В. И. Мордачев

СИСТЕМНАЯ Экология Соновной Радиосвязи

В. И. МОРДАЧЕВ

СИСТЕМНАЯ ЭКОЛОГИЯ СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Минск «Издательский центр БГУ» 2009

УДК 621.371.2; 621.391.82

Мордачев В.И. Системная экология сотовой радиосвязи / В.И. Мордачев. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2009. – 319 с. ISBN 978-985-476-723-9

Монография посвящена вопросам системного анализа и обеспечения экологической безопасности сотовой связи при ее повсеместном использовании, в том числе в условиях присутствия внешнего электромагнитного фона, создаваемого электромагнитными излучениями радиопередатчиков вещательной, радиолокационной и других служб.

Работа содержит обзор энергетических критериев экологической опасности электромагнитных полей и характеристик электромагнитного излучения абонентского и базового оборудования сотовой связи, беспроводного доступа, радиочастотной идентификации и других современных и перспективных систем радиотелекоммуникаций.

Приведено изложение теоретических вопросов формирования и анализа особенностей вероятностно-статистических свойств электромагнитной обстановки в пространственно-распределенных группировках радиоэлектронных средств, рассмотрены прикладные вопросы, связанные с анализом влияния системных характеристик сети сотовой связи (регулировки мощности АС, качества частотно-территориального планирования, степени случайности топологии сети, объема выделенного сети радиочастотного ресурса и др.) на ее экологичность. Содержится изложение методики и результатов системного анализа экологической опасности электромагнитного фона, образуемого средствами информационного обслуживания общества, в условиях массового распространения средств мобильной связи.

Приведен иллюстративный материал и табличные данные, характеризующие электромагнитную безопасность сотовой связи в различных условиях, а также примеры расчетов совокупной интенсивности электромагнитных полей абонентских и базовых станций сотовой связи в различных типовых ситуациях. Сформулированы основные принципы системной экологии и системной иерархии условий и возможностей обеспечения экологической безопасности сотовой радиосвязи.

Книга ориентирована на инженерно-технических и научных работников радиопромышленности, связи и здравоохранения, а также на студентов старших курсов, магистрантов, аспирантов, докторантов и преподавателей радиотехнических специальностей вузов.

Табл. 27. Ил. 58. Библ. 111.

Рекомендована Советом БГУИР, протокол № 11 от 26 июня 2009 г.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Л.М.Лыньков; доктор технических наук, доцент Н.И.Мухуров.

ISBN 978-985-476-723-9

© Мордачев В.И., 2009

СГ	ТИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
BE	ЗЕДЕНИЕ	8
1.	КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ	16
2.	ИСТОЧНИКИ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	36
	2.1. Предельно допустимые уровни электромагнитных полей РЭС	36
	2.2. Излучаемая мощность абонентских и базовых станций	48
	2.3. Выводы	56
3.	ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМО В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГРУППИРОВКАХ РЭС	58
	3.1. Предварительные замечания	58
	3.2. Исходные модели и соотношения	60
	3.2.1. Модель условий распространения радиоволн	60
	3.2.2. Пространственное распределение источников ЭМП	63
	3.2.3. Пороговая модель рецептора ЭМП	65
	3.2.4. Область потенциального электромагнитного взаимодействия	68
	3.3. Распределения вероятностей параметров пространственного размещения источников ЭМИ	69
	3.3.1. Территориальное размещение источников	69
	3.3.2. Объемное размещение источников	73
	3.3.3. Линейное размещение источников	74
	3.4. Распределения вероятностей энергетических параметров ЭМП	76
	3.4.1. Базовые вероятностные модели	76
	3.4.2. Случайная наблюдаемая ЭИИМ источников ЭМП	80
	3.4.3. Особенности гиперболического распределения ППМ ЭМП	83
4.	ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ЭМП В ПРОСТРАНСТВЕННО- РАССРЕДОТОЧЕННЫХ СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ	86
	4.1. Предварительные замечания	86
	4.2. Исходные модели и определения	88
	4.3. Распределение вероятностей динамического диапазона ЭМП на входе РП	91
	4.3.1. Источники излучений постоянной ЭИИМ	91
	4.3.2. Источники излучений различной ЭИИМ	97

СОДЕРЖАНИЕ

	4.3.3	. Влияние фильтрующих свойств среды в месте размещения рецептора ЭМП на вероятностные характеристики динамического диапазона ЭМП	99
	4.4. Ра ка	аспределение вероятностей динамического диапазона ЭМП ак распределение размаха выборки	. 101
	4.5. Д	инамический диапазон ЭМП АС как функция времени	. 107
	4.6. П	римеры практического применения	. 110
	4.6.1	. Вводные замечания	. 110
	4.6.2	. Оценка динамического диапазона ЭМП АС радиотелефонной связи с FDMA	. 111
	4.6.3	. Прогноз предельно допустимой сложности ЭМО	. 118
	4.6.4	. Оценка выигрыша в динамическом диапазоне ЭМП АС за счет подавления наиболее мощных ЭМП в точке наблюдения	. 124
	4.7. M	атематическая интерпретация полученных результатов	. 125
	4.8. 3	аключительные замечания	. 131
5.	ВЛИЯН СОТОЕ	НИЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЕТИ ВОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ	
	БЕЗОГ	ІАСНОСТЬ	. 137
	5.1. Ба	азовая пространственная модель сотовой радиосети	. 137
	5.2. C [.]	татистические характеристики ЭИИМ АС	. 138
	5.3. Xa	арактеристики поглощаемой телом человека мощности ЭМИ С	141
	54 B	о полние лискретной регулировки уровня ЭМИ АС	142
	5.5 C		146
	5.6. B.	лияние пространственно-частотной структуры (кластера) адиосети с FDMA/TDMA на минимально используемый ровень полезного сигнала и ЭИИМ АС	. 153
	5.7. B.	лияние случайности топологии сети на ее экологичность	. 157
6.	ОЦЕНІ ФОНА, ОБСЛУ	КА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО , ОБРАЗУЕМОГО СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО /ЖИВАНИЯ ОБЩЕСТВА, В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО РОСТРАНЕНИЯ СРЕЛСТВ МОЕИЛЬНОЙ РАЛИОСВЯЗИ	164
	61 P		164
	62 Y		167
	621		167
	622	Совокупный уровень ЭМП АС сотовой ралиосвази ная	. 107
	V.Z . Z	земной поверхностью	. 171

6.2.3. Совокупный уровень ЭМП АС сотовой радиосети на земной поверхности	177
6.3. Оценка вероятности превышения ПДУ ЭМП при интенсивном использовании сотовой связи в условиях присутствия постоянного электромагнитного фона, образуемого мощными радиопередатчиками других служб	190
6.4. Оценки совокупного уровня ЭМП БС сотовой радиосети	234
6.5. Общая характеристика полученных результатов	246
7. ОГРАНИЧЕНИЕ РАДИОЧАСТОТНОГО РЕСУРСА, ВЫДЕЛЯЕМОГО СОТОВОЙ РАДИОСЕТИ, КАК СРЕДСТВО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	260
8. ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОИ ЭКОЛОГИИ СОТОВОИ РАДИОСВЯЗИ	278
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	304
ПРИЛОЖЕНИЕ	310
ЛИТЕРАТУРА	312

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

-	автокорреляционная функция
-	абонентская станция сухопутной подвижной (сотовой, тран-
	кинговой и т.п.) радиосвязи
-	базовая станция сухопутной подвижной радиосвязи
-	Всемирная организация здравоохранения
-	диаграмма направленности антенны
-	Европейский союз
-	коэффициент направленного действия
-	предельно допустимый уровень
-	плотность потока мощности ЭМП
-	радиорелейная станция
-	радиочастотный ресурс
-	радиоэлектронное средство
-	радиоприемник
-	электромагнитное излучение
-	электромагнитное поле
-	электромагнитная обстановка
-	электромагнитная совместимость
-	эквивалентная изотропно излучаемая мощность
-	эффективно излучаемая мощность (ЭИИМ - 2,15 дБ)
-	Advanced Mobile Phone Service
-	Digital AMPS
-	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
-	Code-Division Multiple Access

EDGE	- Enhanced Data rates for GSM Evolution
FDD	- Frequency Division Duplex
FDMA	- Frequency-Division Multiple Access
GMSK	- Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	- General Packet Radio Service
GSM	- Global System for Mobile
HDR	- High Data Rate
IMT	- International Mobile Telecommunications
NMT	- Nordic Mobile Telephone
PDC	- Personal Digital Cellular
PSK	- phase-shift keying
RFID	- Radio Frequency Identification
SAR	- Specific Absorption Rate
TDD	- Time Division Duplex
TDMA	- Time-Division Multiple Access
TACS	- Total Access Communications System
UMTS	- Universal Mobile Telecommunications System

введение

Сотовая радиосвязь по праву может быть отнесена к важнейшим достижениям человечества. Она предоставила множество принципиально новых удобств и возможностей, без которых представить нашу жизнь уже просто невозможно. Однако массовое распространение сотовой связи принесло не только новые удобства и возможности, но и новые проблемы. И если проблема существенного ограничения личного пространства может считаться в определенной мере субъективной, то проблема влияния электромагнитного излучения абонентского и базового оборудования сотовой связи на здоровье людей объективна и вполне реальна. В обществе растет обоснованное беспокойство по поводу экологической опасности сотовой связи.

С одной стороны, очевидно, что электромагнитное излучение мобильных телефонов не может не влиять отрицательно на здоровье их владельцев, поскольку весьма существенно изменяет физические характеристики среды вблизи тела человека. Организм владельца мобильного телефона поглощает значительную часть его электромагнитного излучения и при этом существенно изменяет диаграмму направленности этого излучения. Известны многие прямые и косвенные объективные свидетельства опасности этого излучения для человека. Очевидно также, что электромагнитный фон, образуемый как излучениями базовых и абонентских станций сотовой связи, так и электромагнитными излучениями радиопередатчиков вещательной, радиолокационной, фиксированной и других радиослужб, а также промышленным, бытовым и другим оборудованием, в условиях современного города значительно превышающий уровень естественного электромагнитного фона, также не может быть полезным по определению, поскольку изменяет привычную среду обитания людей.

С другой стороны, в связи с рядом причин (относительно короткий период массового распространения сотовой связи, наличие других видов загрязнения окружающей среды и др.) проблема экологии сотовой связи изучена явно недостаточно. Поэтому сегодня большое количество квалифицированных ученых и научных коллективов во всем мире заняты научными исследованиями влияния электромагнитных полей искусственного происхождения на биологические объекты и системы различных иерархических уровней. При этом объективная информация о росте заболеваемости либо об ухудшении состояния здоровья людей из-за применения сотовой связи, корректно подтвержденная медстатистикой, пока, к сожалению, практически отсутствует.

Учитывая это, важность подобных исследований очевидна. Глубокие и всесторонние медико-биологические исследования вопросов влияния на здоровье человека как отдельных электромагнитных полей различной интенсивности с различными неэнергетическими параметрами (рабочая частота, ширина спектра, вид модуляции, характеристики присутствия во времени), так и типовых ансамблей электромагнитных полей с различными характеристиками (совокупность электромагнитных полей, образуемых мобильными телефонами в местах массового скопления людей; эта же совокупность в сочетании с фоном, образуемым мощными излучениями передатчиков вещательной, радиолокационной и других служб, включая электромагнитные излучения базовых и радиорелейных станций сотовых сетей, а также в сочетании с электромагнитными излучениями систем электроэнергетики, промышленного и бытового оборудования и т.п.) имеют приоритетный характер, поскольку именно эти исследования позволяют определить объективные критерии влияния сотовой связи на здоровье людей в различных условиях.

Без сомнения, качественная научная проработка вопросов электромагнитной экологии в сочетании с эффективными научно-обоснованными мерами по снижению экологических рисков при создании и эксплуатации систем сотовой связи и других технических средств с радиоизлучением принципиально способны справиться с проблемой электромагнитной экологии как сотовой связи (в узком смысле), так и с проблемой электромагнитной экологии всей совокупности радиотехнических средств информационного обслуживания современного общества (в широком смысле).

Сегодня весьма значительные усилия всех ведущих производителей абонентского оборудования сотовой связи направлены на оптимизацию конструкций мобильных телефонов по критерию минимума удельной мощности их электромагнитного излучения, поглощаемой тканями ряда критических областей головы человека. Однако даже поверхностный взгляд на проблему экологии сотовой связи позволяет сделать очевидный вывод о том, что экологическая опасность сотовой связи обусловлена не столько техническими характеристиками конкретного мобильного телефона, сколько техническими и системными характеристиками, настройками, качеством проектирования и планирования сети сотовой связи, в которой эксплуатируется данный мобильный телефон. Мощность его электромагнитного излучения принудительно устанавливается соответствующей базовой станцией сети на уровне минимально необходимой для обеспечения требуемого качества связи в конкретных условиях. А эти условия определяются размерами сайтов в сети, качеством ее частотно-территориального планирования и другими характеристиками системы. Поэтому с точки зрения радиотехники проблема экологии сотовой связи носит принципиально системный характер.

В настоящее время имеются достаточно обоснованные санитарные нормативы, определяющие предельно допустимые уровни электромагнит-

ных полей для населения. Опирающиеся на эти ограничения системные исследования электромагнитной экологии сотовой связи, изложению ряда результатов которых посвящена данная работа, позволяют по-новому взглянуть на данную проблему и в перспективе сформулировать обоснованные технические, организационные, экономические, правовые, этические и иные требования ко всем элементам и пользователям сети, обеспечивающие реальную экологическую безопасность сотовой связи в тех или иных условиях.

Человек, представляя собой сложнейшую биосистему, использует множество локальных и глобальных технических систем (сотовой связи, транспорта, вещания, энергопитания, водоснабжения и т.п.), а также сам является элементом многих систем (человечества как биосистемы высшего общественной иерархического уровня, системы, производственнохозяйственной системы и т.п.). Поэтому системный подход к проблеме экологии сотовой связи должен быть принципиально многосторонним: эта проблема должна исследоваться на системном радиотехническом уровне сотовой связи (радиосистемы как источника угрозы), на системном медикобиологическом уровне восприимчивости человеческого организма как системы (биосистемы как объекта угрозы), на системном политикоэкономическом уровне (современного общества как системы, определяющей возможный баланс рисков и пользы при внедрении технических средств с радиоизлучением для информационного обслуживания населения, в том числе с учетом других видов угроз) и т.д.

В этом плане данную работу можно представить как начальную попытку реализации системного подхода к рассматриваемой проблеме «в узком смысле», т.е. на системном радиотехническом уровне. Здесь объектом исследований является электромагнитная обстановка как ансамбль электромагнитных полей, формируемых сотовой связью самостоятельно и в

условиях функционирования систем других радиослужб. Предметом исследований являются свойства, принципы и закономерности построения, развития и функционирования систем/сетей сотовой связи, влияющие на возможности удовлетворения создаваемой ими электромагнитной обстановкой в местах возможного пребывания людей действующим пороговым санитарно-гигиеническим критериям безопасности электромагнитных полей.

Работа выполнена в инициативном порядке. Помещая в ней подробное изложение математических моделей и соотношений, определяющих различные вероятностно-статистические характеристики электромагнитной обстановки, автор руководствовался следующим:

 полное систематическое изложение данного материала в источнике, доступном для ознакомления широкого круга специалистов, приводится впервые; данный материал опубликован по частям в основном в зарубежных изданиях;

– изложенные в данной работе математические модели и соотношения, по мнению автора, в совокупности могут составить первичную теоретическую основу данного научного направления, а также служить основой для решения многочисленных практических задач, часть из которых рассмотрена в данной работе в качестве примеров и частных случаев;

– только развитой и в приложениях доведенный до инженерного уровня математический аппарат данного научного направления позволяет перейти от качественного и эмоционального восприятия проблемы экологии сотовой связи к прагматичным количественным оценкам и к синтезу удовлетворяющих экологическим требованиям системных и проектных решений в области сотовой радиосвязи.

Именно практическое отсутствие возможностей количественного, в том числе вероятностно-статистического анализа вопросов экологии сотовой связи во многих случаях является причиной их излишне эмоционально-

го восприятия. Наблюдаемая в отдельных случаях истерия по поводу вреда сотовой связи, выходящая за рамки здравого смысла, наносит вред развитию радиотелекоммуникационного бизнеса, являющегося сегодня фактически олицетворением научно-технического прогресса. Причем такое восприятие явно не способствует улучшению экологии.

Типовой пример: жильцы многоэтажного дома протестуют против установки на крыше их дома антенн базовой станции сотовой связи. Мощный коллективный протест оказывается успешным: антенны устанавливают на соседнем административном здании, иногда даже ниже уровня кровли расположенного рядом жилого дома. В результате жилой дом оказывается в области главного лепестка диаграммы направленности базовой станции. И хотя в обоих вариантах установки антенн базовых станций санитарные нормы, безусловно, выполняются, уровень электромагнитного облучения жильцов дома во втором случае выше.

Еще один пример: различного рода ограничения и запреты на размещение базовых станций сотовой связи на жилых зданиях, на зданиях учреждений образования и здравоохранения, на зданиях, имеющих историческую ценность и т.п. в каждом конкретном случае, по-видимому, обоснованы. Но в совокупности они приводят к тому, что в условиях одновременного функционирования 4-6 операторов сотовой связи во многих городах места возможной установки базовых станций практически исчерпаны. В результате оказывается практически невозможным развивать инфраструктуру сетей, дробить сайты, уменьшая их размеры. Расширение пропускной способности сетей происходит в значительной мере за счет увеличения используемого радиочастотного ресурса (числа выделяемых каждому оператору частотных каналов на определенной территории). И, в конечном счете, в этой ситуации оказывается невозможным снижать используемую в сетях мощность электромагнитного излучения абонентских станций - главного фактора, определяющего экологическую опасность сотовой связи.

Телекоммуникационный бизнес относится к чрезвычайно эффективным с экономической точки зрения, наиболее наукоемким и прозрачным видам бизнеса, представляющим собой важнейшую часть национальных хозяйственных систем большинства стран. Одновременно данный вид бизнеса является и жестко лицензируемым. Компании-участники данного бизнеса (операторы, производители оборудования, проектировщики) функционируют в рамках жесткой конкуренции и жестких требований законодательства в части управления радиочастотным спектром и электромагнитной совместимости, экологии, экономики и т.п. и практически лишены возможностей ведения успешного бизнеса с нарушением требований законодательства и соответствующих лицензий. Как свидетельствует многолетний опыт, эти компании выполняют все требования действующих нормативных актов и сами активно инициируют совершенствование нормативно-правовой базы радиотелекоммуникационной отрасли, финансируя соответствующие исследования и разработки. Все оборудование сотовой связи проходит сертисоответствие действующим фикацию, В том на санитарночисле гигиеническим нормативам. Все проектные решения и вводимые в эксплуатацию радиообъекты инфраструктуры (базовые станции, радиорелейные станции) согласуются в установленном порядке с органами санэпидемнадзора и удовлетворяют всем принятым экологическим критериям. Поэтому любая необъективная либо тенденциозно представленная информация, касающаяся вопросов экологии сотовой связи, незаслуженно дискредитирует всех законопослушных участников радиотелекоммуникационного бизнеса и, в конечном счете, не может не сказываться на объеме, качестве и доступности услуг в сфере беспроводного информационного обслуживания общества.

Поэтому любые утверждения об экологической опасности сотовой связи, любые ограничения в ее использовании и дальнейшем развитии должны быть серьезно и объективно обоснованы. Автор надеется, что глубокая научная проработка данной проблемы, в том числе на системном уровне, позволит найти оптимальные решения, как обеспечивающие безусловную безвредность сотовой связи и других систем радиосвязи для населения, так и позволяющие операторам и производителям оборудования радиотелекоммуникационных сетей интенсивно развивать данную сферу технологий, производства и услуг.

Автор выражает глубокую признательность всем коллегам, принявшим участие в конструктивном обсуждении данной работы и оказавшим автору помощь в подготовке рукописи, а также рецензентам за ряд ценных замечаний, улучшивших качество изложения материала.

Данная работа ориентирована на инженерно-технических и научных работников радиопромышленности, связи и здравоохранения, а также на студентов старших курсов, магистрантов, аспирантов, докторантов и преподавателей радиотехнических специальностей вузов.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ

После освоения электрической энергии, изобретения и промышленного освоения радио, а фактически в течение последних 100 лет, имеет место постепенное специфическое и все более глубокое изменение физических характеристик среды обитания человека. Это изменение выражается в увеличении интенсивности и изменении спектрально-временных характеристик окружающего электромагнитного поля.

До появления искусственных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) естественный электромагнитный фон на поверхности Земли представлял собой совокупность электромагнитных полей земного (атмосферные помехи и статические разряды в осадках) и внеземного (галактические шумы, электромагнитное излучение Солнца, вторичный космический шум) происхождения [1, 2, 3]. Их интенсивность изменялась и изменяется в значительных пределах в зависимости от состояния атмосферы и солнечной активности, однако эти флуктуации носят естественный характер и являются неотъемлемой чертой естественной среды обитания человека. Наиболее мощные составляющие электромагнитного фона, обусловленные солнечной активностью, галактическими шумами и грозовыми атмосферными помехами, являются относительно низкочастотными.

Электрификация всех сфер жизни человека привела, с одной стороны, к значительному росту уровней низкочастотных электрических и магнитных полей как в местах размещения линий электропередачи и электропитания, так и в местах размещения электрооборудования практически любого назначения, а с другой - к появлению в местах интенсивного использования электрических приборов, машин, механизмов и технологического оборудования т.н. индустриальных помех – электромагнитных полей (ЭМП) импульсного характера с уровнями, заметными даже на частотах выше 0,5 –

1,0 ГГц. Совокупная интенсивность ЭМП искусственного происхождения, связанных с использованием электричества в производстве и в быту, на территории современного города, промышленного либо транспортного узла может превышать интенсивность электромагнитного фона естественного происхождения на 1 – 2 порядка и более; эти ЭМП сегодня превратились в требующий большого внимания вид «электромагнитного» загрязнения окружающей среды.

И, конечно, наибольший вклад в формирование современной электромагнитной обстановки (ЭМО) вносят технические средства и системы, специально предназначенные для генерации электромагнитных полей в целях передачи либо извлечения информации.

Непрерывная мощность ЭМИ радиопередатчиков телевизионных и радиолокационных станций может достигать сотен киловатт, импульсная – десятков мегаватт; суммарная средняя мощность ЭМИ передатчиков на радиообъекте (радиотелевизионный передающий центр, узел ПВО и т.п.) может превышать 1 МВт. При этом многие радиообъекты с мощным ЭМИ размещаются на территории либо вблизи крупных населенных пунктов, а их высотные башни, сооружаемые для размещения антенн, с экологической точки зрения являются весьма спорным украшением городского ландшафта. Суммарная интенсивность ЭМП радиосистем различного назначения в условиях современного города, а также в окрестностях радиообъектов, расположенных в сельской местности, может превышать интенсивность естественного электромагнитного фона на 4 – 5 порядков и более [8].

С увеличением интенсивности ЭМП на рабочих местах и в местах проживания людей стали отмечаться факты их отрицательного влияния на человека, связанные с повышением утомляемости и ухудшением самочувствия, снижением иммунитета, ростом заболеваемости населения, проживающего в зонах с повышенной интенсивностью электромагнитных полей, ухудшением статистики профессиональных заболеваний в производственных условиях, характеризующихся повышенными уровнями ЭМП, и т.п. [4–8]. В результате многолетних исследований были обоснованы и введены в действие санитарные правила, нормы и гигиенические нормативы, устанавливающие предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия на людей ЭМП в широком диапазоне частот [9, 10]. Эти правила и нормы ограничивают на приемлемом уровне вынужденные экологические риски, связанные с присутствием ЭМП в процессе работы, обучения, быта и отдыха людей.

Применение санитарных правил и норм [9, 10] на территории СССР, а после его распада – на территории России, Беларуси и других стран в течение длительного периода позволяло держать под контролем неблагоприятное влияние ЭМИ на экологию. И сегодня массовое внедрение современных альтернативных эфирному телевидению и вещанию технологий и систем информационного обслуживания населения (кабельное и спутниковое телевидение) в сочетании с выносом радиообъектов на значительное удаление от населенных пунктов позволяет ограничить на приемлемом уровне вынужденные экологические риски, обусловленные функционированием данных радиообъектов и радиослужб.

Вместе с тем за последние 10 – 15 лет возникли весьма существенные новые обстоятельства, принципиально осложнившие ситуацию в данной области. Эти обстоятельства связаны с чрезвычайно быстрым развитием и внедрением мобильной радиосвязи, средств беспроводного доступа и радиоинтерфейсов различного назначения, происходящим на фоне чрезвычайно быстрого внедрения персональных компьютеров, сложной бытовой техники и других нерадиотехнических источников ЭМИ в сферы производства, управления, образования, быта и отдыха людей. Здесь необходимо обратить внимание на следующее: 1. Использование средств мобильной радиосвязи, и, прежде всего, сотовой радиосвязи предполагает добровольные повышенные экологические риски пользователей мобильных телефонов. Владельцы абонентских станций (AC) сотовой связи из-за больших удобств и новых коммуникационных возможностей и услуг готовы мириться не только с дополнительными расходами, но и с повышенной экологической опасностью AC. Допустимая интенсивность ЭМП AC, установленная для их пользователей нормами [11], на порядок выше ПДУ ЭМП, установленных [9, 10].

2. В местах массового использования средств мобильной радиосвязи, и, прежде всего, сотовой радиосвязи имеет место значительное увеличение уровней ЭМП (производственные, офисные и жилые помещения, пешеходные зоны, спортивные и иные массовые мероприятия). В этих местах добровольные экологические риски пользователей сотовой связи сопровождаются значительным ростом вынужденных экологических рисков окружающих, в том числе и тех абонентов сотовой связи, которые в данную минуту ею не пользуются, поскольку разговаривающий по мобильному телефону создает повышенный уровень ЭМП вокруг себя. Это особенно характерно для мест локального либо массового скопления людей (переполненный автобус, трибуна стадиона, очередь в магазине, митинг и т.п.).

3. Развитие сетей сотовой радиосвязи и систем беспроводного широкополосного доступа (БШД) сопровождается развитием их инфраструктуры. На территории городской застройки происходит массовое размещение базовых станций (БС) сотовой связи и радиорелейных станций (РРС) соответствующих транспортных сетей, точек доступа и абонентских комплектов оборудования БШД (WiMax). Функционирование этого оборудования также способствует, по меньшей мере, локальному увеличению электромагнитного фона в городской застройке и при определенных условиях может быть причиной превышения в отдельных местах установленных ПДУ ЭМП. 4. Массовая компьютеризация всех сфер человеческой деятельности также является причиной ухудшения экологической обстановки. Персональные компьютеры являются достаточно мощными источниками ЭМИ [6, 7]. Эти излучения являются широкополосными с повышенными уровнями на отдельных частотах, соответствующих тактовым частотам отдельных узлов и частотам развертки монитора, и в помещениях могут быть сопоставимыми по уровню и даже превышать уровни электромагнитного фона, образуемого индустриальными помехами и ЭМИ радиотелевизионных передатчиков.

5. Массовое применение разнообразных радиоинтерфейсов (оборудования БШД внутри помещений – систем WiFi, радиоинтерфейсов BlueTooth, DECT и т.п.) также является серьезным фактором, способным существенно осложнить экологическую обстановку в производственных офисных и жилых помещениях. В отдельных помещениях может одновременно функционировать от нескольких единиц до нескольких десятков подобных устройств, каждый с эквивалентной изотропно-излучаемой мощностью (ЭИИМ) от единиц мВт до 100 мВт. Здесь уместно отметить, что АС стандарта GSM, экологическая опасность которых является объектом массового внимания и не всегда обоснованной тревоги, имеют импульсную ЭИИМ в пределах 5 мВт – 2 Вт [12] в зависимости от условий связи с БС, а пределы изменения их средней ЭИИМ в 8 раз меньше. Таким образом, ЭИИМ электромагнитных излучений устройств WiFi, BlueTooth, DECT и т.п. практически сопоставима с ЭИИМ АС стандарта GSM 900/1800.

6. Существующая практика применения санитарных норм и правил [9, 10, 11, 13] пока не позволяет одновременно учитывать и ограничивать вынужденные экологические риски, обусловленные как ЭМИ радиообъектов, так и ЭМИ мобильных телефонов и радиоинтерфейсов, поскольку ЭМИ последних существенно изменяются во времени и представляют собой случайные процессы с большим динамическим диапазоном. В силу последнего обстоятельства санитарно-защитные зоны и зоны ограничения застройки вокруг радиообъектов, определяемые по методикам [9,10], не учитывают вклада ЭМИ мобильных телефонов и радиоинтерфейсов, хотя массовое распространение последних делает такой учет актуальным.

Означает ли все это, что неизбежно грядет экологическая катастрофа, связанная с необратимым «электромагнитным загрязнением» окружающей среды и разрушением здоровья населения за счет массового применения сотовой связи и других современных радиоэлектронных средств (РЭС)? – Безусловно, нет. И вот почему:

1. «Электромагнитное загрязнение» не является необратимым. Нетрудно поставить несколько очевидных мысленных экспериментов: представить ситуации, когда имеется возможность отключить электропитание, ввести запреты на использование сотовой связи, либо использовать технические средства ее подавления, и т.п. В этих ситуациях функционирование всего радиооборудования сотовой связи окажется невозможным либо будет существенно ограничено. В этом состоит принципиальное отличие «электромагнитного загрязнения» от других видов загрязнения окружающей среды: последствия аварий при транспортировке нефти не исчезают с ее приостановлением и, например, последствия аварии на ЧАЭС не исчезнут даже с закрытием последней.

2. «Электромагнитное загрязнение» является управляемым. Имеется значительный арсенал технических и организационных мер, позволяющих снизить уровень ЭМИ средств сотовой связи и других источников до требуемого уровня. К таким мерам, в частности, могут быть отнесены развитие инфраструктуры и укрупнение сетей сотовой связи, обеспечивающие уменьшение размеров сайтов в этих сетях, использование минибазовых станций в местах, где имеет место экранирование пользователей сотовых телефонов по отношению к базовым станциям сети и т.п.

3. «Электромагнитное загрязнение» ввиду абсолютного охвата населения большинства стран сотовой связью (во многих странах число используемых мобильных телефонов значительно превышает численность населения) является предметом всеобщей обеспокоенности и касается абсолютно всех. Сегодня степень оснащенности средствами мобильной связи и интенсивность ее использования является одним из косвенных показателей уровня личного и корпоративного благосостояния. При этом от воздействия ЭМП не защищают ни высокий забор, ни плотно закрытые двери и окна, ни многочисленная охрана, ни высокая должность. Это, в частности, позволяет надеяться на адекватность, оперативность, обоснованность и эффективность принимаемых в этой сфере решений и действий законодательной и исполнительной власти всех уровней.

4. Не вызывает сомнения, что ЭМП АС по меньшей мере является реальной причиной ухудшения самочувствия и снижения работоспособности (повышенная утомляемость, головные боли и т.п.) пользователей сотовой связи [6]. Тем не менее, объективные свидетельства серьезного вреда, наносимого сотовой связью здоровью населения, пока практически отсутствуют. В частности, отсутствуют «статистически достоверные данные о развитии возможных отдаленных последствий у пользователей сотовых телефонов», «начатые эпидемиологические исследования пока не дали положительных результатов о возможном развитии опухолей мозга и других видов рака у пользователей сотовыми телефонами», не подтверждена связь «между облучением электромагнитными полями и развитием опухоли и что электромагнитные поля не являются промоторами канцерогенеза», «результаты оценки жалоб пользователей сотовыми телефонами телефонами не являются доказа-

тельством неблагоприятного влияния электромагнитных полей на их здоровье» [6].

Отсутствие таких свидетельств, конечно же, не означает, что сотовая связь является безвредной. Речь идет о том, что получение корректных научно обоснованных доказательств вреда сотовой связи крайне затруднено целым рядом факторов и обстоятельств, связанных со следующим:

– с невозможностью постановки «чистых» экспериментов в условиях массового развития сотовой связи, в частности, невозможностью выделения среди населения «исследуемой» (лиц, использующих сотовую связь) и «контрольной» (лиц, не использующих сотовую связь) групп людей требуемой численности, для которых все прочие условия жизни могли бы быть признаны не влияющими на чистоту эксперимента;

– с наличием и развитием одновременно с сотовой связью множества других факторов, изменяющих среду обитания, стиль и условия жизни людей. К таким факторам относятся, в частности, автомобилизация и связанные с ней гиподинамия и загазованность воздуха, распространение и широкое использование генетически модифицированных продуктов и продуктов, полученных с интенсивным использованием достижений «большой химии»; развитие и внедрение бытовой химии, возникновение новых видов вирусов и болезней и связанное с этим применение сильнодействующих лекарственных препаратов, сопровождаемое многими побочными эффектами; глобальные изменения климата, повышение нагрузок на нервную систему за счет стрессов различной природы, включая и нагрузки на нервную систему за счет многократного роста потоков информации, получаемой по каналам сотовой связи и по радиотелевизионным каналам СМИ, особенно в условиях глобального финансового и экономического кризиса, и т.п. Их влияние маскирует влияние сотовой связи на здоровье людей;

– с чрезвычайно высокой динамикой развития и изменения характеристик сотовой связи в течение относительно непродолжительного периода (10 – 15 лет), включая изменение диапазонов частот (с 450 МГц к 900 МГц и далее к 1,8 и 2,0 – 2,5 ГГц), технических характеристик (включая мощность и спектрально-временные характеристики ЭМИ мобильных телефонов), степени развития инфраструктуры сетей сотовой связи (сокращение размеров сайтов, существенное увеличение радиопокрытия территории), совершенствование конструкций мобильных телефонов и т.п.

Многочисленные факты и результаты научных исследований, подтверждающие реальность отрицательного влияния ЭМП на жизнедеятельность биологических объектов, безусловно, должны быть предметом самого серьезного опережающего внимания и глубокого научного анализа, однако истерия и связанная с нею паника, обусловленные якобы страшной экологической опасностью сотовой связи, пока, к счастью, беспочвенны.

5. Достижения современной науки призваны снизить экологические риски от сотовой связи и других источников ЭМИ до приемлемого уровня. Нормативная база [9, 10] в области электромагнитной экологии, полученная на основе многолетних исследований хронического облучения животных электромагнитным полем с относительно малой плотностью потока мощности (до 500 мкВт/см²) [6], по праву может считаться наиболее обоснованной и объективной, а, по мнению автора, и предметом национальной гордости, поскольку принятые ПДУ ЭМП сегодня относятся к числу наиболее жестких и приняты в условиях отсутствия давления со стороны чрезвычайно мощных и влиятельных операторов и производителей оборудования сотовой связи, в ряде стран и регионов практически определяющих подходы к решению вопросов электромагнитной экологии сотовой связи. Выполнение ограничений [9, 10] может хорошо контролироваться имеющимися сред-

ствами измерений, а в ряде случаев устанавливаемые ПДУ могут быть дополнительно снижены в несколько раз [13, 14].

Несколько менее совершенными санитарноявляются эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН) [11], поскольку установленные ими ПДУ плотности потока мощности (ППМ) ЭМП АС у поверхности головы человека 100 мкВт/см² хоть и определены на основе многолетних медико-биологических исследований, но применены для ближней зоны ЭМИ АС, где электромагнитная волна не является плоской. Тем не менее, принятая в [11] методика экспериментальной оценки соответствия ЭМИ АС принятым нормативам на основе принципа подобия (измеренный уровень ППМ ЭМИ АС в диапазоне частот 800-2400 МГц на расстоянии 370 мм не должен превышать приведенного к данному расстоянию значения ПДУ, равного 3 мкВт/см²), по мнению автора, вполне приемлема с практической точки зрения.

В качестве параметра, характеризующего воздействие ЭМИ АС на человеческий организм, все более широко применяется удельная поглощенная мощность электромагнитного поля АС – параметр **SAR** (specific absorption rate) [7, 15]. Его допустимое усредненное значение для населения составляет 0,08 Вт/кг с усреднением по 10 г биологической ткани за интервал времени 6 минут. Определение значений **SAR** АС осуществляется двумя основными методами: с помощью «фантомов» (физических моделей головы человека с имплантированными датчиками напряженности поля и температуры) либо с помощью компьютерного моделирования. Приведенные в [7] данные о результатах измерений величины **SAR** АС GSM-900, полученные при максимальной средней выходной мощности АС 0,25Вт, свидетельствуют о том, что все измеренные значения этого параметра, лежащие в пределах 0,21-1,58, существенно превышают допустимый уровень. Контроль **SAR** осуществляется в условиях максимального уровня средней выходной мощности AC. Однако при этом не контролируется фактическая мощность электромагнитного поля, излучаемого AC в пространство. Поэтому малое значение **SAR** может быть обусловлено малым КПД излучающей антенны AC, либо, например, принадлежностью испытуемой AC к классу абонентского оборудования, имеющему пониженную максимальную выходную мощность (0,1 Вт для GSM-900 либо 0,03 – 0,125Вт для GSM-1800). Кроме того, AC сотовой связи стандарта GSM имеют различную максимальную выходную мощность при различных видах модуляции (в базовых спецификациях декларируется возможность использования таких видов модуляции, как GMSK и 8-PSK) [12]. Поэтому параметр **SAR** предназначен для описания воздействия ЭМИ конкретных AC на биоткани в ряде малоразмерных областей головы человека, но, в отличие от значений ПДУ ППМ, крайне неудобен для изучения экологической опасности системы сотовой связи «в целом».

6. Следует принимать во внимание и уроки истории борьбы против загрязнения окружающей среды: сегодня взяты под контроль многие виды экологической опасности, обусловленные выбросами вредных веществ в окружающую среду в промышленности и на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту. Нет оснований считать, что человечество неспособно справиться с относительно новым видом экологической опасности, обусловленной ЭМИ средств мобильной связи.

Тем не менее, в целом влияние ЭМИ АС сотовой связи на здоровье людей, безусловно, является причиной обоснованного беспокойства. Что же определяет параметры ЭМИ АС и, в конечном счете, величину удельной поглощенной мощности тканями головы абонента во время разговора по сотовому телефону? Выбор модели, фирмы-производителя (из числа ведущих), функциональности АС определяют ее экологическую безопасность не в большей степени, чем ее цвет либо вес. Разброс значений **SAR** мобильных телефонов различных фирм-производителей и поколений достигает 8 – 9дБ [7], однако значительные усилия ведущих фирм-производителей абонентского оборудования сотовой связи по снижению экологической опасности продвигаемых на рынок новых моделей AC в интересах повышения их конкурентоспособности неизбежно приведут к оптимизации конструкций AC по экологическим критериям в условиях ограничений на снижение мощности ЭМИ и продолжительности непрерывной работы AC, и в конечном счете – к нивелированию отличий значений **SAR** сотовых телефонов различных моделей и производителей.

Так какой же сотовый телефон наиболее безопасен? – Ответ на этот вопрос очевиден: в подавляющем числе ситуаций безопаснее тот телефон, который работает в наиболее безопасной сети! В той сети, в которую реально и с умом вложены наибольшие средства, в которой пространственная плотность БС наибольшая и в которой размеры сайтов минимальны (в такой сети требуется наименьшая мощность ЭМИ АС для устойчивой связи в пределах всей зоны обслуживания). В той сети, в которой наиболее качественно и квалифицированно выполнено частотно-территориальное планирование и достигнут наименьший уровень внутрисетевых помех функционированию БС (это позволяет использовать меньшие уровни ЭМИ АС для достижения требуемых отношений сигнал/помеха в радиоприемниках БС). В той сети, зона обслуживания (радиопокрытия с нормальным качеством связи) которой больше (что уменьшает области обслуживания абонентов на предельных дальностях с предельными уровнями ЭМИ АС). В той сети, стандарт и настройки которой обеспечивают наименьшие уровни ЭМИ АС в сопоставимых условиях. Наконец, в той сети, которая имеет наиболее совершенную инфраструктуру и функционирует с наименьшими уровнями ЭМИ АС и БС в областях с высокими уровнями искусственного электромагнитного фона, обусловленными ЭМИ мощных стационарных радиопередатчиков различных служб (радиотелевизионных, радиолокационных и т.п.).

Таким образом, реальная безопасность сотовой связи может быть достигнута исключительно на системном уровне. Именно на этом уровне могут быть сформулированы и реализованы обоснованные технические, организационные, экономические, правовые, этические и иные требования ко всем элементам сети, обеспечивающие реальную экологическую безопасность сотовой связи в тех или иных условиях.

Такая постановка вопроса, сформулированная и развитая в [16 – 33], позволила по-новому взглянуть на многие аспекты разработки, проектирования, строительства, планирования, эксплуатации и развития сетей сотовой связи. В последующих разделах данной работы будут приведены основные результаты исследований в области системной экологии сотовой связи, полученные автором в последние годы.

Основные задачи, сформулированные и решенные автором в последующих разделах данной работы, в той или иной степени связаны с анализом следующих базовых проблем прогноза электромагнитной обстановки (ЭМО) в некоторой произвольно выбранной точке наблюдения:

1. Обоснование вида и характеристик ансамблевой вероятностностатистической модели ЭМО, учитывающих мощность ЭМИ и пространственную плотность случайного размещения АС и БС в различных условиях, а также условия распространения радиоволн (PPB) между АС либо БС и точкой наблюдения.

2. Прогноз в точке наблюдения статистических характеристик интенсивности ЭМП ближайшей АС при случайном размещении АС в пространстве. 3. Прогноз в точке наблюдения суммарной интенсивности ЭМП всех АС и/или БС, случайно располагаемых в некоторой окрестности этой точки, с учетом интенсивности трафика в сотовой сети, а также совокупной интенсивности ЭМП БС, присутствующих в этой точке.

4. Определение суммарной интенсивности электромагнитного поля в точке наблюдения в случае наличия постоянного электромагнитного фона на территории, где используются АС сотовой связи.

5. Оценка вероятности превышения интенсивностью электромагнитного поля в точке наблюдения некоторого предельно допустимого порогового уровня в различных ситуациях.

Нетрудно убедиться, что указанные проблемы в значительной мере совпадают с проблематикой статистической теории электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС [34, 35]. Именно это позволило автору применить результаты выполненных им исследований задач статистической теории ЭМС [36 – 48] к решению задач системного анализа энергетических характеристик электромагнитных полей по экологическим критериям.

Для более удобного восприятия представленных в данной работе новых научных результатов изложение материалов по проблеме экологии сотовой связи производится в следующей последовательности.

Следующий (второй) раздел посвящен краткому обзору нормативной базы в области электромагнитной экологии РЭС различного назначения. Он содержит сведения о значениях ПДУ электромагнитных полей, регламентируемых действующими СанПиН для различных условий, а также информацию о значениях мощности ЭМИ радиопередающего оборудования сотовой связи и других средств радиотелекоммуникаций.

Третий и четвертый разделы посвящены подробному изложению теоретических основ ансамблевого вероятностно-статистического моделирования ЭМО в пространственно распределенных группировках РЭС. Третий раздел посвящен вопросам моделирования вероятностностатистических характеристик ЭМО в пространственно-распределенных группировках РЭС. В этом разделе:

– дано определение базовых моделей, используемых далее при теоретическом анализе вопросов системной экологии сотовой связи: модели условий распространения радиоволн, модели случайного пространственного распределения источников ЭМП, пороговой модели рецептора ЭМП, а также пространственной области потенциального электромагнитного взаимодействия между рецептором ЭМП и всей совокупностью принимаемых в расчет источников ЭМИ;

– излагается методика определения вида и параметров закона распределения ЭМП от пространственно рассредоточенных РЭС – источников ЭМИ в точке наблюдения по энергетическому параметру (ППМ) при заданных зависимости пространственной плотности источников от координат по отношению к точке наблюдения, типе условий распространения радиоволн и типе пространственного размещения РЭС – источников ЭМИ;

 приведены и исследованы вероятностно-статистические модели, обеспечивающие возможности прогноза вида распределения ансамбля ЭМП АС и БС в точке наблюдения по энергетическому параметру.

Четвертый раздел посвящен вероятностно-статистическому анализу характеристик динамического диапазона ЭМП в пространственнорассредоточенных группировках РЭС. Изложенные в этом разделе подходы обеспечивают возможность прогноза динамического диапазона ЭМП, формирующих ЭМО в произвольно выбранной точке наблюдения, в различных ситуациях:

в ситуации, когда пространственное размещение источников излучений
в окрестности рассматриваемой точки пространства случайно и близко к

равномерному, и вероятностно статистические характеристики ЭМО по энергетическому параметру определяются аналитически с использованием вероятностно-статистической модели случайного пространственного размещения РЭС – источников ЭМП в окрестности точки наблюдения и детерминистической модели условий распространения радиоволн в этой области пространства;

– в ситуации, когда известно распределение ЭМП по уровню в их ансамбле, присутствующем в точке наблюдения, и распределение вероятностей динамического диапазона ЭМП может быть определено как распределение размаха выборки значений энергетического параметра ЭМП в ансамбле ЭМП в точке наблюдения;

 в ситуациях, когда возможно устранение каким-либо способом (организационно, технически, и т.п.) в точке наблюдения одного либо нескольких наиболее интенсивных ЭМП от ближайших к точке наблюдения РЭС;

 в ситуациях, когда ЭМП, присутствующие в точке наблюдения, являются бинарными случайными процессами с заданными вероятностями нахождения в активном и пассивном состояниях.

В данном разделе приводится необходимая аргументация, свидетельствующая о том, что при малых вероятностях превышения динамического диапазона рецептора ЭМП динамическим диапазоном ЭМП ближайших РЭС (либо в области больших уровней ЭМП РЭС в точке наблюдения) суммарная интенсивность ЭМП РЭС определяется уровнем преобладающего ЭМП. Раздел также содержит ряд примеров практического применения изложенных подходов и полученных математических моделей, а также иллюстративный материал, облегчающий и углубляющий восприятие приведенного материала: анализ динамического диапазона сигналов абонентских станций мобильной связи в системах с FDMA, прогноз предельно допустимой сложности ЭМО, оценки выигрыша в динамическом диапазоне ЭМП за счет подавления наиболее интенсивных из них, а также математическая интерпретация полученных вероятностно-статистических моделей.

В целом, материал разделов 3,4, по существу, является теоретическим базисом системного анализа ряда вопросов экологии сотовых радиосетей, приведенного в последующих разделах.

Пятый раздел работы посвящен анализу влияния ряда системотехнических особенностей сети сотовой радиосвязи на ее экологическую безопасность. В этом разделе анализируются статистические характеристики мощности ЭМИ АС сотовой связи с учетом наличия в сети ее принудительной регулировки и статистические характеристики доли ЭМИ АС, поглощаемой телом человека; оценивается влияние пространственно-частотной структуры (кластера) сотовой радиосети с FDMA/TDMA на минимально используемый уровень полезного сигнала и мощность ЭМИ АС, рассмотрено влияние случайности топологии сети на ее экологичность.

Шестой раздел посвящен вопросу экологической опасности электромагнитного фона, образуемого средствами информационного обслуживания общества, в условиях массового распространения средств мобильной радиосвязи. Данный вопрос приобретает все большую актуальность в связи с чрезвычайно широким охватом сотовой связью практически всего населения. Оборудование (базовое и абонентское) не только является источником дополнительного электромагнитного фона в местах проживания, работы и отдыха людей, но также используется в условиях присутствия электромагнитного фона, местами достаточно интенсивного, образуемого ЭМИ мощных телевизионных и ОВЧ-ЧМ радиопередатчиков, а также радиопередатчиков других служб (радиолокационной, фиксированной и т.п.).

В данном разделе приведены математические модели, позволяющие определить вероятности превышения принятых значений ПДУ ЭМП совокупной интенсивностью электромагнитного поля в точке наблюдения, представляющей собой сумму интенсивности внешнего постоянного электромагнитного фона от РЭС других служб, интенсивности преобладающего ЭМП АС и суммарной интенсивности электромагнитного фона от остальных АС из области потенциального электромагнитного взаимодействия.

Учитывая чрезвычайную важность рассматриваемого вопроса, автор включил в этот раздел обширный иллюстративный материал и табличные данные, которые могут служить в качестве предварительного справочного материала; их восприятие не требует глубоких математических знаний. Кроме того, в раздел включены многочисленные примеры расчетов совокупной интенсивности ЭМП АС и БС сотовой связи в различных типовых ситуациях, а также приведена достаточно подробная характеристика полученных в данном разделе результатов. По мнению автора, приведенные в данном разделе материалы убедительно свидетельствуют о необходимости учета ЭМП оборудования сотовой связи при расчете санитарно-защитных зон радиообъектов на городской территории, а также о целесообразности введения более жестких ограничений на размещение мощных радиопередатчиков на территориях с высокой плотностью абонентов и БС сотовой связи.

Седьмой раздел посвящен вопросу, рассмотрение которого позволяет проиллюстрировать эффективность системного подхода к обеспечению экологической безопасности сотовой связи. Речь идет о введении ограничений на объем радиочастотного ресурса, выделяемого сотовой радиосети, в интересах обеспечения ее экологической безопасности. Наличие таких ограничений стимулирует развитие операторами сотовой связи инфраструктуры сети, дробление сайтов в местах высокой плотности абонентов, естественным образом способствуя улучшению экологических характеристик сети в процессе ее развития. Содержащиеся в этом разделе оценки носят качественный характер, однако приведенная методика может быть использована при практических оценках необходимых ограничений на радиочастотный ресурс, выделяемый для сетей GSM-900/1800, для конкретных исходных данных о территориальной плотности AC и ожидаемой интенсивности трафика в часы наибольшей нагрузки, а также о предельно допустимом уровне ЭМИ AC, безопасном с экологической точки зрения с учетом принятого критерия [11].

Восьмой раздел посвящен изложению принципов системной экологии сотовой радиосвязи как некоторого предварительного обобщения приведенных в предыдущих разделах методик и результатов анализа ряда аспектов проблемы экологии сотовой радиосвязи «в узком смысле», т.е. на системном радиотехническом уровне. Необходимость подобного обобщения, по мнению автора, обусловлена тем, что представленный в данной работе материал, безусловно, не исчерпывает тематики системного подхода к данной проблеме. Этот подход должен быть принципиально многосторонним, поскольку данная проблема должна исследоваться на различных уровнях: системном радиотехническом уровне, системном на на медикобиологическом И социальном уровнях, на системном политикоэкономическом уровне и т.п. Систематизация и углубление основных принципов системной экологии сотовой радиосвязи как формирующегося научного направления, по мнению автора, в конечном счете способны предложить новые (и вспомнить хорошо забытые старые) пути решения данной проблемы и, в целом, предложить весьма представительный и эффективный арсенал разнообразных методов ее решения в различных ситуациях. Подобное обобщение и систематизация полезны, в частности, при планировании исследований, разработок и организационно-технических мероприятий в области экологии и электромагнитной безопасности сотовой связи и других систем радиотелекоммуникаций. Приведенный в данном разделе материал следует рассматривать как попытку предложить данное обобщение в каче-

стве предмета для широкого обсуждения, анализа и углубления. Это же касается и приведенного в данном разделе предварительного группирования вопросов и возможных направлений работ в области решения проблемы экологии сотовой связи по выделенным иерархическим уровням. Автор уверен в эффективности такого подхода и будет рад любым дальнейшим усилиям коллег, направленным на развитие, углубление и расширение приведенного материала.
2. ИСТОЧНИКИ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

2.1. Предельно допустимые уровни электромагнитных полей РЭС

В разных странах установлены различные ограничения на ПДУ ЭМП. В Российской Федерации, Республике Беларусь и в ряде других стран СНГ действуют нормативы, практически соответствующие ранее разработанным и принятым в СССР в 1980-е годы. В соответствии с базовыми нормативами [9, 10] оценка воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) осуществляется по следующим параметрам:

a) по энергетической экспозиции (ЭЭ), которая определяется интенсивностью ЭМП РЧ и временем его воздействия на человека. Оценка по энергетической экспозиции применяется для лиц, работа или обучение которых связаны с необходимостью пребывания в зонах влияния источников ЭМИ РЧ (кроме лиц, не достигших 18 лет, и женщин в состоянии беременности) при условии прохождения этими лицами в установленном порядке предварительных (при поступлении на работу) и периодических медицинских осмотров по данному фактору и получения положительного заключения по результатам медицинского осмотра;

б) по значениям интенсивности ЭМП РЧ. Такая оценка применяется: для лиц, работа или обучение которых не связаны с необходимостью пребывания в зонах влияния источников ЭМП РЧ; для лиц, не проходящих предварительных (при поступлении на работу) и периодических медицинских осмотров по данному фактору или при наличии отрицательного заключения по результатам медицинского осмотра; для работающих или учащихся лиц, не достигших 18 лет; для женщин в состоянии беременности; для лиц, находящихся в жилых, общественных, служебных зданиях и помещениях, подвергающихся воздействию внешнего ЭМП РЧ (кроме зданий и помещений передающих радиотехнических объектов); для лиц, находящихся на территории жилой застройки и в местах массового отдыха.

Энергетическая экспозиция ЭМП РЧ в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц определяется как произведение плотности потока мощности ЭМП (**П**, Bт/м², мкBт/см²) на продолжительность его воздействия на человека, в диапазоне ниже 300 МГц – как произведение квадрата напряженности электрического (**E**, B/м) или магнитного (**H**, A/м)поля на продолжительность его воздействия на человека.

Интенсивность ЭМП РЧ в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц оценивается значениями ППМ, в диапазоне частот ниже 300 МГц - значениями напряженности электрического и/или магнитного поля.

В случае импульсно-модулированных колебаний оценка проводится по средней за период следования импульса мощности источника ЭМИ РЧ и соответственно, средней интенсивности ЭМП РЧ.

Для лиц, работа или обучение которых связаны с необходимостью пребывания в зонах влияния источников ЭМИ РЧ, энергетическая экспозиция за рабочий день (рабочую смену) ограничена в [9] значениями, указанными ниже в табл. 2.1.

Значения предельно допустимых уровней напряженности электрической ($\mathbf{E}_{nдy}$) и магнитной (\mathbf{H}_{ndy}), ограничиваемых [10] в зависимости от продолжительности воздействия, приведены ниже в табл. 2.2. При продолжительности воздействия менее 0,08 часа дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

Значения предельно допустимых уровней плотности потока мощности ($\Pi_{\Pi,\Pi,Y}$) в зависимости от продолжительности воздействия ЭМП РЧ, соответствующие [9], приведены в табл. 2.3. При продолжительности воздействия менее 0,2 часа дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

Согласно [9, 10] интенсивность ЭМП РЧ на территории жилой застройки и в местах массового отдыха, в жилых, общественных и производственных зданиях (внешнее ЭМП РЧ, включая вторичное излучение), на рабочих местах лиц, не достигших 18 лет, и женщин в состоянии беременности не должна превышать значений, указанных в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.1

Предельно допустимые уровни ЭМП диапазона частот 30 кГц – 300 ГГц на рабочих местах персонала

	Диапазон частот (МГц)				
Параметр	0,03-	3,0-	30,0-	50,0-	300,0-
	3,0	30,0	50,0	300,0	300 000
Предельно допустимое значение	20000	7000	800	800	
ЭЭ _E , (B/м) ² · ч					
Предельно допустимое значение	200		0,72		
ЭЭ _H , (A/м) ² ·ч					
Предельно допустимое значение					200
$ЭЭ_{II}$, (мкВт/см ²)·ч					
Максимальный ПДУ Е, В/м	500	296	80	80	
Максимальный ПДУ Н, А/м	50		3,0		
Максимальный ПДУ П , мкВт/см ²					1000

Таблица 2.2

Предельно допустимые уровни напряженности электрической и магнитной составляющих в диапазоне частот 30 кГц – 300 МГц в зависимости от продолжительности воздействия

	<u> </u>				
Продолжитель-		Е _{пду} , В/м		Н _{пду}	, A/M
ность воздей-	0,03 - 3,0	3,0-30,0	30, - 300,0	0,03 - 3,0	30,0 - 50,0
ствия, ч	ΜΓц	ΜΓц	ΜΓц	ΜГц	ΜΓц
8,0 и более	50	30	10	5,0	0,30
7,5	52	31	10	5,0	0,31
7,0	53	32	11	5,3	0,32
6,5	55	33	11	5,5	0,33

Продолжитель-	Е _{пду} , В/м			Н _{пду} ,	A/M
ность воздей-	0,03 - 3,0	3,0-30,0	30, - 300,0	0,03 - 3,0	30,0-50,0
ствия, ч	ΜГц	ΜΓц	ΜΓц	ΜΓц	ΜΓц
6,0	58	34	12	5,8	0,34
5,5	60	36	12	6,0	0,36
5,0	63	37	13	6,3	0,38
4,5	67	39	13	6,7	0,40
4,0	71	42	14	7,1	0,42
3,5	76	45	15	7,6	0,45
3,0	82	48	16	8,2	0,49
2,5	89	52	18	8,9	0,54
2,0	100	59	20	10,0	0,60
1,5	115	68	23	11,5	0,69
1,0	141	84	28	14,2	0,85
0,5	200	118	40	20,0	1,20
0,25	283	168	57	28,3	1,70
0,125	400	236	80	40,0	2,40
0,08 и менее	500	296	80	50,0	3,00

Окончание табл. 2.2

Таблица 2.3

Предельно допустимые уровни плотности потока мощности в диапазоне частот 300 МГц - 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия, ч	$\Pi_{\Pi Д \mathbf{y}}$, мкВт/см ²
8,0 и более	25
7,5	27
7,0	29
6,5	31
6,0	33
5,5	36
5,0	40
4,5	44
4,0	50
3,5	57
3,0	67
2,5	80
2,0	100
1,5	133

Окончание табл. 2.3

Продолжительность воздействия, ч	ППДУ, мкВт/см2
1,0	200
0,5	400
0,25	800
0,20 и менее	1000

Таблица 2.4

Предельно допустимые уровни ЭМП РЧ для населения, лиц, не достигших 18 лет, и женщин в состоянии беременности

Диапазон частот					
30 кГц –	0,3-3,0	3,0-30,0	30,0-300,0	300 МГЦ –	
300 кГц	ΜГц	ΜГц	ΜΓц	300 ГГц	
Предельно допустимые уровни ЭМП РЧ					
В/м	B/M	В/м	B/M	мкВт/см ²	
			(мкВт/см ²)		
25,0	15,0	10,0	3,0 ¹⁾	10,0	
			$(2,4^{3})$	25,0 ²⁾	

Таблица 2.5

Предельно допустимые уровни ЭМП РЧ, создаваемых телевизионными станциями метрового диапазона (30 - 300 МГц)

Частота, МГц	ПДУ, В/м	ПДУ, мкВт/см ^{2 3)}
48,4	5,0	6,6
88,4	4,0	4,3
192,0	3,0	2,4
300,0	2,5	1,7

Примечания к таблицам 2.4, 2,5:

- ¹⁾ Кроме телевизионных и радиолокационных станций, работающих в режиме кругового обзора или сканирования.
- ²⁾ Для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20.
- ³⁾ Данные справочные значения ПДУ по ППМ получены для плоской электромагнитной волны из значений ПДУ по напряженности поля следующим образом:

$$\Pi_{\Pi,\Pi,\Pi,\Psi}[M\kappa BT/cm^2] = 100 E_{\Pi,\Pi,\Psi}^2[B/m]/120\pi \approx E_{\Pi,\Pi,\Psi}^2[B/m]/3,77.$$
 (2.1)

В соответствии с [9, 10], интенсивность ЭМП РЧ радиолокационных станций специального назначения (РЛС СН), предназначенных для контроля космического пространства и работающих в диапазоне частот 150-300 МГц в режиме электронного сканирования луча, на территории населенных мест, расположенной в ближней зоне диаграммы излучения РЛС CH, не должна превышать 10 мкВт/см² (6,6 В/м) и на территории населенных мест, расположенных в дальней зоне диаграммы излучения РЛС СН – 100 мкВт/см² (19 В/м). В качестве справочных там же приведены следующие данные: условия ближней зоны имеют место преимущественно на территории влияния РЛС СН типа "Днепр" (ближняя зона составляет 20 км). Условия облучения населенных мест РЛС СН типа "Дарьял" соответствуют закономерностям дальней зоны и характеризуются высокими скважностями прерывистых воздействий от 400 до 5000, при этом суммарное время истинного облучения не превышает 4 минуты за сутки. Граница между ближней и дальней зонами на территории влияния РЛС СН типа "Дарьял" составляет 1,2 км. Граница между ближней и дальней зонами диаграммы излучения РЛС СН как названных, так и других типов может быть определена из соотношения

$$\mathbf{r} = (\mathbf{1}...\mathbf{2})\mathbf{D}^2/\lambda, \qquad (2.2)$$

где **r** - расстояние от источника ЭМИ, **D** - максимальный размер излучающей аппаратуры и λ - длина волны излучения.

В целом, исходя из содержания и требований [9,10], можно сделать ряд выводов, в том числе касающихся ПДУ электромагнитного фона в местах и на территориях использования сотовой связи.

<u>Вывод 1.</u> При рассмотрении вопросов экологии сотовой связи как системы связи общего пользования, первоочередной интерес представляют значения ПДУ ЭМП, принятые для населения в целом и не связанные с производственной необходимостью пребывания людей в зонах влияния источников ЭМИ РЧ. В диапазонах частот сотовой связи в соответствии с данными табл. 2.4, 2.5 значение ПДУ ЭМП для непрерывного излучения на частотах выше 300 МГц составляет 10 мкВт/см².

<u>Вывод 2.</u> В метровом диапазоне радиоволн (30 – 300 МГц), где широко используются системы мобильной связи, этот уровень, определяемый как совокупный уровень всех источников непрерывного ЭМИ (включая телевизионные станции и радиолокационные станции, работающих в режиме кругового обзора или сканирования) определяется как сумма соответствующих ПДУ из табл. 2.4 и 2.5 и составляет от 4,1 до 9,0 мкВт/см².

<u>Вывод 3.</u> На частотах выше 300 МГц на территориях, облучаемых антеннами, работающими в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20, ПДУ ЭМП, определяемый как измеряемый уровень ЭМП в момент облучения точки наблюдения, составляет 100 мкВт/см². При этом среднее за период сканирования (обзора) значение ПДУ ЭМП не будет превышать 5 мкВт/см².

В настоящее время в разных странах существуют значительные расхождения во мнениях и в рекомендованных ПДУ ЭМП для населения. В частности,

– по данным [6], по состоянию на июнь 2000 года использовались нормативы на ПДУ ЭМП базовых станций сотовой связи, приведенные ниже в табл. 2.6.1. В табл. 2.6.2 содержатся данные, приведенные в более поздних публикациях [16, 17]. Данная информация, позволяя сформировать общее впечатление о состоянии нормативной базы, приводится автором без редактирования (и, видимо, нуждается в уточнении);

Таблица 2.6.1

ППМ, мкВт/см ²	Стандарты и рекомендации
1000	ICNIRP, Европейский Рекомендательный Совет (>2000 МГц)
900	ICNIRP, Европейский Рекомендательный Совет (1800 МГц)
500	ICNIRP, Европейский Рекомендательный Совет (1000 МГц)
10	Швейцария, Италия, Торонто, Шотландия (>1800 МГц)
7-4	Швейцария (900 и 1800 МГц)
0,02	Новая Зеландия для 2000 г.

Таблица 2.6.2

Страна,	ППМ, BT/m^2 (мк BT/cm^2)			
организация	900 МГц	1 800 МГц	2,45 ГГц	
EC, BO3	4,5 (450)	9,0 (900)	10,0 (1000)	
Бельгия (Фландрия)	1,13 (113)	2,25 (225)	2,3 (230)	
Бельгия (Валлония)	0,024 (2,4)	0,095 (9,5)	0,1 (10)	
Италия (Генова)	0,1 (10)	0,2 (20)	0,2 (20)	
Швейцария	0,042 (4,2)	0,095 (9,5)	0,1 (10)	
Париж	0,024 (2,4)	0,095 (9,5)	0,1 (10)	
Австрия (Зальцбург)	0,001 (0,1)	-	-	

по данным [13, 14], а также исходя из данных табл. 2.6.2, ПДУ ЭМП для населения Москвы и Парижа установлены на уровне 2 – 3 мкВт/см², а в Австрии и Новой Зеландии действуют нормативы 0,1 – 0,2 мкВт/см²; значения ПДУ передающих радиотехнических объектов (ПРТО) для населения г. Москвы, соответствующие [13], приведены ниже в табл. 2.7; согласно [4, с.23], ППМ безопасного для населения электромагнитного фона не должна превышать 1 мкВт/см²;

Таблица 2.7

	ПДУ ЭМП ПРТО			
Объект	30 кГц –	3-30	30-300	300 МГЦ –
	3 МГц	ΜГц	ΜΓц	300 ГГц
	В/м	В/м	В/м	мкВт/см ²
Территория города	15,0	10,0	3,0	3,0
Общественные, служебные, произ- водственные здания	15,0	10,0	3,0	3,0
Жилые здания любого вида; детские образовательные и учебно- воспитательные учреждения и их территория; лечебно-профилакти- ческие учреждения стационарного типа и их территория; интернаты всех видов и их территория; гости- ницы; другие учреждения, предна- значенные для круглосуточного пребывания людей	10,0	7,0	2,0	2,0

- как отмечается в [6, с.36], значительная часть специалистов придерживается мнения, что «в целях профилактической защиты здоровья населения рекомендуется следующий предварительный уровень для суммарных общих электромагнитных облучений от всего высокочастотного оборудования с очень низкой пульсирующей модуляцией, такого как базовые станции GSM, – 1мВт/м² (0,1 мкВт/см²)»;
- согласно ранее действующим на территории СССР нормативам [50] в диапазоне СВЧ (0,3 – 300 ГГц) для лиц, не связанных профессионально с

облучением и для населения предельно допустимая интенсивность облучения составляла 1 мкВт/см²;

 имеется и точка зрения, что не существует уровня облучения, который можно было бы признать абсолютно безопасным для человека [51, 52].

ПДУ ЭМП оборудования мобильной связи (в терминологии [53] – РЭС сухопутной подвижной службы) установлены санитарными правилами [11], определяющими ПДУ ЭМП, создаваемых мобильными радиостанциями у головы пользователя, а также в части ПДУ ЭМП БС уточняющих общие нормативы [9, 10], приведенные выше в табл. 2.1, для энергетической экспозиции ЭМП на рабочих местах персонала.

В частности, в [11] определены следующие временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия на человека ЭМП, создаваемых подвижными станциями сухопутной радиосвязи (включая абонентские терминалы спутниковой связи), в том числе АС сотовой связи, непосредственно у головы пользователя:

в диапазоне частот 27 – 30 МГц 45,0 В/м;

в диапазоне частот 30 – 300 МГц 15,0 В/м;

в диапазоне частот 300 – 2400 МГц 100,0 мкВт/см².

В соответствии с [11], уровни ЭМП БС сухопутной подвижной радиосвязи, создаваемые на рабочих местах персонала, не должны превышать ПДУ, приведенных ниже в табл. 2.8.

В соответствии с Нормами [9, 10, 11] при облучении от нескольких стационарных источников ЭМП установлены следующие правила оценивания допустимости совокупных вынужденных экологических рисков, приведенные ниже.

Таблица 2.8

Предельно допустимые значения энергетической экспозиции ЭМП БС на рабочих местах персонала

Нормируемые параметры	27 – 30 МГц	30-300 МГц	300 – 2400 МГц
Предельно допустимая энергетическая экспози- ция	7000 (В/м) ² ·ч	800 (В/м) ² ·ч	200 (мкВт/см ²)·ч
Максимальный ПДУ	296 В/м ¹⁾	80 B/m ¹⁾	1000 мк BT/cm^{2} 1)
ПДУ для периода облу- чения T ≥ 8 ч за смену	30 В/м	10 В/м	25 мкВт/см ²

¹⁾ Примечание: в диапазоне частот 27 – 300 МГц – для T \leq 0,08 ч, в диапазоне 300 – 2400 МГц – для T \leq 0,2 ч.

 а) Если для всех источников установлены одни и те же ПДУ, то вынужденные экологические риски являются приемлемыми при выполнении следующих условий:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n} E_{i}^{2}} = E_{\Sigma} \le E_{\Pi \not \Pi \mathbf{y}}; \qquad \sum_{i=1}^{n} \Pi_{i} = \Pi_{\Sigma} \le \Pi_{\Pi \not \Pi \mathbf{y}}, \qquad (2.3)$$

где

- Е_i напряженность ЭМП, создаваемая i-м источником (для частот не выше 300 МГц);
- Пі плотность потока мощности ЭМП, создаваемая і-м источником (для частот выше 300 МГц);
- E_Σ совокупная напряженность ЭМП энергетически эквивалентная напряженность суммарного поля;

- Епду ПДУ напряженности ЭМП нормируемого диапазона (не выше 300 МГц);
- Π_Σ совокупная ППМ ЭМП энергетически эквивалентная ППМ суммарного поля (скалярная сумма ППМ ЭМП отдельных источников ЭМП);

ПДУ - ПДУ ППМ ЭМП нормируемого диапазона (выше 300 МГц);
 количество источников ЭМП;

б) При одновременном облучении от нескольких источников ЭМП, для которых установлены разные ПДУ, должны соблюдаться следующие условия:

$$\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{E_{\Sigma j}}{E_{\Pi Д \mathbf{Y} j}} \right)^{2} + \sum_{k=1}^{q} \frac{\Pi_{\Sigma k}}{\Pi_{\Pi Д \mathbf{Y} k}} \leq 1, \qquad \text{где}$$
(2.4)

где

- Е_{Σ j} совокупная напряженность ЭМП, создаваемая источниками
 ЭМП j –го нормируемого диапазона (не выше 300 МГц);
- Е_{ПДУ і} ПДУ напряженности ЭМП **ј** –го нормируемого диапазона;
- Π_{Σ k} совокупная ППМ ЭМП, создаваемая источниками ЭМП k –го нормируемого диапазона (выше 300 МГц);

П_{ПДУ к} - ПДУ ППМ ЭМП нормируемого диапазона (выше 300 МГц);

- количество диапазонов, для которых нормируется напряженность поля ЭМП;
- **q** количество диапазонов, для которых нормируется ППМ ЭМП.

2.2. Излучаемая мощность абонентских и базовых станций

В течение достаточно короткого периода коммерческой эксплуатации сотовой связи созданы несколько поколений систем (стандартов) этого вида радиосвязи. К первому поколению (1G) относят аналоговые системы, принятые в широкую коммерческую эксплуатацию с 80-х годов прошлого века (NMT 450/900, AMPS, TACS/ETACS, Radiocom 2000, C-NETZ). Второе поколение (2G) включает широко эксплуатируемые в настоящее время цифровые системы GSM 900/1800/1900, CDMA (IS-95), D-AMPS (IS-54) и PDS. Третье поколение (3G) включает ряд перспективных систем (стандартов), развиваемых в различных регионах мира (Европа, Северная Америка, Китай, Япония, Корея) [54-63]; к наиболее известным относятся системы UMTS/IMT2000 (Европа) и CDMA-2000 (Северная Америка); идеология последней использована также в системе IMT-MC-450, которая предлагается для замены аналоговой системы NMT-450). Ряд широко используемых модификаций систем второго поколения, в которых обеспечены повышенные скорости передачи данных, относят к промежуточному поколению 2.5 (G2.5). К таким системам относят системы GSM, в которых используются технологии GPRS и EDGE, системы CDMA, соответствующие версиям стандарта IS-95B,С либо технологии HDR, и системы PDC-P.

Максимальные средние значения выходной мощности радиопередающего оборудования систем всех поколений практически соответствуют интервалам 10-100 Вт для БС и 0,1-2,0 Вт для АС [7, 12, 54 – 63]. Более подробные данные о максимальной выходной мощности АС и БС различных систем сотовой связи приведены ниже в табл. 2.9, 2.10.

Следует иметь в виду, что, как правило, БС сотовой связи имеют направленные антенны (секторные в азимутальной плоскости с шириной главного лепестка диаграммы направленности 8° – 15° в вертикальной

плоскости) с усилением до 15 – 17 дБ; в результате эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ БС) может достигать 53 – 60 дБм (250 – 1000 Вт) на канал. Таким образом, ЭИИМ многоканальной БС сети GSM-900/1800 может достигать нескольких киловатт.

Таблица 2.9

Система (стандарт)	Полоса частот	Максимальная выходная		
сотовой связи	радиоизлучения	мощност	ть АС, Вт	
	AC, МГц	Пиковая	Средняя	
NMT-450	453 - 457,5	1,0	1,0	
AMPS	824 - 849	0,6	0,6	
GSM-900	890 - 915			
Класс мощности 1 ¹⁾				
Класс мощности 2		8	1	
Класс мощности 3		5	0,625	
Класс мощности 4		2^{2}	$0,25^{(2)}$	
Класс мощности 5		0,8	0,1	
GSM-1800	1710 - 1785			
Класс мощности 1 1)		1 ²⁾	$0,125^{(2)}$	
Класс мощности 2		0,25	0,031	
Класс мощности 3		4	0,5	
CDMA (IS-95)	824 - 849	0,6	0,6	
D-AMPS (IS-54)	824 - 849			
Класс мощности 1		9	3	
Класс мощности 2		4,8	1,6	
Класс мощности 3		1,8	0,6	
PDC	940 - 956	2	0,66	
	1429 - 1441			
	1453 - 1465			
UMTS / FDD	1920 - 1980			
Класс мощности 1		2	0,125 3)	
			$0,125 - 1,625^{(4)}$	
Класс мощности 2		0,5	0,031 3)	
			$0,031 - 0,4^{4}$	
Класс мощности 3		0,25	0,016 3)	
			$0,016 - 0,2^{4}$	
Класс мощности 4		0,125	0,008 3)	
			$0,008 - 0,1^{-4}$	

Характеристики ЭМИ АС систем сотовой связи

Примечания к табл. 2.9:

- ¹⁾ в соответствии с базовой спецификацией GSM-900/1800 [12];
- ²⁾ для наиболее распространенных АС;
- ³⁾ для речевого трафика (при использовании AC 1 временного слота из 16);
- ⁴⁾ для трафика передачи данных (при использовании AC от 1 до 13 временных слотов из 16).

Таблица 2.10

Система (стандарт) сотовой	Полоса частот ра-	Максимальная излучае-	
связи	диоизлучения БС,	мая мощность БС, Вт	
	МГц		
NMT-450	463 - 467,5	100	
AMPS	869 - 894	100	
GSM-900	935 - 960	40 ¹⁾	
GSM-1800	1805 - 1880	20 ²⁾	
CDMA (IS-95)	869 - 894	100	
UMTS / FDD	2110 - 2170	1 – 12 (31 – 43 дБм) ³⁾	

Характеристики ЭМИ БС систем сотовой связи

Примечания к табл. 2.10:

- ¹⁾ спецификациями [12] для GSM-900 определены 8 классов выходной мощности БС в диапазоне ее возможных значений 2,5 640 Вт. Для микро-БС в диапазоне 900 МГц определены 3 класса выходной мощности в диапазоне значений 9 24 дБм (9 250 мВт), для пико-БС определен диапазон изменения максимальной выходной мощности в пределах 13 20 дБм (20 100 мВт);
- ²⁾ спецификациями [12] для GSM-1800 определены 4 класса выходной мощности БС в диапазоне ее возможных значений 2,5 40 Вт. Для микро-БС в диапазоне 1800 МГц определены 3 класса выходной мощности в диапазоне значений 17 32 дБм (0,05 1,6 Вт), для пико-БС определен диапазон изменения максимальной выходной мощности в пределах 16 23 дБм (40 200 мВт);
- ³⁾ типовое значение выходной мощности; спецификациями UMTS ограничения на значения минимальной и максимальной выходной мощности БС не устанавливаются [58, 59, 62, 63].

В системах сотовой связи второго и третьего поколений производится принудительное управление максимальной выходной мощностью AC – ее понижение по отношению к максимальной выходной мощности до уровня, обеспечивающего номинальный уровень полезного сигнала на входе радио-приемника БС. В соответствии со спецификацией [12]:

- в AC GSM-900 это управление производится с шагом 2 дБ от уровня максимальной выходной мощности до уровня 5 дБм (3,16 мВт) пиковой мощности, что соответствует 0,4 мВт средней выходной мощности;
- в AC GSM-1800 это управление производится также с шагом 2 дБ от уровня максимальной выходной мощности до нуля.

В АС систем сотовой связи, использующих технологию CDMA, требования к дискретности и диапазону управления выходной мощностью АС еще выше; это обусловлено необходимостью обеспечить в приемном тракте БС равные уровни принимаемых сигналов от АС, находящихся на существенно различных расстояниях от БС. Так, в стандарте IS-95 дискретность управления выходной мощностью АС равна 0,4 дБ. В стандарте UMTS радиопередатчик АС должен иметь возможность изменять выходную мощность с шагом 1, 2 и 3 дБ, его минимальная выходная мощность должна быть не менее –44 дБм (0,04 мкВт) [58].

Таким образом, хотя технические спецификации современных стандартов сотовой связи и допускают максимальные пиковые/средние значения выходной мощности на уровне (1,0-2,0)/(0,125-0,25) Вт, но на практике в развитых сотовых сетях уровни пиковой/средней выходной мощности AC, усредненные по всей территории зоны ответственности БС либо по множеству абонентов БС, могут быть значительно меньшими и находиться в пределах 10 – 100 мВт (10 – 20дБм). Напомним, что в соответствии с требованиями [11] измеренный уровень ППМ ЭМИ АС в диапазоне частот 800 – 2400 МГц на расстоянии 370 мм не должен превышать приведенного значения ПДУ, равного 3 мкВт/см². Это значение ППМ соответствует излучаемой мощности 51,6 мВт для гипотетического изотропного излучателя, и 31,5 – 34,5 мВт для реальных малоразмерных дипольных антенн АС с КНД 1,76 – 2,15 дБ. Полученные граничные значения безопасного уровня излучаемой мощности ЭМИ АС примерно соответствуют мощности ЭМИ АС, при которой приемлемыми оказываются и измеряемые уровни **SAR** АС. Что касается значений средней мощности ЭМИ АС выше 35 мВт, то эти уровни, существенно меньшие максимальных, следует отнести к опасным для здоровья.

В этой связи интерес представляют выходные мощности радиопередатчиков разнообразных систем беспроводного доступа, используемых в качестве беспроводных телефонов и радиоинтерфейсов различного назначения. Соответствующие данные приведены ниже в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Система (стандарт)	Используемая полоса	Максимальная выходная мощность АС, мВт		
	частот, МГц	Пиковая	Средняя	
DECT	1880 - 1900	100	8	
CT-2	864 - 868	10	5	
Bluetooth	2400 - 2483,5			
Класс мощности 1		100	$12,5-100^{-1}$	
Класс мощности 2		2,5	0,31 – 1,6 ¹⁾	
Класс мощности 3		1	$0,125-0,625^{-1}$	
Стандарт ІЕЕЕ	2400 - 2483,5	31,6	31,6 ²⁾	
802.16	5150 - 5250			

Характеристики ЭМИ систем беспроводного доступа, используемых внутри помещений

Примечания к табл. 2.11:

- ¹⁾ определяется числом временных слотов, используемых для передачи пакета информации, и функции станции в сети («точка», «многоточка»);
- ²⁾ в ряде стран для этих систем мощность ЭМИ внутри помещений ограничена уровнем 100 мВт.

Быстро развивающимся сегментом телекоммуникационного рынка оборудования и услуг является беспроводный широкополосный доступ (БШД) вне помещений. Системы БШД, эксплуатируемые в локальных зонах жилой застройки и производственных территорий, во многих случаях включают направленные антенны, поэтому ЭИИМ их базового и стационарного абонентского оборудования может быть достаточно высокой. В частности, абонентское оборудование БС системы БШД стандарта DECT должно иметь пиковую мощность не более 250 мВт, что соответствует средней мощности 10 мВт. Однако использование направленных антенн с усилением 6-17 дБ увеличивает среднюю ЭИИМ до значений в пределах 40-500 мВт при использовании этим оборудованием одного временного слота. Некоторые данные о значениях максимальной выходной мощности оборудования БШД стандарта IEEE 802.11 [66, 67] приведены ниже в табл. 2.12, 2.13.

Таблица 2.12

Характеристики ЭМИ систем БШД стандарта IEEE 802.11 в полосе частот 2,4 – 2,4835 ГГц

Максимальная выходная мощность	Географическое положение ¹⁾
1000 мВт	США
100 мВт (ЭИИМ)	Европа
10 мВт/МГц	Япония

Примечания к табл. 2.12:

¹⁾ на территории некоторых стран СНГ данные системы использованы при реализации ряда технологических систем передачи данных за пределами крупных населенных пунктов. Использованное при этом оборудование, в частности, направленные антенны с усилением 15 – 24дБ, обеспечило эксплуатационные значения ЭИИМ абонентского оборудования в пределах 40 – 63 дБм.

Таблица 2.13

	Максимальная выходная мощность	
Полоса радиочастот (ГГц)	при использовании антенны с усиле-	
	нием до 6 дБ (мВт)	
5,15 - 5,25	40 (2,5 мВт/МГц)	
5,25 - 5,35	200 (12,5 мВт/МГц)	
5,725 - 5,825	800 (50 мВт/МГц)	

Характеристики ЭМИ систем БШД стандарта IEEE 802.11 в диапазоне 5 ГГц для территории США

Завершая краткий обзор энергетических характеристик ЭМИ оборудования сотовой связи и сопутствующего радиотелекоммуникационного оборудования (радиоинтерфейсов, систем БШД и т.п.), обратим внимание на системы радиочастотной идентификации (RFID), интенсивно внедряемые во все сферы управления, производства, транспорта, услуг и использующие отдельные полосы радиочастот в диапазоне 0,1 МГц – 24 ГГц. Пиковая ЭИИМ их передатчиков может достигать 3-4 Вт. Массовое применение этих систем в недалеком будущем, возможно, станет заметным фактором ухудшения электромагнитной экологии на производстве и в сфере услуг. Ниже в табл. 2.14 приведены содержащиеся в [68] данные об уровнях ЭМИ оборудования RFID в различных диапазонах частот.

Полоса радиочастот	Допустимое значение напряженности поля / выходной мощности
100 – 135 кГц	72 дБмкА/м (максимальная)
3,155 – 3,400 МГц	13,5 дБмкА/м
6,765 – 6,795 МГц	42 дБмкА/м
7,400 – 8,800 МГц	9 дБмкА/м
13,553 – 13,567 МГц	60 дБмкА/м
26,957 – 27,283 МГц	42 дБмкА/м
433 МГц	10 – 100 мВт
865 – 868 МГц	0,1 – 2,0 Вт (ЭИМ) (ЭИИМ до 3,28 Вт, только Европа)
902 – 928 МГц	4 Вт (ЭИИМ, расширенный спектр, только США, Канада)
2,400 – 2,483 ГГц	4 Вт (расширенный спектр, только США, Канада)
2,446 – 2,454 ГГц	0,5 Вт (ЭИИМ, вне помещений) 4 Вт (ЭИИМ, в помещениях)
5,725 – 5,875 ГГц	4 Вт (США, Канада) 0,5 Вт (Европа)
24 ГГц	0,1 Вт

Характеристики ЭМИ систем RFID

В табл. 2.14 приведены значения импульсной (пиковой) мощности ЭМИ передатчиков систем радиочастотной идентификации. Средняя мощность их ЭМИ существенно ниже пиковой. Тем не менее, при массовом применении этих систем в определенных условиях они могут оказывать заметное влияние на экологию и электромагнитную безопасность производственных процессов в промышленности, на транспорте, в сфере услуг.

2.3. Выводы

Приведенная выше обзорная информация о принятых либо рекомендуемых ограничениях на предельно допустимые уровни ЭМП от радиопередатчиков различных служб для населения и производственного персонала, а также обзорная информация о выходной мощности радиопередатчиков абонентского и базового оборудования систем сотовой связи и другого широко распространенного и интенсивно внедряемого радиотелекоммуникационного оборудования (радиоинтерфейсов, систем БШД, систем RFID) позволяет придти к следующим предварительным выводам:

1. АС сотовой связи различных поколений и стандартов, в частности, стандартов 2-го (2G) и третьего (3G) поколений, имеют близкие значения средней выходной мощности ЭМИ. Значения средней мощности ЭМИ АС сотовой связи стандартов GSM 900/1800 и UMTS/IMT выше 32 – 35 мВт, существенно меньшие максимально возможных, исходя из требований [11] следует отнести к опасным для здоровья пользователей АС.

2. Диапазоны возможных значений выходной мощности ЭМИ АС сотовой связи близки к диапазонам возможных значений выходной мощности ЭМИ разнообразных систем беспроводного доступа, используемых в качестве беспроводных телефонов и радиоинтерфейсов различного назначения, систем радиочастотной идентификации и прочего близкого по назначению радиотелекоммуникационного оборудования. Поэтому ЭМИ этого оборудования в некоторых случаях может оказывать заметное влияние на совокупный уровень техногенного электромагнитного фона, сравнимое с влиянием ЭМИ базового и абонентского оборудования сотовой связи.

3. В качестве пороговых энергетических критериев экологической безопасности ЭМИ оборудования сотовой связи может быть использована совокупность значений ППМ ЭМП **П**_{E1}-**П**_{E6}, указанных ниже в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Энергетические критерии экологической безопасности ЭМИ сотовой связи

Значение	Характеристика
ΠΠΜ,	
мкВт/см ²	
$0,1 (\Pi_{E1})$	Уровень, который может быть рекомендован в качестве
	предварительного профилактического значения ПДУ для
	«суммарных общих электромагнитных облучений от все-
	го высокочастотного оборудования с очень низкой пуль-
	сирующей модуляцией». Равен либо близок к ПДУ ППМ
	ЭМП, принятым в ряде стран
1,0 (П _{Е2})	Значение, которое может быть принято в качестве услов-
	ной верхней границы интенсивности безопасного для
	населения электромагнитного фона. Соответствует ранее
	принятым в СССР ПДУ ЭМП для населения
2,0 (Π _{E3})	ПДУ для мест круглосуточного пребывания людей, при-
	нятый в Москве и Париже
10,0 (П _{Е4})	ПДУ для населения, принятый в России, Беларуси и ряде
	других стран СНГ, а также в ряде стран Западной Европы
100,0 (П _{Е5})	ПДУ для абонентов сотовой связи в момент пользования
	сотовым телефоном, принятый в России, Беларуси и ряде
	других стран СНГ
500,0-1000,0	Рекомендуемые ограничения для Европы (ICNIRP, Евро-
(П _{Еб})	пейский Рекомендательный Совет)

Приведенные выше в табл. 2.15 значения ППМ будут использованы в последующих разделах данной работы при оценке экологической опасности различных ситуаций, связанных с использованием сотовой связи.

3. ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМО В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГРУППИРОВКАХ РЭС

3.1. Предварительные замечания

Современные системы радиосвязи характеризуются весьма высокой пространственной плотностью радиопередатчиков-источников ЭМП. Интенсивное развитие этих систем, в частности, систем мобильной связи и систем удаленного радиодоступа, беспроводных технических решений при реализации информационно-вычислительных сетей, систем охраны и сигнализации и т.п. является главной причиной существенного усложнения ЭМО в современном городе, промышленном районе, транспортном узле. Для сложной ЭМО характерно присутствие в точке наблюдения большого числа ЭМП, уровни (интенсивности) которых являются случайными в силу случайности (априорной неопределенности) размещения радиопередатчиков в пространстве, ориентации их антенн, мощностей ЭМИ передатчиков, и т.п., а также случайности процесса распространения радиоволн, в частности, наличия фединга. В ситуациях, когда совокупная интенсивность этих сигналов либо уровень преобладающего из них превышает установленные санитарными нормативами ПДУ, ЭМО представляет экологическую опасность. Поэтому анализ статистических характеристик ЭМО имеет важное значение с точки зрения планирования систем и сетей радиосвязи и обоснования требований к характеристикам базового и абонентского оборудования, а также к параметрам настройки и характеристикам сетей, определяющим степень их экологической опасности.

Традиционный подход к статистическому моделированию ЭМО в пространственно-рассредоточенных системах, изложенный в работах

58

Д. Миддлтона [69, 70] и ряда других авторов, как правило, связан с обоснованием характеристик статистической модели помеховой обстановки как суммарного случайного процесса, распределение вероятностей мгновенных значений которого принимается логнормальным в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей исходя из мультипликативного характера взаимодействия основных факторов, определяющих значения рассматриваемого процесса. Однако эта модель не в полной мере адекватна задачам, где требуется:

 прогноз параметров преобладающих по уровню сигналов и всего их ансамбля (ЭМО) в некоторой произвольно выбираемой точке наблюдения;

– анализ взаимосвязей между параметрами ЭМО в точке наблюдения (включая параметры преобладающих по уровню сигналов) и базовыми параметрами радиоэлектронной обстановки в местах обитания человека, такими, как пространственная плотность РЭС-источников ЭМИ, условия РРВ, характеристики ЭМИ РЭС и т.п.

Ниже иллюстрируются возможности практического использования иной методики математического вероятностного моделирования ЭМО в пространтодики «ансамблевого» вероятностного моделирования ЭМО в пространственно-распределенных радиосетях. Излагаемый подход, впервые в систематическом виде предложенный проф. А. Ф. Апоровичем [34, 35], предполагает представление ЭМО в виде входного ансамбля электромагнитных полей (радиосигналов), характеризуемого:

 числом N сигналов (детерминированным или случайным), превышающих по уровню некоторое пороговое значение (порог чувствительности, порог восприимчивости и т.п.),

- плотностью распределения вероятностей $w(x_1, x_2, ..., x_n)$ их параметров.

59

Таким образом, ЭМО представляется не в виде суммарного (совокупного) случайного процесса, а в виде **n**-мерной стохастической системы случайных точек (локальных областей). В качестве параметров $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_n$ рассматриваются как энергетический параметр (напряженность поля, плотность потока мощности или уровень на выходе приемной антенны), так и неэнергетические параметры – частота, параметры направления прихода излучения (азимут и угол места), поляризация, время прихода и т.п. В большинстве случаев параметры $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_n$ можно считать статистически независимыми, так что их плотность распределения вероятностей можно представить в виде произведения плотностей распределений вероятностей отдельных параметров: $\mathbf{w}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_n) = \mathbf{w}(\mathbf{x}_1)\mathbf{w}(\mathbf{x}_2)...\mathbf{w}(\mathbf{x}_n)$.

Из вышеизложенного следует, что формирование ансамблевой стохастической модели ЭМО предполагает обоснование (прогноз) вида и параметров плотности распределения $w(x_1, x_2, ..., x_n)$ параметров сигналов (или плотностей распределений $w(x_1)$, $w(x_2)$, ..., $w(x_n)$ сигналов по отдельным параметрам - энергетическому и неэнергетическим), а также прогноз (оценку) числа N сигналов, превышающих по уровню некоторый порог чувствительности либо восприимчивости рецептора ЭМП.

3.2. Исходные модели и соотношения

3.2.1. Модель условий распространения радиоволн

В качестве модели условий распространения радиоволн (PPB) используем общеизвестную аппроксимацию зависимости плотности потока мощности электромагнитного поля Π от расстояния R до его источника степенной функцией с отрицательным показателем степени:

$$\Pi = C_{F0}C_{F1}C_{F2}, \quad C_{F0} = \frac{C_{\nu}P_{etr}}{R^{\nu}},$$

$$P_{etr} = G_aP_{tr}, \quad C_{\nu} = \text{const}, \quad \nu \ge 2,$$
(3.1)

где

- **P**_{etr} эквивалентная изотропно излучаемая мощность,
- P_{tr} мощность, подводимая к антенне источника;
- G_a коэффициент усиления антенны,
- параметр, определяющий «скорость» затухания электромагнитного поля по мере увеличения расстояния до источника излучения. В частности,
 - v = 2 при PPB в свободном пространстве;
 - − в ряде случаев могут быть использованы значения v = 3,0 4,0 (при PPB с интерференцией прямого и отраженного лучей в дальней зоне для диапазонов VHF и UHF, а также при предварительном учете влияния затенения трасс PPB в системах мобильной связи городской застройкой и растительностью [71 – 74]);
 - v = 8 для диапазона HF (декаметровых радиоволн) по результатам интерпретации [40] статистических данных [75];
 - v = 2 12 при использовании «регрессионной» модели [76, 77] РРВ диапазона UHF в помещениях;
 - возможны ситуации, при которых v < 2 при наличии волноводного эффекта вдоль улиц, коридоров, а также внутри заводских цехов, складских помещений и т.п.;
- C_v константа, при РРВ в свободном пространстве $C_2 = 1/4\pi$;
- С_{F0} множитель, определяющий базовое значение затухания (потерь при распространении в пространстве) ЭМП вследствие удаленности точки наблюдения от источника ЭМП на расстояние **R**; этот множитель

определяет средний (average) фединг (затухание, замирание) при РРВ [46, 47, 71, 72]

- С_{F1} множитель, определяющий затухание ЭМП на коротких расстояниях, соизмеримых с длиной волны, в точке наблюдения, обусловленные многолучевостью РРВ; величина С_{F1} случайна и имеет распределение Рэлея («быстрый» (fast) или «небольшой» (small-scale) фединг первого вида) [71, 72];
- С_{F2} множитель, определяющий затухание ЭМП на расстояниях, существенно превышающих длину волны, в точке наблюдения, обусловленные совместным влиянием затенения и дифракции радиоволн при их распространении вдоль крыш зданий, неровностей земной поверхности; величина С_{F2} случайна и имеет логнормальное распределение («медленный» (slow) или «большой» (large scale) фединг второго вида) [71, 72].

Из соотношения (3.1) следует, что энергетика сигналов в точке наблюдения определяется следующими факторами:

1. Пространственным распределением источников сигналов по отношению к точке наблюдения, в частности, удаленностью **R** источника по отношению к рассматриваемой точке.

2. Параметрами условий РРВ, в частности, параметром v зависимости уровня сигнала в точке наблюдения от ее удаленности **R** от источника сигнала, определяющим базовые потери при распространении РРВ, а также значениями величин C_{F1} и C_{F2} , определяющих дополнительные потери при распространении радиоволн у земной поверхности.

3. Параметрами источников, в частности, их эквивалентными изотропно излучаемыми мощностями в направлении на точку наблюдения (рецептор ЭМП).

3.2.2. Пространственное распределение источников ЭМП

При формировании модели пространственного распределения РЭСисточников ЭМИ следует иметь в виду действие двух противоположных тенденций [34, 35]:

 тенденцию к сосредоточению РЭС с целью концентрации их на малоразмерных объектах, при образовании центров управления, для удобства обслуживания и т.п.;

– тенденцию к рассредоточению РЭС с целью приближения их к управляемым объектам, разнесенным территориально; при обеспечении равномерного охвата территории (например, системами обзора пространства, системами радиовещания и т.п.), с целью обеспечения их ЭМС и т.п.

В результате одновременного действия этих тенденций в рассматриваемой области пространства формируется определенное распределение источников ЭМИ, которое может быть описано некоторой функцией плотности источников от координат относительно точки наблюдения [38, 40]:

– функцией $\rho(\alpha, \varepsilon, \mathbf{R})$ [ед./км³] плотности в сферических координатах (α, ε угловые координаты: α –азимут, ε -угол места или визирования) при размещении источников в объеме, например, в некотором слое над земной поверхностью;

 – функцией ρ(α, R) [ед./км²] плотности в полярных координатах при размещении источников на поверхности;

– функцией **ρ(R)** [ед./км] плотности при размещении источников «в линию», например, вдоль транспортной магистрали, воздушного коридора и т.п.

63

Размещение источников ЭМИ в пространстве практически всегда можно считать случайным (в силу принадлежности РЭС различным независимым пользователям, влияния рельефа, морфологии земной поверхности и др. факторов). В качестве модели вероятностного режима пространственного размещения источников ЭМИ может быть использована известная модель пуассоновского случайного размещения точек в пространстве:

$$\mathbf{p}_{\mathbf{k}}(\mathbf{N}_{\Delta \mathbf{V}}) = \frac{\mathbf{N}_{\Delta \mathbf{V}}^{\mathbf{k}}}{\mathbf{k}!} \exp(-\mathbf{N}_{\Delta \mathbf{V}}), \qquad (3.2)$$

где $\mathbf{p}_{\mathbf{k}}(\mathbf{N}_{\Delta \mathbf{V}})$ - вероятность попадания в некоторый элемент $\Delta \mathbf{V}$ пространства ровно \mathbf{k} точечных источников, если среднее число источников в этом элементе равно $\mathbf{N}_{\Delta \mathbf{V}}$. Данная модель находит достаточно широкое применение для моделирования пространственно рассредоточенных сетей (полей) источников ЭМИ; в частности, отметим ее прямое либо косвенное использование в [34 – 48, 69, 70].

Характер зависимости (3.1) свидетельствует о том, что при анализе и моделировании пространственного распределения источников радиосигналов целесообразно ограничиться некоторой областью пространства вокруг точки размещения рецептора ЭМП – областью потенциального (возможного) нежелательного взаимодействия между расположенными в этой области источниками ЭМИ и рецептором ЭМИ, расположенным в точке наблюдения. Определим ее как область пространства, за границами которой источниками ЭМИ можно пренебречь в силу того, что интенсивности образуемых ими в точке наблюдения ЭМП пренебрежимо малы (либо в силу того, что их ЭИИМ недостаточна для создания в точке наблюдения уровней ЭМП, с которыми следует считаться при оценке суммарной интенсивности электромагнитного фона в этой точке).

3.2.3. Пороговая модель рецептора ЭМП

Ансамбль (совокупность) электромагнитных полей, образующий ЭМО и являющийся предметом рассмотрения данной работы, изначально генерируется множеством радиопередатчиков (источников ЭМИ) для передачи и/или извлечения информации и является объектом радиоприема в соответствующих радиосистемах. Экологическая опасность этих ЭМП представляет собой побочный эффект от их присутствия в местах постоянного либо временного пребывания людей. Соответственно, рецепторами ЭМП являются как технические средства (в первую очередь радиоприемники (РП), имеющие высокую чувствительность (восприимчивость) к воздействию ЭМП и специально предназначенные для регистрации слабых ЭМП), так и биологические объекты, в частности, люди в местах наличия ЭМП.

Степень экологической опасности ЭМИ радиосистем и чувствительность их РП по основному каналу приема оказываются косвенно связанными между собой. Действительно, наличие естественных ограничений на чувствительность РП к полезному сигналу диктует использование радиопередатчиков определенной выходной мощности. Эта мощность должна быть не ниже некоторого предела, при котором обеспечиваются требуемые тактико-технические характеристики радиосистем, в частности, требуемая дальность радиосвязи либо требуемая дальность радиолокационного обнаружения при минимально необходимом отношении сигнал/(шум+помеха). Таким образом, требуемая выходная мощность радиопередатчиков в радиосистемах, прямо связанная с их экологической опасностью, должна превышать чувствительность РП на вполне определенную величину, равную максимально возможным базовым потерям при РРВ полезного сигнала.

Аналогичная взаимосвязь прослеживается и по отношению к уровням восприимчивости РП к помехам вне основного канала приема, в частности,

к уровням восприимчивости РП к нелинейным помехам (блокированию полезного сигнала, перекрестной модуляции, интермодуляции, преобразованию шумов гетеродинов). Эти уровни значительно (на величины значений динамического диапазона РП по названным эффектам, составляющие 50-100 дБ [81]) превышают уровень пороговой чувствительности РП по основному каналу приема и могут быть соизмеримы с уровнями ЭМП, приведенными выше в таблице 2.15 и характеризующими различные степени их экологической опасности.

Чувствительность РП, как и восприимчивость человеческого организма к ЭМП, удобно описывать некоторым пороговым значением ППМ либо их совокупностью, отражающей различные степени восприимчивости (чувствительности) РП к действию ЭМП.

В частности, мощность **P**_{rec} радиосигнала на входе РП (на выходе приемной антенны) определяется следующим известным соотношением [71]:

$$P_{rec} = \Pi G_{ar} \frac{\lambda^2}{4\pi} = \Pi G_{ar} \frac{c^2}{4\pi f^2}, \quad f \in Df, \quad Df = [f_{min}, f_{max}],$$
 (3.3)

где

- П плотность потока мощности радиосигнала, определяемая из соотношения (3.1),
- G_{ar} коэффициент усиления приемной антенны в направлении на источник радиосигнала (в общем случае – функция параметров направления прихода радиосигнала в горизонтальной и вертикальной плоскостях – азимута и угла места),
- λ длина волны радиосигнала, **f=c**/ λ его частота, **c** скорость света;
- **Df** диапазон частот, в котором исследуется ЭМО.

Восприимчивость РП к действию помех может быть описана характеристикой его восприимчивости к помехе [2, 78 - 80] – зависимостью **P**₀(**f**) порога восприимчивости от частоты. Очевидно, что восприимчивость РП к помехам максимальна (значение **P**₀(**f**) минимально) на частоте **f**_{ОКП} настройки основного канала радиоприема РП:

$$\mathbf{P}_{\mathbf{0}}(\mathbf{f}_{\mathbf{0}\mathbf{K}\mathbf{\Pi}}) = \min\{\mathbf{P}_{\mathbf{0}}(\mathbf{f})\}, \quad \mathbf{f}_{\mathbf{0}\mathbf{K}\mathbf{\Pi}} \in \mathbf{D}\mathbf{f}.$$
(3.4)

В результате минимальный порог **П**_{min} восприимчивости РП «по полю» может быть определен следующим образом:

$$\Pi_{\min} = \frac{4\pi P_0(f_{0K\Pi})f_{0K\Pi}^2}{G_{ar}c^2}.$$
(3.5)

Порог восприимчивости РП Π_{bl} к блокированию, определяемый «по полю», превышает величину (3.5) на величину D_{bl} динамического диапазона РП по блокированию:

$$\Pi_{bl} = \mathbf{D}_{bl} \Pi_{\min} \,. \tag{3.6}$$

Используя (3.5) и данные [12,54–63], касающиеся чувствительности РП систем АС мобильной связи различных поколений, нетрудно убедиться в том, что для них значения Π_{min} примерно соответствуют интервалу [$10^{-12} - 10^{-11}$] Вт/м². Для этих значений чувствительности радиоприемных устройств мобильной связи и данных [81] о возможном диапазоне значений **D**_{bl} расчетные уровни блокирующей помехи, выраженные в мкВт/см², приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Π_{\min}	Π_{bl} , мкВт/см ²				
Bt/m ²	D _{bl} = 60 дБ	D _{bl} = 70 дБ	D _{bl} = 80 дБ	D _{bl} = 90 дБ	D _{bl} = 100 дБ
10 ⁻¹²	10-4	10-3	10 ⁻²	$10^{-1} = \Pi_{E1}$	$1,0 = \Pi_{E2}$
10-11	10-3	10-2	$10^{-1} = \Pi_{E1}$	$1,0 = \Pi_{E2}$	$10 = \mathbf{\Pi}_{\mathbf{E4}}$

Нетрудно убедиться, что уровень блокирующей помехи для высоколинейных приемных трактов соответствует нижней части 0,1 – 10 мкВт/см² области значений ППМ, существенной с экологической точки зрения.

Таким образом, пороговая модель рецептора ЭМП предполагает наличие некоторого порога Π_0 интенсивности ЭМП, являющегося критерием его восприимчивости к воздействию ЭМП. Если совокупная интенсивность ЭМП в точке размещения рецептора превышает этот порог ($\Pi_{\Sigma} > \Pi_0$), то считается, что уровень ЭМП выше приемлемого; если же совокупная интенсивность ЭМП в этой точке не превышает порога восприимчивости ($\Pi_{\Sigma} \le \Pi_0$), то уровень ЭМП считается приемлемым. Диапазон пороговых значений ППМ $\Pi_0 \le \Pi_{\text{bl}}$ определяет область энергетических критериев ЭМС РЭС, диапазон $\Pi_0 \ge \Pi_{\text{E1}}$ соответствует области критериев экологичности ЭМО в точке наблюдения.

3.2.4. Область потенциального электромагнитного взаимодействия

Пространственной областью потенциального электромагнитного взаимодействия РЭС будем считать сферическую область радиусом

$$\mathbf{R}_{\max} = \left(\frac{\mathbf{C}_{\mathbf{v}} \mathbf{P}_{\text{etr}}}{\mathbf{\Pi}_{\min}}\right)^{1/\mathbf{v}} \tag{3.7}$$

вокруг точки размещения рецептора ЭМП, порог восприимчивости которого равен П_{min}.

Оценка **R**_{max} позволяет определить среднее число источников сигналов в области потенциального мешающего взаимодействия:

при территориальном размещении источников радиосигналов:

$$N_{Scp} = \int_{0}^{R_{max}} \int_{0}^{2\pi} R \rho(\alpha, R) d\alpha dR; \qquad (3.8)$$

при объемном размещении источников радиосигналов:

$$N_{Vcp} = \int_{0}^{R_{max}} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R^2 \rho(\alpha, \varepsilon, R) \cos(\varepsilon) d\varepsilon d\alpha dR; \qquad (3.9)$$

– при линейном размещении источников радиосигналов:

$$N_{Lcp} = \int_{-R_{max}}^{R_{max}} \rho(R) dR. \qquad (3.10)$$

Вероятность присутствия конкретного числа сигналов в рассматриваемой области может быть определена из пуассоновской модели (3.2).

3.3. Распределения вероятностей параметров пространственного размещения источников ЭМИ

3.3.1. Территориальное размещение источников

Будем полагать, что в круговой области потенциального электромагнитного взаимодействия радиусом \mathbf{R}_{max} с центром в точке размещения рецептора ЭМП (рис. 3.1) с плотностью $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ располагаются источники ЭМИ. Используя методику [38, 40], определим вид плотности распределения вероятности параметров α, \mathbf{R} источников относительно точки размещения рецептора ЭМП (точки наблюдения) в следующем виде:

$$w(\alpha, \mathbf{R}) = C_{NS} \frac{dN(\alpha, \mathbf{R})}{d\alpha d\mathbf{R}} = C_{NS} R\rho(\alpha, \mathbf{R}); \qquad (3.11)$$
$$dN(\alpha, \mathbf{R}) = \rho(\alpha, \mathbf{R}) dS(\mathbf{R}, d\alpha, d\mathbf{R}) = \rho(\alpha, \mathbf{R}) \mathbf{R} d\alpha d\mathbf{R};$$

 $aN(\alpha, \mathbf{K}) = \rho(\alpha, \mathbf{K}) dS(\mathbf{K}, d\alpha, d\mathbf{K}) = \rho(\alpha, \mathbf{K}) \mathbf{K} d\alpha d\mathbf{K};$

 $R \in [0, R_{max}], \quad \alpha \in [0, 2\pi], \quad C_{NS} = 1/N_{Scp}.$



Рис. 3.1



- L_H линия горизонта;
- $\epsilon_{H}~-$ угол визирования горизонта;
- **R**₃ радиус Земли (с учетом рефракции);
- R_{H} удаленность линии горизонта от точки размещения $P\Pi$; $R_{max} \le R_{H}$.

Рис. 3.2

В этих выражениях $dN(\alpha, R)$ – среднее число источников на элементарной площадке площадью $dS(R, d\alpha, dR) = Rd\alpha dR$ и координатами { α, R } относительно точки размещения рецептора ЭМП (центра области); C_{NS} – множитель, обеспечивающий необходимую нормировку для функции (3.11), имеющей смысл совместной плотности распределения вероятностей величин α, R .

При равномерном пространственном размещении источников ЭМИ в пределах рассматриваемой области $\rho(\alpha, \mathbf{R}) = \rho = \text{const}$, и распределение (3.11) приобретает следующий вид:

$$\mathbf{w}(\alpha, \mathbf{R}) = \mathbf{w}(\alpha)\mathbf{w}(\mathbf{R}) = \frac{\mathbf{R}}{\pi \mathbf{R}_{\max}^2}, \quad \mathbf{R} \le \mathbf{R}_{\max}; \quad (3.12)$$

$$\mathbf{w}(\alpha) = \frac{1}{2\pi}; \qquad (3.13)$$

$$\mathbf{w}(\mathbf{R}) = \frac{2\mathbf{R}}{\mathbf{R}_{\max}^2} \ . \tag{3.14}$$

Соотношения (3.11), (3.12), (3.14) получены в предположении, что точка размещения рецептора ЭМП находится на плоской поверхности. Рассмотрим случай, когда эта точка находится на определенной высоте **H** над поверхностью, а также учтем сферичность земной поверхности (рис. 3.2).

Площадь S_{uc} шарового сегмента высотой **h**, ограничиваемого удаленностью **R** от точки, поднятой на высоту **H** над сферической поверхностью радиусом **R**₃, равна:

$$S_{\rm mc} = \pi R_3 (R^2 - H^2) / (R_3 + H).$$

$$dN(\alpha, R) = \rho(\alpha, R) dS_{uuc}(R, d\alpha, dR) = \frac{R_3}{R_3 + H} R\rho(\alpha, R) d\alpha dR. \qquad (3.15)$$

В результате получаем общее выражение для $w(\alpha, \mathbf{R})$:
$$\mathbf{w}(\alpha, \mathbf{R}) = \frac{1}{N_{\text{Scp}}} \frac{d\mathbf{N}(\alpha, \mathbf{R})}{d\alpha d\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{R}_3}{N_{\text{Scp}}(\mathbf{R}_3 + \mathbf{H})} \mathbf{R}\rho(\alpha, \mathbf{R}); \qquad (3.16)$$

$$N_{Scp} = \frac{R_3}{R_3 + H} \int_{H}^{R_{max}} \int_{0}^{2\pi} R \rho(\alpha, R) d\alpha dR; \qquad (3.17)$$

 $R \in [H, R_{max}], R_{max} \le \sqrt{2R_3H + H^2} \approx \sqrt{2R_3H}; \alpha \in [0, 2\pi].$

При равномерном пространственном распределении источников в пределах поверхности сферического сегмента, ограниченной удаленностью \mathbf{R}_{max} (см. рис. 3.2), имеем $\rho(\alpha, \mathbf{R}) = \rho = \text{const}$, и распределение (3.16) приобретает следующий вид:

$$w(\alpha, R) = w(\alpha)w(R) = \frac{R}{\pi \left(R_{\max}^2 - H^2\right)} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}; \qquad (3.18)$$

$$w(R) = \frac{2R}{R_{max}^2 - H^2}.$$
 (3.19)

Таким образом, вид $w(\alpha, \mathbf{R})$ инвариантен к кривизне земной поверхности и зависит исключительно от вида функции $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ средней территориальной плотности источников от координат. Для случая равномерного распределения источников по территории плотности распределения вероятностей (3.12) и (3.19) отличаются только областями определения величины **R** и, соответственно, нормирующими множителями.

Обратим внимание на следующее обстоятельство: несмотря на использование полярных координат при определении функции $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ средней территориальной плотности источников относительно точки размещения рецептора ЭМП, эта функция имеет размерность [ед./км²], т.е. задается в привычных декартовых координатах. Это значительно удобнее с практической точки зрения, а также вполне приемлемо, поскольку функция $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ в моделях (3.11),(3.16) используется для описания распределений вероятностей координат точечных объектов, линейными либо угловыми размерами которых можно пренебречь.

3.3.2. Объемное размещение источников

Анализ ситуаций, для которых характерно случайное объемное размещение источников ЭМИ (например, при анализе ЭМО внутри многоэтажного здания), будем проводить в той же последовательности, что и при обосновании моделей (3.11), (3.12) для территориального размещения источников.

Будем полагать, что в сферической области потенциального электромагнитного взаимодействия радиусом \mathbf{R}_{max} с центром в точке размещения рецептора ЭМП с плотностью $\rho(\alpha, \varepsilon, \mathbf{R})$ располагаются источники ЭМИ. Далее определим вид плотности распределения вероятности параметров $\alpha, \varepsilon, \mathbf{R}$ источников относительно точки размещения рецептора (точки наблюдения) в следующем виде:

$$w(\alpha,\varepsilon,R) = C_{NV} \frac{dN(\alpha,\varepsilon,R)}{d\alpha d\varepsilon dR} = C_{NV} R^2 \rho(\alpha,\varepsilon,R) \cos(\varepsilon); \qquad (3.20)$$

 $dN(\alpha,\varepsilon,R) = \rho(\alpha,\varepsilon,R) dV(R,d\alpha,d\varepsilon,dR) = \rho(\alpha,\varepsilon,R) R^2 \cos(\varepsilon) d\alpha d\varepsilon dR;$

$$R \in [0, R_{max}], \quad \alpha \in [0, 2\pi], \quad \varepsilon \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \quad C_{NV} = 1/N_{Vcp}.$$

В этих выражениях $dN(\alpha, \epsilon, R)$ – среднее число источников в элементе пространства, характеризуемого сферическими координатами { α, ϵ, R } относительно точки наблюдения (центра области) и объемом $dV(R, d\alpha, d\epsilon, dR) = R^2 cos(\epsilon) d\alpha d\epsilon dR$; C_{NV} - множитель, обеспечивающий необходимую нормировку для функции (3.20), имеющей смысл совместной плотности распределения вероятностей величин α,ε,**R**.

При равномерном пространственном распределении источников в пределах рассматриваемой области $\rho(\alpha, \varepsilon, \mathbf{R}) = \rho = \text{const}$, и распределение (3.20) приобретает следующий вид:

$$w(\alpha,\varepsilon,R) = w(\alpha)w(\varepsilon)w(R) = \frac{3R^2\cos(\varepsilon)}{4\pi R_{max}^3}; \qquad (3.21)$$

$$\mathbf{w}(\alpha) = \frac{1}{2\pi}; \quad \mathbf{w}(\varepsilon) = \frac{\cos(\varepsilon)}{2};$$
 (3.22)

$$\mathbf{w}(\mathbf{R}) = \frac{\mathbf{3R}^2}{\mathbf{R}_{\max}^3} \,. \tag{3.23}$$

3.3.3. Линейное размещение источников

Анализ ситуаций, для которых характерно случайное размещение источников ЭМП «в линию» (например, при анализе ЭМП от источников, размещенных в пределах транспортной магистрали, воздушного коридора и т.п.) также будем проводить в последовательности, принятой при обосновании моделей (3.11),(3.12) для территориального размещения источников.

Будем полагать, что в линейной области потенциального электромагнитного взаимодействия длиной $2R_{max}$ с центром в точке размещения рецептора ЭМП с плотностью $\rho(\mathbf{R})$ располагаются источники ЭМИ. Далее определим вид плотности распределения вероятности удаленности \mathbf{R} источников относительно точки размещения рецептора (точки наблюдения) в следующем виде:

$$w(R) = C_{NL} \left[\frac{dN_1(R)}{dR} + \frac{dN_2(R)}{dR} \right] = C_{NL} \left[\rho_1(R) + \rho_2(R) \right]; \qquad (3.24)$$

$$dN_1(R) = \rho_1(R) dR, \quad dN_2(R) = \rho_2(R) dR;$$

$$R \in [0, R_{max}], \qquad C_{NL} = 1/N_{Lcp}.$$

В этих выражениях $dN_1(R)$, $dN_2(R)$ – среднее число источников в элементах линии размещения источников, удаленных по каждому из лучей на расстояние **R** от точки наблюдения; $\rho_1(R)$, $\rho_2(R)$ функции линейной плотности источников по каждому из лучей от расстояния **R** до точки наблюдения, C_{NL} - множитель, обеспечивающий необходимую нормировку для функции (3.24), имеющей смысл плотности распределения вероятностей величины **R**.

При равномерном пространственном распределении источников в пределах рассматриваемой области $\rho(\mathbf{R})=\rho=\text{const}$ распределение (3.24) оказывается равномерным:

$$\mathbf{w}(\mathbf{R}) = \frac{1}{\mathbf{R}_{\max}} \,. \tag{3.25}$$

В силу того, что приведенные выше вероятностные модели определяются видом функции средней пространственной плотности источников от координат относительно точки размещения рецептора, они обеспечивают широкие возможности описания закономерностей пространственного размещения, а также прогноза ансамблевых статистических характеристик ансамбля ЭМП в пространственно-рассредоточенных группировках РЭС произвольной конфигурации.

3.4. Распределения вероятностей энергетических параметров ЭМП

3.4.1. Базовые вероятностные модели

На начальной стадии анализа введем следующие ограничения:

- а) будем полагать все источники излучений изотропными и имеющими одинаковую ЭИИМ (в модели (3.1) C_vP_{etr}=const),
- б) будем полагать отсутствие фединга первого и второго вида (в модели $(3.1) C_{F1}$ =const, C_{F2} =const);
- в) зависимостью характеристик антенн источников от частоты пренебрегаем, полагая диапазон частот излучений источников ограниченным.

Для этих ограничений модель (3.1) условий РРВ и определение (3.7) преобразуются к следующему упрощенному виду:

$$\Pi = \Phi(\mathbf{R}) = \frac{\beta}{\mathbf{R}^{\nu}}, \quad \beta = C_{\nu} P_{\text{etr}} C_{F1} C_{F2} = \text{const};$$

$$\mathbf{R}_{\text{max}} = \left(\frac{\beta}{\Pi_{\min}}\right)^{1/\nu}.$$
(3.26)

Зависимость (3.26) позволяет определить вид плотности распределения вероятности **w**(**П**) плотности потока мощности сигналов в точке размещения рецептора (в точке наблюдения), используя модели (3.11), (3.14), (3.16), (3.19), (3.23), (3.24), (3.25), а также известное правило определения плотности распределения вероятности функционально преобразованной случайной величины (при однозначности функции **П**=**Ф**(**R**)):

$$\mathbf{w}(\mathbf{\Pi}) = \mathbf{w}\left(\Phi^{(-1)}(\mathbf{\Pi})\right) \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}\mathbf{\Pi}} \Phi^{(-1)}(\mathbf{\Pi}), \quad \Phi^{(-1)}(\mathbf{\Pi}) = \mathbf{R} = \left(\frac{\beta}{\mathbf{\Pi}}\right)^{1/\nu}.$$
 (3.27)

 Территориальное размещение источников, размещение рецептора на поверхности, произвольная функция ρ(α, R) плотности источников в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, модель (3.11) плотности распределения вероятностей параметров пространственного размещения источников. Для этой ситуации

$$w(\alpha, \Pi) = \frac{B_{S}}{\Pi^{(2+\nu)/\nu}} \rho \left(\alpha, \left(\frac{\beta}{\Pi}\right)^{1/\nu} \right), \qquad (3.28)$$
$$B_{S} = \text{const}; \ \Pi \ge \Pi_{\min}, \alpha \in [0, 2\pi];$$

здесь B_s – нормирующий множитель, определяемый видом функции $\rho(\alpha, R).$

Территориальное размещение источников, размещение точки наблюдения на поверхности, постоянная территориальная плотность источников в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, модель (3.14) плотности распределения вероятностей удаленности источников. Для этой ситуации

$$w(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu}}{\nu\Pi^{(2+\nu)/\nu}}; \ \Pi \ge \Pi_{\min} .$$
(3.29)

 Территориальное размещение источников, произвольная функция ρ(α, R) их плотности в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, размещение точки наблюдения на высоте Н над поверхностью, модель (3.16) плотности распределения вероятностей параметров пространственного размещения (полярных координат) источников.

Для этой ситуации совместная плотность распределения $w(\alpha, \Pi)$ имеет вид (3.28), однако область определения величины Π оказывается ограниченной сверху:

$$\Pi \in \left[\Pi_{\min}, \Pi_{\max}\right], \quad \Pi_{\max} = \frac{\beta}{H^{\nu}}, \tag{3.30}$$

что влечет также соответствующее изменение значения нормирующего множителя в (3.28).

 Территориальное размещение источников, размещение точки наблюдения на высоте Н над поверхностью, постоянная территориальная плотность источников в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, модель (3.19) плотности распределения вероятностей удаленности источников.

Для этой ситуации плотность распределения **w**(**П**) имеет вид (3.29) в области (3.30) определения аргумента:

$$w(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu} \Pi_{\max}^{2/\nu}}{\nu \left(\Pi_{\max}^{2/\nu} - \Pi_{\min}^{2/\nu}\right) \Pi^{(2+\nu)/\nu}};$$

$$\Pi \in [\Pi_{\min}, \Pi_{\max}], \quad \Pi_{\max} = \frac{\beta}{H^{\nu}}.$$
(3.31)

Эта модель применительно к свободному РРВ (v=2) широко использована в [34,35]. При Π_{max} >> Π_{min} распределение (3.31) практически совпадает с (3.29).

5. Объемное размещение источников, произвольная функция ρ(α,ε,R) пространственной плотности источников в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, модель (3.20) плотности распределения вероятностей параметров пространственного размещения источников. Для этой ситуации

$$\mathbf{w}(\alpha,\varepsilon,\Pi) = \frac{\mathbf{B}_{\mathbf{v}}\cos(\varepsilon)}{\Pi^{(3+\nu)/\nu}} \rho\left(\alpha,\varepsilon,\left(\frac{\beta}{\Pi}\right)^{1/\nu}\right),\tag{3.32}$$

 $B_V = \text{const}; \ \Pi \ge \Pi_{\min}, \ \alpha \in [0, 2\pi], \ \varepsilon \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right];$

здесь B_V – нормирующий множитель, определяемый видом функции $\rho(\alpha, \epsilon, R)$.

6. Объемное размещение источников, постоянная пространственная плотность источников в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, модель (3.23) плотности распределения вероятностей удаленности источников. Для этой ситуации

$$w(\Pi) = \frac{3\Pi_{\min}^{3/\nu}}{\nu\Pi^{(3+\nu)/\nu}}; \ \Pi \ge \Pi_{\min} .$$
(3.33)

 Линейное размещение источников, размещение точки наблюдения на этой же линии, произвольные функции ρ₁(R), ρ₂(R) линейной плотности источников по каждому из лучей потенциальной области электромагнитного взаимодействия от расстояния R до точки наблюдения, модель (3.24) плотности распределения вероятностей параметров пространственного размещения источников. Для этой ситуации

$$\mathbf{w}(\mathbf{\Pi}) = \frac{\mathbf{B}_{\mathbf{L}}}{\mathbf{\Pi}^{(1+\nu)/\nu}} \left(\mathbf{P}_{1}\rho_{1}\left(\left(\frac{\beta}{\mathbf{\Pi}}\right)^{1/\nu}\right) + \mathbf{P}_{2}\rho_{2}\left(\left(\frac{\beta}{\mathbf{\Pi}}\right)^{1/\nu}\right)\right); \qquad (3.34)$$

 $B_L = const; \ \Pi \ge \Pi_{min}, \ P_1 = \frac{N_{L1}}{N_{Lcp}}, \ P_2 = \frac{N_{L2}}{N_{Lcp}};$

$$N_{L1} = \int_{-R_{max}}^{0} \rho_1(R) dR; \qquad N_{L2} = \int_{0}^{R_{max}} \rho_2(R) dR;$$

B_L – нормирующий множитель.

8. Линейное размещение источников, размещение точки наблюдения на этой же линии, постоянная плотность источников в потенциальной области электромагнитного взаимодействия, модель (3.25) плотности распределения вероятностей удаленности источников. Для этой ситуации

$$w(\Pi) = \frac{\Pi_{\min}^{1/\nu}}{\nu \Pi^{(1+\nu)/\nu}}; \ \Pi \ge \Pi_{\min} .$$
(3.35)

При размещении точки наблюдения на расстоянии **H** (сверху, сбоку и т.п.) от рассматриваемой линии модели (3.34),(3.35) сохранят свой вид,

однако их область определения уменьшится до области П∈[П_{min}, П_{max}], характерной для модели (3.31).

3.4.2. Случайная наблюдаемая ЭИИМ источников ЭМП

В модели (3.26) принято следующее ограничение:

$$\beta = C_{\nu} P_{etr} C_{F1} C_{F2} = C_{\nu} G_a P_{tr} C_{F1} C_{F2} = \text{const}.$$
(3.36)

В действительности величины G_a , P_{tr} , C_{F1} , C_{F2} являются случайными. В совокупности это может быть интерпретировано как случайность ЭИИМ источников, наблюдаемой из точки размещения рецептора ЭМП. При некоторых достаточно общих дополнительных условиях случайность указанных величин не влияет, по крайней мере, на гиперболический вид моделей (3.29), (3.33), (3.35). Ниже сформулируем эти условия: будем полагать:

- а) величины G_a, P_{tr}, входящие в (3.36), статистически независимыми (предполагается независимость использования источников по прямому назначению);
- б) статистические характеристики случайных параметров G_a, P_{tr} источников в направлении на точку наблюдения постоянными) для всех источников и всех координат рассматриваемой области (равновероятная ориентация антенн и равномерное пространственное размещение источников всех типов);
- величины C_{F1}, C_{F2}, входящие в (3.36), статистически независимыми. Последнее обусловлено практической независимостью трасс PPB от источников ЭМИ к точке наблюдения ЭМО в силу случайности пространственного размещения и относительно невысокой пространственной плотности источников – расстояния между отдельными источниками,

как правило, соизмеримы или превышают интервалы автокорреляции случайных функций $C_{F1}(\mathbf{R})$, $C_{F2}(\mathbf{R})$ (от единиц до сотен длин волн [71, 72]) при отличающихся углах прихода сигналов;

- г) случайные функции C_{F1}(R), C_{F2}(R) стационарными, по крайней мере, в пределах расстояний, при которых уровни сигналов в точке приема превышают порог восприимчивости РП;
- д) среднюю пространственную плотность источников радиосигналов и тип
 PPB постоянными в пределах области потенциального электромагнитного взаимодействия: ρ=const, C_v=const;
- e) область потенциального электромагнитного взаимодействия при всех β ограниченной исключительно порогом восприимчивости РП рецептора помех.

Для принятых ограничений значения случайной величины β можем полагать независимыми для каждого из источников, наблюдаемых в точке размещения рецептора ЭМП (в точке наблюдения ЭМО), а статистические характеристики этой величины – стабильными (постоянными) для всех источников в рассматриваемой области потенциального электромагнитного взаимодействия.

Сформулированные выше условия носят уточняющий характер и, как правило, фактически используются многими авторами при анализе и моделировании ЭМО (в частности, [34, 35, 69, 70, 71, 74]).

При этих условиях величину β охарактеризуем плотностью распределения вероятностей **w**(β), и в области ее существования **D** β =[β_{min} , β_{max}] рассмотрим некоторый элементарный интервал шириной **d** β с центром в точке β_1 ; в пределах этого интервала различиями в значениях β пренебрегаем: β_1 **d** $\beta/2\approx\beta_1$ +**d** $\beta/2\approx\beta_1$. Далее, повторяя шаги, предшествовавшие выводу соотношений (3.29), (3.33), (3.35), для этого конкретного значения $\beta=\beta_1$ получим следующую модель, являющуюся очевидным обобщением моделей (3.29), (3.33), (3.35):

$$\mathbf{w}(\mathbf{\Pi}) = \frac{\mathbf{m} \mathbf{\Pi}_{\min}^{\mathbf{m}/\mathbf{v}}}{\mathbf{v} \mathbf{\Pi}^{(\mathbf{m}+\mathbf{v})/\mathbf{v}}}; \ \mathbf{\Pi} \ge \mathbf{\Pi}_{\min} , \qquad (3.37)$$

где параметр **m** характеризует рассматриваемый тип пространственного размещения источников сигналов: **m**=1 при линейном размещении источников, **m**=2 при территориальном размещении источников, **m**=3 при их объемном размещении.

Заметим, что величина $\beta = \beta_1$ в модель (3.37) не входит, она лишь через зависимость (3.26) связана с размером области потенциального электромагнитного взаимодействия, а также определяет пространственную плотность $\rho(\beta_1)$ и общее число $dN(\beta_1)$ источников, для которых $\beta = \beta_1$:

$$\rho(\beta_{1}) = \rho w(\beta_{1}) d\beta; R_{max}(\beta_{1}) = \left(\frac{\beta_{1}}{\Pi_{min}}\right)^{1/\nu};$$

$$dN(\beta_{1}) = \frac{\rho \pi^{m/2} w(\beta_{1})}{\Gamma(1+m/2)} \left(\frac{\beta_{1}}{\Pi_{min}}\right)^{\frac{m}{\nu}} d\beta.$$
(3.38)

Таким образом, при принятых ограничениях вид распределения (3.37) не зависит от вида **w**(**β**); однако от вида этого распределения зависит число **N** сигналов, превышающих порог восприимчивости РП:

$$N = \frac{\rho \pi^{m/2}}{\Gamma(1+m/2)\Pi_{\min}^{m/\nu}} \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \beta^{\frac{m}{\nu}} w(\beta) d\beta.$$
(3.39)

В частности, при территориальном размещении источников (m=2) и при свободном PPB (v=2) интеграл в (3.39) соответствует первому начальному моменту распределения w(β) – среднему значению величины β.

Независимость распределения (3.37) от вида $w(\beta)$ имеет принципиальное значение и означает устойчивость модели (3.37) и ее частных случаев – моделей (3.29), (3.33), (3.35) к влиянию фединга первого и второго рода, а также разброса в ЭИИМ источников при их равномерном случайном пространственном размещении в пределах области потенциального электромагнитного взаимодействия. Очевидно, что вид распределения (3.37) и его частных случаев определяется в первую очередь типом случайного пространственного размещения источников ЭМИ и видом функции $C_{FO}(R)$ среднего фединга от расстояния **R** между источником ЭМИ и точкой наблюдения.

3.4.3. Особенности гиперболического распределения ППМ ЭМП

Главной особенностью гиперболического распределения (3.37) является отсутствие у него начальных и центральных моментов в наиболее интересных с практической точки зрения случаях. Действительно, выражение для начальных моментов этого распределения **n**-го порядка имеет следующий вид:

$$m_{n}(\Pi) = \int_{\Pi_{\min}}^{\infty} \Pi^{n} w(\Pi) d\Pi = .$$

$$= \int_{\Pi_{\min}}^{\infty} \frac{m \Pi_{\min}^{m/\nu}}{\sqrt{m}} d\Pi = \frac{m \Pi_{\min}^{m/\nu}}{n\nu - m} \Pi^{n - m/\nu} \bigg|_{\Pi_{\min}}^{\infty} . \qquad (3.40)$$

Нетрудно убедиться, что интеграл (3.40) обращается в бесконечность при территориальном и линейном размещении источников ЭМП ($m \le 2$) для всех возможных типов PPB ($v \ge 2$). И только при объемном размещении источников (m=3) и свободном PPB (v=2) существует начальный момент первого порядка – среднее значение случайной величины П: $m_1(\Pi)=3\Pi_{min}$. Второй

начальный момент распределения (3.37) отсутствует при любых возможных типах РРВ и видах случайного равномерного пространственного размещения источников ЭМП, поэтому невозможно оценить дисперсию случайной величины **П**.

Отсутствие у распределения (3.37) начальных моментов, невозможность определения среднего значения и дисперсии случайной величины **П** на практике означает, что в выборке случайной величины, распределенной по этому закону, практически всегда имеется преобладающее значение, случайность и большой разброс которого исключают возможность получения стабильных оценок выборочного среднего и выборочной дисперсии в результате сопоставительного анализа выборок, полученных для идентичных условий.

Данное обстоятельство существенно затрудняет системный анализ ЭМО традиционными методами, поэтому в последующих разделах будет предложен другой подход к оценке статистических характеристик ЭМО в точке наблюдения, позволяющий преодолеть указанные трудности и основанный на анализе статистических характеристик преобладающего по уровню ЭМП и динамического диапазона ансамбля ЭМП в точке наблюдения.

Проблема отсутствия начальных и центральных моментов распределения (3.37) исчезает в случаях, когда имеются объективные причины ограничения области определения величины **П** сверху некоторым предельно возможным значением $\Pi_{max} >> \Pi_{min}$. В частности, это характерно для рассмотренного выше случая размещения точки наблюдения на высоте **H** над поверхностью, на которой случайно равномерно размещены источники ЭМП. Модель (3.37) в этом случае превращается в распределение (3.31), определение его начальных и центральных моментов не вызывает трудностей.

84

Вместе с тем, при использовании модели (3.31) для изучения ЭМО, образуемого AC сотовых систем связи на земной поверхности, корректная мотивация сужения области определения величины **П**, по всей видимости, отсутствует. Однако этот прием оказывается адекватным при изучении ситуаций, в которых рецептор ЭМП располагается на некоторой высоте **H** над поверхностью (плоской или сферической). В этих ситуациях распределение вероятностей **w**(**R**) при $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ =const приобретает вид (3.19). Таким образом, оказывается возможным определить ситуации, для которых результаты работ [34, 35] имеют практическую ценность (размещение РП на мачте над поверхностью, РП на борту летательного аппарата при распределении источников помех по земной поверхности, эксплуатация РЭС в условиях нормирования территориального разноса РЭС и т.п.).

4. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ЭМП В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАССРЕДОТОЧЕННЫХ СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

4.1. Предварительные замечания

Для сложной ЭМО современного города, промышленного или транспортного объекта характерно наличие в местах возможного присутствия людей большого числа ЭМП, уровни которых являются случайными в силу случайности размещения радиопередатчиков в пространстве. Преобладающие по уровню сигналы по интенсивности могут превышать порог восприимчивости, установленный действующими нормативами [9,10]. Поэтому вероятностный прогноз динамического диапазона ЭМП имеет важное значение с точки зрения прогноза их экологической опасности, а также для обоснования экологических требований к действующим радиосистемам и радиосетям, в первую очередь к радиосетям сотовой связи.

Данный раздел посвящен изложению и иллюстрации возможностей практического использования методики прогноза динамического диапазона ЭМП, образуемых АС сотовой связи. Излагаемый подход учитывает случайность пространственного размещения источников ЭМИ, использует известные модели условий PPB за пределами индукционной зоны излучения и позволяет учесть ряд факторов, влияющих на характеристики ЭМО и на опасность превышения динамическим диапазоном ансамбля ЭМП в точке наблюдения порога восприимчивости рецептора ЭМП (направленные свойства источников излучений, меры по подавлению наиболее мощных входных сигналов, прерывистый характер сигналов абонентских станций и т.п.). В качестве иллюстрации практической применимости методики приводятся результаты ее использования для прогноза условий радиоприема в сетях

86

FDMA, TDMA и CDMA, а также результаты сопоставления с методикой, основанной на теоретическом вероятностном оценивании размаха выборки значений уровней сигналов в точке размещения рецептора ЭМП.

Интенсивное развитие коммерческих и служебных радиосистем, в первую очередь систем сотовой радиосвязи, вызвало существенное усложнение ЭМО в условиях современного города. Количество радиотелефонных аппаратов достигает 80 - 120 единиц на 100 жителей, что соответствует пространственной плотности аппаратов до 0,1 - 1,0 AC на кв.метр площади городской застройки, а также до 0,1 - 0,3 AC на 1 метр протяженности транспортной магистрали или на 1 куб.метр внутреннего объема многоэтажных зданий. В этих условиях приходится считаться с опасностью присутствия в местах возможного нахождения людей сравнительно мощных ЭМП от ближайших AC.

Цель данного раздела – изложение практической методики [36, 39, 41, 42] оценки опасности (вероятности) присутствия мощных входных сигналов в произвольно выбранной точке территории, на которой эксплуатируются пространственно-рассредоточенные сети мобильной радиосвязи, в частности, сотовые или транкинговые сети большой емкости, а также обоснование инженерной методики предварительного прогноза предельно допустимой пространственной плотности источников ЭМИ, потенциально допустимой исходя из опасности наличия мощных ЭМП в местах возможного присутствия людей.

Для достижения этой цели ниже использован изложенный в разделе 3 метод «дифференциального» (ансамблевого) статистического моделирования ЭМО, формируемой в точке размещения рецептора ЭМП принадлежащими пространственно-распределенной сети источниками излучений; данный метод связан с прогнозированием в этой точке статистических характеристик ансамбля значений уровней ЭМП.

4.2. Исходные модели и определения

 В качестве параметра ЭМО, характеризующего присутствие в точке наблюдения мощных сигналов, используем значение динамического диапазона D ансамбля N входных сигналов:

$$\mathbf{D}_{\Pi} = \frac{\Pi_{\text{max}}}{\Pi_{\text{min}}} = \left(\frac{\mathbf{E}_{\text{max}}}{\mathbf{E}_{\text{min}}}\right)^2 = \mathbf{D}_E^2, \qquad \mathbf{D} = \mathbf{10} \, \mathbf{lg} \, \mathbf{D}_{\Pi} = \mathbf{20} \, \mathbf{lg} \, \mathbf{D}_E. \tag{4.1}$$

В этом соотношении присутствуют следующие величины:

 энергетические характеристики преобладающего по уровню входного сигнала - плотность потока мощности П_{max} и напряженность поля Е_{max} преобладающего по уровню ЭМП в точке наблюдения;

- минимальные уровни ЭМП Π_{min} , E_{min} , которые могут представлять интерес с точки зрения анализа совокупной интенсивности ЭМП в точке наблюдения; в частности, эти уровни могут соответствовать порогу чувствительности радиоприема «по полю» и определять нижнюю границу возможного диапазона анализа уровней ЭМП, присутствующих в точке наблюдения, стандартными радиоизмерительными средствами.
- В качестве модели условий РРВ используем общеизвестную гиперболическую аппроксимацию (3.1), (3.26) степени v зависимости плотности потока мощности электромагнитного поля П от расстояния R до его источника.
- В качестве параметра рецептора ЭМП, характеризующего его восприимчивость к воздействию мощных ЭМИ, используем значение динамического диапазона рецептора ЭМП по интенсивности поля:

$$D_{rec} = \Pi_{max} / \Pi_0 \in \{D_{E1}, D_{E2}, D_{E3}, D_{E4}, D_{E5}, D_{E6}\},$$
 (4.2)

где **D**_{E1}=**П**_{E1}/**П**₀ – динамический диапазон рецептора по интенсивности ЭМП профилактического уровня, определяемый как отношение уровня Π_{E1} , приведенного в табл. 2.15 и рекомендованного в качестве предварительного профилактического значения ПДУ для «суммарных общих электромагнитных облучений от всего высокочастотного оборудования с очень низкой пульсирующей модуляцией» [6], к минимальному наблюдаемому (регистрируемому) уровню Π_0 интенсивности ЭМП;

 $D_{E2}=\Pi_{E2}/\Pi_0$ — динамический диапазон рецептора по интенсивности ЭМП, соответствующей условной верхней границе интенсивности безопасного для населения электромагнитного фона, определяемый как отношение уровня Π_{E2} , указанного в табл. 2.15, к минимальному наблюдаемому (регистрируемому) уровню Π_0 интенсивности ЭМП;

 $D_{E3}=\Pi_{E3}/\Pi_0$ – динамический диапазон рецептора по интенсивности ЭМП, соответствующей принятому в Москве и Париже ПДУ ЭМП для мест круглосуточного пребывания людей, определяемый как отношение уровня Π_{E3} , указанного в табл. 2.15, к минимальному наблюдаемому (регистрируемому) уровню Π_0 интенсивности ЭМП;

 $D_{E4}=\Pi_{E4}/\Pi_0$ — динамический диапазон рецептора по интенсивности ЭМП, соответствующей принятому в России, Белоруссии и ряде других стран СНГ, а также в ряде стран Западной Европы ПДУ ЭМП для населения, определяемый как отношение уровня Π_{E4} , указанного в табл.2. 15, к минимальному наблюдаемому (регистрируемому) уровню Π_0 интенсивности ЭМП;

D_{E5}= Π_{E5}/Π_0 – динамический диапазон рецептора по интенсивности ЭМП, соответствующей принятому в России, Белоруссии и ряде других стран СНГ ПДУ ЭМП для абонентов сотовой связи в момент пользования сотовым телефоном, определяемый как отношение уровня Π_{E5} , указанного в табл. 2.15, к минимальному наблюдаемому (регистрируемому) уровню Π_0 интенсивности ЭМП;

 $D_{E6}=\Pi_{E6}/\Pi_0$ — динамический диапазон рецептора по интенсивности ЭМП, соответствующей рекомендуемым ограничениям ICNIRP, определяемый как отношение уровня Π_{E6} , указанного в табл. 2.15, к минимальному наблюдаемому (регистрируемому) уровню Π_0 интенсивности ЭМП.

- 4. Пространственной областью потенциального (возможного) электромагнитного взаимодействия РЭС будем считать область радиуса \mathbf{R}_{max} , определяемого соотношением (3.7), вокруг точки размещения рецептора ЭМП с порогом восприимчивости \mathbf{II}_{min} . Случайное пространственное размещение источников излучений в этой области будем характеризовать функцией средней пространственной плотности источников от координат: функцией $\rho(\alpha, \theta, \mathbf{R})$ в сферических координатах при объемном размещении источников или функцией $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ в полярных координатах при территориальном размещении источников; здесь α, θ – азимут и угол места направления прихода излучения, \mathbf{R} -расстояние от центра области. Функции $\rho(\alpha, \mathbf{R})$ и $\rho(\alpha, \theta, \mathbf{R})$ будем полагать медленно изменяющимися, так что в окрестности точки размещения рецептора ЭМП, соответствующей началу координат, пространственная плотность источников может быть принята постоянной. В общем случае для **m**-мерной окрестности РП будем полагать ρ =const.
- 5. В качестве модели вероятностного режима случайного пространственного размещения источников радиоизлучений в окрестности точки наблюдения используем известную модель (3.2) пуассоновского случайного размещения точек в пространстве.
- 6. На начальной стадии анализа будем полагать все источники излучений изотропными и имеющими одинаковую ЭИИМ (C_vP_{etr}=const); зависи-

мостью характеристик антенн источников от частоты пренебрегаем, полагая диапазон частот излучений источников ограниченным.

Для этих условий преобладающий по уровню сигнал в точке наблюдения с интенсивностью Π_{max} принадлежит ближайшему источнику, возможность воздействия которого на рецептор ЭМП не устранена специальными организационными или техническими мерами. В силу случайности расстояний от точки размещения рецептора ЭМП (точки наблюдения) до источников ЭМП величина Π_{max} и динамический диапазон D_{Π} ЭМП в ансамбле входных сигналов являются функционально связанными случайными величинами и могут быть охарактеризованы соответствующими распределениями вероятностей.

4.3. Распределение вероятностей динамического диапазона ЭМП на входе РП

4.3.1. Источники излучений постоянной ЭИИМ

При **m**-мерном пространственном размещении источников расстояние \mathbf{R}_{min} до ближайшего источника может быть определено как наибольший из радиусов сферической окрестности ΔU вокруг точки наблюдения, свободной от источников ЭМП (рис. 4.1). С учетом возможных организационно-технических мер (экранирования, запрета на излучение и т.п.), позволяющих исключить воздействие ЭМП от некоторого числа **K** наиболее близко расположенных источников (рис. 4.2), радиус этой окрестности будет равен расстоянию от точки наблюдения до **K**+1-го по удаленности источника. Этот источник можно считать ближайшим источником ЭМП.

В результате функция распределения вероятностей величины ΔU приобретает следующий вид:



Рис. 4.1



Рис. 4.2

$$P(\Delta U) = 1 - \sum_{k=1}^{K} p_k(N_{\Delta U}) = p_{\geq (K+1)}, \qquad (4.3)$$

где $N_{\Delta U} = \rho \cdot \Delta U$ - среднее число точечных источников в сферической окрестности ΔU , вероятность $\mathbf{p}_k(\mathbf{N}_{\Delta U})$ определена (3.2), $\mathbf{p}_{\geq (\mathbf{K}+1)}$ - вероятность того, что случайные фактические размеры **m**-мерной сферической области, в пределах которой расположены не менее **K**+1 источников, не превзойдут размеров ΔU (т.е. **K**+1 -й по удаленности источник будет расположен на внешней границе сферической окрестности ΔU точки наблюдения). Таким образом, функция (4.3) представляет собой вероятность присутствия в рассматриваемой окрестности точки наблюдения наряду с **K** ближайшими к РП источниками, ЭМП которых устранены организационными или техническими мерами, хотя бы одного источника, который окажется ближайшим источником излучения. Дифференцированием (4.3) легко убедиться, что для принятой модели (3.2) случайного пространственного размещения источников излучений в окрестности рассматриваемой точки плотность распределения вероятности величины ΔU имеет вид распределения Эрланга **K**-го порядка:

$$\mathbf{w}(\Delta \mathbf{U}) = \frac{\rho^{\mathbf{K}+1} \Delta \mathbf{U}^{\mathbf{K}}}{\mathbf{K}!} \exp(-\rho \cdot \Delta \mathbf{U}). \tag{4.4}$$

В общем случае

$$\Delta U = a_m R_{min}^m$$
, $a_m = \pi^{m/2} / \Gamma(1 + m/2)$, где $\Gamma(*)$ – гамма-функция.

Поэтому плотность распределения вероятностей расстояния **R**_{min} до ближайшего источника ЭМП имеет следующий вид:

$$w(R_{\min}) = \frac{\rho^{K+1} a_m^{K+1} m}{K!} R_{\min}^{(K+1)m-1} \exp(-\rho a_m R_{\min}^m) \qquad R_{\min} \ge 0. \quad (4.5)$$

Математическая конструкция этого распределения допускает расширение области определения его параметров **m**, **K** на всю область действительных положительных чисел, что позволяет представить его обобщенные дифференциальную и интегральную формы записи, а также выражение для начальных моментов произвольного порядка **n** в следующем виде:

$$\mathbf{w}(\mathbf{R}_{\min}) = \frac{\mathbf{G}^{\mathbf{H}}\mathbf{m}}{\Gamma(\mathbf{H})} \mathbf{R}_{\min}^{\mathbf{H}\mathbf{m}-1} \exp(-\mathbf{G}\mathbf{R}_{\min}^{\mathbf{m}});$$
(4.6)

$$P(R_{\min}) = \frac{\gamma(H, GR_{\min}^{m})}{\Gamma(H)}; \qquad (4.7)$$

$$m_{n}(R_{\min}) = \frac{\Gamma(H + n/m)}{\Gamma(H)G^{n/m}}; \qquad (4.8)$$

 $G = \rho a_m > 0, \ H = K + 1 > 0, \ m > 0, \ R_{min} \ge 0, \ G R_{min}^m = N_a(R_{min});$

$$\gamma(\mathbf{H}, \mathbf{GR}_{\min}^{\mathbf{m}}) = \int_{0}^{\mathbf{GR}_{\min}^{\mathbf{m}}} \exp(-\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x}^{\mathbf{H}-1} d\mathbf{x}$$
 - неполная гамма-функция перво-

го вида.

Величина $N_a(R_{min})$ имеет смысл среднего числа источников в **m**мерной сферической области ΔU радиусом R_{min} вокруг точки размещения рецептора ЭМП (точки наблюдения).

Далее, используя очевидную функциональную связь значений динамического диапазона D_{Π} и минимального расстояния R_{min}

$$D_{\Pi} = \frac{c_{\nu} P_{etr}}{\Pi_{min} R_{min}^{\nu}},$$

из (4.6),(4.7) получим закон распределения вероятностей динамического диапазона сигналов в точке наблюдения, определяемого уровнем излучения **Н**-го по удаленности от РП источника, имеющий вид экспоненциально-гиперболического распределения [39, 41, 42]:

$$\mathbf{w}(\mathbf{D}_{\Pi}) = \frac{\mathbf{N}_{a}^{H}\mathbf{m}}{\mathbf{v}\Gamma(\mathbf{H})} \mathbf{D}_{\Pi}^{-(\mathbf{H}\mathbf{m}+\mathbf{v})/\mathbf{v}} \exp(-\mathbf{N}_{a}\mathbf{D}_{\Pi}^{-\mathbf{m}/\mathbf{v}}); \qquad (4.9)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{D}_{\Pi}) = \frac{\Gamma(\mathbf{H}, \mathbf{N}_{\mathbf{a}} \mathbf{D}_{\Pi}^{-\mathbf{m}/\nu})}{\Gamma(\mathbf{H})};$$
(4.10)

 $D_{\Pi} \ge 0\,, \quad N_a \ge 0\,, \qquad \nu > 0\,; \qquad m > 0\,;$

$$\Gamma(\mathbf{H}, \mathbf{N}_{a}\mathbf{D}_{\Pi}^{-m/\nu}) = \int_{\mathbf{N}_{a}\mathbf{D}_{\Pi}^{-m/\nu}}^{\infty} \exp(-\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x}^{\mathbf{H}-1} d\mathbf{x}$$
 – неполная гамма-функция вто-

рого вида.

Параметр N_a этого распределения имеет смысл среднего числа источников излучений в сферической области потенциального мешающего взаимодействия радиусом $R_{max} = (C_v P_{etr} / \Pi_{min})^{1/v}$, ограниченной некоторым минимальным наблюдаемым (регистрируемым) уровнем $\Pi_{min} = \Pi_0$ интенсивности ЭМП, в случае, если средняя пространственная плотность источников ЭМП во всей этой области постоянна и равна средней плотности ρ случайного пространственного размещения источников в окрестности точки наблюдения:

$$N_{a} = GR_{max}^{m} = \rho \pi^{m/2} R_{max}^{m} / \Gamma(1 + m/2) \ge 0.$$
 (4.11)

Выражение для начальных моментов распределения (4.9),(4.10) имеет следующий вид:

$$\mathbf{m}_{\mathbf{n}}(\mathbf{D}_{\Pi}) = \mathbf{N}_{\mathbf{a}}^{\mathbf{n}\mathbf{v}/\mathbf{m}} \frac{\Gamma(\mathbf{H} - \mathbf{n}\mathbf{v}/\mathbf{m})}{\Gamma(\mathbf{H})}, \quad \mathbf{H} - \mathbf{n}\mathbf{v}/\mathbf{m} > \mathbf{0}.$$
(4.12)

Соотношения (4.9),(4.10),(4.12) подробно характеризуют вероятностные свойства динамического диапазона ЭМП, присутствующих в точке наблюдения в простейшем случае, когда случайно расположенные в области потенциального мешающего взаимодействия источники сигналов имеют постоянную во времени и одинаковую эквивалентную мощность излучения в направлении на точку наблюдения. В этих соотношениях $D_{\Pi} \ge 0$, хотя практический интерес представляет область $D_{\Pi} > 1$. Условие $D_{\Pi} < 1$ означает, что при пуассоновской модели (3.2) случайного размещения источников в пространстве вероятность их отсутствия в области радиусом \mathbf{R}_{max} вокруг точке наблюдения не равна нулю при любых конечных ρ , \mathbf{R}_{max} , хотя, как правило, и чрезвычайно мала.

Необходимо отметить, что в наиболее важных с практической точки зрения случаях $nv/m \ge H$, и распределение (4.9) начальных моментов не имеет. Тем не менее, полученные соотношения обеспечивают возможность прогнозирования динамического диапазона сигналов при радиоприеме в пространственно-распределенных группировках радиосредств на основе оценки верхней границы доверительного интервала [0,D_{П0}], включающего оцениваемое значение **D**_П с вероятностью **p**:

$$\mathbf{D}_{\Pi 0} = \arg\{\mathbf{P}(\mathbf{D}_{\Pi 0}) = \mathbf{p}\},$$
 (4.13)

где
$$P(D_{\Pi 0}) = \Gamma(H, N_a D_{\Pi 0}^{-m/\nu} / \Gamma(H))$$
.

В частности, если в рассматриваемой ситуации задан динамический диапазон D_{Ei} , i=1,2,...,6 рецептора ЭМП в точке наблюдения, то вероятность $p(D_{\Pi}>D_{Ei})$ его превышения динамическим диапазоном входных сигналов определяется простым соотношением

$$p(\mathbf{D}_{\mathbf{P}} > \mathbf{D}_{\mathbf{E}i}) = 1 - \Gamma(\mathbf{H}, \mathbf{N}_{a} \mathbf{D}_{\mathbf{E}i}^{-m/\nu} / \Gamma(\mathbf{H}).$$
(4.14)

Распределение (4.9) получено с использованием модели (3.1), при этом динамический диапазон сигналов определен по плотности потока мощности в точке наблюдения. Если использовать модель РРВ вида (3.1) по напряженности поля, в которой показатель степени в 2 раза меньше v, то вид соотношений (4.9),(4.10),(4.12) и смысл входящих в них параметров не изменится, но облегчится условие существования начальных моментов этого распределения. Ниже будет приведена аргументация, позволяющая существенно облегчить ограничения на применимость полученных выше моделей и соотношений, принятые при выводе распределения (4.9).

4.3.2. Источники излучений различной ЭИИМ

Рассмотрим ситуацию, когда в интересующей нас области пространства случайно с пуассоновским вероятностным режимом (3.2) размещаются **J** типов изотропных источников излучений, отличающихся эквивалентными излучаемыми мощностями $P_{etr j}$ и средними плотностями пространственного размещения ρ_j , $j \in [1,J]$. При одинаковой геометрии размещения источников в пространстве ($m_1=m_2=...=m_J=m$) и идентичных условиях PPB для всех источников ($v_1=v_2=...=v_J=v$) распределения вероятностей динамического диапазона сигналов источников каждой группы имеют вид (3.11), (3.12) и отличаются лишь параметрами $N_{aj}=a_m\rho_j(C_vP_{etrj}/\Pi_{min})^{m/v}$. Ограничимся рассмотрением случая H=1, при котором для сигналов источников **j**-й группы вероятность $P_j(D_{II})$ того, что значение динамического диапазона сигналов этой группы не превысит величины D_{II} , определяется следующим образом:

$$P_{j}(D_{\Pi}) = \Gamma(1, N_{aj}D_{\Pi}^{-m/\nu}) = \exp\left(-N_{aj}D_{\Pi}^{-m/\nu}\right); \qquad j \in [1, J].$$

Тогда вероятность того, что величина D_{Π} не будет превышена значениями динамического диапазона сигналов источников ни одной из групп, определяется как произведение вероятностей:

$$P_{\Sigma}(D_{\Pi}) = \prod_{j=1}^{J} P_{j}(D_{\Pi}) = \exp\left(-D_{\Pi}^{-m/\nu} \sum_{j=1}^{J} N_{aj}\right) = \exp\left(-N_{a\Sigma} D_{\Pi}^{-m/\nu}\right), \quad (4.15)$$

где $N_{a\Sigma}$ -суммарное среднее число источников всех типов, располагаемых в области потенциального электромагнитного взаимодействия, с сигналами, по уровню превышающими порог Π_{min} в рассматриваемой точке пространства при условии, что плотность случайного пространственного размещения источников ρ_j каждого типа постоянна и равна их плотности в окрестности рассматриваемой точки.

Таким образом, по крайней мере, при **H=1** вид распределения вероятностей (4.9),(4.10) устойчив к различиям в ЭИИМ у источников излучений при условии идентичности характера размещения источников различных типов в пространстве; параметр N_{Σ} имеет смысл среднего числа сигналов от источников всех типов, по интенсивности превышающих порог **П**_{min} в точке наблюдения.

В заключение отметим, что в ситуации, когда в окрестности точки наблюдения могут быть определены суммарная пространственная плотность источников ЭМП ρ_{Σ} и плотность распределения вероятности их ЭИИМ w(P_{etr}), то, по крайней мере, для H=1 параметр N_a в распределении вероятностей (4.9),(4.10) может быть определен следующим образом:

$$N_{a} = C_{\nu}^{\prime} \rho_{\Sigma} \int_{(P_{etr})}^{P_{etr}^{m/\nu} w (P_{etr}) dP_{etr}}, \qquad C_{\nu}^{\prime} = a_{m} \left(\frac{C_{\nu}}{\Pi_{min}}\right)^{m/\nu}.$$
(4.16)

--- / . .

В частности, если в пространстве располагаются источники излучений, антенны которых имеют направленные свойства и ориентированы в пространстве равновероятно по отношению к направлению на точку наблюдения, то закон распределения ЭИИМ $w(P_{etr})$ будет определяться характеристикой направленности излучений источников. При этом распределение (4.9),(4.10) сохранит свой вид, по крайней мере, для случая **H=1**.

4.3.3. Влияние фильтрующих свойств среды в месте размещения рецептора ЭМП на вероятностные характеристики динамического диапазона ЭМП

Рассмотрим ситуацию, когда

- в некоторой интересующей нас области пространства случайно с пуассоновским вероятностным режимом (3.2) размещаются изотропные источники излучений, и динамический диапазон плотности потока мощности их сигналов в месте размещения рецептора ЭМП имеет распределение (4.9),(4.10) с параметрами N_a=N_{in}, H=1;
- непосредственно вблизи размещения рецептора ЭМП на расстоянии $r << m_1(R_{min})$ от точки размещения рецептора ЭМП присутствуют некие конструкции либо элементы, осуществляющие ослабление ЭМП в зависимости от направления прихода, частоты и поляризации ЭМП. Такими конструкциями, например, могут быть элементы одежды, мебели, стен помещения и т.п. Фактически эти конструкции играют роль некоторой «фильтрующей оболочки» по отношению к точке наблюдения и могут быть представлены в виде своеобразной "избирательной системы", осуществляющей линейную селекцию ЭМП по неэнергетическим параметрам x_1, x_2, \dots, x_L . К числу этих параметров, в частности, могут быть отнесены частота, параметры направления прихода (азимут и угол места) излучения, поляризация; нормированную характеристику $K(x_1, x_2, \dots, x_L)$ избирательности этого L-мерного фильтра полагаем известной;
- параметры $x_1, x_2, ..., x_L$ ЭМП в месте размещения рецептора случайны, их области существования $x_1 \in Vx_1$, $x_2 \in Vx_2$,..., $x_L \in Vx_L$ и совместная плотность распределения вероятностей $w(x_1, x_2, ..., x_L)$ в этих областях известны.

Повторяя рассуждения, аналогичные предшествовавшим выводу соотношений (4.15), (4.16), нетрудно убедиться, что в силу безграничной делимости пуассоновского распределения (3.2) распределение динамического диапазона сигналов на выходе данной "избирательной системы" сохранит вид (4.9),(4.10), при этом среднее число **N**_{out} сигналов, превышающих порог восприимчивости рецептора ЭМП "по выходу избирательной системы", определится следующим соотношением:

$$N_{out} = N_{in} \int \dots \int [K(x_1, \dots, x_L)]^{m/\nu} w(x_1, \dots, x_L) dx_1 \dots dx_L.$$
(4.17)

Отсюда выигрыш (в статистическом смысле) в динамическом диапазоне входных сигналов за счет L-мерной линейной селекции в месте размещения рецептора ЭМП может быть определен следующим образом:

$$\mathbf{D}_{\mathrm{out}} / \mathbf{D}_{\mathrm{in}} = \mathbf{Q}^{\mathbf{v}/\mathbf{m}}, \tag{4.18}$$

где D_{out} , D_{in} – оценки динамического диапазона сигналов на "выходе" и на "входе" данной "избирательной системы", определенные на основе (4.13) для H=1 с одинаковой доверительной вероятностью; параметр Q может быть принят в качестве обобщенной характеристики эффективности фильтрующих (экранирующих) свойств рассматриваемой "избирательной системы" применительно к рассматриваемым условиям [39]:

$$Q = \frac{N_{out}}{N_{in}} = \int \dots \int [K(x_1, ..., x_L)]^{m/\nu} w(x_1, ..., x_L) dx_1 ... dx_L.$$
(4.19)

Соотношения (4.17) – (4.19) позволяют реализовать универсальную методику оценки влияния экранирующих свойств одежды и расположенных рядом мебели, стен и других объектов (включая присутствие других людей) на динамический диапазон ЭМП в рассматриваемой точке пространства.

4.4. Распределение вероятностей динамического диапазона ЭМП как распределение размаха выборки

Полученные выше распределения вероятностей динамического диапазона ЭМП получены на основе использования моделей (3.1),(3.2), которые определяют как характер случайности размещения источников в пространстве, так и статистические характеристики ансамбля мощных сигналов в точке наблюдения. Если в этой точке может быть определен закон распределения сигналов по энергетическому параметру, то вероятностностатистические характеристики динамического диапазона этих ЭМП могут быть определены непосредственно на основе решения известной задачи [82] оценки размаха выборки случайных значений плотности потока мощности ЭМП в точке наблюдения, распределенных по этому закону.

В частности, если справедлива модель (3.2) случайного пространственного размещения источников, и средняя плотность случайного размещения источников излучений в пространстве постоянна (ρ =const), то плотность распределения вероятности сигналов по плотности потока мощности в некоторой произвольно выбранной точке пространства, в которой находится рецептор ЭМП, имеет вид гиперболического распределения (3.37). Представление ансамбля значений случайной величины **П**, имеющей это распределение, в виде вариационного ряда, позволяет с помощью известных приемов определить распределение вероятности **N**-й порядковой статистики **П**_N этого ряда, а также определить функцию распределения вероятности **F**_N(**D**) динамического диапазона сигналов при условии, что число сигналов равно **N**:

$$\mathbf{F}_{\mathbf{N}}(\mathbf{D}) = \left(\mathbf{1} - \mathbf{D}^{-\mathbf{m}/\mathbf{v}}\right)^{\mathbf{N}}, \qquad \mathbf{D} = \mathbf{\Pi}_{\mathbf{N}}/\mathbf{\Pi}_{\min}.$$
(4.20)

Сравнительный анализ результатов прогноза вероятного динамического диапазона сигналов, получаемых для доверительной вероятности **p** \geq **0.9** с использованием моделей (4.15) и (4.20), свидетельствует об удовлетворительном совпадении оценок с использованием этих моделей, особенно при больших **N**. В частности, для **F**_N(**D**)=**0.9**, **N**=1000 совпадение результатов достигается с точностью до 0,1%.

Вместе с тем, следует подчеркнуть различный смысл величины N_a , $N_{a\Sigma}$ в (4.11), (4.15), где эта величина является действительным числом (средним числом ЭМП с уровнем выше $\Pi_{min}=\Pi_0$ в точке наблюдения), и величины N в (4.20), где эта величина является фактическим числом ЭМП в точке наблюдения и должна рассматриваться как случайная целая величина применительно к ожидаемой ЭМО. Поэтому использование модели (4.20) для оценки вероятного динамического диапазона ЭМП, источники которых располагаются в пространственной области возможного электромагнитного взаимодействия, требует учета вероятностей присутствия в рассматриваемой точке конкретного фактического числа сигналов, по уровню превышающих пороговый уровень Π_{min} . С учетом принятого вероятностного режима (3.2) формирования ансамбля ЭМП получим следующее выражение для функции распределения вероятности динамического диапазона ЭМП:

$$F(D) = \sum_{N=0}^{\infty} p_N(N_a) F_N(D) = exp(-N_a) \sum_{N=0}^{\infty} \frac{N_a^N}{N!} (1 - D^{-m/\nu})^N, \quad (4.21)$$

где N_a - параметр $N_{a\Sigma}$ распределения (4.15) или параметр N_a в распределении (4.9),(4.10), определяемые одним из описанных выше способов. Нетрудно убедиться, что полученное соотношение совпадает с разложением функции распределения (4.15) в ряд Тейлора по $D^{-m/\nu}$ в окрестности точки **D=1**.

Модель (4.21) может быть использована для оценок вида F(D) при любом распределении вероятностей сигналов по энергетическому параметру. В этой модели может быть использовано представление $F_N(D)=F^N(\Pi/\Pi_{min})$, где $F(\Pi/\Pi_{min}) - \phi$ ункция распределения вероятностей отношения ППМ ЭМП П к пороговому уровню Π_{min} интенсивности ЭМП. В случае, когда объем выборки N сигналов определен, и использование модели (3.2) теряет смысл, соотношение (4.21) вырождается в равенство $F(D)=F_N(D)$.

В модели (4.9),(4.10) параметр **H** характеризует возможности снижения (в вероятностно-статистическом смысле) динамического диапазона ЭМП за счет подавления **H-1** наиболее мощных ЭМП в точке наблюдения. Покажем возможность учета этого фактора при использовании выборочного метода прогноза динамического диапазона сигналов в точке приема.

Если в точке наблюдения присутствуют N ЭМП с распределением (3.37) по энергетическому параметру, то, преобразуя выборку значений $\Pi_1, \Pi_2, ..., \Pi_N$ в вариационный ряд $D_{(1)}=\Pi_{(1)}/\Pi_{min}$, $D_{(2)}=\Pi_{(2)}/\Pi_{min}$, ..., $D_{(N)}=\Pi_{(N)}/\Pi_{min}$, по известным правилам можно найти плотность распределения вероятностей k-й порядковой статистики $D_{(k)}$ этого ряда:

$$w(D_{(k)}) = \frac{m\Gamma(N+1)}{\nu\Gamma(k)\Gamma(N-k+1)} \left[1 - D_{(k)}^{-m/\nu}\right]^{k-1} D_{(k)}^{-\frac{m}{\nu}(N-k+1)-1} = \frac{m\Gamma(N+1)}{\nu\Gamma(H)\Gamma(N-H+1)} \left[1 - D_{(k)}^{-m/\nu}\right]^{N-H} D_{(k)}^{-\frac{m}{\nu}H-1}, \quad k = N - H + 1. \quad (4.22)$$

Сравним (4.22) и (4.9). Подставляя в модель (4.9) $\mathbf{D}=\mathbf{D}_{(k)}$ и обозначая эту модель как **w'(D**_(k)), а выборочную модель (4.22) – как **w''(D**_(k)), найдем их отношение:

$$S = \frac{w''(D_{(k)})}{w'(D_{(k)})} = \frac{\Gamma(N+1) \left[1 - D_{(k)}^{-m/\nu}\right]^{N-H}}{\Gamma(N-H+1) exp(-ND_{(k)}^{-m/\nu})^{N-H}}.$$

Наибольший интерес представляет случай больших N, D_(k). В ситуации, когда D_(k)>>N, имеем следующее:

$$\begin{split} & \left[1 - D_{(k)}^{-m/\nu}\right]^{N-H} \approx 1 - (N-H) D_{(k)}^{-m/\nu} \to 1; \\ & exp\left(-N D_{(k)}^{-m/\nu}\right) \approx 1 - N D_{(k)}^{-m/\nu} \to 1; \\ & lim \frac{N!}{N/H \to \infty} \frac{N!}{(N-H)! N^H} \to 1. \end{split}$$

Таким образом, при $H \ll N \ll D_{(k)}^{m/\nu} = \Re$ имеем $\lim_{\Re \to \infty} S \to 1$, т.е. имеет место совпадение моделей (4.9) и (4.22). Это обстоятельство позволяет использовать (4.22) для прогноза вероятного динамического диапазона ЭМП для уровней доверительной вероятности **p≥0,9** и в тех случаях, когда системная оценка динамического диапазона ЭМП осуществляется на основе моделирования пространственного размещения источников с использованием модели (3.2) и следует считаться со случайностью числа помех на входе РП.

Интегральная форма распределения (4.22) и выражение для его начальных моментов порядка **n** имеют следующий вид:

$$F_{N}(D_{(k)}) = 1 - \frac{B'_{(k)}(D_{(k)})(H, N - H + 1)}{B(H, N - H + 1)} = \frac{B''_{(k)}(D_{(k)})(H, N - H + 1)}{B(H, N - H + 1)} = \frac{1 - I_{(k)}(D_{(k)})(H, N - H + 1)}{B(H, N - H + 1)} = \frac{1 - I_{(k)}(D_{(k)})(H, N - H + 1)}{\Gamma(H)(H - VN/M)} = \frac{V_{N}/M}{\Gamma(H)(H - VN/M)} = \frac{V_{N}/M}{\prod_{i=1}^{N-1} \frac{N + 1 - i}{H - i}}, \quad H > V_{N}/M; \quad (4.24)$$

в этих соотношениях B(H, N – H + 1) – бета-функция (Эйлеров интеграл 1-го рода);

$$B'_{(D_{(k)}^{-m/\nu})}(H, N-H+1), B''_{(D_{(k)}^{-m/\nu})}(H, N-H+1), I_{(D_{(k)}^{-m/\nu})}(H, N-H+1) - \frac{1}{2}$$

неполные бета-функции в различных вариантах определения:

$$B(H, N - H + 1) = \int_{0}^{1} t^{H-1} (1 - t)^{N-H} dt = \frac{\Gamma(H)\Gamma(N - H + 1)}{\Gamma(N + 1)};$$

$$B'_{(D_{(k)}^{-m/\nu})}(H, N - H + 1) = \int_{0}^{D_{(k)}^{-m/\nu}} t^{H-1} (1 - t)^{N-H} dt;$$

$$B''_{(D_{(k)}^{-m/\nu})}(H, N - H + 1) = \int_{D_{(k)}^{-m/\nu}}^{1} t^{H-1} (1 - t)^{N-H} dt;$$

$$I_{(D_{(k)}^{-m/\nu})}(H, N - H + 1) = \frac{B'_{(k)}^{-m/\nu}(H, N - H + 1)}{B(H, N - H + 1)}.$$
(4.25)

Очевидно, что наилучшее приближение к (4.9),(4.10) при исследовании вероятностно-статистических характеристик динамического диапазона как размаха выборки значений случайной величины, имеющей распределение (3.37), может быть получено путем взвешивания гипотез (4.22),(4.23) с вероятностями (3.2). В этом случае функция распределения вероятностей динамического диапазона ЭМП при известных параметрах N_a, **H** имеет следующий вид:

$$F_{N_{a}}(D_{(k)}) = \sum_{N=0}^{H-1} p_{N}(N_{a}) + \sum_{N=H}^{\infty} p_{N}(N_{a}) F_{N}(D_{(k)}), \qquad k = N - H + 1. \quad (4.26)$$

В целом, сопоставление модели (4.9) – (4.12) и модели (4.22) – (4.26) позволяет сделать следующие выводы:

- а) использование при прогнозе динамического диапазона ЭМП модели (4.22) – (4.26) при заданных параметрах пространственного размещения источников излучений и условий РРВ не обеспечивает заметных преимуществ по сравнению с применением модели (4.9) – (4.12), поскольку начальные моменты (4.12) и (4.24) существуют при одинаковых условиях (H>vn/m), и при малых Н для обеих моделей методика прогноза предполагает оценку верхней границы доверительного интервала значений динамического диапазона сигналов при заданной доверительной вероятности в соответствии с (4.13), а также оценку вероятности превышения динамического диапазона РП динамическим диапазоном входных сигналов на основе (4.14);
- б) применение модели (4.22) (4.26) предпочтительно в случаях, когда объем выборки значений уровней сигналов, имеющих распределение (3.37), зафиксирован; в этих ситуациях вычислительные трудности оценки неполных и полной бета-функций (4.25) могут быть преодолены с использованием известных асимптотических представлений, в частности, на основе вычисления соответствующих значений гипергеометрической функции Гаусса;
- в) прогноз статистических характеристик динамического диапазона ЭМП на основе анализа плотности распределения вероятностей k-й порядковой статистики $D_{(k)}$ вариационного ряда $D_{(1)}=\Pi_{(1)}/\Pi_{min}$, $D_{(2)}=\Pi_{(2)}/\Pi_{min}$,..., $D_{(N)}=\Pi_{(N)}/\Pi_{min}$, по использованной выше методике предпочтителен в случае, когда по данным радиомониторинга определен вид распределения сигналов в точке приема по энергетическому параметру и их число, а прочая информация (о характеристиках пространственного размещения источников излучений и условий РРВ) отсутствует;
- г) анализ динамического диапазона ЭМП с учетом фильтрующих свойств конструкций в месте размещения рецептора ЭМП и с учетом возможно-

стей подавления некоторого числа К наиболее мощных ЭМП (H=K+1>1) предполагает использование приведенных выше моделей и соотношений в следующей последовательности:

- оценка динамического диапазона излучений в точке предполагаемого размещения рецептора ЭМП с использованием модели (4.9)-(4.12) или модели (4.22) – (4.26) в зависимости от имеющихся исходных данных в соответствии с п.п. а),б);
- оценка ожидаемого среднего числа ЭМП в рассматриваемой точке с учетом фильтрующих свойств конструкций на основе (4.17) – (4.19)
 с учетом характеристик линейной избирательности эквивалентной избирательной системы, образуемой конструкциями в предполагаемом месте размещения рецептора ЭМП, по неэнергетическим параметрам ЭМП;
- оценка динамического диапазона сигналов с учетом влияния данного фактора на ансамбль ЭМП в рассматриваемой точке на основе использования модели (4.22) – (4.26) по результатам прогноза среднего числа N_a ЭМП в этой точке.

4.5. Динамический диапазон ЭМП АС как функция времени

Модели (4.9) – (4.12) и (4.22) – (4.26) получены в предположении, что все источники ЭМП являются постоянными источниками электромагнитных излучений. Большой практический интерес представляет случай, когда излучения в точке наблюдения имеют прерывистый характер и могут быть описаны моделью в виде дискретного марковского случайного процесса с двумя возможными состояниями **0**, **P**_{etr} и вероятностями пребывания каждого источника в одном из состояний в произвольный момент времени
$$p(0) = \sigma/(\sigma + \chi)$$

$$p(P_{etr}) = \chi/(\sigma + \chi)$$
(4.27)

где σ, χ - параметры Марковской модели функционирования передатчикаисточника излучений, имеющие смысл интенсивностей простейших потоков переходов источника из состояния в состояние вида $P_{etr} \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow P_{etr}$ соответственно. При независимости и идентичности параметров функционирования источников излучений (σ =const, χ =const) число L одновременно включенных передатчиков из N зарегистрированных распределено по биномиальному закону:

$$p_{N}(L) = \frac{N! \chi^{L} \sigma^{N-L}}{L! (N-L)! (\sigma + \chi)^{N}}.$$

Таким образом, динамический диапазон сигналов в рассматриваемой ситуации является случайной функцией времени **D=D(t)** с плотностью распределения вероятностей мгновенных значений

$$w(D) = \sum_{L=0}^{N} p_{N}(L)w(D/L) =$$

$$= \delta(D_{x})\sum_{L=0}^{H-1} p_{N}(L) +$$

$$+ \sum_{L=H}^{N} p_{N}(L)\frac{m\Gamma(L+1)}{\nu\Gamma(H)\Gamma(L-H+1)} \left[1 - D^{-m/\nu}\right]^{L-H} D^{-\frac{m}{\nu}H-1},$$
(4.28)

где $\delta(\mathbf{D}_x)$ - дельта-функция от аргумента \mathbf{D}_x , определяемого характером подавления **H-1** преобладающих по уровню сигналов. При подавлении этих сигналов в системе регулировкой их уровня до значения, превышающего пороговый уровень $\Pi_{min} = \Pi_0$ на некоторую величину \mathbf{D}_0 , следует принять $\mathbf{D}_x = \mathbf{D}_0$; в случае применения организационных мер, связанных с запретом на излучение, следует принять $\mathbf{D}_x = \mathbf{0}$. Нормированная автокорреляционная функция случайного процесса **D(t)** при **H=1** определяется следующим известным соотношением:

$$\mathbf{R}(\tau) = \exp(-(\sigma + \chi)|\tau|) \tag{4.29}$$

Таким образом, в рассматриваемом случае интервал корреляции процесса **D**(t) равен $\tau_{\rm K} = (\sigma + \chi)^{-1}$, а относительное время превышения этим процессом некоторого критического уровня, соответствующего динамическому диапазону рецептора ЭМП, определяется следующим соотношением:

$$p(D > D_{Ei}) = \sum_{L=H}^{N} p_{N}(L) \cdot F_{N}(D_{Ei}) =$$

$$= \sum_{L=H}^{N} \frac{N! \chi^{L} \sigma^{N-L}}{L! (N-L)! (\sigma + \chi)^{N}} \bigg[1 - I_{(D_{Ei}^{-m/\nu})}(H, L-H+1) \bigg].$$
(4.30)

В более общем случае, если в области потенциального электромагнитного взаимодействия может быть определена величина (4.11), то соотношения (4.28),(4.30) с учетом (3.2) могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{split} \mathbf{w}(\mathbf{D}) &= \sum_{N=0}^{\infty} \mathbf{p}_{N} \left(\mathbf{N}_{a} \right) \sum_{L=0}^{N} \mathbf{p}_{N}(L) \mathbf{w}(\mathbf{D}/L) = \\ &= \sum_{N=0}^{\infty} \mathbf{p}_{N} \left(\mathbf{N}_{a} \right) \begin{bmatrix} \delta(\mathbf{D}_{x}) \sum_{L=0}^{H-1} \mathbf{p}_{N}(L) + \\ &+ \sum_{L=H}^{N} \mathbf{p}_{N}(L) \frac{\mathbf{m}\Gamma(L+1)}{\mathbf{v}\Gamma(H)\Gamma(L-H+1)} \left[1 - \mathbf{D}^{-\mathbf{m}/\mathbf{v}} \right]^{L-H} \mathbf{D}^{-\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{v}}H-1} \end{bmatrix}, \end{split}$$
(4.31)
$$\mathbf{p}(\mathbf{D} > \mathbf{D}_{Ei}) = \sum_{N=0}^{\infty} \mathbf{p}_{N} \left(\mathbf{N}_{a} \right) \sum_{L=H}^{N} \mathbf{p}_{N}(L) \cdot \mathbf{F}_{N} \left(\mathbf{D}_{Ei} \right) = \\ &= \sum \mathbf{p}_{N} \left(\mathbf{N}_{a} \right) \left\{ \sum_{L=H}^{N} \frac{\mathbf{N}! \chi^{L} \sigma^{N-L}}{L! (N-L)! (\sigma+\chi)^{N}} \left[1 - \mathbf{I}_{\left(\mathbf{D}_{Ei}^{-\mathbf{m}/\mathbf{v}} \right)} (\mathbf{H}, \mathbf{L} - \mathbf{H} + 1) \right] \right\}. \end{split}$$
(4.32)

Представленные соотношения позволяют в первом приближении оценить опасность (вероятность) превышения динамическим диапазоном ЭМП

в точке наблюдения динамического диапазона рецептора ЭМП, и в силу безграничной делимости модели (3.2) могут быть применены для отдельных участков диапазона частот. Грубо вероятность $p_T(D>D_{Ei})$ превышения динамическим диапазоном ЭМП динамического диапазона рецептора ЭМП за отрезок времени $T>\tau_K$ может быть оценена с использованием (4.30) или (4.32) на основе следующего соотношения:

$$\mathbf{p}_{\mathrm{T}}(\mathbf{D} > \mathbf{D}_{\mathrm{E}i}) \approx \left[\mathbf{p}(\mathbf{D} > \mathbf{D}_{\mathrm{E}i})\right]^{\mathrm{T}/\tau_{\mathrm{k}}}.$$
(4.33)

В заключение отметим, что весьма распространенная модель (4.27) может быть принята в качестве базовой модели процесса функционирования AC сотовой связи во времени. В этом случае соотношения (4.28) – (4.32) описывают случайный процесс изменения в точке наблюдения интенсивности преобладающего ЭМП, обусловленного ЭМИ ближайшей AC, работающей «на передачу». Более точные модели случайного процесса функционирования AC во времени и случайного процесса изменения преобладающей и суммарной интенсивностей ЭМП AC в точке наблюдения могут быть получены с использованием более точной математической модели поведения абонента в сотовых сетях, предложенной в [83].

4.6. Примеры практического применения

4.6.1. Вводные замечания

В разд. 3 и 4 приведена аргументация, позволяющая существенно снизить влияние ограничений, принятых при выводе распределения (4.9), на применимость полученных выше моделей и соотношений. Однако и в рамках оговоренных выше ограничений существуют достаточно важные с практической точки зрения случаи, когда возможно непосредственное применение соотношений (4.13), (4.14) в сочетании с моделями (4.9) – (4.12) или (4.22) – (4.26).

4.6.2. Оценка динамического диапазона ЭМП АС радиотелефонной связи с FDMA

Ограничимся рассмотрением территориального размещения AC (m=2). Для условий PPB в модели (3.1) следует принять v=4. В рассматриваемом случае мобильные радиостанции, как правило, имеют ненаправленные антенны, их ЭИИМ в частном случае может быть принята одинаковой (например, транкинговая система мобильной профессиональной связи). Кроме того, эти AC, являющиеся источниками ЭМИ, принадлежат независимым пользователям и располагаются на территории случайно и рассредоточенно, что позволяет использовать пуассоновскую модель (3.2) их размещения в окрестности точки наблюдения.

Организация использования АС в системах мобильной связи не предполагает какого-либо ограничения сигналов соседних станций. В этой связи интерес представляет рассмотрение ситуации в двух вариантах [34, 39,41,42]:

- Вариант 1. Динамический диапазон **D**_П ЭМП в произвольно выбранной точке поверхности (**H**=1), например, в точке размещения рецептора ЭМП.
- Вариант 2. Динамический диапазон **D**_П ЭМП в точке размещения AC (собственный сигнал во время приема отсутствует (симплекс) или представляет собой фактор добровольного экологического риска, рассматриваемый отдельно (**H=2**)).

<u>В первом варианте</u> распределение (4.9) начальных моментов не имеет. Поэтому системный анализ динамического диапазона излучений в выбранной точке возможен с использованием (4.13) и предполагает:

- обоснование требуемого значения коэффициента надежности р прогноза - вероятности того, что динамический диапазон излучений не превысит искомой величины D_{П0};
- решение уравнения (4.13) относительно **D**_{п0} аналитически, численными методами или с использованием семейства графиков распределения (4.10).

В рассматриваемом случае возможно и аналитическое решение: используя свойства известного представления неполной гамма-функции второго рода в виде

$$\Gamma(1+n,x) = n!e^{-x}\sum_{i=0}^{n}\frac{x^{i}}{i!}, \qquad n = 0,1,2,...,$$
 (4.34)

получим:

$$\mathbf{p} = \Gamma \left(\mathbf{1}, \mathbf{N}_{a} \mathbf{D}_{\Pi 0}^{-2/4} \right) = \exp \left(-\mathbf{N}_{a} / \sqrt{\mathbf{D}_{\Pi 0}} \right), \text{ отсюда } \mathbf{D}_{\Pi 0} = \left(\mathbf{N}_{a} / \ln p \right)^{2}; \quad (4.35)$$

при **p≥0,9** возможна аппроксимация $D_{\Pi 0} \approx (N_a/(1-p))^2$. При одинаковых N_a разница между значениями D_0 для **p=0,9** и для **p=0,99** составляет примерно 20 дБ.

Во втором варианте распределение (4.9) для величины D_{Π} также не имеет начальных моментов. Поэтому, используя (4.34), приведем уравнение (4.13) к следующему виду:

$$\mathbf{D}_{\Pi \mathbf{0}} = \arg\{\left(\mathbf{1} + \mathbf{N}_{\mathbf{a}} / \sqrt{\mathbf{D}_{\Pi \mathbf{0}}}\right) \exp\left(-\mathbf{N}_{\mathbf{a}} / \sqrt{\mathbf{D}_{\Pi \mathbf{0}}}\right) = \mathbf{p}\}.$$
(4.36)

Численное решение этого уравнения для **p=0.9** и **p=0.99** позволяет, в частности, получить следующие оценки:

$$D_{\Pi 0}(0.9) \approx 3,54 N_a^2, \quad D_{\Pi 0}(0.99) \approx 45,3 N_a^2;$$
 (4.37)

разница между этими оценками для одинаковых N_a составляет примерно 11 дБ.

Параметр N_a в приведенных соотношениях имеет смысл среднего числа АС, включенных на передачу, в области потенциального электромагнитного взаимодействия радиусом R_{max}, если пространственная плотность станций в пределах всей этой области одинакова и соответствует их плотности в окрестности рассматриваемой точки. Для типовых абонентских станций с излучаемой мощностью 2-5Вт (транкинговая связь) и высотой антенны над поверхностью 1,5-2,0 м при принятых условиях PPB (v=4) площадь этой зоны может составить 10 – 30 кв.км (с учетом интерференции прямого и отраженного лучей, экранирующего действия зданий и земной поверхности, влияния растительности и т.п.). Для территориальной плотности рє[1000,10000] станций/кв.км при относительном времени включения станции на передачу 2-5 % получим значение параметра $N_a \in [200, 10000]$, что в целом соответствует сложным условиям эксплуатации. Для реальных условий эксплуатации может быть принята область значений территориальной плотности источников р∈[100,1000] станций/кв.км, что примерно соответствует N_a ∈ [20,1000]. Ниже для этих условий в таблице приведены результаты прогноза областей ожидаемых значений D₀=10lgD₁₀ для p=0,9 и **р=0,99** в соответствии с (4.35) и (4.37).

Таблица 4.1

Исходные данные	Вариант 1 (H=1)		Вариант 2 (H=2)	
Область значений территори- альной плотности источников ЭМП р, AC/км ²	$10^2 - 10^3$	$10^3 - 10^4$	$10^2 - 10^3$	$10^3 - 10^4$
Область значений D ₀ (0.9), дБ	46 - 80	66 - 100	32 - 66	52 - 86
Область значений D ₀ (0.99), дБ	66 - 100	86 - 120	43 – 77	63 – 97

Если во втором из рассмотренных вариантов динамический диапазон определить по напряженности электромагнитного поля и при анализе опираться на модель PPB вида (3.1) по напряженности поля, в которой следует принять v=2, то обеспечатся условия существования 1-го начального момента в (4.12) для распределения (4.9). Для этого варианта $\mathbf{m_1}(\mathbf{D_E})=\mathbf{N_a}$. В результате для рассмотренных выше условий эксплуатации получим для интервала $\mathbf{N_a} \in [200,10000]$ область значений $20lg(\mathbf{m_1}(\mathbf{D_E}))=26 - 60$ дБ.

Приведенные выше предварительные оценки вполне согласуются с практическими представлениями о характеристиках ЭМО в условиях современного города.

Поясним возможную причину различий в оценках значений $D_0(0,9)$, $D_0(0,99)$ для рассмотренных вариантов. Во втором варианте точка наблюдения совпадает с точкой размещения некоторой случайно выбранной абонентской станции. В первом же случае мы анализируем произвольную точку пространства (в которой может быть размещен рецептор ЭМП); и размещение в этой точке AC привело бы к локальному увеличению средней пространственной плотности источников излучений. Это одно из возможных объяснений причины различий в оценках с использованием (4.35) и (4.36), в определенной степени спорное с математической точки зрения.

На частотах выше 300 МГц при высокой пространственной плотности AC, характерной для сотовой связи, наиболее предпочтительными моделями условий PPB между точкой наблюдения и ближайшей AC-источником ЭМП при их территориальном пространственном размещении (**m=2**) являются следующие модели:

 модель условий РРВ в свободном пространстве (v=2) в местах массового скопления людей, где расстояние R_{min} между точкой наблюдения и ближайшей АС-источником ЭМП относительно невелико: $\mathbf{R}_{min} \leq 4\mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2 / \lambda$, где \mathbf{h}_1 и \mathbf{h}_2 – высоты точки наблюдения и антенны ближайшей АС над поверхностью соответственно, λ -длина волны;

 - "интерференционная" модель РРВ (v=4) при существенно меньшей пространственной плотности АС, когда R_{min}≥18h₁h₂/λ.

Для этих условий представление (4.34) позволяет получить следующие упрощенные соотношения для первого и второго из рассмотренных случаев [46]:

$$P(D_{\Pi}) = \exp\left(-N_{a}D_{\Pi}^{-m/\nu}\right), \qquad H = 1$$

$$P(D_{\Pi}) = \left(1 + \frac{N_{a}}{D_{\Pi}^{m/\nu}}\right) \exp\left(-\frac{N_{a}}{D_{\Pi}^{m/\nu}}\right), \qquad H = 2$$

$$p(D_{\Pi} \ge D_{Ei}) = 1 - P(D_{\Pi} = D_{Ei}).$$
(4.38)

При малых вероятностях превышения динамического диапазона рецептора ЭМП динамическим диапазоном ЭМП ближайших АС могут быть использована следующая аппроксимация (4.38):

$$p(D_{\Pi} \ge D_{Ei}) = 1 - P(D_{\Pi} = D_{Ei}) \approx \begin{cases} N_{a} D_{Ei}^{-m/\nu}, & H = 1; \\ \frac{N_{a}^{2}}{2D_{Ei}^{2m/\nu}}, & H = 2. \end{cases}$$
(4.39)

На рис. 4.3, 4.4 приведены результаты [46, 47] моделирования методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) ансамблей ЭМП в наземных (\mathbf{m} =2) системах мобильной связи при различных условиях PPB (\mathbf{v} =2 и \mathbf{v} =4) для $\mathbf{N}_{\mathbf{a}}$ =100, а также для \mathbf{H} =1 и \mathbf{H} =2. Кроме зависимостей вероятности превышения динамического диапазона рецептора ЭМП $\mathbf{D}_{\mathbf{E}i}$ динамическим диапазоном $\mathbf{D}_{\mathbf{H}}$ ЭМП ближайших АС на этих рисунках приведены также зависимости вероятности превышения динамического диапазона рецептора ЭМП $\mathbf{D}_{\mathbf{E}i}$ динамическим диапазоном $\mathbf{D}_{\mathbf{H}\Sigma}$ всего ансамбля $\mathbf{N}_{\mathbf{a}}$ ЭМП АС в точке наблюдения, определяемым следующим образом:



Рис. 4.3



Рис. 4.4

$$D_{\Pi\Sigma} = \frac{\Pi_{\Sigma}}{\Pi_{\min}} = \frac{\sum_{H=1}^{N_{a}} \Pi_{H}}{\Pi_{\min}} = \sum_{H=1}^{N_{a}} \frac{\Pi_{H}}{\Pi_{\min}} = \sum_{H=1}^{N_{a}} D_{\Pi H}.$$

В первой и второй дроби этого отношения числитель представляет собой скалярную сумму ППМ (интенсивностей) всех N_a ЭМП, присутствующих в точке размещения рецептора. Приведенные результаты [46, 47] подтверждают гипотезу, что в области $p(D_{\Pi\Sigma} > D_{Ei}) << 1$ динамический диапазон ЭМО определяется уровнем преобладающего ЭМП из числа присутствующих в точке наблюдения ($p(D_{\Pi\Sigma} > D_{Ei}) \approx p(D_{\Pi1} > D_{Ei})$), а вклад всех остальных ЭМП из ансамбля присутствующих в точке наблюдения в суммарную интенсивность поля оказывается незначительным.

Следует особо заметить, что эта гипотеза справедлива не только при **H=1**, но и при **H**=2, т е. в случае, когда наиболее интенсивное ЭМП устранено организационно-техническими мерами, и преобладающим ЭМП оказывается второе по интенсивности ЭМП. Случай с Н=2 с некоторой натяжкой может рассматриваться и применительно к ситуациям, когда точка наблюдения совпадает с местоположением АС, т.е. в качестве рецептора ЭМП рассматривается абонент мобильной связи в момент, когда его АС находится в пассивном состоянии и не является источником ЭМП. Справедливость утверждения, что при малых вероятностях превышения динамического диапазона рецептора ЭМП динамическим диапазоном ЭМП ближайших АС (либо в области больших уровней ЭМП АС в точке наблюдения) суммарная интенсивность ЭМП АС определяется уровнем преобладающего сигнала одной из ближайших АС (уровень ЭМП которой наиболее интенсивен по отношению к ЭМП всех прочих АС), может быть доказана и математически [46,47] на основе использования материалов [49] (см. приложение).

Это положение имеет принципиальное значение не только с точки зрения системного анализа вопросов экологии радиотелекоммуникационных систем, но также применительно ко многим другим проблемам радиотехники (электромагнитной совместимости, оптимальной обработки сигналов в присутствии помех, компенсации помех и т.п.). В соответствии с этим заключением для очень широкого класса условий эксплуатации можно считать, что основное мешающее действие осуществляется преобладающей по уровню помехой, но при устранении одной или нескольких наиболее мощных помех аналогичный вывод может быть сделан относительно помехи, преобладающей в оставшемся ансамбле помех. Эта закономерность является принципиальной особенностью вероятностно-статистических характеристик ансамбля сигналов/помех, имеющих распределение (3.37) по энергетическому параметру.

4.6.3. Прогноз предельно допустимой сложности ЭМО

Соотношения (4.13),(4.14) позволяют оценить предельную сложность ЭМО, допустимую с точки зрения опасности превышения динамического диапазона рецептора ЭМП динамическим диапазоном присутствующего ансамбля ЭМП. С учетом известного представления (4.34) неполной гаммафункции уравнение (4.13) может быть представлено в следующем виде:

$$P = \frac{\Gamma(H,Z)}{\Gamma(H)} = \exp(-Z) \sum_{i=0}^{H-1} \frac{Z^{i}}{i!}, \quad Z = N_{a} D_{\Pi 0}^{-m/\nu}.$$
(4.40)

Решая это уравнение относительно $D_{\Pi 0}$ при различных N_a для фиксированных $p(D < D_{\Pi 0}) = P(D_{\Pi 0})$, H, ν/m , можно оценить наибольшее среднее число входных сигналов N_a , предельно допустимое для рецептора ЭМП с динами-

ческим диапазоном $\mathbf{D}_{Ei} = \mathbf{D}_{\Pi 0}$. На рис.4.5 – 4.8 приведены графики, отражающие различные сечения функциональной зависимости величины $\mathbf{D}_{\Pi 0}$ от



Рис. 4.5. Зависимости **D**_{П0}=**F**(**N**_a) для **р**(**D**<**D**_{П0})=**0.9**, рассчитанные для различных типов условий РРВ и различного числа подавляемых наиболее мощных сигналов



Рис. 4.6. Зависимости **D**_{П0}=**F**(**N**_a) для **р**(**D**<**D**_{П0})=**0.99**, рассчитанные для различных типов условий РРВ и различного числа подавляемых наиболее мощных сигналов



Рис. 4.7. Зависимости **D**_{П0}=**F**(**p**) для **N**_a=1000, рассчитанные для различных типов условий РРВ и различного числа подавляемых наиболее мощных сигналов



Рис. 4.8. Зависимости **D**_{П0}=**F**(**H**), рассчитанные для различных значений доверительной вероятности (**p**(**D**<**D**_{П0})=**0.9** и **p**(**D**<**D**_{П0})=**0.99**), различной сложности ЭМО (**N**_a=100 и **N**_a=1000) и различных типов условий PPB

величин N_a , **р**, **H** при различных значениях **m**/**v**, характеризующих условия распространения радиоволн при различных типах пространственного размещения источников ЭМП. На этих рисунках

- график 1 соответствует m/v=3/2 (РРВ в свободном пространстве при объемном размещении источников),
- график 2 соответствует m/v=1 (РРВ в свободном пространстве при территориальном размещении источников),
- график 3 соответствует m/v=1/2 ("интерференционное" PPB, PPB в городской застройке в диапазонах VHF и UHF при территориальном размещении источников),
- график 4 соответствует m/v=1/4 (РРВ в диапазоне НF, РРВ диапазона UHF внутри зданий при двумерном и объемном размещении источников).

На рис. 4.5 приведены зависимости $D_{p0} = F(N_a)$ для $p(D < D_{II0}) = 0.9$ и **H=1, 2, 4, 8**. Аналогичные m/vпри различных зависимости для $p(D < D_{II0}) = 0.99$ приведены на рис. 4.6. Приведенные графики позволяют для различных условий РРВ оценить допустимое значение среднего числа ЭМП в точке размещения рецептора, при котором их динамический диапазон с вероятностью $\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{D} < \mathbf{D}_{\Pi 0})$ не превысит некоторой заданной величины $D_{\Pi 0}$. Например, при $\nu/m = 2$, что, в частности, соответствует условиям РРВ в системах мобильной связи, для $N_a = 100$, H = 1 имеем $D_{II0} \approx 60$ дБ для p = 0.9 и $D_{\Pi 0} \approx 80$ дБ для p = 0.99. Эти оценки вполне согласуются с практическими представлениями о характеристиках ЭМО в системах мобильной связи современного города.

Приведенные на рис 4.5, 4.6 кривые позволяют выполнить предварительный прогноз предельно допустимой средней пространственной плотности источников радиоизлучений, потенциально достижимой с учетом опасности превышения динамическим диапазоном ЭМО динамического диапазона рецептора ЭМП. Для этого достаточно, используя рис.4.5, 4.6, оценить предельно допустимую величину N_a и в соответствии с (4.11) разделить ее на размеры области потенциального электромагнитного взаимодействия радиуса $R_{max} = (C_v P_{etr}/\Pi_0)^{1/v}$, ограниченной некоторым минимальным наблюдаемым (регистрируемым) уровнем Π_0 интенсивности ЭМП.

Оценки с использованием (4.40) существенно зависят от вероятности **p**, с которой оцениваемое значение **D**_{П0} окажется за пределами доверительного интервала [0,**D**_{П0}]. На рис. 4.7 приведены графики, отражающие зависимости **D**_{П0}=**F**(**p**) для **N**_a=1000 и различных **m**/v при **H**=1,2,4,8. Эти кривые позволяют для заданных условий эксплуатации, для которых могут быть определены значения **N**_a и **m**/v, оценить вероятность **p**, с которой динамического диапазона **D**_{Ei} рецептора ЭМП.

4.6.4. Оценка выигрыша в динамическом диапазоне ЭМП АС за счет подавления наиболее мощных ЭМП в точке наблюдения

Соотношение (4.40) позволяет оценить уменьшение вероятного динамического диапазона ЭМП в точке наблюдения за счет устранения либо существенного уменьшения уровней ЭМИ от некоторого числа $\mathbf{K} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{I}$ наиболее близко расположенных источников. На рис. 4.8 приведены полученные из (4.40) расчетные зависимости $\mathbf{D}_{\Pi 0} = \mathbf{F}(\mathbf{H})$ для различных \mathbf{m}/\mathbf{v} при $\mathbf{N}_{a} = 100$ и $\mathbf{N}_{a} = 1000$, $\mathbf{p} = 0.99$ и $\mathbf{p} = 0.999$. Их анализ свидетельствует о следующем:

- устранение одного наиболее мощного излучения в точке наблюдения позволяет уменьшить вероятный динамический диапазон входных сигналов примерно на 10 дБ при m/v = 1/2 (интерференционное PPB) и примерно на 5 дБ при m/v = 1 (свободное PPB) для p = 0,9; для вероятности p = 0,99 выигрыш в динамическом диапазоне составит 20 – 25дБ при m/v = 1/2 и примерно 10 – 12дБ при m/v = 1;
- при H>4-8 дальнейшее увеличение Н не приводит к заметному уменьшению вероятного динамического диапазона входных сигналов. Это обстоятельство, в частности, позволяет упростить требования к процедурам и мероприятиям, касающимся устранения либо существенного уменьшения уровней наиболее мощных ЭМП в сетях мобильной связи, ограничиваясь их осуществлением только для 1 – 2 ближайших АС.

4.7. Математическая интерпретация полученных результатов

Базовая математическая модель, обеспечившая получение изложенных выше результатов, связана с изучением и использованием закономерностей взаимного расположения и взаимодействия точечных элементов в **m**-мерном Евклидовом пространстве, если вероятностный режим случайного равномерного размещения этих элементов в пространстве является пуассоновским (модель (3.2)), а для поля взаимодействия элементов в пространстве характерна связь вида (3.1). Обобщающий характер этой модели обеспечивает возможность единой интерпретации форм записи и механизмов формирования значительного числа известных распределений вероятностей, находящих самое широкое применение в статистике [84 – 88]. Действительно, полученные выше модели (4.7), (4.10) и (4.23) являются трехпараметрическими и в силу этого являются обобщающими по отношению к большой группе известных одно- и двухпараметрических функций распределений. Эти модели образованы с использованием эйлеровых интегралов I и II рода (полных и неполных гамма- и бета-функций). Представленное ниже обобщение математических конструкций данных моделей образует группу трехпараметрических моделей, представляющих интерес для использования в задачах аппроксимации, анализа и синтеза распределений вероятностей случайных переменных. При этом в отличие от известных кривых Пирсона [86, 89] и Джонсона [86, 90] рассматриваемые модели обеспечены единой схемой их интерпретации и механизмом формирования на основе случайного равномерного **m**-мерного размещения и взаимодействия точечных объектов.

Представим функцию распределения случайной величины **x** в следующем виде:

$$P_{1}(x) = \frac{\int_{a}^{b} \Phi(z)dz}{\int_{a}^{b} \Phi(z)dz}, \quad f'_{x}(x) = \frac{df(x)}{dx} > 0; \quad (4.41)$$

$$P_{2}(x) = \frac{\int_{a}^{b} \Phi(z)dz}{\int_{a}^{b} \Phi(z)dz}, \quad f'_{x}(x) < 0, \quad (4.42)$$

где $\Phi(z)$ – некоторая функция, не изменяющая знака и интегрируемая на отрезке **[a,b]**, который соответствует области возможных значений непрерывной монотонной функции **f**(**x**). Эта функция распределения характеризуется плотностью

$$\mathbf{w}(\mathbf{x}) = \frac{\operatorname{sgn}\{\mathbf{f}_{\mathbf{x}}'(\mathbf{x})\} \cdot \Phi[\mathbf{f}(\mathbf{x})] \cdot \mathbf{f}_{\mathbf{x}}'(\mathbf{x})}{\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \Phi(\mathbf{z}) d\mathbf{z}}.$$
(4.43)

Используя в соотношениях (4.41),(4.42) в числителе и знаменателе эйлеровы интегралы I и II рода, для **f**(**x**) вида степенной функции получим следующие варианты распределения (4.41) – (4.43) для **x≥0**:

$$P_{1}(x) = \frac{\gamma(H, Gx^{m})}{\Gamma(H)}; \quad w_{1}(x) = \frac{G^{H}m}{\Gamma(H)}x^{Hm-1}\exp\left(-Gx^{m}\right); \quad (4.44)$$

$$P_{2}(x) = \frac{\Gamma(H, Sx^{-n})}{\Gamma(H)}; \quad w_{2}(x) = \frac{S^{H}n}{\Gamma(H)}x^{-Hn-1}\exp\left(-Sx^{-n}\right); \quad (4.45)$$

$$P_{3}(x) = \frac{B'_{x}r(H,W)}{B(H,W)}; \quad w_{3}(x) = \frac{rx^{rH-1}(1-x^{r})^{W-1}}{B(H,W)}; \quad (4.46)$$

$$P_{4}(x) = \frac{B_{x^{-c}}^{''}(H,W)}{B(H,W)} = 1 - I_{x^{-c}}(H,W);$$

$$w_{4}(x) = \frac{cx^{-cH-1}(1-x^{-c})^{W-1}}{B(H,W)}.$$
(4.47)

Ниже приведены краткие характеристики каждого из этих распределений.

1. Распределение (4.44) совпадает с распределением (4.6)/(4.7), характеризуется параметрами **m**,**G**,**H** и имеет смысл распределения вероятностей расстояния **x** от произвольной точки в **m**-мерном евклидовом пространстве, выбранной в качестве начала координат, до **H**-го по удаленности от начала координат точечного элемента, если вероятностный режим случайного равномерного размещения этих элементов в пространстве является пуассоновским со средней пространственной плотностью $\rho = G/a_m = G\Gamma(1+m/2)/\pi^{m/2}$. В качестве некоторых частных случаев этой модели могут быть названы следующие известные распределения:

- при m=1 гамма-распределение и его частные случаи: χ²распределение (G=0,5), показательно-степенное распределение (G=1), показательное распределение (H=1), распределение Эрланга (при целых H);
- при m=2 распределение Накагами и распределение модуля многомерного вектора, а также их частные случаи: χ-распределение (G=0,5), распределения Максвелла (H=1,5), Рэлея (H=1) и нормальное (H=0,5);
- при **H=1** распределение Вейбулла.

Распределение (4.44) получено подстановкой в числитель и знаменатель (4.41) эйлерова интеграла II рода (гамма-функции) при $f(x) = Gx^m \ge 0$, $f_x' = Gmx^{m-1} > 0$; $H \ne 0, -1, -2, ...$

- 2. Распределение (4.45) совпадает с распределением (4.9) / (4.10), характеризуется параметрами **n**, **S**, **H** и имеет смысл распределения вероятностей энергетического параметра **x** поля, формируемого **H**-м по удаленности точечным элементом в произвольной точке **m**-мерного евклидова пространства, выбранной в качестве начала координат, если:
 - вероятностный режим случайного равномерного размещения этих элементов в пространстве является пуассоновским;
 - рассматриваемый параметр поля х=П_Н/П_{min} обратно пропорционален степени m/n расстояния R_H до H-го по удаленности точечного элемента: П_H=const/R_H^{m/n};
 - параметр S имеет смысл среднего числа элементов в области радиуса R_{max}, при нахождении в которой некоторого элемента параметр П_Н его поля в центре этой области может быть измерен оборудованием, имеющим пороговую чувствительность П_{min}.

Распределение (4.45) получено подстановкой в числитель и знаменатель (4.42) Эйлерова интеграла II рода (гамма-функции) при $f(x) = Sx^{-n} \ge 0$, $f_x' = -Snx^{-n-1} < 0$; $H \ne 0, -1, -2, ...$ В частности, при n = 1, S > 0, H > 0 оно вырождается в экспоненциально-гиперболическое распределение из семейства кривых Пирсона (тип V кривых в соответствии с принятой классификацией).

- 3. Распределение (4.46) получено подстановкой в числитель и знаменатель (4.41) Эйлерова интеграла I рода (бета-функции) при **f**(**x**)=**x**^r∈**[0,1**]; f_x'=rx^{r-1}≥0; H>0, W>0. При r=1 оно приобретает вид бета-распределения (тип I кривых Пирсона) и может быть интерпретировано как распределение **W-**й порядковой статистики вариационного ряда x₍₁₎,x₍₂₎,...,x_(W),...,x_(N), W=N-H+1, где члены ряда x_(i)=R_(i)/R_{max} имеют смысл значений относительного расстояния от точки наблюдения (начала координат) в **m**-мерном евклидовом пространстве до каждого из N точечных элементов, фактически попавших в сферическую область радиусом R_{max} (если вероятностный режим их случайного равномерного размещения в пространстве является пуассоновским).
- 4. Распределение (4.47) получено подстановкой в числитель и знаменатель (4.42) эйлерова интеграла I рода (бета-функции) при $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^{-c} \in [0,1]$; $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}^{'} = -\mathbf{c}\mathbf{x}^{-c-1} < \mathbf{0}$; $\mathbf{H} > \mathbf{0}$, $\mathbf{W} > \mathbf{0}$. Оно совпадает с распределением (4.22) / (4.23), характеризуется параметрами с, H, W и имеет смысл распределения W-й порядковой статистики вариационного ряда $\mathbf{x}_{(1)}, \mathbf{x}_{(2)}, ..., \mathbf{x}_{(W)}, ..., \mathbf{x}_{(N)}, \mathbf{W} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{1}$, где члены ряда $\mathbf{x}_{(i)} = \mathbf{\Pi}_{(i)} / \mathbf{\Pi}_{\min}$ имеют смысл значений относительного энергетического параметра поля, формируемого H-м по удаленности точечным элементом в произвольной точке **m**-мерного евклидового пространства, выбранной в качестве начала координат, если

- вероятностный режим случайного равномерного размещения этих элементов в пространстве является пуассоновским, и в сферическую окрестность точки наблюдения радиусом R_{max} фактически попало N точечных элементов, параметр П_(i) поля каждого из которых может быть измерен оборудованием, имеющим пороговую чувствительность П_{min};
- рассматриваемый параметр поля x_(H)=П_(H)/П_{min} обратно пропорционален степени m/c расстояния R_(H) до H-го по удаленности точечного элемента: П_(i)=const/R_(H)^{m/c}.

При **W=1** распределение (4.47) вырождается в степенное распределение, которое, в частности, может приобретать вид гиперболического распределения (3.37). Нетрудно также убедиться в связи моделей (4.47) с обобщенным распределением арксинуса, распределениями Снедекора, Парето, Стьюдента, Коши.

Применение моделей (4.44) – (4.47) при аппроксимации экспериментальных данных в ряде случаев позволяет не только подобрать аналитическую форму, наилучшим образом аппроксимирующую гистограмму случайной переменной, но и предположить возможный механизм ее формирования. В частности, при решении задач, связанных с аппроксимацией результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования уровней сигналов и помех в каналах мобильной и фиксированной радиосвязи, АМ– и FM–вещания, автор многократно сталкивался с ситуацией, когда аппроксимация выборочного распределения с использованием известных критериев согласия (Пирсона, Колмогорова – Смирнова, Романовского и т.п.) для объемов выборки 100 – 150 значений оказывалась наилучшей при использовании моделей (4.44), (4.45) по сравнению со стандартными распределениями из перечней [84 – 88] - логнормальным, Вейбулла, Накагами, а при объемах выборки более 150–200 значений модели (4.44), (4.45) оказывались предпочтительными, поскольку мера расхождения упомянутых стандартных моделей с экспериментальными данными становилась недопустимой.

В целом, приведенные соображения обеспечивают возможность реализации имитационного моделирования пространственно-распределенных радиосетей на транспортных магистралях (m=1), на территории (m=2) или в объеме многоэтажного здания (m=3), а также расширения области возможного применения полученных выше вероятностных моделей при решении разнообразных задач имитационного моделирования и компьютерного анализа статистических данных.

4.8. Заключительные замечания

Изложенные выше подходы обеспечивают возможность прогноза динамического диапазона ЭМП, формирующих ЭМО в точке наблюдения, в различных ситуациях.

Первый подход ориентирован на ситуации, когда пространственное размещение источников излучений в окрестности рассматриваемой точки пространства случайно и близко к равномерному, условия РРВ в окрестности этой точки хотя бы в первом приближении могут быть описаны степенной зависимостью вида (3.1)/(3.26), а прогноз может быть выполнен с использованием теоретических моделей. Этот подход позволяет решить задачу в общем виде и непосредственно установить связь исследуемой характеристики ансамбля входных сигналов с основными факторами, определяющими ЭМО в точке наблюдения.

Второй подход ориентирован на ситуации, когда известно распределение ЭМП по их уровням в ансамбле, присутствующем в точке наблюдения, и может быть использован при любом виде этого распределения. Он удобен при прогнозе динамического диапазона ЭМП в случаях, когда статистические характеристики ансамбля ЭМП определены на основе экспериментальных исследований. Выше показано, что оба подхода хорошо дополняют друг друга и при равномерном случайном пространственном размещении источников сигналов в области потенциального электромагнитного взаимодействия обеспечивают практическое совпадение оценок в случаях, когда может быть признана адекватной модель (3.1)/(3.26).

Необходимо отметить, что распределения (4.9)/(4.10) (а в конечном счете и распределения (4.22)/(4.23)) фактически описывают вероятностностатистические характеристики ППМ Π_{max} преобладающего (либо H-го по интенсивности) ЭМП в точке наблюдения при условии, что плотность случайного пространственного распределения источников ЭМП, по крайней мере в окрестности размещения точки наблюдения, постоянна. Эта величина оказывается выраженной в единицах ППМ, равных пороговому значению Π_{min} : Π_{max} =D_П Π_{min} . При этом вероятностно-статистические характеристики ППМ Π_{max} в точке наблюдения определяются исключительно величиной ЭИИМ P_{etr}, средней плотностью ρ и типом (параметр **m**) случайного "пуассоновского" пространственного размещения источников ЭМП, а также условиями РРВ (параметр **v**) в окрестности точки наблюдения.

В качестве примера ниже приведены распределения вероятности величины Π_{max} , полученные известным преобразованием (4.9)/(4.10) для случаев, представляющих наибольший интерес: для **m=2** (территориальное пространственное размещение источников и рецептора ЭМП), **v=2** (PPB в свободном пространстве), а также для **H=1** (подавление наиболее мощных ЭМП отсутствует, точка наблюдения соответствует случайному размещению рецептора ЭМП) и для **H=2** (осуществляется подавление наиболее мощного ЭМП в точке размещения рецептора ЭМП, либо точка наблюдения совмещена с одним из источников ЭМП):

<u>H=1:</u>

$$w(\Pi_{\max}) = \frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}^2} exp\left(-\frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right), \quad \Pi_{\max} > 0; \quad (4.48)$$

$$P(\Pi_{\max}) = \Gamma\left(1, \frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right) = exp\left(-\frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right); \qquad (4.49)$$

начальные моменты этого распределения отсутствуют;

<u>H=2:</u>

$$w(\Pi_{\max}) = \frac{\rho^2 P_{etr}^2}{16\Pi_{\max}^3} exp\left(-\frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right), \quad \Pi_{\max} > 0; \quad (4.50)$$

$$P(\Pi_{\max}) = \Gamma\left(2, \frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right) = \left(1 + \frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right) exp\left(-\frac{\rho P_{etr}}{4\Pi_{\max}}\right); \quad (4.51)$$

существует только первый начальный момент этого распределения, определяемый следующим простым соотношением:

$$\mathbf{m}_1(\boldsymbol{\Pi}_{\max}) = \rho \mathbf{P}_{\mathrm{etr}} / 4. \tag{4.52}$$

В целом, по мнению автора, главные особенности предложенных выше моделей (4.9)/(4.10) и (4.22)/(4.23) и их частных случаев состоят в следующем:

в "дифференциальном" определении (4.2) динамического диапазона сигналов как отношения уровня преобладающего сигнала к порогу восприимчивости рецептора ЭМП, хотя при изучении экологической опасности ЭМП, либо опасности нелинейных эффектов в РП часто используют определение в "интегральной" форме, в котором в числителе (4.2) фигурирует суммарная интенсивность ЭМП либо суммарный уровень сигналов на входе РП; в отсутствии начальных моментов распределений (4.9) / (4.10) и (4.22) / (4.23) в ряде важных практических случаев, когда Н мало.

Эти особенности могут рассматриваться как некоторые ограничения, в определенной степени затрудняющие использование приведенных результатов. Однако, по мнению автора, эти ограничения не носят характер принципиальных недостатков, поскольку:

- представленные результаты получены непосредственно на основе моделирования совокупности основных факторов, определяющих вероятностно-статистические характеристики ЭМО в точке наблюдения, поэтому любое упрощение предлагаемых моделей способно ухудшить их адекватность и разрушить взаимооднозначность их функциональной связи с характеристиками основных факторов, определяющих свойства моделируемых величин **D**, **П**_{max};
- наличие начальных моментов распределений (4.9) / (4.10) и (4.22) / (4.23) при H>1 позволяет найти в точке наблюдения суммарную интенсивность всех ЭМП за исключением 1 – 2 наиболее мощных, что позволяет исследовать ЭМО в месте размещения рецептора ЭМП как совокупность нескольких преобладающих по уровню ЭМП и электромагнитного фона, представляющего собой сумму всех прочих ЭМП в рассматриваемой точке;
- в пространственно-рассредоточенных радиосетях характер распределения сигналов по энергетическому параметру, в том числе распределения (3.37), таков, что выборки значений этого параметра всегда характеризуются значительным разбросом и присутствием существенно преобладающего по уровню значения (что подтверждается результатами моделирования на рис. 4.3, 4.4 и, в частности, связано с отсутствием в распределениях (4.9) / (4.10) и (4.22) / (4.23) начальных моментов для ситу-

аций, когда формирование электромагнитной обстановки осуществляется без исключения наиболее мощных сигналов (**H-n**v/m≤0);

- значения доверительной вероятности **р**, используемой при оценке динамического диапазона сигналов, с практической точки зрения выбираются в области **p>0,9**, что требует работы с "хвостами" распределений (4.9)/(4.10) и (4.22)/(4.23) и снижает интерес к моментам этих распределений;
- целый ряд практических случаев, связанных с обеспечением экологических требований и выполнением условий ЭМС, требует учета подавления либо регулировки уровня наиболее мощных ЭМП, что позволяет выполнить условия существования моментов (4.12), (4.24).

При этом указанные ограничения окупаются такими достоинствами, как:

- возможность получения аналитических оценок приемлемой сложности в наиболее важных практических случаях;
- возможность непосредственно установить связь динамического диапазона ЭМП в точке наблюдения с основными факторами, определяющими ЭМО в этой точке;
- возможность использования «безграничной делимости» пуассоновской модели (3.2) для иллюстрации практической независимости вида (4.9)/(4.10) и (4.22)/(4.23) от многих факторов, определяющих различия в ЭИИМ источников ЭМИ;
- возможность обобщений (4.44) (4.47) моделей (4.9) (4.10) и (4.22)/(4.23), демонстрирующих фундаментальные взаимосвязи рассматриваемых в данной работе задач со многими прикладными областями теории вероятностей и математической статистики, включая статистическую радиотехнику, теорию надежности технических систем и ряд других областей.

В целом, по мнению автора, представленный выше материал обладает достаточно серьезным потенциалом дальнейшего развития применительно к конкретным ситуациям и условиям, а также возможностями для решения практических задач прогноза возможной степени экологической опасности ЭМО в пространственно-рассредоточенных группировках РЭС. Этот потенциал в определенной мере будет продемонстрирован в последующих разделах, посвященных ряду конкретных проблем системной экологии сотовых радиосетей.

5. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЕТИ СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ

5.1. Базовая пространственная модель сотовой радиосети

Используем типовую пространственную модель сотовой радиосети, предполагающую следующее:

- многосайтовую регулярную идеализированную структуру сети с гексагональными по форме ячейками (сайтами) одинакового размера с БС, имеющими одинаковые высоты подвеса антенн H_{BS} в центрах ячеек, радиус описанной окружности каждой из которых равен R_{max} (рис. 5.1);
- размещение сети на малопересеченной местности, для которой могут использоваться модели радиоволн класса (3.1)/(3.26) – эмпирические модели (модель Окамура – Хата (v = 3,0 – 4,0), статистическая модель в соответствии с Рекомендацией 1546 МСЭ, ЕРМ-73 и т.п.) и другие, в обобщенной форме учитывающие влияние растительности, городской застройки, топографических и электрических неоднородностей поверхности, а также модель РРВ в свободном пространстве (v=2), известная "интерференционная" модель Введенского (v=4) и др.;
- случайное "пуассоновское" равномерное размещение на местности с вероятностным режимом (3.2) абонентов и, соответственно, АС сети с постоянной средней плотностью ρ[ед./кв.км];
- связь радиуса сайта \mathbf{R}_{max} с некоторой предельной величиной $\mathbf{S}_{max} = \mathbf{\Phi}(\mathbf{R}_{max})$ базовых потерь [дБ] при РРВ от АС к БС, которая связывает максимально требуемую ЭИИМ АС \mathbf{P}_{MSmax} [дБВт] и чувствительность \mathbf{P}_0 [дБВт] радиоприемного устройства (РПУ) БС [71]:



Рис. 5.1. Типовая идеализированная (регулярная) структура сотовой радиосети с гексагональными по форме ячейками (сайтами)

$$\mathbf{P}_{\mathrm{MS max}} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{S}_{\mathrm{max}} - \mathbf{G}_{\mathrm{A BS}},\tag{5.1}$$

где G_{ABS} – коэффициент усиления приемной антенны БС, дБ.

Используя эти модели и результаты [16, 22, 26], далее определим статистические характеристики ЭИИМ АС в сетях подобного вида, а также ее доли, поглощаемой телом человека, и оценим связь средней ЭИИМ АС с дискретностью регулировки мощности ЭМИ АС как основной технической меры снижения экологического риска в сетях, использующих различные технологии многостанционного радиодоступа.

5.2. Статистические характеристики ЭИИМ АС

Если в сайте радиусом \mathbf{R}_{max} случайно равномерно (с постоянной средней плотностью ρ [ед./кв.км] располагаются AC, то расстояния AC от

БС, расположенной в центре сайта, случайны. Если многоугольностью сайта пренебречь и считать его круглым радиуом \mathbf{R}_{max} , то плотность распределения вероятностей расстояния **R** от AC до БС имеет вид (3.14):

$$w(R) = \frac{2R}{R_{max}^2}, \quad 0 \le R \le R_{max}.$$

ЭИИМ АС P_{MS} [BT], необходимая для обеспечения радиосвязи на удаленности **R** от БС, определяется очевидным образом из (3.1):

$$\Pi_{0} = \frac{P_{0}}{S_{ABS}} = \frac{C_{\nu} P_{MS}}{R^{\nu}}, \text{ отсюда } P_{MS} = \frac{\Pi_{0} R^{\nu}}{C_{\nu}} = \frac{P_{0} R^{\nu}}{S_{ABS} C_{\nu}},$$
(5.2)

где $\Pi_0 [BT/M^2]$ – чувствительность РПУ БС «по полю», выраженная в единицах плотности потока мощности и связанная со значением P_0 чувствительности РПУ БС в (5.1) через эффективную площадь S_{ABS} приемной антенны БС: $P_0 = \Pi_0 S_{ABS}$.

Если в радиосети предусмотрена регулировка мощности ЭМИ АС в зависимости от ее удаленности от БС, то величина P_{MS} оказывается случайной величиной, функционально связанной со случайной величиной **R**. Вид плотности распределения вероятности ЭИИМ ЭМИ АС может быть определен по известной методике из (3.14),(5.2) [16]:

$$w(P_{MS}) = \frac{2}{\nu P_{MS}^{2/\nu} \Pr_{MS}^{1-2/\nu}}, 0 < P_{MS} \le P_{MS max};$$
(5.3)

$$P_{\text{MS max}} = \frac{\Pi_0 R_{\text{max}}^{\nu}}{C_{\nu}} = \frac{P_0 R_{\text{max}}^{\nu}}{S_{\text{A BS}} C_{\nu}}.$$

Распределение (5.3) получено для случая идеальной регулировки ЭИИМ ЭМИ АС; в этом случае **0**<**P**_{MS}<**P**_{MS max}.

<u>Пример 1:</u> v=2 (свободное PPB). В этом случае (5.3) приобретает вид равномерного распределения:

$$\mathbf{w}(\mathbf{P}_{\mathbf{MS}}) = \frac{1}{\mathbf{P}_{\mathbf{MS}\max}}.$$
(5.4)

<u>Пример 2:</u> v=4 (модель Введенского) В этом случае (5.3) приобретает вид гиперболического распределения:

$$w(P_{MS}) = \frac{1}{2\sqrt{P_{MS \max} P_{MS}}}, \quad 0 < P_{MS} \le P_{MS \max}.$$
 (5.5)

Из (5.3) может быть определено математическое ожидание ЭИИМ АС:

$$\left\langle P_{MS} \right\rangle = m_1 \left(P_{MS} \right) = \int_{0}^{P_{MS}} P_{MS} w(P_{MS}) dP_{MS} = \frac{2P_{MS \max}}{2 + \nu}.$$
 (5.6)

<u>Пример 3:</u> ν =4,49-0,655 lg H_{BS}, где H_{BS}[м] – высота подвеса антенны базовой станции (модель Окамура – Хата [71]). В этом случае при H_{BS}=const имеем

$$\langle P_{\rm MS} \rangle = \frac{2 P_{\rm MS\,max}}{6,49 - 0,655 \, \lg H_{\rm BS}}.$$
 (5.7)

Очевидно, что в тех случаях, когда в сети нет регулировки ЭИИМ AC, плотности распределений вероятностей (5.3) - (5.5) вырождаются в дельтафункцию Дирака в точке $P_{MS max}$ соответственно, и средние значения (5.6), (5.7) ЭИИМ AC в сайте также оказываются равным $P_{MS max}$.

Поскольку эмпирическая модель Окамура-Хата получена на основе статистической обработки больших массивов данных о затухании радиоволн при их распространении в условиях городской застройки (urban area) большого (large city) и среднего (medium city) города, в условиях пригорода (suburban area) и в сельской местности (open area), приведенные выше выводы дают общее представление о статистических характеристиках используемой ЭИИМ АС сотовой связи для достаточно широкого класса условий эксплуатации АС вне помещений.

Влияние затухания радиоволн в зданиях при использовании AC внутри помещений способно изменить вид статистических распределений ЭИИМ AC в сотовой сети по сравнению с (5.3) - (5.7). Поэтому большой интерес представляет статистическая обработка «внутренних» данных компьютеров сотовых радиосетей 2G/3G о значениях мощности ЭМИ AC в этих сетях при каждом соединении с учетом ее регулировки базовыми станциями. Полученные таким образом данные о характеристиках w(P_{MS}) позволили бы наиболее объективно оценивать экологическую опасность (либо безопасность) сотовых радиосетей в соответствии с принятыми критериями.

5.3. Характеристики поглощаемой телом человека мощности ЭМИ АС

Доля P_A мощности P_{MS} ЭМИ AC, поглощаемая телом человека, в основном тканями головы, составляет 15 – 50% от P_{MS} и существенно зависит от диапазона рабочих частот радиосети, достигая максимума в полосах частот 1,5 – 4 ГГц [4]. Отсюда с учетом того, что $P_A=kP_{MS}$, $k\approx const<1$, получим вид плотности распределения вероятности и математическое ожидание поглощаемой телом человека мощности P_A :

$$w(P_A) = \frac{2}{\nu k^{2/\nu} P_{MS \ max}^{2/\nu} P_A^{1-2/\nu}}, \ 0 < P_A \le k P_{MS \ max};$$
(5.8)

$$\langle \mathbf{P}_{\mathbf{A}} \rangle = \mathbf{m}_{1} \left(\mathbf{P}_{\mathbf{A}} \right) = \frac{2\mathbf{k}\mathbf{P}_{\mathbf{MS}\max}}{2+\nu} = \frac{2\mathbf{k}\mathbf{P}_{0}\mathbf{R}_{\max}^{\nu}}{\mathbf{S}_{\mathbf{A}}\operatorname{BS}\mathbf{C}_{\nu}(2+\nu)}.$$
 (5.9)

Очевидно, что при отсутствии в сети регулировки ЭИИМ АС плотность

распределения вероятностей (5.8) вырождаются в дельта-функцию Дирака в точке $P_{A max}=kP_{MS max}$, и среднее значение (5.9) поглощаемой телом человека доли ЭИИМ АС в сайте также оказывается равным $P_{A max}$.

Если **k** является случайной величиной с известным законом распределения вероятностей, для которого существует первый начальный момент (**k**), то (5.9) может быть уточнено следующим образом:

$$\langle \mathbf{P}_{\mathbf{A}} \rangle = \langle \mathbf{k} \rangle \langle \mathbf{P}_{\mathbf{MS}} \rangle = \frac{2 \Pi_0 \mathbf{R}_{\mathbf{max}}^{\mathbf{v}}}{\mathbf{C}_{\mathbf{v}} (2 + \mathbf{v})} \langle \mathbf{k} \rangle = \frac{2 \mathbf{P}_0 \mathbf{R}_{\mathbf{max}}^{\mathbf{v}}}{\mathbf{S}_{\mathbf{A} \mathbf{BS}} \mathbf{C}_{\mathbf{v}} (2 + \mathbf{v})} \langle \mathbf{k} \rangle.$$
(5.10)

В частности, для модели РРВ Окамура – Хата и для корневых частот IMT-2000, а также для GSM-1800, где можно принять **k≈0,5**, получим следующее оценочное соотношение:

$$\langle P_A \rangle \approx \frac{\Pi_0 R_{max}^{4,49-0,655 \, lg \, H_{BS}}}{C_{\nu}(6,49-0,655 \, lg \, H_{BS})} = \frac{P_0 R_{max}^{4,49-0,655 \, lg \, H_{BS}}}{S_{A \, BS} C_{\nu}(6,49-0,655 \, lg \, H_{BS})}.$$
 (5.11)

5.4. Влияние дискретной регулировки уровня ЭМИ АС

Влияние дискретной регулировки мощности ЭМИ АС на среднюю мощность ЭМИ АС может быть оценено следующим образом [16,19, 22]. Предположим, что в системе реализована «идеальная» регулировка мощности АС (вне зависимости от местоположения абонентской станции в пределах зоны обслуживания обеспечивается минимальный уровень полезного сигнала на входе приемных устройств БС, необходимый для нормального качества двухсторонней радиосвязи). Тогда среднее значение ЭИИМ АС определяется соотношениями (5.6),(5.7). В частности, для условий РРВ, для которых характерно наличие прямого и отраженного лучей (модель Введенского, v=4) из соотношения (5.6) имеем (P_{MS})= $P_{MSmax}/3$. Таким образом, в этих условиях «идеальная» регулировка мощности излучения позволяет уменьшить среднюю мощность ЭМИ АС в 3 раза.

В случае если в системе предусмотрена дискретная регулировка мощности ЭМИ АС с шагом **ΔР**[дБ], выражение для среднего значения ЭИИМ АС записывается следующим образом:

$$\langle \mathbf{P}_{\mathbf{MS}} \rangle = \sum_{j=1}^{\infty} \mathbf{P}_{j} \int_{\mathbf{R}_{j+1}}^{\mathbf{R}_{j}} w(\mathbf{R}) d\mathbf{R}, \quad v \lg \left(\frac{\mathbf{R}_{j+1}}{\mathbf{R}_{j}} \right) = -\frac{\Delta \mathbf{P}}{10}; \quad j \in [1,...,J],$$
 (5.12)

где P_j – мощность абонентской станции на **j**-м шаге регулировки; R_j и R_{j+1} - границы интервала расстояний AC от БС, в пределах которого абонентская станция имеет мощность P_j (см. рис. 5.2).

В результате окончательное выражение для среднего значения ЭИИМ АС приобретает следующий вид:



Рис. 5.2. Зависимость ЭИИМ AC при дискретной и непрерывной регулировке ЭМИ от расстояния до БС
$$\langle P_{MC} \rangle = P_{MS max} \ 10^{\frac{\Delta P}{10}} \frac{10^{\frac{\Delta P}{5\nu}} - 1}{\frac{\Delta P(2+\nu)}{10^{\frac{\Delta P(2+\nu)}{10\nu}} - 1}} [B_T];$$
 (5.13)

в этом выражении величина $P_{MS max}$ имеет размерность [BT], а ΔP выражена в децибелах.

Нетрудно убедиться, что для условий РРВ, характерных для сотовых радиосетей дециметрового диапазона (v=3,5 – 4), регулировка ЭИИМ АС обеспечивает существенное снижение среднего уровня ЭМИ АС.

В частности для v=4 (модель РРВ Введенского), в случае ступенчатой регулировки мощности излучения с шагом 2 дБ (GSM) и 0,5 дБ (CDMA) средняя мощность излучения равна $\langle P_{MS} \rangle = 0,415 P_{MS max}$ и $\langle P_{MS} \rangle = 0,363 P_{MS max}$ соответственно. В этих условиях выигрыш CDMA по сравнению с GSM в экологической безопасности (без учета прочих факторов) составляет не более 0,6 дБ. Зависимость отношения $P_{MS}/P_{MS max}$ от шага ступенчатой регулировки мощности излучения для этих условий РРВ приведена на рис.5.3.

Близкая к идеальной регулировка мощности ЭМИ АС позволяет уменьшить среднюю мощность ЭМИ АС в три раза; в случае ступенчатой регулировки ЭМИ АС с шагом 2 дБ (GSM) и 0,5 дБ (CDMA) средняя мощность ЭМИ АС может быть уменьшена в среднем в 2,4 раза в сетях GSM и в 2,75 раз в сетях CDMA [19]. Использование эмпирической модели PPB Окамура – Хата также подтверждает существенное уменьшение средней мощности ЭМИ АС за счет регулировки последней: в 2,0 – 2,2 раза в сетях GSM и в 2,3 – 2,5 раз в сетях CDMA.

Изложенное в части, касающейся оценок степени уменьшения средней ЭИИМ AC за счет автоматической регулировки мощности ЭМИ AC в зависимости от фактически необходимой энергетики радиолинии «AC-БС»,



Рис. 5.3. Зависимость уменьшения средней ЭИИМ АС в сети от степени дискретности ее регулировки

в достаточной степени адекватно для радиосетей, использующих технологии FDMA, TDMA и их комбинации (GSM, TETRA и т.п.). Однако применительно к сетям CDMA данные выводы носят в значительной мере предварительный характер.

Дело в том, что добровольные экологические риски в сетях FDMA/TDMA, связанные с использованием AC, не зависят от мгновенной пространственной плотности абонентов и их активности и определяются исключительно пространственной структурой сети, которая лишь косвенно (через процессы планирования, проектирования и строительства сети) связана с прогнозируемым трафиком в часы максимальной нагрузки. Действительно, в приведенных выше соотношениях (5.2) – (5.13) отсутствует какаялибо зависимость от средней территориальной плотности AC ρ [ед./кв.км] либо от числа (среднего, мгновенного и т.п.) работающих AC в пределах сайта или соответствующей нагрузки БС.

Иная ситуация характерна для сетей, использующих технологию

СDMA. В этих сетях ЭИИМ АС зависит как от удаленности абонента от БС, так и от степени загруженности данной БС, а фактически необходимая энергетика радиолинии «AC-БС» зависит как от потерь при PPB на трассе «AC-БС», так и от числа AC, одновременно работающих в частотном канале с кодовым разделением сигналов. Влияние последнего фактора на среднюю ЭИИМ AC рассмотрим ниже.

5.5. Средняя ЭИИМ АС в сетях, использующих технологию СDMA

Средняя мощность ЭМИ АС в сети CDMA в общем виде может быть определена следующим образом:

$$\langle \mathbf{P}_{\mathbf{MS}} \rangle = \sum_{n=0}^{N_{\max}} \mathbf{p}_n \int_{0}^{R_{\max}} \mathbf{P}_{\mathbf{MS} n}(\mathbf{R}) \mathbf{w}(\mathbf{R}) d\mathbf{R},$$
 (5.14)

где

- N_{max} максимальное количество одновременно обслуживаемых абонентов в одном частотном канале;
- **p**_n вероятность одновременной работы **n** абонентов в одном частотном канале;
- R_{max} расстояние до границы зоны обслуживания при максимальной загрузке частотного канала;
- P_{MSn}(R) зависимость мощности излучения абонентской станции от расстояния до базовой станции при условии одновременной работы
 n абонентов в одном частотном канале, Вт;
- **w(R)** плотность распределения вероятности удаления абонента от БС.

При равномерном случайном пространственном распределении абонентов в пределах зоны обслуживания базовой станции w(R) имеет вид (3.14). С учетом известной модели обслуживания «Erlang-B» [91] вероятность одновременной работы **n** абонентов определяется следующим образом [21, 22]:

$$p_{n} = \frac{\frac{E^{n}}{n!}}{\sum_{k=0}^{N_{max}} E^{k} / k!}$$
(5.15)

где **E** - абонентская нагрузка, Эрл, на один частотный канал. Абонентская нагрузка однозначно определяется максимальным количеством каналов трафика **N**_{max} в одном частотном канале и вероятностью **p**_b блокирования вызова, вызываемого отсутствием свободного канала трафика [91].

Максимальное количество каналов трафика, организуемых в одном частотном канале, определяется исходя из минимального отношения энергии, приходящейся на один бит передаваемой информации E_b к спектральной плотности помехи (шума) N_0 , нормируемой для каждой системы связи, и усиления обработки (эффективной базы сигнала) **В**:

$$N_{\max} = Int \left\{ \frac{B}{E_b / N_0} + 1 \right\}.$$
 (5.16)

Зависимость мощности излучения абонентской станции от расстояния до базовой станции при условии одновременной работы **n** абонентов в одном частотном канале описывается следующим выражением:

$$P_{MS n}(R) = P_{max}(R) \frac{B - {\binom{E_b}{N_0}}(N_{max} - 1)}{B - {\binom{E_b}{N_0}}(n - 1)},$$

где $P_{max}(R) = P_{MS max}(N_{max}) 10^{\nu lg(R/R_{max})};$

P_{MS max}(**N**_{max}) – мощность абонентской станции в [Вт] при условии максимальной загрузки частотного канала, обеспечивающая связь заданного качества на границе зоны обслуживания.

Произведя ряд преобразований, получим:

$$P_{\text{MS n}}(R) = P_{\text{max 1}}(R) \frac{B}{B - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)(n-1)},$$
5.17)

где

 $P_{\max 1}(R) = P_{MS\max}(1)10^{\nu \log(R/R_{\max})};$

P_{MS max}(1) – мощность абонентской станции при условии загрузки частотного канала только одним каналом трафика, обеспечивающая связь заданного качества на границе зоны обслуживания.

Учитывая (5.15) – (5.17), получим оценку средней мощности ЭМИ АС в сетях, использующих технологию CDMA, при следующих условиях: – при условии идеальной непрерывной регулировки мощности ЭМИ АС:

$$\left< P_{MS} \right> = \frac{P_{01}S_{ABS}R_{max}^{\nu}}{C} \frac{2}{2+\nu} \sum_{n=0}^{N_{max}} \frac{\frac{E^{n}}{n!}}{\sum_{k=0}^{N_{max}} \frac{E^{k}}{k!}} \frac{B}{B - {\binom{E_{b}}{N_{0}}}(n-1)}; \quad (5.18)$$

- при условии дискретной регулировки мощности с шагом **ДР**[дБ]:

$$\left\langle \mathbf{P_{MS}} \right\rangle = \frac{\mathbf{P_{01}S_{ABS}R_{max}^{\nu}}}{C} \mathbf{K}_{\nu,\Delta P} \mathbf{K}(\mathbf{B},\mathbf{E},\frac{\mathbf{E_b}}{\mathbf{N_0}}), \qquad (5.19)$$

где **P**₀₁ – чувствительность приемника базовой станции, [Вт] при условии загрузки частотного канала только одним каналом трафика; вклад в уменьшение средней мощности ЭМИ АС за счет дискретной регулировки мощности ЭМИ АС определяется множителем:

$$K_{\nu, \Delta P} = 10^{\frac{\Delta P}{10}} \frac{10^{\frac{\Delta P}{5\nu}} - 1}{\frac{\Delta P}{10^{\frac{\Delta P}{5\nu}} - 1}},$$

а влияние на среднюю мощность ЭМИ АС интенсивности трафика, обрабатываемого БС, определяется множителем

$$K(B, E, \frac{E_b}{N_0}) = \sum_{n=0}^{N_{max}} \frac{\frac{E^n}{n!}}{\sum_{k=0}^{N_{max}} \frac{E^k}{k!}} \frac{B}{B - (\frac{E_b}{N_0})(n-1)}.$$

На рис. 5.4 приведены зависимости $\mathbf{K}_{\nu,\Delta P}$ и $\mathbf{K}(\mathbf{B},\mathbf{E},\mathbf{E}_b/\mathbf{N}_0)$ для системы сотовой связи стандарта IS-95 (CdmaOne) от вероятности блокирования вызова \mathbf{p}_b (загруженности системы), шага регулировки мощности ΔP и высоты подвеса антенны базовой станции \mathbf{H}_b (эта высота определяет параметр ν в (3.1) при использовании модели Окамура – Хата).

На рис. 5.5 приведены расчетные зависимости от интенсивности трафика отношений средней мощности излучения абонентского терминалов стандарта GSM-1800 и терминалов со стандартной аналоговой PM к средней мощности излучения терминалов стандартов Cdma2000 и UMTS для сайтов одинакового размера.

При построении зависимостей использовались основные параметры систем подвижной радиосвязи [12, 60 – 63], приведенные ниже в табл. 5.1.



Рис. 5.4. Кривые, характеризующие уменьшение средней мощности ЭМИ АС в сетях IS-95, использующих технологию CDMA, с уменьшением вероятности **P**_b блокирования вызова в сети и уменьшения шага Δ**P** регулировки мощности ЭМИ АС



Рис. 5.5. Соотношение средней мощности излучения абонентских терминалов различных систем подвижной радиосвязи

Таблица 5.1

	GSM-1800	CDMA 2000	UMTS	РМ-аналог
Р ₀₁ , дБм	-105 ^{*)}	-125*)	-125*)	-117
Е _b /N ₀ , дБ	9	4	3	-
ΔР, дБ	2	0,5	0,5	3
Δf, MΓų	0,2	1,25	3,84	0,017
Сь, кБит/с	270,8	9,6	12,2	-
F, дБ	5	5	5	_

Базовые параметры систем подвижной радиосвязи

^{*)} Чувствительность приемника базовой станции [дБм] определяется в соответствии с выражением –174+10lg(C_b)+E_b/N_o+F, где C_b – скорость информационной модуляции, Бит/с; F – коэффициент шума приемника, дБ [92].

Таким образом, имеющийся запас между пиковой и фактической нагрузкой в сетях CDMA является дополнительной «степенью свободы» с точки зрения обеспечения экологии сети. При пиковых нагрузках экологические характеристики сетей CDMA значительно проигрывают аналогичным характеристикам сетей GSM и аналоговых сетей 1-го поколения, однако в периоды, когда нагрузка в сети значительно меньше пиковой (что справедливо, по крайней мере, для 80 – 90% времени), дополнительный выигрыш в ЭИИМ АС (за счет выигрыша в реальной чувствительности РПУ «недогруженной» БС сети CDMA по сравнению с реальной чувствительностью РПУ БС сети GSM) может достигать 4 – 7 дБ. В действительности этот выигрыш, по данным [93], несколько меньше; можно предположить, что последнее объясняется более высоким уровнем в сети CDMA внутрисетевых взаимных помех, обусловленных упрощенной кластерной структурой этих сетей, в частности, использованием смежных и даже совпадающих частотных каналов с кодовым разделением в соседних секторах одной и той же БС, а также соседними БС в примыкающих зонах обслуживания.

Приведенные выше соотношения и зависимости обеспечивают возможность общей качественной и количественной оценки влияния наличия и величины шага регулировки мощности ЭМИ АС, требований к вероятности блокирования вызова в сети, а также высот подвеса антенн БС в сетях сотовой связи, использующих различные технологии многостанционного доступа, на их экологичность, определяемую средней мощностью ЭМИ АС. Они непосредственно могут быть использованы при обосновании требований к параметрам действующих и перспективных сетей мобильной связи, при которых обеспечивается приемлемый для абонентов уровень средней излучаемой мощности АС.

152

5.6. Влияние пространственно-частотной структуры (кластера) радиосети с FDMA/TDMA на минимально используемый уровень полезного сигнала и ЭИИМ АС

С точки зрения экологии сотовой связи большой интерес представляет анализ влияния особенностей структуры и топологии сотовой радиосети на используемые в ней мощности ЭМИ АС. Результаты [16] такого анализа призваны объективно охарактеризовать влияние на экологичность сотовых радиосетей принимаемых при их реализации системных решений.

Для оценки наибольшего значения ЭИИМ АС, располагаемой на наибольшем удалении от БС (на границе сайта радиусом \mathbf{R}_{max}) необходимо определить реальное значение чувствительности \mathbf{P}_0 РПУ БС, которое зависит как от уровня собственных шумов \mathbf{P}_N РПУ БС, приведенных к его входу, так и от уровня $\mathbf{P}_{\Sigma INT}$ суммарной приведенной входной внутрисетевой помехи (в наиболее корректном варианте определяемой с учетом помех по основному и соседним каналам приема); уровень суммарной внутрисетевой помехи определяется параметрами кластера, принятыми при частотнотерриториальном планировании сети.

Радиус сайта **R**_{max} определяет предельную величину базовых потерь при распространении радиоволн (PPB) от АС к БС:

$$S_{max} = \Phi(R_{max}) = P_{MS max}(R_{max}) [\Box BBT] - P_0 [\Box BBT] + G_{ABS} [\Box B],$$

которая связывает наибольшую в пределах сайта ЭИИМ АС $P_{MS max}$ и реализуемую в сети чувствительность P_0 РПУ БС при заданном коэффициенте G_{ABS} усиления антенны БС. В свою очередь, чувствительность P_0 РПУ БС, приведенная к выходу ее приемной антенны, определяется следующим соотношением:

 $\mathbf{P}_{0} \left[\mathtt{Д} \mathtt{\overline{B}} \mathtt{B} \mathtt{T} \right] = (\mathbf{P}_{\mathrm{N}} + \mathbf{P}_{\Sigma \text{ int}}) [\mathtt{Д} \mathtt{\overline{B}} \mathtt{B} \mathtt{T}] + \mathbf{Q} \left[\mathtt{Д} \mathtt{\overline{B}} \right],$

где

- P_N уровень собственных шумов РПУ БС, приведенный ко входу приемной антенны БС;
- P_{Σ int} уровень суммарной внутрисетевой помехи на входе РП БС от АС других сайтов сети, использующих совмещенные и соседние каналы; определяется параметрами кластера, принятыми при частотно-территориальном планировании сети, а также характеристиками избирательности РПУ АС по соседним каналам и характеристиками ми внеполосных ЭМИ АС;
- Q минимальное защитное отношение "сигнал / (собственный шум + внутрисетевая помеха)", необходимое для нормального функционирования РПУ БС.

Таким образом, для оценки требуемого наибольшего значения ЭИИМ AC в пределах сайта радиусом \mathbf{R}_{max} необходимо прежде всего определить фактическое значение реализуемой чувствительности \mathbf{P}_0 РПУ БС.

Для обеспечения нормального качества связи в радиосети необходимо обеспечить превышение минимально используемой мощностью полезного сигнала $P_{u\mbox{ min}}$ [BT] на входе РП БС уровня эквивалентной мощности суммарной помехи $P_N + P_{\Sigma\mbox{ int}}$ [BT] в заданное число раз, равное защитному отношению Q:

$$\frac{\mathbf{P}_{\mathrm{u}\,\mathrm{min}}}{\mathbf{P}_{\mathrm{N}} + \mathbf{P}_{\sum\,\mathrm{int}}} \ge \mathbf{Q}\,. \tag{5.20}$$

Если требуемое минимальное защитное отношение Q меньше значения Q_{CL} защитного отношения для суммарной внутрисетевой помехи, характерного для выбранного типа кластера

$$Q < Q_{CL} = \frac{P_u}{P_{\sum int}},$$
(5.21)

где **P**_u – обеспечиваемый в сети уровень полезного сигнала при внутрисете-

вой помехе уровня $P_{\Sigma int}$, то можно найти минимально используемую мощность полезного сигнала $P_{u min}$, привязанную к собственным шумам РПУ БС и определяющую фактическое значение реализуемой в сети чувствительности радиоприема БС:

$$P_{\Sigma int} = \frac{P_{u \min}}{Q_{CL}}, \qquad \frac{P_{u \min}}{P_{N} + \frac{P_{u \min}}{S_{CL}}} \ge Q.$$

Отсюда

$$P_{u\min} \ge P_N \frac{QQ_{CL}}{Q_{CL} - Q} = P_0, \ Q < Q_{CL},$$
(5.22)

и выражение для средней ЭИИМ АС приобретает следующий вид:

$$m_{1}(P_{MS}) = \frac{2P_{N}QQ_{CL}S_{max}}{(Q_{CL} - Q)(2 + \nu)G_{ABS}}, \quad \nu \ge 2; \quad Q < Q_{CL}; \quad (5.23)$$

в соотношениях (5.20) – (5.23) все величины выражены в абсолютных единицах, а не в дБ, дБВт.

Соотношение (5.22) отражает зависимость максимально достижимой чувствительности радиоприема БС от соотношения значений Q и Q_{CL} . Если $Q_{CL} >> Q$, то чувствительность РПУ БС приближается к значению $P_0 = = P_N Q$, определяемому его внутренними тепловыми шумами. С приближением Q_{CL} к Q достижимая чувствительность РПУ БС резко ухудшается, поскольку для достижения в сети требуемого значения защитного отношения Q необходимо резко увеличивать величину минимально используемой мощности полезного сигнала $P_{u \ min}$, чтобы за счет пропорционального возрастания суммарной внутрисетевой помехи $P_{\Sigma \ INT}$ ослабить влияние собственных шумов P_N на разницу между величинами (5.20) и (5.21). При $Q_{CL} \leq Q$ требуемое качество связи в сети недостижимо из-за высокого уровня суммарной внутрисетевой помехи.

Соотношение (5.23) отражает зависимость средней ЭИИМ AC от соотношения значений Q и Q_{CL}. Если Q_{CL} >> Q, то средняя ЭИИМ AC приближается к минимально необходимому значению. С приближением Q_{CL} к Q средняя мощность ЭИИМ AC в сети резко возрастает, что также связано с необходимостью резко увеличивать величину минимально используемой мощности полезного сигнала $P_{u min}$ для достижения в сети требуемого значения защитного отношения Q; экологичность сети при этом резко ухудшается. При Q_{CL} \leq Q требуемое качество связи в сети недостижимо из-за высокого уровня суммарной внутрисетевой помехи при любой сколь угодно большой ЭИИМ AC.

Таким образом, приведенные выше соотношения позволяют связать среднюю ЭИИМ AC в сети через достижимую при выбранном кластере чувствительность $P_{U min} = P_0$ РП БС с базовым параметром кластера Q_{CL} и в целом фактически связать экологичность радиосети с требованиями к качеству связи и принятой частотно-территориальной структурой (кластером) радиосети.

При этом необходимо отметить следующие обстоятельства, позволяющие существенно расширить поле зрения в данной области:

- а) тип кластера, характеризуемый параметром Q_{CL} , определяет порядок и эффективность использования радиочастотного ресурса (РЧР) в сети, так что соотношения (5.22),(5.23) могут быть использованы для исследования связи экологических характеристик сети с характеристиками эффективности использования выделенного этой сети радиочастотного ресурса (РЧР);
- б) используя подход, изложенный выше в разд. 5.3, нетрудно оценить среднюю мощность ЭМИ АС, поглощаемой телом человека, в условиях, когда дополнительно известны значения Q_{CL}, Q, P_N;
- в) величина Q_{CL} в определенной мере зависит от степени случайности раз-

мещения БС в радиосети [94 – 96], поэтому соотношения (5.22), (5.23) могут быть использованы для косвенной оценки влияния степени нерегулярности структуры сети на ее экологичность.

5.7. Влияние случайности топологии сети на ее экологичность

Сотовый принцип построения сетей мобильной связи предполагает регулярность структуры сети, в идеальном случае элементарные ячейки которой имеют вид правильных шестиугольников с размещенными в центре ячеек базовыми станциями [54 – 57, 74, 91]. В действительности нерегулярность рельефа, городской застройки, транспортных коммуникаций и растительности, наличие водоемов и другие факторы препятствуют строгому соблюдению регулярности структуры сети. Происхождение вынужденных нарушений регулярности пространственной структуры сотовой радиосети в процессе ее планирования иллюстрируется рис. 5.6, 5.7.

На начальной стадии планирования сети в условиях крупного города исходя из ряда соображений (планируемый трафик, планируемый объем инвестиций и т.п.) определяются требуемое число сайтов и первичная гипотетическая регулярная структура сети (см. рис. 5.6). Далее, в процессе выбора и согласования в установленном порядке реального места размещения БС каждого сайта с учетом возможности размещения БС на ближайших к гипотетическим центрам сайтов зданиях и сооружениях либо возможности землеотвода для строительства антенных опор происходит смещение фактических мест размещения БС по отношению к гипотетическим центрам сайтов (например, в направлениях, указанных стрелками на рис. 5.6).

В результате регулярность пространственной структуры сети нарушается; зоны ответственности БС теряют правильную (в геометрическом смы-



Рис. 5.6. Начальная стадия планирования сети, на которой оцениваются требуемое число сайтов, и формируется первичная гипотетическая регулярная структура сети



Рис. 5.7. Зоны ответственности и локальные области с повышенным уровнем мощности ЭМИ АС после уточнения возможных мест установки БС

сле) форму (рис. 5.7). Кроме того, у границ зон ответственности отдельных БС появляются области, удаленные от обслуживающих эти области БС на расстояния, превышающие величину \mathbf{R}_{max} (выделены жирными замкнутыми линиями на рис. 5.7); в этих областях требуется использование повышенных уровней ЭМИ АС для обеспечения нормального качества связи, что ухудшает экологичность сети.

Таким образом, размещение БС сети приобретает случайный характер, что сказывается и на ее внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС), в первую очередь – на случайности отношения сигнал/помеха при приеме сигнала абонентскими станциями, и, как следствие – на ухудшении качества предоставляемых сетью услуг (в связи с уменьшением величины Q_{CL} в (5.23)). Компенсация этого ухудшения производится автоматически увеличением мощности ЭМИ отдельных АС, что также ухудшает экологическую безопасность сети.

Анализу влияния случайности размещения БС на некоторые характеристики сотовой сети, касающиеся качества обслуживания абонентов и внутрисистемной ЭМС, посвящены работы [94 – 96], однако, в целом, вопрос влияния случайности размещения БС на характеристики сотовых радиосетей исследован недостаточно. На практике обусловленная данной причиной существенная нерегулярность пространственной структуры сети часто делает невозможным применение традиционного кластерного подхода к частотному планированию ее городских фрагментов, равно как и к оценке ожидаемого уровня качества связи и уровня экологичности сети.

При оценке влияния на экологичность сотовой сети случайности ее пространственной топологии используем следующие модели и предположения, а также результаты [24, 94 – 96]:

1. Поскольку центр ячейки является естественным центром группирования фактических мест размещения БС, естественно использовать следующие вероятностные модели параметров пространственного размещения БС:

- нормальное распределение отклонения БС от гипотетического центра ячейки при равномерном распределении азимута отклонения БС;
- отношение **о**/**R**_{max} среднеквадратического отклонения положения БС от гипотетического центра ячейки к радиусу ячейки как характеристику случайности размещения БС в сети.

2. В силу естественного стремления к регуляризации структуры сети наибольший практический интерес представляет случай $0 \le \sigma/R_{max} \le 0.5$.

3. При выполнении обобщенных оценок можно пренебречь случайностью условий PPB за счет влияния отдельных элементов морфологии подстилающей поверхности (затенения и переотражения зданиями и элементами рельефа, затенения отдельными очагами растительности и т.п.); оценку производим в обобщенной форме, используя гиперболическую модель PPB (в частности в варианте модели Окамура – Хата [71]), в показателе степени которой интегрально учтено влияние этих факторов на затухание радиоволн между AC и БС.

4. На начальном этапе ограничимся оценками применительно к сотовой сети, реализуемой с использованием трехсекторной структуры с размерностью кластера N=4 как очень распространенного при построении сетей GSM-900/1800 в условиях ограниченности выделяемого сети радиочастотного ресурса.

5. При анализе обоих вышеназванных факторов, ухудшающих экологическую безопасность сети при нарушении регулярности ее пространственной структуры – появления зон с повышенным уровнем ЭМИ АС (фактор 1) и ухудшения внутрисетевой ЭМС (ухудшения отношения сигнал/помеха) в местах размещения АС (фактор 2) взаимосвязью этих факторов в первом приближении можно пренебречь, поскольку первый фактор

160

проявляется только у границ зон ответственности БС, а со вторым фактором следует считаться в пределах всей зоны ответственности БС.

В рамках изложенных выше ограничений для различных уровней случайности размещения БС в сети получены следующие семейства кривых, обеспечивающие возможность оценки влияния случайности (нерегулярности) пространственной структуры сотовой радиосети на ее экологическую безопасность [24, 95, 96]:

- Кривые вероятности превышения в сети заданного отношения "сигнал/помеха" Q_{CL} при 0,01 ≤ σ/R_{max} ≤ 0,5 для кластера размерности 4 с трехсекторными антеннами (рис. 5.8).
- 2. Кривые функции распределения вероятности значений отношения S_D/S_0 площади S_D части зоны ответственности, удаленной от БС на расстояния, превышающие R_{max} (выделены на рис. 5.7), к площади зоны ответственности БС (рис. 5.9).

Анализ этих кривых свидетельствует о следующем:

- Суммарная площадь областей с повышенным уровнем ЭМИ АС могут достигать 20...30 % совокупной площади покрытия сотовой радиосети при обычном уровне значимости (доверительной вероятности)
 P=0,95...0,98, используемом при проектировании сотовых радиосетей. В этих условиях ликвидация областей с повышенным уровнем ЭМИ АС может быть достигнута при первичном планировании сети увеличением в 1,2...1,5 раза пространственной плотности БС (уменьшением величины R_{max} в 1,1...1,25 раза по сравнению со значением, необходимым для регулярной пространственной структуры).
- При указанном уровне значимости ухудшение отношения сигнал/помеха, обусловленное случайностью размещения БС, может достигать 2-5 дБ. В соответствии с (5.23) необходимое увеличение мощности



Рис.5.8. Вероятности превышения в сети заданного отношения "сигнал/помеха" при различном уровне случайности размещения БС в сети для кластера размерности 4 с трехсекторными антеннами



Рис.5.9. Функция распределения вероятности значений отношения площади S_D части зоны ответственности, удаленной от БС на расстояния, превышающие R_{max} , к площади зоны ответственности БС

ЭМИ АС для компенсации ухудшения качества связи из-за влияния этого фактора для трехсекторной структуры сети с кластером размерности N=4 может достигать 1,5...3,0 дБ. Компенсация влияния данного фактора на ухудшение экологической безопасности сотовой сети может быть достигнута следующими способами:

- увеличением размерности кластера при ее частотном планировании и, как следствие, при σ/R_{max} ≥ (0,4...0,5) с возможным отказом от алгоритмов частотного планирования сети, основанных на ее регуляризации;
- дополнительным по сравнению с указанным выше в п.1 уменьшением величины R_{max} в 1,1...1,2 раза по сравнению со значением, необходимым при 0,3 ≤ σ/R_{max} ≤ 0,5 в силу известной связи между долей мощности ЭМИ АС, поглощаемой телом человека, и величиной R_{max}.

Таким образом, нарушение регулярности пространственной структуры сотовой радиосети, обусловленное имеющимися ограничениями (технического, экономического, экологического характера) в пространственном размещении БС приводит к ухудшению экологической безопасности сети. Это ухудшение обусловлено, с одной стороны, появлением локальных удаленных от БС областей с повышенным уровнем ЭМИ АС и, с другой стороны, появлением локальных областей с повышенным уровнем внутрисетевых помех (пониженным отношением сигнал/помеха). Компенсация ухудшения экологической безопасности сотовой радиосети, обусловленного случайностью размещения БС, может быть достигнута увеличением пространственной плотности базовых станций сети в 1,5...2,0 раза, либо увеличением размерности кластера при ее частотном планировании (или, возможно, отказом от кластерного частотного планирования сети) в сочетании с увеличением пространственной плотности базовых станций сети в 1,2...1,5 раза.

6. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА, ОБРАЗУЕМОГО СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБЩЕСТВА, В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СРЕДСТВ МОБИЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ

6.1. Вводные замечания

Принято считать, что в сотовой сети основную экологическую опасность представляют ЭМИ АС, причем эта опасность в основном угрожает здоровью абонентов сотовой сети в периоды пользования сотовой связью, когда АС находятся в активном состоянии и представляют собой источники ЭМП. В этом вряд ли стоит сомневаться. Вместе с тем в силу широкого распространения мобильных телефонов значительный интерес представляют также оценки суммарной интенсивности ЭМП АС либо интенсивности преобладающих ЭМП АС в различных условиях, в первую очередь в местах массового скопления людей. И особый интерес эти оценки представляют применительно к ситуациям, когда интенсивное использование сотовой радиосвязи происходит в условиях заметного электромагнитного фона, создаваемого ЭМИ мощных телевизионных и ОВЧ-ЧМ радиопередатчиков, а также радиопередатчиков других служб.

Дело в том, что абоненты сотовой связи, используя AC, подвергают себя действию ее ЭМП добровольно. И этот экологический риск является управляемым: абонент может сократить продолжительность разговора, может вообще не использовать сотовой связи в местах с низкими уровнями сигналов БС, где мощность ЭМИ AC близка к максимальной, и т.п. Добровольный характер этого риска находит отражение в значениях ПДУ ЭМП

[11], принятых для пользователей мобильной связи и на порядок и более превышающих ПДУ ЭМП [9, 10, 13] для населения.

В то же время существуют достаточно многочисленные ситуации, когда ЭМИ АС являются источниками вынужденного экологического риска. Эти ситуации имеют место в местах массового скопления людей. Сегодня охват населения сотовой связью приближается к 100 %, число АС сотовой связи на душу населения во многих странах превышает 1 (многие активные абоненты сотовой связи имеют по нескольку АС в целях экономии на оплате межсетевых соединений). В результате

- в местах скопления людей многие из них, не используя сотовой связи, подвергаются воздействию ЭМП с уровнями, превышающими ПДУ для населения; источники этих ЭМП – излучающие АС соседей. Подобные ситуации наблюдаются, например, в переполненном городском транспорте, когда его пассажиры используют сотовую связь;
- в местах массового скопления людей, например, во время митингов, политических акций, спортивных и праздничных мероприятий и т.п., массовое применение сотовой связи может стать источником электромагнитного фона, в отдельные отрезки времени по интенсивности превышающего ПДУ для населения;
- в местах, где присутствует заметный электромагнитный фон, образуемый ЭМИ мощных радиопередатчиков (телевидение, ОВЧ-ЧМ вещание, фиксированная связь, радиолокация, и др., источниками ЭМП технологического и бытового назначения и т.п.) и не превышающий по уровню установленный ПДУ, даже относительно небольшая добавка за счет ЭМП АС, суммируясь с присутствующим электромагнитным фоном, может обеспечить совокупное недопустимое превышение ПДУ ЭМП для населения на значительной площади. При этом может наблюдаться как существенное увеличение зоны с совокупным уровнем ЭМП выше

указанного значения ПДУ вокруг отдельно взятой активной АС, так и относительно долговременное превышение данного ПДУ ЭМП совокупной интенсивностью ЭМП мощных передатчиков и электромагнитного фона, образуемого массовым использованием сотовой связи. Подобные ситуации могут иметь место непосредственно за пределами санитарно-защитных зон радиотелевизионных передающих центров, центров радиолокационного наблюдения и иных мощных радиообъектов, располагаемых на территории либо вблизи населенных пунктов и мест отдыха.

Таким образом, с учетом возможностей подходов и моделей, представленных выше в разделах 3 – 5, интерес представляют следующие вопросы, связанные с массовым использованием средств сотовой связи, в том числе в условиях присутствия электромагнитного фона, обусловленного функционированием радиосистем различного назначения:

- анализ уровней электромагнитного фона, образуемого ЭМИ АС сотовой связи в условиях, применительно к которым распределения (3.37), (4.9)/(4.10) и (4.22)/(4.23) имеют начальные моменты, т.е. могут быть найдены оценки средних значений суммарной интенсивности ЭМП, присутствующих в точке наблюдения;
- анализ совокупной интенсивности ЭМП в условиях, когда в точке наблюдения наряду с ансамблем ЭМП АС сотовой связи присутствует постоянный электромагнитный фон, образуемый мощными радиопередатчиками и иными источниками ЭМП и по уровню приближающийся к ПДУ ЭМП для населения.

6.2. Характеристики совокупного уровня ЭМП АС сотовой сети6.2.1. Характеристика исходных данных

Если в круговой или сферической пространственной области радиусом \mathbf{R}_{max} случайно равномерно располагаются АС сотовой сети с ЭИИМ \mathbf{P}_{MS} , то в центре этой области плотность распределения вероятностей ППМ II от АС имеет вид гиперболического распределения (3.37).

Используя эту модель, можно оценить суммарный уровень ЭМП от одновременно работающих АС всех сотовых сетей, функционирующих в рассматриваемой пространственной области. Данная задача нетривиальна, поскольку распределение (3.37) в наиболее интересных с практической точки зрения случаях начальных и центральных моментов не имеет. Исключение составляет случай $\mathbf{m} = \mathbf{3}$ (объемное размещение источников ЭМИ) и $\mathbf{v} = \mathbf{2}$ (РРВ в свободном пространстве). Однако если объемное размещение АС и может быть принято с известной долей условности для плотной высотной застройки делового центра крупного современного города, то условия РРВ в этой ситуации существенно отличаются от условий РРВ в свободном пространстве.

Распределение (3.37) при $\mathbf{m} = \mathbf{2}$ инвариантно к кривизне земной поверхности и к высоте точки наблюдения над поверхностью. Это, в частности, позволяет оценить суммарный уровень ЭМИ АС в точке размещения БС, а также в любой другой точке над поверхностью, на которой располагаются АС. При высоте **H**_{BS} подвеса антенны БС над поверхностью, позволяющей сузить область определения распределения (3.37) в силу того, что величина **H**_{BS} равна минимально возможному расстоянию между БС и располагаемыми на поверхности АС, математическое ожидание величины **П** при использовании модели PPB Окамура – Хата имеет следующий вид:

$$m_{1}(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu}}{\nu - 2} \left(\Pi_{\max}^{1 - 2/\nu} - \Pi_{\min}^{1 - 2/\nu} \right) \approx$$

$$\approx \frac{2\Pi_{\min}^{2/\nu} \Pi_{\max}^{1 - 2/\nu}}{\nu - 2}; \ \Pi_{\min} \le \Pi \le \Pi_{\max},$$
(6.1)

$$\Pi_{\text{max}} = \frac{C_{\nu} P_{\text{MS}}}{H_{\text{BS}}^{\nu}}, \quad \nu = 4,49 - 0,655 \, \text{lg} \, \text{H}_{\text{BS}}.$$

Очевидно, что суммарный уровень ЭМИ АС в рассматриваемой точке определяется скалярной величиной $\Pi_{\Sigma} = \mathbf{m}_1(\Pi)\mathbf{N}_{cp}$ совокупной ППМ ЭМИ АС, среднее число которых в рассматриваемой области потенциального электромагнитного взаимодействия, ограниченной радиусом \mathbf{R}_{max} , равно \mathbf{N}_{cp} .

Для определения величины среднего числа N_{cp} излучающих AC в указанной области необходимо располагать следующими исходными данными:
 данными о средней пространственной плотности *p*_{av} [AC/км₂] AC в пределах области потенциального электромагнитного взаимодействия;

данными о средней нагрузке Е [Эрл] на одного абонента в сотовой сети.
 Средняя пространственная плотность *р*_{MS} AC, являющихся источниками
 ЭМИ в рассматриваемой области в данный момент времени, может быть определена как произведение Е*р*_{av}.

Данные о средней плотности населения (потенциальных абонентов сотовой связи) могут быть почерпнуты, в частности, из [97, 98]; эти данные сведены в табл. 6.1.

Средняя нагрузка, создаваемая одним абонентом сотовой связи в сети в час наибольшей нагрузки [54, 55, 58, 91], обычно принимается равной 0,025-0,03 Эрл. Однако в связи с существующими тенденциями к полному охвату населения сотовой радиосвязью и к частичному вытеснению средствами мобильной связи средств традиционной проводной телефонной связи следует ожидать тенденции к увеличению средней нагрузки на одного абонента сотовой связи до уровней, соответствующих средней нагрузке на одного абонента проводной телефонной связи, т.е. до 0,05 – 0,08 Эрл.

Таблица 6.1

Условия эксплуатации сети	Плотность населения (потенциальных пользователей) в зоне обслуживания		
	Плотность насе- ления согласно [97], чел./км ²	Плотность насе- ления согласно [98], чел./км ²	
Деловой центр города/город в по- мещении (CBD/Urban in building)	250 000	180 000	
Пригород в помещении или на ули- це (Suburban in building or on street)		7 200	
Жилые районы города в помещении (Home in building)		380	
Город/пешеходы (Urban pedestrian)	100 000	108 000	
Город/автомобили (Urban vehicular)	3 000	2 780	
Сельская местность/внутри и вне помещения (Rural in- & out-door)		36	

Таким образом, при дальнейших оценках могут быть приняты ориентировочные данные о средней пространственной плотности ρ_{MS} [AC/км²] AC-источников ЭМИ в области потенциального электромагнитного взаимодействия, приведенные ниже в табл. 6.2.

В случаях, когда точка наблюдения находится на той же поверхности, на которой случайно равномерно размещены АС-источники ЭМИ, высота точки наблюдения относительно плоскости размещения АС равна нулю, распределение ППМ АС в точке наблюдения приобретает вид (3.37), начальные моменты которого отсутствуют. В результате определить среднее значение ППМ ЭМП АС в точке наблюдения по аналогии с (6.1) оказывается невозможным.

Поэтому при анализе вероятностно-статистических характеристик совокупной интенсивности суммарного ЭМП АС сотовой радиосети и внешнего электромагнитного фона в различных ситуациях, учитывая методические особенности данной задачи, наряду с интенсивностью названного фона будем рассматривать следующие слагаемые интенсивности совокупного ЭМП АС:

- не поддающуюся статистическому усреднению (4.12)/(4.24) при $\mathbf{H} \leq \mathbf{v}/\mathbf{m}$ интенсивность одного преобладающего ЭМП, как правило, излучаемого ближайшей AC ($2 \leq \mathbf{v} < 4$, $\mathbf{m} = 2$), либо не поддающиеся статистическому усреднению интенсивности двух преобладающих ЭМП, как правило, излучаемых ближайшими AC ($\mathbf{v} = 4$, $\mathbf{m} = 2$), и
- сумму поддающихся статистическому усреднению (4.12)/(4.24) интенсивностей ЭМП прочих АС (v/m < H ≤ N_a либо (v/m < H ≤ N) из области потенциального электромагнитного взаимодействия.

Таблица	6.	.2
---------	----	----

Характер ситуации	Плотность АС- источников ЭМИ, АС/км ²
Места локального массового скопления людей	10 ⁵
Деловой центр города/город в помещении	10 ⁴
Пригород в помещении или на улице	$10^2 - 10^3$
Жилые районы города в помещении	$10^1 - 10^2$
Город/пешеходы	$10^3 - 10^4$
Город/автомобили	$10^2 - 10^3$
Сельская местность/внутри и вне помещения	$10^0 - 10^1$

6.2.2. Совокупный уровень ЭМП АС сотовой радиосвязи над земной поверхностью

Базовые математические модели, описывающие вероятностностатистические характеристики ЭМО в пространственно-распределенных группировках РЭС и позволяющие оценить суммарную интенсивность ЭМП АС сотовой связи над земной поверхностью, приведены выше в разд. 3. Ниже рассмотрим ряд примеров оценочных расчетов совокупного уровня ЭМП АС.

Выполним анализ достаточно распространенной ситуации: антенна БС сети GSM, располагаясь в центре крупного города, имеет высоту подвеса $H_{BS} = 60$ м и коэффициент усиления $G_{ABS} = 15$ дБ с учетом затухания в фидере; пороговая чувствительность РПУ БС Р₀ = -107 дБм. При высоте АС над поверхностью 1,5 м и усредненной величине ЭИИМ АС **P**_{MS} = 100 мВт площадь зоны потенциального электромагнитного взаимодействия, ограничиваемая чувствительностью РПУ БС и рассчитываемая по медианному значению ППМ ЭМП АС с использованием модифицированной модели РРВ Окамура – Хата в городской застройке (urban area), составляет примерно $45...50 \text{ км}^2$ ($\mathbf{R}_{max} \approx 4 \text{ км}$) при использовании диапазона 900 МГц и примерно 15км² ($\mathbf{R}_{max} \approx 2,2$ км) при использовании диапазона 1800 МГц. С учетом данных табл. 6.1, 6.2, можно предположить возможность нахождения в этой зоне от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов владельцев AC и до $N_{cp} = 10^4 \dots 10^5$ AC в активном состоянии (состоянии с электромагнитным излучением). Для этой ситуации оценим суммарную интенсивность ЭМП АС в точке подвеса антенны БС.

В рассматриваемой ситуации базовые потери при РРВ от границы зоны потенциального электромагнитного взаимодействия до точки размещения БС составляют $L_{max} \approx (P_{MS}G_{ABS}/P_0); \quad L_{max} [дБ] = -10 дБВт + 15 дБ -(-137 дБВт) = 142 дБ.$ Величина Π_{min} , соответствующая чувствительности РПУ БС «по полю», будет равна

$$\Pi_{\min} = \frac{P_0}{S_{ABS}} = \frac{4\pi P_0}{G_{ABS}\lambda^2}.$$
(6.2)

При использовании диапазона 900 МГц $\Pi_{\min} \approx 7,3 \cdot 10^{-14} \text{ Bt/m}^2$ ($\lambda \approx 0,33 \text{ м}$), при использовании диапазона 1800 МГц $\Pi_{\min} \approx 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ Bt/m}^2$ ($\lambda \approx 0,167 \text{ м}$).

Всю область радиуса R_{max} следует условно разделить на две части:
внутреннюю область радиуса R_{in}=1 км, которая находится за пределами области адекватности модели условий РРВ Окамура – Хата (1 км ≤ R ≤ 20 км) и внутри которой в силу выполнения условия "Breakpoint" [71, стр.205]

$$\mathbf{R} \le \mathbf{R}_{in} \le \mathbf{R}_{BP} = \frac{4\mathbf{H}_{BS}\mathbf{H}_{MS}}{\lambda} \tag{6.3}$$

ППМ AC обратно пропорциональна квадрату удаленности от БС, и можно пользоваться моделью условий РРВ в свободном пространстве;

– внешнюю область $\mathbf{R}_{in} \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{max}$, в которой можно использовать модель Окамура – Хата с параметром $\mathbf{v} = 3,33$, определяемым из (6.1) для $\mathbf{H}_{BS} = 60$ м.

1. Оценка совокупной интенсивности ЭМП АС диапазона 900 МГц

В рассматриваемой ситуации площадь внешней области составляет $S_1 \approx 47,1 \text{ км}^2$, площадь внутренней области составляет $S_2 \approx 3,14 \text{ км}^2$. При пространственной плотности AC диапазона 900 МГц в активном состоянии $\rho_{MS} = 10^3...10^4$ [AC/км²] получим среднее число излучающих AC во внешней области $N_{1cp} \approx 5 \cdot 10^4...5 \cdot 10^5$, во внутренней области $N_{2cp} \approx 3 \cdot 10^3...3 \cdot 10^4$.

Во внешней области возможно применение модели Окамура – Хата, в соответствии с которой v = 3,33 и в (6.1) расчетное значение $\Pi_{1max} \approx 104 \Pi_{min}$

(разница между $\Pi_{1\text{max}}$ и Π_{min} составляет 20,16 дБ). В результате, используя (6.1), оценим среднее значение ППМ в точке наблюдения от АС во внешней области: $\Pi_{1\text{cp}} = \mathbf{m}_1(\Pi_1) \approx 9,6\Pi_{\text{min}}$.

Для АС во внутренней области ППМ их ЭМП в точке наблюдения может быть принята обратно пропорциональной квадрату удаленности от БС, что соответствует v = 2. В результате динамический диапазон значений ППМ АС, располагаемых в этой области, оказывается равным квадрату отобласти наблюдения: ношения радиуса данной к высоте точки $D_2 = \Pi_{2max}/\Pi_{2min} = (R_{in}/H_{bs})^2 = (1000/60)^2 \approx 278$. При этом наименьшее значение ППМ П_{2min} на границе этой области равно максимальному значению ППМ на внутренней границе внешней области: $\Pi_{2\min} = \Pi_{1\max} \approx 104 \Pi_{\min}$, отсюда $\Pi_{2max} \approx 28800 \Pi_{min}$.

Случайные значения ППМ ЭМП AC, расположенных во внутренней области, в точке наблюдения имеют распределение (3.37) с параметрами $\mathbf{m} = 2$, $\mathbf{v} = 2$ и областью определения [$\mathbf{\Pi}_{2\min}$, $\mathbf{\Pi}_{2\max}$]. Для этого случая математическое ожидание распределения (3.37) имеет следующий вид:

$$m_1(\Pi_2) = \frac{\Pi_{2\max} \Pi_{2\min}}{\Pi_{2\max} - \Pi_{2\min}} \ln\left(\frac{\Pi_{2\max}}{\Pi_{2\min}}\right) \approx \Pi_{2\min} \ln\left(\frac{\Pi_{2\max}}{\Pi_{2\min}}\right).$$
(6.4)

Используя (6.4), получим среднее значение ППМ в точке наблюдения от AC внутренней области: $\Pi_{2cp} = m_1(\Pi_2) = 104\Pi_{min} ln(278) \approx 585\Pi_{min}$.

В результате нетрудно получить оценки суммарной интенсивности ЭМП в точке наблюдения от АС внешней ($\Pi_{\Sigma out}$) и внутренней ($\Pi_{\Sigma in}$) областей, а также от АС в области потенциального электромагнитного взаимодействия в целом (Π_{Σ}), приведенные ниже:

$$\Pi_{\Sigma out} = N_{1cp}m_1(\Pi_1) \approx (5 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^6)\Pi_{min};$$

$$\Pi_{\Sigma in} = N_{2cp}m_1(\Pi_2) \approx (1,8 \cdot 10^6 \dots 1,8 \cdot 10^7)\Pi_{min};$$

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\Sigma out} + \Pi_{\Sigma in} \approx (2,3 \cdot 10^6 \dots 2,3 \cdot 10^7)\Pi_{min} \approx (3,2 \cdot 10^{-7} \dots 3,2 \cdot 10^{-6}) [BT/M^2]$$

Для рассматриваемого случая характерны условия размещения AC в условиях городской застройки, что определяет важность влияния такого фактора, как экранирующее действие зданий в области потенциального электромагнитного взаимодействия, на условия PPB в данной области. Поэтому в качестве «опорной точки» при оценках величин $\Pi_{\Sigma out}$, $\Pi_{\Sigma in}$, Π_{Σ} принято значение Π_{min} . В результате полученная оценка Π_{Σ} является оптимистической, поскольку по мере приближения к точке наблюдения экранирующее действие зданий ослабляется.

Если в качестве «опорной точки» принять значение Π_{2max} , которое может быть найдено исходя из свободного РРВ между АС и точкой наблюдения на высоте \mathbf{H}_{bs} над АС, то оценки $\Pi_{\Sigma in}$, Π_{Σ} оказываются на два порядка выше:

$$m_1(\Pi_2) \approx 4.5 \cdot 10^{-9} [BT/M^2];$$

$$\Pi_{\Sigma} \approx \Pi_{\Sigma in} \approx (1, 4 \cdot 10^{-5} \dots 1, 4 \cdot 10^{-4}) [\text{Bt/m}^2]$$

Данная оценка является пессимистической и существенно завышенной, поскольку не учитывает экранирующего влияния зданий на PPB от AC к точке наблюдения во всей внутренней области. Поэтому на основании проведенной «вилочной» оценки можно сделать вывод, что для принятых начальных условий суммарная интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения, создаваемого ЭМИ AC диапазона 900 МГц, будет находиться в следующих пределах:

 $\Pi_{\Sigma} \approx \Pi_{\Sigma in} \approx (10^{-6} \dots 10^{-5}) \; [\text{Bt/m}^2].$

Следует обратить внимание на следующие обстоятельства:

а) полученные оценочные значения Π_{Σ} на 70 – 80 дБ превышают уровень Π_{min} пороговой чувствительности РПУ БС. Эти условия эксплуатации БС следует признать достаточно сложными (работоспособность РПУ БС обеспечивается пространственной и частотной избирательностью, а

также высокой линейностью приемного радиотракта БС), однако с экологической точки зрения полученный уровень безопасен, поскольку он на 2–3 порядка ниже уровня $\Pi_{E1} = 10^{-3}$ Вт/м², принятого выше (см. табл. 2.15) в качестве нижней границы диапазона значений интенсивности ЭМП, проблемных с экологической точки зрения;

- б) исключение могут составлять достаточно редкие ситуации, характерные для верхних этажей зданий вблизи мест массового скопления людей, располагаемых на высотах, соизмеримых с H_{BS} и попадающих в зону главного лепестка диаграммы направленности ЭМИ БС. В этих ситуациях, когда уровень электромагнитного фона Π_{Σ} приближается к значению $(10^{-5}...10^{-4})$ Вт/м², определение размеров санитарно-защитной зоны БС может потребовать учета уровня электромагнитного фона в месте ее размещения в области главного лепестка ее ЭМИ;
- в) как следует из полученных оценок, основной вклад в величину Π_{Σ} вносится излучениями AC из внутренней области; величина $\Pi_{\Sigma in}$ на порядок превышает величину $\Pi_{\Sigma out}$, хотя число N_{2cp} излучающих AC на порядок меньше числа N_{1cp} активных AC во внешней области.

2. Оценка совокупной интенсивности ЭМП АС диапазона 1800 МГц

В рассматриваемой ситуации для AC диапазона 1800 МГц площадь внешней области составляет $S_1 \approx 12 \text{ км}^2$, площадь внутренней области, как и в предыдущем случае, равна $S_2 \approx 3,14 \text{ км}^2$. При пространственной плотности AC диапазона 1800 МГц в активном состоянии $\rho_{MS} = 10^3...10^4 \text{ [AC/км}^2\text{]}$ получим среднее число излучающих AC во внешней области $N_{1cp} \approx 10^4...10^5$, во внутренней области $N_{2cp} \approx 3 \cdot 10^3...3 \cdot 10^4$.

Как и в предыдущем случае, во внешней области возможно применение модели Окамура – Хата, в соответствии с которой v = 3,33 и в (6.1) расчетное значение $\Pi_{1max} \approx 14 \Pi_{min}$ (разница между ними составляет 11,4 дБ). В результате, используя (6.1), оценим среднее значение ППМ в точке наблюдения от AC во внешней области: $\Pi_{1cp} = \mathbf{m}_1(\Pi_1) \approx 4,3 \Pi_{min}$.

Для АС во внутренней области ППМ их ЭМП в точке наблюдения также может быть принята обратно пропорциональной квадрату удаленности от БС, что соответствует v = 2. В результате, как и в предыдущем случае, $D_2 = \Pi_{2max}/\Pi_{2min} = (R_{in}/H_{bs})^2 = (1000/60)^2 \approx 278$. При этом наименьшее значение ППМ Π_{2min} на границе этой области равно максимальному значению ППМ на внутренней границе внешней области: $\Pi_{2min} = \Pi_{1max} \approx 14\Pi_{min}$, отсюда $\Pi_{2max} \approx 3900\Pi_{min}$.

Как и в предыдущем случае, для внутренней области следует применить (6.4): $\Pi_{2cp} = m_1(\Pi_2) = 14\Pi_{min} ln(278) \approx 79\Pi_{min}$.

В результате также нетрудно получить оценки суммарной интенсивности ЭМП в точке наблюдения от АС внешней ($\Pi_{\Sigma 1}$) и внутренней ($\Pi_{\Sigma 2}$) областей, а также от АС в области потенциального электромагнитного взаимодействия (Π_{Σ}), приведенные ниже:

$$\begin{split} \Pi_{\Sigma out} &= N_{1cp} m_1(\Pi_1) \approx (4,3 \cdot 10^4 \dots 4,3 \cdot 10^5) \Pi_{min}; \\ \Pi_{\Sigma in} &= N_{2cp} m_1(\Pi_2) \approx (2,4 \cdot 10^5 \dots 2,4 \cdot 10^6) \Pi_{min}; \\ \Pi_{\Sigma} &= \Pi_{\Sigma out} + \Pi_{\Sigma in} \approx (2,8 \cdot 10^5 \dots 2,8 \cdot 10^6) \Pi_{min} \approx (8 \cdot 10^{-8} \dots 8 \cdot 10^{-7}) \ [\text{Bt/M}^2]. \end{split}$$

При получении этих оценок, как и для диапазона 900 МГц, в качестве «опорной точки» при оценках величин $\Pi_{\Sigma out}$, $\Pi_{\Sigma in}$, Π_{Σ} принято значение Π_{min} . В результате полученная оценка Π_{Σ} также является оптимистической.

Если в качестве «опорной точки» принять значение Π_{2max} , которое может быть найдено исходя из свободного РРВ между АС и точкой наблюдения на высоте H_{bs} над АС, то оценки $\Pi_{\Sigma in}$, Π_{Σ} также оказываются на 2 – 3 порядка выше и совпадают с полученными для диапазона 900 МГц. Эти оценки являются пессимистическими и существенно завышенными, поскольку не учитывают экранирующего влияния зданий на РРВ от АС к точке наблюдения во всей внутренней области. Поэтому, как и в предыдущем случае, можно сделать вывод, что для принятых начальных условий суммарная интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения, создаваемого ЭМИ АС диапазона 1800 МГц, будет находиться практически в тех же пределах, что и для диапазона 900 МГц при одинаковой пространственной плотности АС каждого диапазона. Это может быть объяснено тем обстоятельством, что вклад одинаковых по площади внутренних частей области потенциального электромагнитного взаимодействия в величину Π_{Σ} оказывается решающим в обоих случаях, а ЭМП АС из существенно различных по площади внешних частей этой области сравнительно мало влияют на интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения.

Практическое совпадение оценок для диапазонов 900 и 1800 МГц позволяет пренебрегать многодиапазонностью AC и в ситуациях, близких к рассмотренной, производить оценки интенсивности электромагнитного фона, обусловленного ЭМИ AC сотовой связи, только для одного из диапазонов, используя в качестве параметра N_{cp} среднее число активных AC в области потенциального электромагнитного взаимодействия.

6.2.3. Совокупный уровень ЭМП АС сотовой радиосети на земной поверхности

Рассмотрим ситуацию, аналогичную рассмотренной выше в подразд. 6.2.2, но отличающуюся тем, что точка наблюдения находится на земной поверхности на той же высоте, что и AC.

В этой ситуации, наиболее сложной для анализа, распределение (3.37) начальных моментов не имеет, и определять совокупную интенсивность электромагнитного фона как произведение среднего значения ППМ АС в точке наблюдения на среднее число активных АС в области потенциального

электромагнитного взаимодействия радиуса (3.7) не представляется возможным. В ансамбле ЭМП АС в точке наблюдения, как правило, присутствует преобладающее ЭМП от ближайшей АС; его уровень в области большой интенсивности практически совпадает с уровнем суммарного электромагнитного фона (см. выше подразд. 4.6.2, рис. 4.3 и 4.4).

Вероятностная оценка уровня ЭМП ближайшей АС будет выполнена в следующем разделе. Что же касается оценки совокупного уровня ЭМП всех остальных АС, размещенных случайно равномерно в области потенциального электромагнитного взаимодействия, то здесь имеются следующие возможности, связанные с использованием (4.12),(4.24).

Для случайного равномерного распределения AC по территории (m = 2) и PPB в свободном пространстве (v = 2), при случайном независимом от размещения AC выборе координат точки наблюдения начальные моменты распределений (4.9)/(4.10), (4.22)/(4.23) существуют при $H \ge 2$. Это означает, что может быть найдена сумма средних значений ППМ ЭМП всех AC, расположенных в области потенциального электромагнитного взаимодействия, за исключением AC, ближайшей к точке наблюдения.

При использовании **H**-кратного «прореживания» двумерного «пуассоновского» поля случайных точек (мест случайного размещения AC) в окрестности случайно выбранной точки наблюдения эта сумма может быть найдена с использованием (4.12). **H**-кратное «прореживание» представляет собой последовательное пошаговое исключение из рассмотрения ближайших AC, начиная с первой (**H** = 2), затем первой – второй (**H** = 3), первой – третьей (**H** = 4) и т.д. вплоть до всех AC, кроме наиболее удаленной от точки наблюдения, для которой **H** равно целой части среднего числа N_a AC в области потенциального электромагнитного взаимодействия: **H** = int{ N_a }:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\min} \sum_{\substack{H=2\\ H=2}}^{\inf\{N_{a}\}} (D_{\Pi}(H)) = N_{a} \Pi_{\min} \sum_{\substack{H=2\\ H=2}}^{\inf\{N_{a}\}} \frac{\Gamma(H-1)}{\Gamma(H)} =$$

$$= N_{a} \Pi_{\min} \sum_{\substack{H=2\\ H=2}}^{\inf\{N_{a}\}} \frac{1}{H-1}.$$
(6.5)

Если рассматривать в точке наблюдения ансамбль N ЭМП AC, имеющих распределение (3.37) по ППМ с параметрами v = m = 2, в виде вариационного ряда, то оценку значения Π_{Σ} можно также получить, используя (4.24) для средних значений порядковых статистик этого ряда, за исключением преобладающей N-й статистики:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\min} \sum_{H=2}^{N} m_1 (D_{(k)}(H)) =$$

$$= N\Pi_{\min} \sum_{H=2}^{N} \frac{1}{H-1}, \quad k = N - H + 1.$$
(6.6)

Нетрудно убедиться в совпадении (6.5) и (6.6) при целых $N_a = N$.

Поскольку высоты АС и точки наблюдения над поверхностью невелики и соответствуют человеческому росту (1,5 – 2м), рассмотрим наиболее сложный случай малопересеченной местности и отсутствия экранирующих препятствий (многоэтажных зданий) при высокой территориальной плотности АС. Эти условия могут быть характерны для зон отдыха, мест проведения массовых мероприятий, пешеходных зон и т.п. Для этих условий неприменима модель Окамура – Хата, предполагающая высоту подвеса точки наблюдения над поверхностью не менее 30 м, однако могут быть использованы модели РРВ в свободном пространстве (для окрестности точки наблюдения) и «интерференционная» модель Введенского для всей остальной части области потенциального электромагнитного взаимодействия.

Поэтому, как и ранее, всю область потенциального электромагнитного взаимодействия радиуса **R**_{max} условно разделим на две части:
1) внутреннюю область радиуса \mathbf{R}_{in} вокруг точки наблюдения, внутри которой можно пользоваться моделью условий РРВ в свободном пространстве в силу того, что ППМ ЭМП АС обратно пропорциональна квадрату удаленности от точки наблюдения. Если принять высоты АС \mathbf{H}_{MS} и точки наблюдения \mathbf{H}_{SP} над поверхностью одинаковыми и равными $\mathbf{n}\lambda$, то значение \mathbf{R}_{in} радиуса этой области может быть выбрано в следующих пределах (рис. 6.1):

$$\mathbf{R}_{\mathbf{BP}} \le \mathbf{R}_{\mathbf{in}} \le \mathbf{R}_{\mathbf{V}}, \quad \mathbf{R}_{\mathbf{BP}} = 4n^2\lambda, \quad \mathbf{R}_{\mathbf{V}} = 18n^2\lambda, \quad (6.7)$$

где **R**_V – нижняя граница области расстояний от точки наблюдения, в пределах которой можно пользоваться «интерференционной» моделью условий РРВ Введенского [99]:

$$\Pi = \frac{4\pi P_{etr} n^4 \lambda^2}{R^4}, \quad R \ge \frac{18 H_{MS} H_{SP}}{\lambda} = 18n^2 \lambda; \quad H_{MS} = H_{SP} = n\lambda.$$
(6.8)



Рис. 6.1

Следует отметить, что для области $\mathbf{R}_{BP} \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}_V$ характерна интерференционная картина зависимости уровня ЭМП в точке наблюдения от расстояния до AC: при противофазном сложении прямого и отраженного от поверхности лучей наблюдаются острые провалы уровня ЭМП, при их синфазном либо близком к синфазному сложении имеют место достаточно широкие «пучности» уровня ЭМП. Кроме того, на частотах сотовой связи (0,9...2,2 ГГц) длина волны оказывается соизмеримой либо менее размеров неоднородностей подстилающей поверхности, что увеличивает рассеяние при ее отражении. В связи с этим с экологической точки зрения при определении суммарного уровня ЭМП АС можно в первом приближении допуприменение для ЭМП АС, расположенных на удаленности стить $R_{BP} \le R \le R_V$ от точки наблюдения, модель PPB (3.1)/(3.7) в свободном пространстве (v = 2) с расширением внутренней области до $R \ge R_{in} = R_V$, что определит пессимистический характер оценок совокупной интенсивности ЭМП АС в точке наблюдения;

2) внешнюю область $\mathbf{R}_{\mathbf{V}} \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{\text{max}}$, в которой можно использовать модель Введенского (6.8) с параметром $\mathbf{v} = \mathbf{4}$.

Для диапазона 900 МГц ($\lambda = 0,33$ м) в (6.7),(6.8) можно принять **n** = 5 ($\mathbf{H}_{MS} = \mathbf{H}_{SP} \approx 1,65$ м), тогда $\mathbf{R}_{BP} \approx 33$ м, $\mathbf{R}_{in} \approx \mathbf{R}_{V} \approx 150$ м. Для диапазона 1800 МГц ($\lambda = 0,167$ м) можно принять **n** =10 ($\mathbf{H}_{MS} = \mathbf{H}_{SP} \approx 1,65$ м), тогда $\mathbf{R}_{BP} \approx 67$ м, $\mathbf{R}_{in} \approx \mathbf{R}_{V} \approx 300$ м.

В рассматриваемом случае границу области потенциального электромагнитного взаимодействия определим таким образом, чтобы ППМ ЭМП AC, находящейся на границе этой области, в точке наблюдения соответствовала пороговой чувствительности РПУ AC «по полю». Используя (6.2) и пренебрегая усилением антенн AC, для типового значения пороговой чувствительности РПУ AC $P_0 = -103$ дБм получим $\Pi_{min} \approx 0.5 \cdot 10^{-11}$ Вт/м² для диапазона 900 МГц и $\Pi_{min} \approx 0.25 \cdot 10^{-10}$ Вт/м² для диапазона 900 МГц. Используя (6.8), определим радиус области потенциального электромагнитного взаимодействия для ЭИИМ АС $P_{etr} = 100$ мВт; он оказывается равным $R_{max} \approx 2030$ м для диапазона 900 МГц, и $R_{max} \approx 1930$ м для диапазона 1800 МГц. При этом базовые потери при РРВ от границы зоны потенциального электромагнитного взаимодействия до точки наблюдения

 $L_{max} \approx (P_{MS}/P_0); \quad L_{max} [дБ] = -10 дБВт - (-133 дБВт) \approx 123 дБ.$

1. Оценка совокупной интенсивности ЭМП АС диапазона 900 МГц

В рассматриваемой ситуации площадь внешней области составляет $S_1 \approx 12.9 \text{ км}^2$, площадь внутренней области составляет $S_2 \approx 0.07 \text{ км}^2$. При пространственной плотности AC диапазона 900 МГц в активном состоянии $\rho_{MS} = 10^3 \dots 10^4 \text{ [AC/км}^2 \text{]}$ получим среднее число излучающих AC во "внешней" области $N_{1cp} \approx 1.3 \cdot 10^4 \dots 1.3 \cdot 10^5$, во внутренней области $N_{2cp} \approx 7 \cdot 10^1 \dots 7 \cdot 10^2$.

Поскольку во внешней области возможно применение «интерференционной» модели условий РРВ Введенского (6.8), в соответствии с которой v = 4, случайные значения ППМ ЭМП АС, расположенных в этой области, в точке наблюдения имеют распределение (3.37) с параметрами $\mathbf{m} = 2$, v = 4 и областью определения [Π_{1min} , Π_{1max}]. Для этого случая математическое ожидание распределения (3.37) имеет следующий вид:

$$m_1(\Pi_1) = \sqrt{\Pi_{1\,\text{max}}\Pi_{\text{min}}}, \quad \Pi_{1\,\text{max}} = \Pi_{\text{min}} (R_{\text{max}}/R_{\text{in}})^4.$$
 (6.9)

Величина ППМ АС в точке наблюдения, соответствующая удаленности АС на расстояние $\mathbf{R}_{in} \approx \mathbf{R}_V$ (граница внешней и внутренней областей) будет равна $\mathbf{\Pi}_{1max} \approx 33544 \mathbf{\Pi}_{min} \approx 1,68 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^2$; разница между $\mathbf{\Pi}_{1max}$ и $\mathbf{\Pi}_{min}$ составляет 45,3дБ. Таким образом, среднее значение ППМ в точке наблюдения от АС во "внешней" области, определяемое из (6.9), равно $\mathbf{m}_1(\mathbf{\Pi}_1) \approx 183 \mathbf{\Pi}_{min} \approx 0,92 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^2$.

В результате суммарная интенсивность ЭМП $\Pi_{\Sigma out}$ в точке наблюде-

ния от AC, расположенных во внешней области на удаленностях $\mathbf{R}_{V} \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{max}$, будет равна:

$$\Pi_{\Sigma out} = N_{1cp}m_1(\Pi_1) \approx (2,4 \cdot 10^6 \dots 2,4 \cdot 10^7) \Pi_{\min} \approx (1,2 \cdot 10^{-5} \dots 1,2 \cdot 10^{-4}) \text{ BT/M}^2.$$

При оценке среднего уровня электромагнитного фона в точке наблюдения от AC, располагаемых случайно равномерно во внутренней области радиуса $\mathbf{R}_{in} \approx \mathbf{R}_{V}$, воспользуемся (6.5). При постоянной территориальной плотности $\mathbf{\rho}_{MS}$ AC во внутренней области суммарная интенсивность электромагнитного фона в ней как выраженная в Вт/м² скалярная сумма $\Pi_{\Sigma in}$ значений ППМ в данной точке от ЭМИ окружающих AC, за исключением ближайшей AC, определяется соотношениями

$$\Pi_{\Sigma in} = \frac{P_{etr} \rho_{MS}}{4} \sum_{H=2}^{int\{N_a\}} \frac{1}{H-1}; \qquad (6.10)$$

$$\Pi_{\Sigma in} \approx \frac{P_{etr}}{4R_{in}^2} N_a^{1,12}, \quad N_a = \pi R_{in}^2 \rho_{MS};$$
(6.11)

в этих соотношениях для $\Pi_{\Sigma in}$, выраженной в Bт/м², значение ρ_{MS} должно быть выражено в AC/м², радиус внутренней области \mathbf{R}_{in} – в метрах, а средняя ЭИИМ AC \mathbf{P}_{etr} – в ваттах; $\mathbf{N}_{a} = \mathbf{N}_{2cp}$.

Таким образом, суммарная интенсивность ЭМП $\Pi_{\Sigma in}$ в точке наблюдения от всех AC, расположенных во "внутренней" области на удаленностях $\mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{V}$, за исключением AC, ближайшей к точке наблюдения, будет равна:

$$\Pi_{\Sigma in} \approx (1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,7 \cdot 10^{-3}) \text{ BT/M}^2.$$

 $\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\Sigma out} + \Pi_{\Sigma in} \approx (1, 4 \cdot 10^{-4} \dots 1, 8 \cdot 10^{-3}) \text{ BT/m}^2.$

Полученные оценки $\Pi_{\Sigma out}, \Pi_{\Sigma in}$ свидетельствуют о следующем:

а) полученные оценочные значения Π_{Σ} на 90 – 100 дБ превышают уровень Π_{min} пороговой чувствительности РПУ АС. Эти условия эксплуатации АС, как и в случае с условиями эксплуатации БС, рассмотренном в предыдущем

разделе, следует признать достаточно сложными (работоспособность РПУ AC обеспечивается пространственной и частотной избирательностью, а также высокой линейностью приемного радиотракта БС). С экологической точки зрения полученный уровень безопасен, поскольку он на 2 – 3 порядка ниже уровня $\Pi_{E4} = 10^{-1}$ BT/M² (см. табл. 2.15), принятого в качестве ПДУ для населения в России, Беларуси и ряде других стран СНГ, а также в ряде стран Западной Европы. Вместе с тем с присутствием этого фона следует считаться, поскольку при $\rho_{MS} \approx 10^4 [AC/km^2]$ он в совокупности с фоном, образуемым AC внешней области ($\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\Sigma in} + \Pi_{\Sigma out}$), практически вдвое превышает пороговый уровень $\Pi_{E1} = 10^{-3}$ BT/M², принятый выше в качестве нижней границы диапазона значений интенсивности ЭМП, проблемной с экологической точки зрения;

б) Как следует из полученных оценок, основной вклад в величину Π_{Σ} вносится излучениями AC из внутренней области; величина $\Pi_{\Sigma in}$ на порядок превышает величину $\Pi_{\Sigma out}$, хотя число N_{2cp} излучающих AC более чем на 2 порядка меньше числа N_{1cp} активных AC во внешней области.

Вместе с тем следует признать, что если принять внешнюю границу внутренней области соответствующей условию "breakpoint" (6.3), то за счет увеличения среднего значения ППМ АС внешней области примерно в 2 раза увеличится значение $\Pi_{\Sigma out}$ при уменьшении примерно в 2 раза значения $\Pi_{\Sigma in}$ за счет уменьшения среднего числа АС во внутренней области. И в этом случае превышение $\Pi_{\Sigma in}$ над $\Pi_{\Sigma out}$ составит примерно 4 дБ.

2. Оценка совокупной интенсивности ЭМП АС диапазона 1800 МГц

В рассматриваемой ситуации для AC диапазона 1800 МГц площадь внешней области составляет $S_1 \approx 11,4 \text{ км}^2$, площадь внутренней области равна $S_2 \approx 0,28 \text{ км}^2$. При пространственной плотности AC диапазона 1800 МГц в активном состоянии $\rho_{MS} = 10^3...10^4 \text{ [AC/км}^2]$ получим среднее число излучающих AC во внешней области $N_{1cp} \approx 10^4...10^5$, во внутренней области $\mathbf{N_{2cp}} \approx 3 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^3.$

Поскольку во внешней области, как и в предыдущем случае, возможно применение «интерференционной» модели условий РРВ Введенского (6.8), случайные значения ППМ ЭМП АС, расположенных в этой области, в точке наблюдения имеют распределение (3.37) с параметрами $\mathbf{m} = 2$, $\mathbf{v} = 4$ и областью определения [Π_{2min} , Π_{2max}]. Для этого случая математическое ожидание распределения (3.37) может быть найдено из (6.9). Величина ППМ АС в точке наблюдения, соответствующая удаленности АС на расстояние $\mathbf{R}_{in} \approx \mathbf{R}_V$ (граница внешней и внутренней областей) будет равна:

 $\Pi_{1 \text{max}} \approx 1713 \Pi_{\text{min}} \approx 4.3 \cdot 10^{-8} \text{ Br/m}^2;$

разница между $\Pi_{1 \text{ max}}$ и Π_{min} составляет 26,3 дБ. Таким образом, среднее значение ППМ в точке наблюдения от АС во внешней области, определяемое из (6.9), равно $\mathbf{m}_1(\Pi_1) \approx 41, 4\Pi_{\text{min}} \approx 1,03 \cdot 10^{-9} \text{ Bt/m}^2$.

В результате суммарная интенсивность ЭМП $\Pi_{\Sigma out}$ в точке наблюдения от AC, расположенных во внешней области на удаленностях $\mathbf{R}_{V} \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{max}$, будет равна:

$$\Pi_{\Sigma out} = N_{1cp}m_1(\Pi_1) \approx (4,14 \cdot 10^5 \dots 4,14 \cdot 10^6) \Pi_{min} \approx (1,03 \cdot 10^{-5} \dots 1,03 \cdot 10^{-4}) \text{ BT/M}^2.$$

При оценке среднего уровня электромагнитного фона в точке наблюдения от AC, располагаемых случайно равномерно во внутренней области радиуса $\mathbf{R}_{in} \approx \mathbf{R}_{V}$, воспользуемся (6.10),(6.11), подставляя $\mathbf{N}_{a} = \mathbf{N}_{2cp}$. При постоянной территориальной плотности $\boldsymbol{\rho}_{MS}$ AC во внутренней области суммарная интенсивность $\Pi_{\Sigma in}$ электромагнитного фона в точке наблюдения от AC данной области, за исключением ближайшей AC – источника преобладающего по интенсивности ЭМП, будет равна

 $\Pi_{\Sigma in} \approx (1, 7 \cdot 10^{-4} \dots 2, 2 \cdot 10^{-3}) \text{ Br/m}^2;$

 $\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\Sigma out} + \Pi_{\Sigma in} \approx (1, 8 \cdot 10^{-4} \dots 2, 3 \cdot 10^{-3}) \text{ BT/M}^2.$

Оценки $\Pi_{\Sigma out}$, $\Pi_{\Sigma in}$, полученные для диапазона 1800 МГц, свидетельствуют о следующем: а) соотношение величин $\Pi_{\Sigma out}$, $\Pi_{\Sigma in}$, Π_{Σ} , Π_{min} в целом аналогично полученному для случая 900 МГц: полученные оценочные значения $\Pi_{\Sigma 2}$, Π_{Σ} , на 90-100 дБ превышают уровень Π_{min} пороговой чувствительности РПУ АС. Как и в предыдущем случае, с экологической точки зрения полученный уровень Π_{Σ} безопасен, поскольку он на 2-3 порядка ниже ПДУ $\Pi_{E4} = 10^{-1}$ Вт/м². Вместе с тем при $\rho_{MS} \approx 10^4$ [AC/км²] этот уровень более чем вдвое превышает пороговый уровень $\Pi_{E1} = 10^{-3}$ Вт/м², принятый выше в качестве нижней границы диапазона значений интенсивности ЭМП, проблемной с экологической точки зрения;

б) как и в предыдущем случае, величина $\Pi_{\Sigma in}$ более чем на порядок превышает величину $\Pi_{\Sigma out}$, хотя число N_{2cp} излучающих АС примерно в 30 раз меньше числа N_{1cp} активных АС во внешней области. Если принять внешнюю границу внутренней области соответствующей условию "breakpoint" (6.3), то, как и в предыдущем случае, за счет увеличения примерно в 2 раза величины $\Pi_{\Sigma out}$ и уменьшении примерно в 2 раза значения $\Pi_{\Sigma in}$ превышение $\Pi_{\Sigma in}$ над $\Pi_{\Sigma out}$ составит примерно 6 дБ.

Для последнего из рассмотренных случаев зависимости (6.10), (6.11) иллюстрируются кривыми на рис. 6.2, полученными для $\mathbf{R}_{in} = 300$ м, $\mathbf{P}_{etr} = 0,1$ Вт. На этом рисунке сплошная линия соответствует (6.10), пунктирная линия – аппроксимации (6.11). Приведенные графики свидетельствуют о том, что в данном частном примере различным пороговым уровням, приведенным в табл. 2.15, соответствуют следующие значения средней территориальной плотности АС:

$$\begin{split} \Pi_{E1} &= 10^{-3} \text{ BT/m}^2 \quad \rightarrow \quad \rho_{MS} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ AC/m}^2 = 6 \cdot 10^3 \text{ AC/km}^2; \\ \Pi_{E2} &= 10^{-2} \text{ BT/m}^2 \quad \rightarrow \quad \rho_{MS} \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ AC/m}^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ AC/km}^2; \\ \Pi_{E3} &= 2 \cdot 10^{-2} \text{ BT/m}^2 \quad \rightarrow \quad \rho_{MS} \approx 8 \cdot 10^{-2} \text{ AC/m}^2 = 8 \cdot 10^4 \text{ AC/km}^2; \\ \Pi_{E4} &= 10^{-1} \text{ BT/m}^2 \quad \rightarrow \quad \rho_{MS} \approx 3 \cdot 10^{-1} \text{ AC/m}^2 = 3 \cdot 10^5 \text{ AC/km}^2. \end{split}$$



Рис. 6.2

Как было показано выше (подразд.4.6.2, рис. 4.3 и 4.4), в области высоких значений интенсивности электромагнитного фона его уровень определяется интенсивностью преобладающего ЭМП от ближайшей АС. В рассмотренном выше частном примере при территориальном случайном размещении АС в условиях, когда имеет место свободное РРВ ($\mathbf{m} = 2, \mathbf{v} = 2$), можно определить вероятность, с которой преобладающее по уровню ЭМП ближайшей АС не превышает средний суммарный уровень $\Pi_{\Sigma} \approx \Pi_{\Sigma 2}$ ЭМП всех остальных АС, присутствующих в области потенциального электромагнитного взаимодействия.

Поскольку при **m** = 2, **v** = 2, **H** = 1 функция распределения вероятностей (4.10) динамического диапазона сигналов в точке наблюдения является экспоненциальной (**F**(**D**_П) = **exp**(-**N**_a/**D**_П)), вероятность непревышения преобладающим сигналом от ближайшей АС средней интенсивности **П**_{Σin} фона, равной суммарной интенсивности остальных сигналов AC внутренней области в рассматриваемой точке, будет равна

$$\mathbf{P}_{\Sigma 2} = \mathbf{P}\left(\mathbf{D}_{\Pi} \leq \frac{\Pi_{\Sigma 2}}{\Pi_{1 \max}}\right) = \exp\left(\frac{-\mathbf{N}_{2 c p} \Pi_{1 \max}}{\Pi_{\Sigma 2}}\right) \approx \exp\left(\frac{-1}{\pi \mathbf{N}_{2 c p}^{0, 12}}\right), \quad (6.12)$$

где $\Pi_{\Sigma in}$ определяется соотношениями (6.10),(6.11). И эта вероятность непревышения для свободного РРВ достаточно заметна (0,8 – 0,9). Она сопоставима со значениями вероятностей отсутствия помех (надежности связи) не ниже 0,8 (0,8 – 0,99), используемых при планировании и проектировании радиосетей мобильной радиосвязи, международно-правовой защите частотных присвоений, расчете зон обслуживания и зон радиопомех и т.п. [100]. При этом из (4.49) с учетом (4.52) следует, в частности, что вероятность непревышения уровнем преобладающего ЭМП среднего уровня второго по интенсивности ЭМП равна exp(-1) = 0,368. График зависимости вероятности $P_{\Sigma 1}$ от среднего числа $N_a = N_{2cp}$ сигналов, превышающих в рассматриваемой точке уровень Π_{1max} , приведен на рис. 6.3.



Рис. 6.3 188

В заключение необходимо отметить следующие важные обстоятельства:

1. Указанные выше относительно высокие уровни вероятности (6.12) в сочетании с выводом о том, что в области больших значений динамического диапазона сигналов преобладающее ЭМП вносит определяющий вклад в их суммарную интенсивность, а вклад всех остальных ЭМП оказывается незначительным (см. выше подразд. 4.6.2), означают следующее: скорость убывания плотности распределения вероятности уровня преобладающего сигнала в области больших интенсивностей ЭМП оказывается значительно меньшей скорости убывания плотности распределения вероятности суммарного уровня ЭМП. Об этом свидетельствуют и графики, приведенные на рис. 4.3, 4.4;

2. Если наиболее интенсивное ЭМП АС в точке наблюдения устраняется, то для такого случая $\mathbf{H} = 2$, и все результаты, приведенные в данном разделе для внутренней области, приобретают «безусловный» характер, поскольку преобладающее по уровню ЭМП от ближайшей к точке наблюдения АС также учитывается при оценке $\mathbf{\Pi}_{\Sigma in} \approx \mathbf{\Pi}_{\Sigma}$. При этом графики, приведенные на рис. 4.4, свидетельствуют о том, что и для такой постановки задачи сохраняется справедливость сделанного выше вывода о том, что преобладающее ЭМП ближайшей АС вносит определяющий вклад в суммарную интенсивность ЭМП АС в точке наблюдения, а вклад всех остальных ЭМП оказывается незначительным.

Из приведенных выше оценок следует, что основной вклад в величину Π_{Σ} в точке наблюдения вносится излучениями AC из внутренней области; величина $\Pi_{\Sigma in}$ на порядок превышает величину $\Pi_{\Sigma out}$ и относительно слабо зависит от положения границы между внутренней и внешней областями. Последнее обстоятельство позволяет предложить практическую методику определения конфигурации санитарно-защитных зон радиопередатчиков в городской застройке и в других местах массового скопления абонентов сотовой связи, которая учитывала бы совокупный уровень ЭМП АС сотовой связи на основе прогноза пространственной плотности АС непосредственно в местах с высокой плотностью населения (отдельных зданий, мест проведения массовых мероприятий и т.п.).

6.3. Оценка вероятности превышения ПДУ ЭМП при интенсивном использовании сотовой связи в условиях присутствия постоянного электромагнитного фона, образуемого мощными радиопередатчиками других служб

Опираясь на сделанный ранее вывод о том, что в представляющей наибольший интерес с экологической точки зрения области больших интенсивностей ЭМП уровень электромагнитного фона, образуемого ЭМП АС, определяется уровнем преобладающего ЭМП ближайшей к точке наблюдения АС, определим вероятностные характеристики этого фона с учетом регулировки ЭИИМ АС в сети и с учетом возможного присутствия в точке наблюдения постоянного электромагнитного фона, обусловленного электромагнитным излучением мощных радиопередатчиков других служб (телерадиовещание, радиолокация и т.п.).

При исследовании данного вопроса воспользуемся следующим:

 моделью случайного равномерного территориального (m = 2) размещения АС-источников ЭМП с пуассоновским вероятностным режимом (3.2) со средней плотностью **р**_{MS} по крайней мере в окрестности точки наблюдения;

- выводами подразд. 6.1, 6.2 данной работы о том, что основной вклад в совокупную интенсивность ЭМП АС в точке наблюдения принадлежит ЭМИ АС из окрестности радиуса R_{in} ≈ R_V вокруг точки наблюдения, в которой могут быть приняты условия РРВ в свободном пространстве (v = 2) между точкой наблюдения и АС, расположенными в пределах этой окрестности;
- распределением вероятности (4.48)/(4.49) преобладающей ППМ ЭМП АС, ближайшей к точке наблюдения, для H=1 (подавление наиболее мощных ЭМП отсутствует, точка наблюдения соответствует случайному размещению рецептора ЭМП);
- распределением вероятности (4.50)/(4.51) величины ППМ ЭМП АС, второй по удаленности от точки наблюдения, т.е. для H=2 (осуществляется подавление наиболее мощного ЭМП в точке размещения рецептора ЭМП, либо точка наблюдения совмещена с одним из источников ЭМП);
- «интерференционной» моделью (6.8) РРВ Введенского (v=4) и моделью
 Окамура Хата (v = 4,49–0,655 lg H_{BS}) для радиолиний между АС, располагаемыми в окрестности точки наблюдения, и БС;
- моделью идеальной регулировки средней ЭИИМ АС P_{MS} [BT] на всем интервале [$0 \le P_{MS} \le P_{MS max}$], где величина $P_{MS max}$ определяется радиусом зоны обслуживания БС, до минимального уровня, необходимого для обеспечения радиосвязи с БС; при такой регулировке могут быть использованы вероятностно-статистические характеристики (5.3) – (5.7) величины P_{MS} .

Следует пояснить, что при случайной ЭИИМ АС с распределением вероятности (5.3), что обусловлено наличием в сети принудительной регу-

лировки ЭИИМ АС исходя из величины затухания между АС и БС, преобладающее по интенсивности ЭМП в точке наблюдения принципиально не обязательно принадлежит ближайшей АС, равно как и второе по интенсивности ЭМП АС не обязательно принадлежит второй по удаленности АС. Возможны ситуации, особенно при наличии нескольких независимых сотовых сетей, когда преобладающее ЭМП АС принадлежит одной из соседних АС, но не ближайшей. Однако в силу того что все базовые статистические модели, полученные как на основе использования случайного пуассоновского пространственного распределения АС (модели (4.9) – (4.12)), так и на основе выборочного метода (модели (4.22) – (4.24)), практически совпадают при больших $N_a \approx N$, а при равномерном случайном пространственном размещении АС распределение (3.37) инвариантно к разбросу ЭИИМ (см. подразд. 3.4.2, 4.3.2), вопрос о принадлежности преобладающих ЭМП ближайшим АС не является принципиальным. Вместе с тем в пределах одной сети эта принадлежность обычно имеет место, поскольку отдельные малоразмерные элементы зоны покрытия сети обслуживаются одной и той же БС, и поэтому по крайней мере в окрестности точки наблюдения все АС, как правило, имеют близкие значения ЭИИМ.

Сначала рассмотрим ситуацию, когда подавление наиболее мощных ЭМП от ближайших AC отсутствует, точка наблюдения соответствует случайному размещению рецептора ЭМП (**H=1**). Для этой ситуации могут быть предложены следующие соотношения (п.п. 1 - 3):

1. Вероятность $p(\Pi \le \Pi_{max})$ того, что ППМ преобладающего ЭМП АС не превысит уровня Π_{max} в рассматриваемой точке наблюдения, если в сети имеется плавная автоматическая регулировка ЭИИМ АС в пределах $[0 \le P_{MS} \le P_{MS max}]$, определяется из (4.49),(5.3):

$$p(\Pi \le \Pi_{\max}) = \int_{0}^{P_{MS\max}} exp\left(-\frac{\rho P_{MS}}{4\Pi_{\max}}\right) w(P_{MS}) dP_{MS} = \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS\max}}{4\Pi_{\max}}\right)^{-\frac{2}{\nu}} \gamma\left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS\max}}{4\Pi_{\max}}\right), \quad \nu \ge 2,$$
(6.13)

где

 $\gamma\left(\frac{2}{\nu},\frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}\right) = \int_{0}^{\frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}} exp(-x) \cdot x^{\frac{2}{\nu}-1} dx - \text{ неполная гамма-функция}$

первого вида.

Соотношение (6.13) получено в предположении, что в окрестности точки наблюдения имеет место свободное PPB, что позволяет пользоваться моделью (4.49), а процесс регулировки ЭИИМ АС производится в условиях интерференции (v > 2), что требует использования (5.3). В частности, при v = 4 («интерференционная» модель PPB Введенского), используя (5.5), можно преобразовать это соотношение к следующему виду [23, 28, 29, 31]:

$$p(\Pi \le \Pi_{\max}) = \frac{2\sqrt{\Pi_{\max}}}{\sqrt{\rho P_{MS \max}}} \sqrt[]{\frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}}} \int_{0}^{\rho P_{MS \max}} exp(-t^2) dt, \quad v = 4.$$
(6.14)

Таким образом, соотношения (6.13),(6.14) являются развитием вероятностно-статистической модели (4.49), предполагающим наличие идеальной автоматической регулировки ЭИИМ АС от уровня $P_{MS max}$, соответствующего размещению АС на границе сайта, до минимально необходимого. Такой регулировке соответствуют использованные при выводе (6.13),(6.14) вероятностно-статистические модели (5.3),(5.5).

Подстановкой в (6.13),(6.14) значения $\Pi_{max} = \Pi_{E4}$ ПДУ ЭМП, установленного Нормами [9, 10, 13], а также других пороговых уровней из табл. 2.15, можно получить оценки вероятностей непревышения этих уров-

ней интенсивностью преобладающего ЭМП АС в точке наблюдения с учетом наличия в сети плавной автоматической регулировки ЭИИМ АС в пределах $[0 \le P_{MS} \le P_{MS max}]$.

2. Особый интерес представляет случай, когда территория, на которой функционирует сотовая радиосеть, дополнительно облучается («подсвечивается») одним или несколькими мощными радиопередатчиками. Например, это имеет место, если на территории города размещается радиотелевизионный передающий центр с высотной телебашней, либо если группы мощных радиопередатчиков телевизионного и ОВЧ-ЧМ вещания располагаются на высотных зданиях в пределах городской застройки.

При наличии в рассматриваемой точке пространства электромагнитного фона от других радиослужб с интенсивностью Π_{BG} , не достигающей установленных Нормами [9, 10, 13] ПДУ, принципиальный интерес представляют статистические характеристики совокупной ППМ $\Pi_m = \Pi_{BG} + \Pi_{max}$ как скалярной суммы интенсивности фонового ЭМП других радиослужб и преобладающего по энергетике ЭМП АС. Подстановкой в (6.13),(6.14) значения $\Pi_{max} = \Pi_m - \Pi_{BG}$ получим вид функции распределения вероятности совокупной ППМ Π_m ЭМИ в произвольный момент времени в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (учитываются АС всех сотовых радиосетей) при заданной интенсивности электромагнитного фона Π_{BG} :

$$p(\Pi \le (\Pi_{m} - \Pi_{BG})) =$$

$$= \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS \max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG})} \right)^{-2/\nu} \gamma \left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS \max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG})} \right), \nu \ge 2; \qquad (6.15)$$

$$p(\Pi \le (\Pi_{m} - \Pi_{BG})) =$$

$$= \frac{2\sqrt{\Pi_{m} - \Pi_{BG}}}{\sqrt{\rho P_{MS \max}}} \sqrt[]{\frac{\rho P_{MS \max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG})}} \exp(-t^{2}) dt, \quad \nu = 4.$$
(6.16)

3. Если дополнительно принять во внимание не учитываемую при оценке санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки с использованием [9, 10, 13] составляющую $\Pi_{\Sigma 2}$ электромагнитного фона, образуемого всеми прочими AC в области потенциального электромагнитного взаимодействия, определяемую из (6.11) с учетом подстановки (5.6) для соответствующего значения **v**, то выражения для условной функции распределения вероятности совокупной ППМ Π_m ЭМИ в произвольный момент времени в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи при заданной интенсивности электромагнитного фона $\Pi_{BG}+\Pi_{\Sigma 2}$ для случая H = 1 (подавление преобладающих ЭМП отсутствует) примут следующий окончательный вид:

$$p(\Pi \leq (\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2})) =$$

$$= \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS \max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2})} \right)^{-2/\nu} \gamma \left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS \max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2})} \right), \nu \geq 2; \quad (6.17)$$

$$p(\Pi \leq (\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2})) =$$

$$= \frac{2\sqrt{\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2}}}{\sqrt{\rho P_{MS max}}} \sqrt{\frac{\rho P_{MS max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2})}} \exp(-t^{2})dt, \quad v = 4.$$
(6.18)

Функции распределения (6.17),(6.18) названы условными, поскольку мы приняли уровень $\Pi_{\Sigma 2}$ электромагнитного фона, образуемого всеми AC, начиная со второй по удаленности от точки наблюдения, постоянным. В действительности ситуация сложнее, поскольку

- и в образующим этот фон ансамбле ЭМП АС имеется преобладающее по уровню ЭМП второй по удаленности АС с дисперсией, которую невозможно определить аналитически (начальные моменты (4.12)/(4.24) выше первого порядка при H = 2 отсутствуют, т.к. соответствующие интегралы расходятся);
- данный фон представляет собой случайный процесс, динамика изменения которого во времени соответствует динамике изменения во времени преобладающих ЭМП (см. подраздел 4.5).

Однако строгое аналитическое определение выражения для функции распределения вероятности совокупной ППМ Π_m ЭМИ в произвольный момент времени в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи при заданной интенсивности постоянного электромагнитного фона Π_{BG} и с учетом случайности уровня $\Pi_{\Sigma 2}$ как для рассматриваемого случая H = 1, так и для H = 2, 3,... представляется чрезвычайно громоздким и трудоемким. Столь существенное уточнение результатов (6.17),(6.18) возможно только на основе использования метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

Применительно к рассмотренной ситуации, по мнению автора, и условные функции (6.17),(6.18) дают достаточно адекватное представление о зависимостях вероятностей превышения заданных экологически значимых пороговых значений интенсивности ЭМП, приведенных в табл. 2.15, от уровней Π_{BG} и $\Pi_{\Sigma 2}$ при различных значениях максимальной ЭИИМ АС $P_{MS max}$ и средней пространственной плотности ρ АС в окрестности точки наблюдения. Подробный анализ этих зависимостей будет сделан ниже.

Далее рассмотрим ситуацию, когда имеет место подавление наиболее интенсивного ЭМП в точке наблюдения от одной из ближайшей АС, в частности, когда точка наблюдения соответствует случайному размещению одной из AC (H=2). Основные соотношения, характеризующие эту ситуацию, приведены ниже в п.п.4 – 6.

4. Вероятность $p(\Pi \le \Pi_{max})$ того, что ППМ преобладающего ЭМП АС не превысит уровня Π_{max} в рассматриваемой точке наблюдения, если в сети имеется плавная автоматическая регулировка ЭИИМ АС в пределах $[0 \le P_{MS} \le P_{MSmax}]$, определяется из (4.51),(5.3):

$$p(\Pi \le \Pi_{\max}) = \int_{0}^{P_{MS}\max} \left(1 + \frac{\rho P_{MS}\max}{4\Pi_{\max}}\right) exp\left(-\frac{\rho P_{MS}}{4\Pi_{\max}}\right) w(P_{MS}) dP_{MS} = \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS}\max}{4\Pi_{\max}}\right)^{-\frac{2}{\nu}} \left(\gamma\left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS}\max}{4\Pi_{\max}}\right) + \gamma\left(\frac{2}{\nu} + 1, \frac{\rho P_{MS}\max}{4\Pi_{\max}}\right)\right), \quad \nu \ge 2;$$

$$(6.19)$$

Как и соотношение (6.13), данное соотношение получено в предположении, что в окрестности точки наблюдения имеет место свободное PPB, что позволяет пользоваться моделью (4.51), а процесс регулировки ЭИИМ АС производится в условиях интерференции (v > 2), что требует использования (5.3). В частности, при v = 4 («интерференционная» модель PPB Введенского), используя (5.5), можно преобразовать это соотношение к следующему виду:

$$p(\Pi \le \Pi_{\max}) = \frac{2\sqrt{\Pi_{\max}}}{\sqrt{\rho P_{MSmax}}} \int_{0}^{\sqrt{\rho P_{MSmax}}} (1+t^2) exp(-t^2) dt, \quad v = 4. \quad (6.20)$$

Таким образом, соотношения (6.19),(6.20) являются развитием вероятностно-статистической модели (4.51), предполагающим наличие идеальной автоматической регулировки ЭИИМ АС от уровня $P_{MS max}$, соответствующего размещению АС на границе сайта, до минимально необходимого уровня. Такой регулировке соответствуют использованные при выводе этих соотношений вероятностно-статистические модели (5.3),(5.5). Подстановкой в (6.19),(6.20) в качестве значения Π_{max} уровня Π_{E4} ПДУ ЭМП, установленного Нормами [9, 10, 13], а также других пороговых уровней из табл. 2.15, можно получить оценки вероятностей непревышения этих уровней интенсивностью преобладающего ЭМП АС при H = 2 (одно наиболее мощное ЭМП АС в ансамбле исключено) с учетом наличия в сети плавной автоматической регулировки ЭИИМ АС в пределах $[0 \le P_{MS} \le P_{MSmax}]$.

5. Как и для H = 1, особый интерес представляет случай, когда территория, на которой функционирует сотовая радиосеть, дополнительно облучается («подсвечивается») одним или несколькими мощными радиопередатчиками. При наличии в рассматриваемой точке пространства электромагнитного фона от других радиослужб с интенсивностью Π_{BG} , не достигающей установленных Нормами [9, 10, 13] ПДУ, принципиальный интерес ППМ представляют статистические характеристики совокупной $\Pi_m = \Pi_{BG} + \Pi_{max}$ как скалярной суммы интенсивности фонового ЭМП других радиослужб и преобладающего по энергетике ЭМП АС. Подстановкой в (6.19),(6.20) П_{max}=П_m-П_{BG} получим вид функции распределения вероятности совокупной ППМ П_m ЭМИ в произвольный момент времени в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи (учитываются АС всех сотовых радиосетей) при заданной интенсивности электромагнитного фона Π_{BG} :

$$p(\Pi \le (\Pi_{m} - \Pi_{BG})) = \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS \max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG})} \right)^{-2/\nu} \times \left(\gamma \left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}} \right) + \gamma \left(\frac{2}{\nu} + 1, \frac{\rho P_{MS \max}}{4\Pi_{\max}} \right) \right), \nu \ge 2;$$
(6.21)

$$p(\Pi \leq (\Pi_{m} - \Pi_{BG})) = \frac{2\sqrt{\Pi_{m} - \Pi_{BG}}}{\sqrt{\rho P_{MS max}}} \times \sqrt{\frac{\rho P_{MS max}}{4(\Pi_{m} - \Pi_{BG})}}$$

$$\times \int_{0}^{\sqrt{\rho P_{MS max}}} (1 + t^{2}) exp(-t^{2}) dt, \quad v = 4.$$
(6.22)

6. Если, как и ранее в п.3, дополнительно принять во внимание не учитываемую при оценке санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки с использованием [9,10,13] составляющую $\Pi_{\Sigma 3}$ электромагнитного фона, образуемого всеми прочими AC в области потенциального электромагнитного взаимодействия, определяемую из (6.11) с учетом подстановки (5.6) для соответствующего значения v и за вычетом (4.52), то выражения для условной функции распределения вероятности совокупной ППМ Π_m ЭМИ в произвольный момент времени в произвольно выбранной точке зоны обслуживания сотовой радиосвязи при заданной интенсивности электромагнитного фона $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3}$, $\Pi_{\Sigma 3} = \Pi_{\Sigma 2} - \rho P_{MSmax}/[2(2+v)]$ для случая **H=2** (имеет место подавление одного преобладающего ЭМП АС) примут следующий окончательный вид:

$$p(\Pi \le (\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 3})) =$$

$$= \frac{2}{\nu} \left(\frac{\rho P_{MS \max}}{4 \left(\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2} + \frac{\rho P_{MS \max}}{2(2 + \nu)} \right)} \right)^{-\frac{2}{\nu}} \times \left(\gamma \left(\frac{2}{\nu}, \frac{\rho P_{MS \max}}{4 \left(\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2} + \frac{\rho P_{MS \max}}{2(2 + \nu)} \right)} \right) + \frac{1}{\nu} \right)$$

$$+ \gamma \left(\frac{2}{\nu} + 1, \frac{\rho P_{MS \max}}{4 \left(\Pi_m - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2} + \frac{\rho P_{MS \max}}{2(2+\nu)} \right)} \right) \right).$$
(6.23)

$$p(\Pi \le (\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 3})) = \frac{2\sqrt{\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2} + \frac{\rho P_{MS \max}}{12}}}{\sqrt{\rho P_{MS \max}}} \times \sqrt{\frac{\rho P_{MS \max}}{4\left(\Pi_{m} - \Pi_{BG} - \Pi_{\Sigma 2} + \frac{\rho P_{MS \max}}{12}\right)}}_{\sqrt{9}\left(1 + t^{2}\right) exp\left(-t^{2}\right)} dt, \quad v = 4.$$
(6.24)

Соотношения (6.10)–(6.24), полученные на основе использования (4.12)/(4.24) (4.49)/(4.51) и (5.3)–(5.7), имеют большое практическое значение. Они позволяют оценить вероятность превышения уровнем совокупного ЭМП в произвольной точке наблюдения в произвольный момент времени пороговых уровней ППМ ЭМП, принятых в качестве экологических критериев, в условиях массового распространения средств мобильной радиосвязи. При этом совокупное ЭМП в точке наблюдения формируется как сумма ансамбля произвольного числа ЭМП АС сотовой связи и постоянного электромагнитного фона заданной интенсивности, образуемого средствами информационного обслуживания общества.

И если соотношения (4.49)/(4.51) позволяют оценить опасность превышения интенсивностью преобладающего по энергетике ЭМИ АС некоторого заданного уровня в произвольной точке области обслуживания сотовой связью, то соотношения (6.10)–(6.24) позволяет оценить опасность превышения совокупной ППМ Π_m в произвольной точке этой области некоторого установленного ПДУ при условии присутствия в этой точке электромагнитного фона Π_{BG} с уровнем ниже ПДУ. Последнее принципиально важно с точки зрения возможности объективной оценки экологической опасности возведения на территории населенных пунктов мощных радиообъектов, создающих повышенный электромагнитный фон (в частности радиотелевизионных башен) в условиях массового применения средств мобильной связи, а также с точки зрения оценки экологической опасности использования средств мобильной радиосвязи в электромагнитной обстановке современного города, сформированной системами эфирного телерадиовещания, радиолокационными и радиорелейными системами и другими ранее введенными в эксплуатацию мощными источниками ЭМИ.

Учитывая важность этих результатов, подробно проиллюстрируем их графически и численно.

Ниже приведена серия рисунков с изображением расчетных кривых (4.49)/(4.51) и (6.13) – (6.24) для различных значений средней территориальной плотности AC ρ_{MS} и двух ситуаций: когда подавление преобладающих ЭМП отсутствует (H=1), и когда наиболее интенсивное ЭМП AC в точке наблюдения, принадлежащее ближайшей AC (при наличии одной сотовой радиосети) либо одной из ближайшей AC (при функционировании нескольких независимых сотовых радиосетей), подавлено (H=2). Поскольку в указанных соотношениях значения территориальной плотности и ЭИИМ AC входят в виде произведений $\rho_{MS}P_{etr}$ (если ЭИИМ всех AC одинакова и фиксирована) или $\rho_{MS}P_{MS max}$ (если ЭИИМ всех AC случайна и распределена в интенвале [0, $P_{MS max}$] по закону (5.3)/(5.5)), приведенные на рисунках семейства графиков позволяют простым пропорциональным пересчетом производить оценки требуемых вероятностных характеристик для произвольных значений ρ_{MS} , P_{etr} , $P_{MS max}$, в частности, для значения $P_{MS max} = 100$ мВт, характерного для сетей GSM-1800. Кроме того, ниже приведен целый ряд расчетных оценок, сведенных в таблицы и снабженных необходимыми комментариями, что позволяет предварительно оценить опасность тех или иных ситуаций в зависимости от применяемого энергетического критерия и предъявляемых требований к вероятности удовлетворения его требованиям, а также средней пространственной плотности и ЭИИМ АС-источников ЭМП в окрестности точки наблюдения.

Приведенные рисунки удобно сгруппировать следующим образом:

- 1. На рис. 6.4.1 6.4.4 для случая, когда подавление преобладающих ЭМП отсутствует (H=1), приведены зависимости от территориальной плотности AC ρ_{MS} [AC/M²] при различной средней мощности ЭМИ AC P_{MS} [дБВт], вероятности непревышения уровнем ППМ преобладающего ЭМП ближайшей AC уровней $\Pi_{E1} = 0,1$ мкВт/см², $\Pi_{E2} = 1$ мкВт/см², $\Pi_{E3} = 2$ мкВт/см² и $\Pi_{E4} = 10$ мкВт/см² соответственно (группа 1).
- На рис. 6.5.1 6.5.4 приведены те же зависимости вероятности непревышения уровней Π_{E1}-Π_{E4} уровнем ППМ преобладающего ЭМП от территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС Р_{MS} [дБВт], что и на рисунках группы 1, но для случая, когда наиболее интенсивное ЭМП АС в точке наблюдения устранено (H=2) (группа 2).
- 3. На рис. 6.6.1а и рис. 6.6.1б для ситуации, когда подавление преобладающих ЭМП и постоянный электромагинтный фон отсутствуют (H=1, Π_{BG} = 0), приведены зависимости функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения от территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] в случаях, когда (группа 3):
 - величина П_m определяется только ППМ наиболее интенсивного (преобладающего) ЭМП АС в точке наблюдения, а электромагнитный фон отсутствует полностью (П_{Σ2} = 0) (см. рис. 6.6.1а);

- в точке наблюдения принимается во внимание весь ансамбль ЭМП АС из окрестности радиуса R_{in}=300м: Π_m определяется как сумма ППМ наиболее интенсивного (преобладающего) ЭМП АС в точке наблюдения и средней интенсивности Π_{Σ2} электромагнитного фона от прочих АС из окрестности рассматриваемой точки (см. рис. 6.6.1б).
- На рис. 6.6.1в и рис. 6.6.1г приведены те же кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения для различной территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²], что и на рис. 6.6.1а, 6.6.1б, но в области малых вероятностей превышения величины Π_m (группа 4).
- 5. На рис. 6.6.2а и 6.6.2б приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности П_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения для различной территориальной плотности АС р_{MS} [AC/м²] для ситуации, когда подавление преобладающих ЭМП отсутствует (H=1), а величина П_m определяется как скалярная сумма ППМ наиболее интенсивного (преобладающего) ЭМП АС в точке наблюдения и ППМ электромагнитного фона в случаях (группа 5), когда
 - в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E1} = 0,1$ мкВт/см² (см. рис. 6.6.2a);
 - в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E1} = 0,1$ мкВт/см², так и электромагнитный фон от прочих АС из окрестности точки наблюдения (\mathbf{R}_{in} =300м) со средней интенсивностью $\Pi_{\Sigma 2}$ (см. рис. 6.6.26).
- 6. На рис. 6.6.3а и 6.6.3б приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения в зависимости от территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] для той же ситуации, что и в предыдущем случае (см. рис. 6.6.2а и 6.6.2б), но

для внешнего постоянного электромагнитного фона с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E2} = 1$ мкВт/см² (группа 6).

- 7. На рис. 6.6.4а 6.6.4е приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения от территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/M²] для той же ситуации, что и в предыдущих случаях (рис. 6.6.2a, 6.6.2б, 6.6.3a, 6.6.3б), но для внешнего постоянного электромагнитного фона с интенсивностью Π_{BG} , приближающейся к ПДУ $\Pi_{E4} = 10$ мкВт/см², регламентируемому [9,10] (группа 7), для случаев, когда
 - в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 3$ дБ (см. рис. 6.6.4а);
 - в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 3$ дБ, так и электромагнитный фон от прочих AC из окрестности точки наблюдения (\mathbf{R}_{in} =300м) со средней интенсивностью $\Pi_{\Sigma 2}$ (см. рис. 6.6.4б);
 - в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью П_{вG} = П_{E4} –2дБ (см. рис. 6.6.4в);
 - в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью П_{BG} = П_{E4} –2дБ, так и электромагнитный фон от прочих АС из окрестности точки наблюдения (R_{in}=300м) со средней интенсивностью П_{Σ2} (см. рис. 6.6.4г);
 - в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью П_{вG} = П_{E4} −1дБ (см. рис. 6.6.4д);
 - в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 1$ дБ, так и электромагнитный фон от прочих AC из окрестности точки наблюдения (\mathbf{R}_{in} =300м) со средней интенсивностью $\Pi_{\Sigma 2}$ (см. рис. 6.6.4е).



Рис. 6.4.1. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E1} = 0,1 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП ближайшей АС от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], подавления преобладающих ЭМП нет (**H** = 1)



Рис. 6.4.2. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E2} = 1 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП ближайшей АС от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], подавления преобладающих ЭМП нет (**H** = **1**)



Рис. 6.4.3. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E3} = 2 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП ближайшей АС от территориальной плотности АС **р**_{MS} [АС/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], подавления преобладающих ЭМП нет (**H** = 1)



Рис. 6.4.4. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E4} = 10 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП ближайшей АС от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], подавления преобладающих ЭМП нет (**H** = 1)



Рис. 6.5.1. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E1} = 0,1 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], ЭМП ближайшей АС подавлено (**H** = **2**)



Рис. 6.5.2. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E2} = 1 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], ЭМП ближайшей АС подавлено (**H** = 2)



Рис. 6.5.3. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E3} = 2 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], ЭМП ближайшей АС подавлено (**H** = **2**)



Рис. 6.5.4. Зависимости вероятности непревышения уровня **П**_{E4} = 10 мкВт/см² уровнем ППМ преобладающего ЭМП от территориальной плотности АС **р**_{MS} [AC/м²] при различной средней мощности ЭМИ АС **Р**_{MS} [дБВт], ЭМП ближайшей АС подавлено (**H** = **2**)



Рис. 6.6.1а. Функция распределения вероятности интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС в точке наблюдения в отсутствие фона (**Π**_{BG} + **Π**_{Σ2} = 0) при различной территориальной плотности АС **ρ**_{MS} [AC/м²] для **H** = **1** (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)



Рис. 6.6.16. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС и средней суммарной интенсивности Π_{Σ2} ЭМП прочих АС в окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in}=300м в отсутствие постоянного фона (П_{вG} = 0) при различной территориальной плотности АС **р**_{MS} [АС/м²] для **H** = 1



Рис. 6.6.1в. Функция распределения вероятности интенсивности Π_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС в точке наблюдения в отсутствие фона (П_{вб} + Π_{Σ2} = 0) при различной территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] для H = 1 (см. рис. 6.6.1а) в области малых вероятностей превышения величины П_m



Рис. 6.6.1г. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ2} ЭМП прочих АС из окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} в отсутствие постоянного фона (**Π**_{BG} = **0**) при различной территориальной плотности АС **ρ**_{MS} для **H** = **1** (см. рис. 6.6.1б) в области малых вероятностей превышения величины **П**_m



Рис. 6.6.2а. Функция распределения вероятности интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] совокупности преобладающего ЭМП ближайшей АС и фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E1} = 0,1 мкВт/см² при различной территориальной плотности АС **ρ**_{MS} для **H** = **1** (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)



Рис. 6.6.2б. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС, постоянного фона с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E2} = 0,1 мкВт/см² и средней суммарной интенсивности Π_{Σ2} ЭМП прочих АС в окрестности точки наблюдения радиуса R_{in} = 300м при различной территориальной плотности АС **р**_{MS} для H = 1



Рис. 6.6.3а. Функция распределения вероятности интенсивности Π_m [мкВт/см²] совокупности преобладающего ЭМП ближайшей АС и фона с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E2} = 1 мкВт/см² при различной территориальной плотности АС ρ_{MS} для H = 1 (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)



Рис. 6.6.36. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС, постоянного фона с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E2} = 1 мкВт/см² и средней суммарной интенсивности П_{Σ2} ЭМП прочих АС в окрестности точки наблюдения радиуса R_{in} = 300м при различной территориальной плотности АС **р**_{MS} для H = 1



Рис. 6.6.4а. Функция распределения вероятности интенсивности **П**_m [мкВт/см²] совокупности преобладающего ЭМП ближайшей АС и фона с интенсивностью **П**_{BG} = **П**_{E4} –3дБ при различной территориальной плотности АС **р**_{MS} для **H** = **1** (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)



Рис. 6.6.4б. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС, постоянного фона с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E4} –3дБ и средней суммарной интенсивности Π_{Σ2} ЭМП прочих АС в окрестности точки наблюдения радиуса R_{in} = 300м при различной территориальной плотности АС ρ_{MS} для H = 1



Рис. 6.6.4в. Функция распределения вероятности интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] совокупности преобладающего ЭМП ближайшей АС и фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E4} –2дБ при различной территориальной плотности АС **ρ**_{MS} для **H** = **1** (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)



Рис. 6.6.4г. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС, постоянного фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E4} –2дБ и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ2} ЭМП прочих АС в окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} = 300м при различной территориальной плотности АС **ρ**_{MS} для **H** = **1**



Рис. 6.6.4д. Функция распределения вероятности интенсивности **П**_m [мкВт/см²] совокупности преобладающего ЭМП ближайшей АС и фона с интенсивностью **П**_{BG} = **П**_{E4} –1дБ при различной территориальной плотности АС **р**_{MS} для **H** = **1** (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)



Рис. 6.6.4e. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] преобладающего ЭМП ближайшей АС, постоянного фона с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E4} –1дБ и средней суммарной интенсивности Π_{Σ2} ЭМП прочих АС в окрестности точки наблюдения радиуса R_{in} = 300м при различной территориальной плотности АС ρ_{MS} для H = 1
- На рис. 6.7.1а и рис. 6.7.1б для ситуации, когда преобладающее ЭМП АС в точке наблюдения устраняется и постоянный электромагнитный фон отсутствуют (H=2, Π_{BG} = 0), приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения для различной территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] в случаях, когда (группа 8)
 - величина Π_m в точке наблюдения определяется только ППМ второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC, а электромагнитный фон отсутствует полностью (Π_{Σ3} = Π_{Σ2} ρP_{MSmax}/[2(2+v)] = 0) (см. рис. 6.7.1а);
 - в точке наблюдения принимается во внимание весь ансамбль ЭМП АС из окрестности радиуса R_{in} = 300м: П_m определяется как сумма интенсивностей второго по мощности ЭМП от одной из ближайших АС и средней интенсивности П_{Σ3} электромагнитного фона от прочих АС из окрестности данной точки (см. рис. 6.7.1б).

Данная ситуация близка к ситуации, проиллюстрированной с помощью рис. 6.6.1a и 6.6.1б; эти ситуации отличаются значением параметра **H** (наличием подавления одного преобладающего по уровню ЭМП АС в точке наблюдения).

9. На рис. 6.7.2а и 6.7.26 приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения для различной средней территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] для ситуации, когда преобладающее ЭМП АС в точке наблюдения устраняется (H = 2), а величина Π_m определяется как скалярная сумма ППМ второго по мощности ЭМП от одной из ближайших АС в точке наблюдения и ППМ электромагнитного фона в случаях (группа 9), для которых характерно следующее:

- в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E1} = 0,1$ мкВт/см² (см. рис. 6.7.2а);
- в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E1} = 0,1$ мкВт/см², так и электромагнитный фон от прочих АС из окрестности точки наблюдения ($\mathbf{R}_{in} = 300$ м) со средней интенсивностью $\Pi_{\Sigma 3}$ (см. рис. 6.7.26).

Как и в предыдущем случае, данная ситуация близка к ситуации, проиллюстрированной с помощью рис. 6.6.2a и 6.6.2б; эти ситуации также отличаются только значением параметра **H** (наличием подавления одного преобладающего по уровню ЭМП АС в точке наблюдения).

10. На рис. 6.7.3а и 6.7.3б приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения при различной средней территориальной плотности АС ρ_{MS} [AC/м²] для той же ситуации, что и в предыдущем случае (см. рис. 6.7.2а и 6.7.2б), но для внешнего постоянного электромагнитного фона с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E2} = 1$ мкВт/см² (группа 10).

Как и в двух предыдущих случаях, данная ситуация близка к ситуации, проиллюстрированной с помощью рис. 6.6.3a и 6.6.3б; указанные ситуации отличаются только значением параметра **H** (наличием подавления одного преобладающего по уровню ЭМП АС в точке наблюдения).

11. На рис. 6.7.4а – 6.7.4е приведены кривые функции распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] ЭМП в точке наблюдения при различной территориальной плотности АС ρ_{MS} [АС/м²] для той же ситуации, что и в предыдущих случаях (см. рис. 6.7.2a, 6.7.2б, 6.7.3a, 6.7.3б), но для внешнего постоянного электромагнитного фона с интенсивностью Π_{BG} , приближающейся к ПДУ $\Pi_{E4} = 10$ мкВт/см², регламентируемому [9, 10] (группа 7), для случаев, когда

- в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью П_{вG} = П_{E4} 3дБ (рис. 6.7.4а);
- в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 3$ дБ, так и электромагнитный фон от прочих AC из окрестности точки наблюдения ($\mathbf{R}_{in} = 300$ м) со средней интенсивностью $\Pi_{\Sigma 3}$ (рис. 6.7.46);
- в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью П_{вG} = П_{E4} 2дБ (рис. 6.7.4в);
- в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E4} –2дБ, так и электромагнитный фон от прочих AC из окрестности точки наблюдения (**R**_{in} = 300м) со средней интенсивностью Π_{Σ3} (рис. 6.7.4г);
- в точке наблюдения присутствует только внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью П_{вG} = П_{E4} –1дБ (рис. 6.7.4д);
- в точке наблюдения присутствует как внешний постоянный электромагнитный фон с интенсивностью Π_{BG} = Π_{E4} −1дБ, так и электромагнитный фон от прочих АС из окрестности точки наблюдения (**R**_{in} = 300м) со средней интенсивностью Π_{Σ3} (рис. 6.7.4е).

Как и в трех предыдущих случаях, данная ситуация близка к ситуации, проиллюстрированной с помощью рис. 6.6.4a и 6.6.4e; указанные ситуации отличаются только значением параметра **H** (наличием подавления одного преобладающего по уровню ЭМП АС в точке наблюдения).

12. Далее в таблицах для различных фиксированных значений ЭИИМ АС приведены оценки значений средней пространственной плотности ρ_{MS} АС-источников ЭМИ, при которой с заданной вероятностью р(Π > Π_Π) достигается превышение заданного уровня Π_Π интенсивности ЭМП уровнем П преобладающего ЭМП в ансамбле ЭМП АС в точке наблюдения (табл. 6.3), а также оценки вероятности превышения ПДУ П_{Е4}=



Рис. 6.7.1а. Функция распределения вероятности интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших АС в точке наблюдения в отсутствие фона (**Π**_{BG} + **Π**_{Σ3} = 0) при различной территориальной плотности АС **ρ**_{MS} [AC/м²] для **H = 2** (преобладающее ЭМП АС устраняется)



Рис. 6.7.16. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ3} ЭМП прочих AC в окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} = 300м в отсутствие постоянного фона (**Π**_{BG} = **0**) при различной территориальной плотности AC **ρ**_{MS} [AC/м²] для **H** = **2**



Рис. 6.7.2а. Функция распределения вероятности интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] совокупности второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC и фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E1} = 0,1 мкВт/см² при различной территориальной плотности AC **ρ**_{MS} для **H** = **2** (преобладающее ЭМП AC устраняется)



Рис. 6.7.26. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC, фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E2} = 0,1 мкВт/см² и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ3} ЭМП прочих AC в окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} = 300м при различной территориальной плотности AC **ρ**_{MS} для **H** = **2**



Рис. 6.7.3а. Функция распределения вероятности интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] совокупности второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC и фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E2} = 1 мкВт/см² при различной территориальной плотности AC **ρ**_{MS} для **H** = **2** (преобладающее ЭМП AC устраняется)



Рис. 6.7.36. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC, фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E2} = 1 мкВт/см² и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ3} ЭМП прочих AC в окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} = 300м при различной территориальной плотности AC **р**_{MS} для **H** = **2**



Рис. 6.7.4а. Функция распределения вероятности интенсивности **П**_m [мкВт/см²] совокупности второго по мощности ЭМП от одной из ближайших АС и фона с интенсивностью **П**_{BG} = **П**_{E4} –3дБ при различной территориальной плотности АС **р**_{MS} для **H** = **2** (преобладающее ЭМП АС устраняется)



Рис. 6.7.4б. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC, фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E4} –3дБ и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ3} ЭМП прочих AC из окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} = 300м при различной территориальной плотности AC **ρ**_{MS} для **H** = **2**



Рис. 6.7.4в. Функция распределения вероятности интенсивности **П**_m [мкВт/см²] совокупности второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC и фона с интенсивностью **П**_{BG} = **П**_{E4} –2дБ при различной территориальной плотности AC **р**_{MS} для **H** = **2** (преобладающее ЭМП AC устраняется)



Рис. 6.7.4г. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности **Π**_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC, фона с интенсивностью **Π**_{BG} = **Π**_{E4} –2дБ и средней суммарной интенсивности **Π**_{Σ3} ЭМП прочих AC в окрестности точки наблюдения радиуса **R**_{in} = 300м при различной территориальной плотности AC **ρ**_{MS} для **H** = **2**



Рис. 6.7.4д. Функция распределения вероятности интенсивности **П**_m [мкВт/см²] совокупности второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC и фона с интенсивностью **П**_{BG} = **П**_{E4} –1дБ при различной территориальной плотности AC **р**_{MS} для **H** = **2** (преобладающее ЭМП AC устраняется)



Рис. 6.7.4е. Функция распределения вероятности совокупной интенсивности Π_m [мкВт/см²] второго по мощности ЭМП от одной из ближайших AC, фона с интенсивностью $\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 1$ дБ и средней суммарной интенсивности $\Pi_{\Sigma3}$ ЭМП прочих AC в окрестности точки наблюдения радиуса $R_{in} = 300$ м при различной территориальной плотности AC ρ_{MS} для H = 2

ЭИИМ АС P _{etr} ,	Средняя пространственная плотность АС-источников ЭМИ ρ_{MS} [AC/m ²], при которой превышение заданного уровня Π_{Π} интенсивно- сти ЭМП уровнем Π преобладающего ЭМП в ансамбле ЭМП АС в точке наблюдения достигается с заданной вероятностью р (П>П _П)						
дыят (мят, Вт)	H=1 (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)			H=2 (одно наиболее мощное ЭМП АС устраняется)			
	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E1}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E2}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E4}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E1}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E2}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{\rm E4}$	
$p(\Pi > \Pi_{\Pi}) = 0,2$							
-30 (1,0 мВт)	0,9	9	>10	3,3	>10	>10	
-25 (3,16 мBт)	0,28	2,8	>10	1,03	>10	>10	
- 20 (10 мВт)	0,09	0,9	9	0,33	3,3	>10	
-15 (31,6 мВт)	0,028	0,28	2,8	0,103	1,03	>10	
- 10 (100 мВт)	0,009	0,09	0,9	0,033	0,33	3,3	
- 5 (316 мВт)	0,0028	0,028	0,28	0,0103	0,103	1,03	
0 (1,0 Вт)	0,0009	0,009	0,09	0,0033	0,033	0,33	
5 (3,16 Вт)	0,00028	0,0028	0,028	0,00103	0,0103	0,103	
10 (10,0 Вт)	0,00009	0,0009	0,009	0,00033	0,0033	0,033	
$p(\Pi > \Pi_{\Pi}) = 0,1$							
-30 (1,0 мВт)	0,42	4,2	>10	2,1	>10	>10	
-25 (3,16 мBт)	0,13	1,3	>10	0,69	6,9	>10	
— 20 (10 мВт)	0,042	0,42	4,2	0,21	2,1	>10	
- 15 (31,6 мВт)	0,013	0,13	1,3	0,069	0,69	6,9	
— 10 (100 мВт)	0,0042	0,042	0,42	0,021	0,21	2,1	
- 5 (316 мВт)	0,0013	0,013	0,13	0,0069	0,069	0,69	
0 (1,0 Вт)	0,00042	0,0042	0,042	0,0021	0,021	0,21	
5 (3,16 Вт)	0,00013	0,0013	0,013	0,00069	0,0069	0,069	
10 (10,0 Вт)	0,000042	0,00042	0,0042	0,00021	0,0021	0,021	
$p(\Pi > \Pi_{\Pi}) = 0,05$							
-30 (1,0 мВт)	0,2	2	>10	1,4	>10	>10	
<i>—</i> 25 (3,16 мВт)	0,064	0,64	6,5	0,44	4,4	>10	
— 20 (10 мВт)	0,02	0,2	2	0,14	1,4	>10	
- 15 (31,6 мВт)	0,0064	0,064	0,65	0,044	0,44	4,4	
— 10 (100 мВт)	0,002	0,02	0,2	0,014	0,14	1,4	
- 5 (316 мВт)	0,00064	0,0064	0,065	0,0044	0,044	0,44	
0 (1,0 Вт)	0,0002	0,002	0,02	0,0014	0,014	0,14	
5 (3,16 Вт)	0,000064	0,00064	0,0065	0,00044	0,0044	0,044	
10 (10,0 Вт)	0,00002	0,0002	0,002	0,00014	0,0014	0,014	

Окончание табл. 6.3

ЭИИМ АС Р еtr, дБВт (мВт,	Средняя пространственная плотность АС-источников ЭМИ р _{мs} [AC/м ²], при которой превышение заданного уровня П _п интенсивности ЭМП уровнем П преобладающего ЭМП в ансамбле ЭМП АС в точке наблюдения достигается с заданной вероятностью р(П>П _п)						
Вт)	H=1 (подавление преобладающих ЭМП АС отсутствует)			H=2 (одно наиболее мощное ЭМП АС устраняется)			
	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E1}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E2}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E4}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E1}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E2}$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{\rm E4}$	
$p(\Pi > \Pi_{\Pi}) = 0,01$							
-30 (1,0 мВт)	0,04	0,4	4	0,6	6	>10	
- 25 (3,16 мВт)	0,013	0,13	1,3	0,19	1,9	>10	
- 20 (10 мВт)	0,004	0,04	0,4	0,06	0,6	6	
- 15 (31,6 мВт)	0,0013	0,013	0,13	0,019	0,19	1,9	
- 10 (100 мВт)	0,0004	0,004	0,04	0,006	0,06	0,6	
- 5 (316 мВт)	0,00013	0,0013	0,013	0,0019	0,019	0,19	
0 (1,0 Вт)	0,00004	0,0004	0,004	0,0006	0,006	0,06	
5 (3,16 Вт)	0,000013	0,00013	0,0013	0,00019	0,0019	0,019	
10 (10,0 Вт)	0,000004	0,00004	0,4	0,00006	0,0006	0,006	

Таблица 6.4

Средняя про- странствен- ная плот- ность АС- источников ЭМИ рмs [AC/м ²]	Вероятность превышения ПДУ Π_{E4} =10 мкВт/см ² совокупной интенсивно- стью Π_{Σ} ЭМП постоянного электромагнитного фона Π_{BG} и ансамбля ЭМП АС из окрестности точки наблюдения радиуса R_{in} =300м					
	Учитывается тол ладающего ЭМІ АС в точке	ько ППМ П преоб- I в ансамбле ЭМП наблюдения	Учитывается весь ансамбль ЭМП АС из окрестности точки наблюде- ния (R _{in} =300м)			
	H=1 (подавле- ние ЭМП АС отсутствует),	H=2 (устраняется одно наиболее мощное ЭМП АС),	H=1 (подавление ЭМП АС отсут- ствует),	H=2 (устраняется одно наиболее мощное ЭМП АС),		
	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} + \Pi$		
$Π_{BG} = Π_{E1} \le 0,1$ MKBT/cM ²						
0,0001	0,21.10-4	0,4.10-9	$0,21 \cdot 10^{-4}$	0,4.10-9		
0,001	0,21.10-3	0,4.10-7	0,21.10-3	0,4.10-7		
0,01	0,21.10-2	0,4.10-5	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$		
0,1	0,0205	0,4.10-3	0,027	0,6.10-3		
1	0,175	0,03	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG}+\Pi_{\Sigma 3}>\Pi_{E4}$		

Окончание табл. 6.4

	Вероятность превышения ПДУ $\Pi_{E4}=10$ мкВт/см ² совокупной интенсивно-								
Средняя про-	стью Π_{Σ} ЭМП постоянного электромагнитного фона Π_{BG} и ансамоля ЭМП								
странствен-	Vчитывается топ	крестности точки на ько ППМ П преоб-	Vчитывается вес	Учитывается весь ансамбль ЭМП					
ная плот-	ладающего ЭМГ	I в ансамбле ЭМП	АС из окрестности точки наблюле-						
ность АС-	АС в точке	наблюдения	ния (R _{in} =300м)						
источников	Н=1 (подавле-	Н=2 (устраняется	H=1 (подавление	Н=2 (устраняется					
ЭМИ	ние ЭМП АС	одно наиболее	ЭМП АС отсут-	одно наиболее					
$\rho_{\rm MS} \left[{\rm AC/M}^2 \right]$	отсутствует),	мощное ЭМП АС),	ствует),	мощное ЭМП АС),					
	$\Pi_{\Sigma}=\Pi_{BG}+\Pi$	$\Pi_{\Sigma}=\Pi_{BG}+\Pi$	$ \prod_{\Sigma} = \prod_{BG} + \prod_{\Sigma 2} + \prod_{\Sigma}$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} + \Pi$					
		$\Pi_{BG} = \Pi_{E2} = 1 \text{ MKB}_{T}$	г/см ²						
0,0001	0,23.10-4	0,48.10-9	0,23.10-4	0,48.10-9					
0,001	0,23.10-3	0,48.10-7	0,23.10-3	0,48.10-7					
0,01	0,23.10-2	0,48.10-5	0,23.10-2	0,5.10-5					
0,1	0,023	0,47.10-3	0,03	0,77.10-3					
1	0,19	0,035	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$					
	Πι	$_{BG} = \Pi_{E4} - 3 \ \text{дБ} = 5 \ \text{м}$	кВт/см ²						
0,0001	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-8}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-8}$					
0,001	$0,42 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-6}$	$0,42 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-6}$					
0,01	$0,42 \cdot 10^{-2}$	0,16.10-4	0,43.10-2	0,17.10-4					
0,1	0,04	$0,15 \cdot 10^{-2}$	0,07	$0,23 \cdot 10^{-2}$					
1 0,3		0,09	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$					
$\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 2 \ дE = 6,3 \ MKBT/cM^2$									
0,0001	$0,56 \cdot 10^{-4}$	0,28.10-8	$0,56 \cdot 10^{-4}$	0,3.10-8					
0,001	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-6}$					
0,01	$0,56 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$					
0,1	0,053	0,27.10-2	0,12	0,012					
1	0,36	0,125	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$					
	Π _B	_G = П _{Е4} - 1 дБ = 7,9 м	икВт/см ²						
0,0001	10-4	0,9.10-8	10 ⁻⁴	0,9.10-8					
0,001	10-3	$0,9 \cdot 10^{-6}$	10 ⁻³	0,9.10-6					
0,01	10 ⁻²	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1.10^{-2}$	10 ⁻⁴					
0,1	0,09	$0,8 \cdot 10^{-2}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, Π _{BG} + Π _{Σ3} ≈ Π _{E4}					
1	0,5	0,27	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$					
$\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 0.1 \ дБ = 9,77 \ MKBT/cM^2$									
0,0001	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,8.10-6					
0,001	0,8.10-2	$0,8 \cdot 10^{-4}$	10 ⁻²	0,8.10-4					
0,01	0,08	$0,8 \cdot 10^{-2}$	0,3	0,05					
0,1	0,45	0,26	1, $\Pi_{BG}+\Pi_{\Sigma 2}>\Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG}+\Pi_{\Sigma 3}>\Pi_{E4}$					
1	0,83	0,75	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$					

=10 мкВт/см² совокупной интенсивностью Π_{Σ} ЭМП постоянного электромагнитного фона Π_{BG} и ансамбля ЭМП АС из окрестности точки наблюдения радиуса $\mathbf{R}_{in} = 300$ м для различных значений средней пространственной плотности АС-источников ЭМИ в сетях GSM-900, в которых $\mathbf{P}_{MS max} = 0,25$ Вт (табл. 6.4).

Результаты анализа

При анализе полученных выше результатов целесообразно принять во внимание следующие ранее оговоренные соображения и обстоятельства:

1. По имеющимся данным, практически безопасный для здоровья человека электромагнитный фон не превышает уровня $\Pi_{E1} = 0,1$ мкВт/см²; уровни электромагнитного фона в пределах $\Pi_{E1} \leq \Pi_m \leq \Pi_{E4}$, т.е. от 0,1 мкВт/см² до 10 мкВт/см² могут считаться приемлемыми с точки зрения вынужденных экологических рисков для населения, уровни электромагнитного фона выше уровня $\Pi_{E4} = 10$ мкВт/см² должны быть признаны недопустимыми по крайней мере на территории тех стран, которыми приняты нормативы [9, 10, 11].

2. На основании имеющихся данных [97, 98] о пространственной плотности абонентов сотовой связи в различных ситуациях, а также данных [54, 55, 58, 91] о средней нагрузке, создаваемой одним абонентом сотовой связи, в сети можно сделать вывод (см. табл. 6.2), что средняя пространственная плотность АС-источников ЭМИ может достигать уровня $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$ в помещениях деловых центров, уровня $\rho_{MS} = 0,1 \text{ AC/m}^2$ в местах локального массового скопления народа (торговые центры, места проведения политических мероприятий и спортивных соревнований и т.п.), а также до уровня [0,001 $\leq \rho_{MS} \leq 0,01$] АС/м² в пешеходных зонах; значение $\rho_{MS} = 1 \text{ AC/m}^2$ может быть принято в качестве предельно возможного в экстремальных ситуациях.

3. При размещении на территории крупных населенных пунктов мощных передающих центров эфирного телерадиовещания типовой является ситуация, когда на значительных территориях городской застройки планируемый и/или фактический уровень электромагнитного фона незначительно (на 1 – 3 дБ и менее) ниже ПДУ, установленного нормами [9, 10].

4. В ближайшие годы следует ожидать практически полного охвата всего населения услугами сотовой радиосвязи, при этом количество эксплуатируемых АС примерно в 1,1 – 1,2 раза превысит численность населения (это превышение будет определяться тарифной политикой операторов сотовой связи в отношении межсетевых соединений).

5. В ближайшем будущем следует ожидать насыщения спальных и офисных помещений, транспортных средств, территорий предприятий промышленности торговли и сферы услуг оборудованием различных радиоинтерфейсов и средств беспроводного доступа с пространственной плотностью, сопоставимой с пространственной плотностью АС сотовой связи в режиме излучения [101].

6. Содержащийся в приведенных выше соотношениях параметр **H** "прореживания" поля случайных точек размещения AC в пространстве по существу характеризует степень случайности взаимного размещения точки наблюдения и ближайших AC-источников излучения. Совершенно случайный выбор места размещения точки наблюдения соответствует значению H = 1. Введение любых ограничений на размещение точки наблюдения (например, ограничение ее размещения непосредственно вблизи излучающей AC), либо ограничений на излучение AC-источника наиболее интенсивного ЭМП в случайно выбранной точке наблюдения соответствует случаю H > 1, причем значение H не обязательно является целым. В частности, на увеличение значения H влияет любой элемент поведения человека, положение которого в пространстве рассматривается как точка наблюдения,

направленный на защиту от действия ЭМП ближайшей AC-источника ЭМП. Рассматривая случаи для H = 1 и H = 2, мы обеспечиваем своеобразную вилочную оценку опасности тех или иных ситуаций с предварительным обобщенным учетом возможного внесения ограничений на случайность взаимного расположения точки наблюдения и ближайших AC-источников ЭМП.

Принимая во внимание вышеперечисленные соображения и обстоятельства, а также приведенные выше рисунки и данные таблиц, обратим внимание на следующее:

1. В отсутствие электромагнитного фона вероятность превышения интенсивностью преобладающего ЭМП от одной из ближайших AC уровня $\Pi_{E4} = 10 \text{ мкBt/cm}^2$ в произвольной точке в произвольный момент времени составляет 0,02 при $\rho_{MS} = 0,1 \text{ AC/m}^2$ и достигает 0,175 при $\rho_{MS} = 1 \text{ AC/m}^2$. Последнее означает, что в принятых условиях (места массового скопления народа, $\rho_{MS} = 0,1 \text{ AC/m}^2$) в произвольный момент времени для каждых 20 человек из тысячи уровень преобладающего ЭМП от одной из ближайших AC превысит ПДУ электромагнитного фона, установленный для населения нормами [9,10].

2. В отсутствие электромагнитного фона вероятность превышения интенсивностью ЭМИ преобладающего ЭМП от одной из ближайших AC уровня $\Pi_{E2} = 1 \text{ MkBt/cm}^2$ составляет 0,02 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$ и достигает 0,175 при $\rho_{MS} = 0,1 \text{ AC/m}^2$ и 0,5 при $\rho_{MS} = 1 \text{ AC/m}^2$. Последнее означает, что в принятых условиях (места массового скопления народа, $\rho_{MS} = 0,1 \text{ AC/m}^2$) в произвольный момент времени для каждых 17 – 18 человек из ста уровень преобладающего ЭМП от одной из ближайших AC превысит уровень, соответствующий принятому ранее в СССР ПДУ ЭМП, соответствующему нормам [50].

3. Для малых значений вероятности превышения интенсивностью преобладающего ЭМП одной из ближайших АС заданного уровня Π_{Π} ($P(\Pi \ge \Pi_0) \le 0,1$) вместо сложной модели (4.49) можно пользоваться более простой моделью [47]:

$$P_{H=1}(\Pi \ge \Pi_{\Pi}) \approx \frac{\rho_{MS} P_{etr}}{4\Pi_{\Pi}} \approx \frac{\rho_{MS} P_{MS max}}{12\Pi_{\Pi}};$$

$$P_{H=2}(\Pi \ge \Pi_{\Pi}) \approx \frac{1}{2} P_{H=1}^{2} (\Pi \ge \Pi_{\Pi}).$$
(6.25)

4. Массовое применение маломощных радиоинтерфейсов типа Bluetooth, DECT в офисах, а также в жилых помещениях в рамках перспективной концепции «умного дома» (SmartHouse) [101] также может представлять серьезную экологическую опасность. Так, вероятность $P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})$ превышения интенсивностью ЭМИ этих устройств уровней $\Pi_{\Pi} = \Pi_{E2}$ и $\Pi_{\Pi} = \Pi_{E4}$ при ЭИИМ этих устройств $P_{etr} = 10$ мВт принимает значения, приведенные ниже в таблице 6.5:

Таблица 6.5.

Плотность	$P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})$			
р, ед/м ²	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E2} = 1 \text{ MKBT/cm}^2$	$\Pi_{\Pi} = \Pi_{E4} = 10 \text{ mkBt/cm}^2$		
1	0,22	0,025		
0,1	0,025	0,0025		
0,01	0,0025	0,00025		
0,001	0,00025	0,000025		

Следует подчеркнуть, что, например, вероятность $P(\Pi \ge \Pi_{\Pi}) = 0,0025$ в правом столбце табл.6.5 означает, что при массовом применении этих радиоинтерфейсов в плотной городской застройке деловых центров и жилых кварталов ($\rho \rightarrow 0,1$ ед/м²) в произвольный момент времени в среднем для каждых 25 человек из 10 тысяч уровень электромагнитного фона будет превышать ПДУ даже без учета ЭМИ других источников (станции эфирного телерадиовещания, АС сотовой связи, бытовая техника и т.п.). Оценки **Р**(**П** ≥ **П**_П) для других значений ЭИИМ этих устройств могут быть получены из рис. 6.4.1 – 6.4.4.

5. Средняя пространственная плотность АС-источников ЭМП, при которой с вероятностью $P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})$ достигается превышение заданного уровня Π_{Π} интенсивности ЭМП в точке наблюдения уровнем преобладающего ЭМП АС, для малых $P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})$ может быть определена приблизительно из следующих простых соотношений:

$$\rho_{\text{MS Pr}} \approx \frac{4\Pi_{\Pi} P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})}{P_{\text{etr}}} \approx \frac{12\Pi_{\Pi} P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})}{P_{\text{MS max}}}, \quad \text{H} = 1. \quad (6.26)$$

$$\rho_{\text{MS Pr}} \approx \frac{4\Pi_{\Pi} \sqrt{2P(\Pi \ge \Pi_{\Pi}) - P^{2}(\Pi \ge \Pi_{\Pi})}}{P_{\text{etr}}} \approx \frac{12\Pi_{\Pi} \sqrt{2P(\Pi \ge \Pi_{\Pi}) - P^{2}(\Pi \ge \Pi_{\Pi})}}{P_{\text{MS max}}}, \quad \text{H} = 2.$$

6. В присутствии электромагнитного фона интенсивностью $\Pi_{E2} = 1 \text{ мкBt/cm}^2 \Pi \Box Y \Pi_{E4} = 10 \text{ мкBt/cm}^2$, установленный [9,10], превышается в произвольной точке пространства в произвольный момент времени интенсивностью преобладающего ЭМП AC с вероятностью 0,0023 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$ и с вероятностью 0,023 при $\rho_{MS} = 0,1 \text{ AC/m}^2$. Для этой интенсивности фона уровень $\Pi_{E3} = 2 \text{ мкBt/cm}^2$, принятый в качестве ПДУ мэриями Москвы и Парижа [13,14], превышается с вероятностью 0,0021 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$, с вероятностью 0,021 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$, с вероятностью 0,021 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$ и с вероятностью 0,021 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$, с вероятностью 0,021 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$ и с вероятностью 0,021 при $\rho_{MS} = 0,01 \text{ AC/m}^2$. Последнее означает, что при указанном уровне электромагнитного фона в местах массового скопления людей для

каждых 20...200 человек из тысячи в произвольный момент времени имеет место превышение принятого в столицах России и Франции ПДУ преобладающим ЭМП АС сотовой связи.

7. В области малых вероятностей $P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})$ превышения совокупной интенсивностью ЭМП заданного порогового уровня эта вероятность определяется ППМ преобладающего ЭМП АС в точке наблюдения. Этот вывод подтверждается не только результатами подразд. 4.6.2 и кривыми рис. 4.3, 4.4, а также данными табл. 6.4 в области $\rho_{MS} \le 0,01$ АС/м², но и сравнением кривых на рис. 6.6.1a и на рис. 6.6.1б, а также сравнением этих же кривых в области малых значений $P(\Pi \ge \Pi_{\Pi})$ (либо в области больших значений $p(\Pi < (\Pi_m - \Pi_{\Sigma^2})))$ на рис. 6.6.1в, 6.6.1г.

8. При больших территориальных плотностях АС существенное значение начинает приобретать составляющая электромагнитного фона, формируемая как сумма средних уровней ЭМП АС из окрестности точки наблюдения (за исключением преобладающего ЭМП АС). При плотностях $\rho_{MS} = 0.01...0.1 \text{ AC/m}^2$ эта составляющая заметно повышает вероятность превышения ПДУ Π_{E4} совокупной интенсивностью ансамбля ЭМП АС ПДУ в случайно выбранной точке наблюдения, а при $\rho_{MS} > 0.3 \text{ AC/m}^2$ эта составляющая электромагнитного фона превышает ПДУ Π_{E4} .

В присутствии электромагнитного фона интенсивностью на 1 – 3 дБ ниже ПДУ ЭМП для населения опасность превышения совокупной интенсивностью электромагнитного поля этого ПДУ Π_{E4} оказывается достаточно заметной (см. табл. 6.4). Если же интенсивность фона ниже ПДУ менее чем на 1 дБ, то ПДУ превышается всегда при плотностях АС $\rho_{MS} \ge 0.1$ АС/м². Если интенсивность фона ниже ПДУ всего на 0,1 дБ, что соответствует ситуации на границе санитарно-защитной зоны мощного радиотелевизионного передатчика, то ПДУ превышается практически всегда при плотностях AC $\rho_{MS} \ge 0.01 \text{ AC/m}^2$.

Эти данные наглядно свидетельствуют о том, что при массовом охвате населения средствами мобильной связи доля этих средств в формировании совокупного электромагнитного фона оказывается значительной, что, по-видимому, требует пересмотра критериев [9,10] допустимости размещения в населенных пунктах мощных источников радиоизлучения (станции эфирного телерадиовещания, мощные РЛС и т.п.).

Использованные при расчетах значения средней пространственной плотности АС-источников ЭМИ опираются на заслуживающие доверия прогнозы (см. табл. 6.1, 6.2), поэтому в свете приведенных выше оценок влияние электромагнитного фона на экологическую безопасность сотовых радиосетей в условиях современного города (равно как и влияние сотовых радиосетей на экологическую безопасность радиотехнических объектов, размещаемых в городской застройке) представляется заслуживающим безусловного внимания.

6.4. Оценки совокупного уровня ЭМП БС сотовой радиосети

ЭИИМ БС достаточно велики и, исходя из данных табл. 2.10 с учетом применения антенн с усилением до 15...17 дБ, а также многоканальности БС, могут достигать многих киловатт. Поэтому оценка экологической опасности массового использования сотовой связи в условиях присутствия электромагнитного фона, образуемого средствами информационного обслуживания общества, была бы неполной без оценивания экологической опасности совокупного уровня ЭМП БС сотовых радиосетей. Выполним эти оценки по методике, использованной выше в подразд. 6.2.1.

Рассмотрим ситуацию вблизи земной поверхности на высоте

 $h \approx 1,5...2$ м. При высотах подвеса антенн БС в десятки метров радиус R_{BP} области, в пределах которой на трассах «БС-АС» может быть использована модель условий РРВ в свободном пространстве (граница «breakpoint»), определяется соотношением (6.3) и составляет примерно 1 км для GSM-900 и примерно 2 км для GSM-1800. Поэтому всю область потенциального электромагнитного взаимодействия вокруг точки наблюдения со случайно выбранными координатами разобьем на две зоны:

- внутреннюю зону, в которой расстояния между БС и точкой наблюдения составляют $H_{BS} \le R \le R_{in}, R_{in} \approx 1$ км, и
- внешнюю зону, в которой расстояния между БС и точкой наблюдения составляют **R** > **R**_{in}, и в которой могут быть использованы модель условий РРВ Окамура-Хата [71] с параметром **v** = **4**,**49**–**0**,**655 lg H**_{BS} ≈ 3...4 в базовой модели (3.1) условий РРВ. Ограничимся размерами этой области 20 км вокруг точки наблюдения с учетом области адекватности модели условий РРВ Окамура-Хата (1 км ≤ **R** ≤ 20 км).

Рассмотрим наихудший с экологической точки зрения случай, для которого могут быть дополнительно приняты следующие допущения:

1. Пренебрежем зависимостью ЭИИМ БС P_{BS} в вертикальной плоскости от угла визирования точки наблюдения из точки подвеса антенны БС и ограничимся рассмотрением ситуации с $P_{BS} = const;$

2. Будем считать, что ЭИИМ БС установлена максимально допустимой с экологической точки зрения, т.е. под базовой станцией на земной поверхности уровень ЭМП БС не должен превышать ПДУ $\Pi_{E4} = 10 \text{ мкBt/cm}^2$. Поскольку $\mathbf{H}_{BS} >> \mathbf{h}$, различием ППМ ЭМП БС у поверхности и на высоте \mathbf{h} головы человека над поверхностью пренебрежем.

 Исходя из предположения стопроцентного охвата городского населения услугами сотовой связи, будем полагать, что территориальная плотность БС в городской застройке находится в следующих пределах: 1 < ρ_{BS} < 10 $[\mathrm{BC/km}^2] (10^{-6} \dots 10^{-5} \mathrm{BC/m}^2).$

Для этого случая могут быть использованы модели (3.31), (6.1)/(6.4). Величина ЭИИМ БС в данном случае определится из условий «свободного» PPB:

$$P_{BS max} = 4\pi H_{BS}^2 \Pi_{E4}.$$
 (6.28)

Для высот подвеса БС $H_{BS} \approx 30...60$ м эта величина составит $P_{BS max} \approx 1, 1...4, 5$ кВт.

Совокупная интенсивность ЭМП БС внутренней зоны

Для БС, размещенных на границе между внутренней и внешней зонами по отношению к точке наблюдения, уровень ППМ БС в этой точке может быть определен следующим образом:

$$\Pi_{\min in} = \Pi_{E4} \left(\frac{H_{BS}}{R_{in}} \right)^2 \approx \frac{\Pi_{E4}}{280...1100}.$$
(6.29)

Далее, используя (6.4), определим в точке наблюдения средний уровень совокупной ППМ ЭМП БС из внутренней зоны для среднего числа N_{in} БС в этой зоне:

$$\Pi_{\Sigma in} = N_{in} (m_1 (\Pi_{BS}))_{in} = \pi \rho_{BS} \Pi_{E4} H_{BS}^2 \ln \frac{R_{in}}{H_{BS}} \approx 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2} \text{ BT/M}^2.$$

На первый взгляд, это соотношение может показаться парадоксальным в силу присутствующей в нем пропорциональности между совокупным уровнем ЭМП БС и квадратом их удаленности от поверхности. Однако на самом деле в этом нет ничего необычного, так как аналогичная пропорциональность присутствует между высотой подвеса антенны БС и ее ЭИИМ в (6.28). Отметим, что верхняя граница полученного интервала ожидаемых значений $\Pi_{\Sigma in}$ всего на 5 дБ ниже ПДУ Π_{E4} .

Совокупная интенсивность ЭМП БС внешней зоны

Для принятого диапазона значений **H**_{BS} параметр **v** модели PPB (6.1)

принимает значения $v \approx 3,25...3,52$. С учетом этого для БС, размещенных на внешней границе внешней зоны по отношению к точке наблюдения, уровень ППМ их ЭМП в данной точке может быть определен следующим образом:

$$\Pi_{\min \text{ out}} = \frac{\Pi_{\text{E4}}}{20^{4,49-0,655 \, \text{lg} \, \text{H}_{\text{BS}}}} \left(\frac{\Pi_{\text{BS}}}{R_{\text{in}}}\right)^2 \approx \frac{\Pi_{\text{E4}}}{4 \cdot 10^6 \dots 4 \cdot 10^7}.$$
(6.30)

Для принятых размеров внешней зоны максимальное среднее число N_{out} расположенных в ней БС, исходя из предполагаемой территориальной плотности БС, будет находиться в следующих пределах: $1200 \le N_{out} \le 12000$. Далее, используя (3.31), нетрудно определить средний уровень совокупной ППМ ЭМП БС из внешней зоны:

$$\Pi_{\Sigma out} = N_{out} \left(m_1 \left(\Pi_{BS} \right) \right)_{out} = N_{out} \frac{2 \Pi_{\min out}^{2/\nu} \Pi_{\min in}^{1-2/\nu}}{\nu - 2}.$$
(6.31)

Подставляя в (6.31) оценки (6.29),(6.30), получим следующее:

1. При $H_{BS} = 30$ м ожидаемый средний уровень $\Pi_{\Sigma out}$ совокупной ППМ ЭМП БС внешней зоны при принятых допущениях составит $4 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м², что на 14...24 дБ ниже ПДУ Π_{E4} .

2. При $H_{BS} = 60$ м диапазон значений среднего уровня совокупной ППМ ЭМП БСсоставит 2·10⁻²...2·10⁻³ Вт/м², что на 7...17 дБ ниже ПДУ Π_{E4} .

Объединяя оценки совокупного уровня ППМ ЭМП БС для внутренней и внешней зон, получим оценку совокупного уровня ППМ ЭМП БС в точке наблюдения: $\Pi_{\Sigma BS} = \Pi_{\Sigma in} + \Pi_{\Sigma out} \approx 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ Bt/m}^2$.

Следует подчеркнуть, что рассмотренный случай является наихудшим с экологической точки зрения, поэтому приведенные выше оценки являются весьма пессимистическими. На самом деле совокупный уровень электромагнитного фона, образуемого ЭМИ БС в городской застройке, где пространственная плотность БС максимальна, по меньшей мере на порядок ниже. Это, в частности, связано со следующим:

– с реально имеющей место направленностью основной части ЭМИ БС в диапазоне углов визирования 3°...20° по отношению к горизонту и уменьшением ЭИИМ БС, по крайней мере, на 5 – 10 дБ при углах визирования более 30° по сравнению с ЭИИМ в главном лепестке ее диаграммы направленности антенны (ДНА);

– с тем обстоятельством, что в плотной городской застройке требование непревышения ПДУ уровнем ЭМП БС на земной поверхности оказывается недостаточным, и ЭИИМ БС дополнительно ограничивается до значений, гарантирующих отсутствие в санитарно-защитной зоне БС мест возможного нахождения людей (верхних этажей зданий, высотных сооружений различного назначения, наивысших точек рельефа с учетом возможного нахождения людей в некотором слое у поверхности и т.п.);

- с целесообразностью снижения ЭИИМ БС в допустимых пределах в интересах уменьшения внутрисетевых помех.

Приведенные выше оценки позволяют сделать ряд выводов.

1. С учетом реально присутствующей зависимости ЭИИМ БС от угла визирования совокупные уровни ЭМП групп БС из внутренней и внешней зон можно считать приблизительно одинаковыми. Эта ситуация отличается от рассмотренной в подразд. 6.2.2, где ансамбль ЭМП АС внутренней зоны вносит определяющий вклад в совокупный уровень ЭМП АС сотовой радиосети над земной поверхностью.

2. Полученные оценки совокупного уровня ППМ ЭМП БС в точке наблюдения $\Pi_{\Sigma BS} \approx 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ Bt/m}^2$ на 3...20 дБ ниже ПДУ Π_{E4} . При этом указанный диапазон включает значение ПДУ Π_{E3} , принятого на территории Москвы и Парижа, и значение $\Pi_{E2} = 10^{-2} \text{ Bt/m}^2$ (1 мкВт/см²), соответствующее принятому ранее ПДУ ЭМП для населения СССР в 1970-е годы. И хотя приведенные выше оценки носят пессимистический характер, следует ожидать, что уровень электромагнитного фона от БС сотовой сети на значительной части территории современного города может превышать уровень Π_{E1} . Таким образом, составляющую постоянного электромагнитного фона, образуемую на территории городов за счет ЭМИ БС сотовой связи, следует признать заслуживающей внимания с экологической точки зрения.

В рассмотренном выше случае уменьшение высоты подвеса антенн БС с 60 до 30 м. повлекло уменьшение интенсивности совокупного электромагнитного фона от ЭМИ БС на 7 дБ. Однако на самом деле этот выигрыш может быть еще большим за счет следующего:

a) с уменьшением высоты подвеса антенн БС сокращается площадь сайта и количество абонентов в сайте. Это приводит к уменьшению необходимого числа каналов и соответственно канальных радиопередатчиков на каждой из БС.

б) С уменьшением высоты подвеса антенн БС до 30...40 м и ниже резко возрастает экранирующее действие городской застройки (30 м – типовая высота 9-этажного жилого дома). Это способствует уменьшению размеров области потенциального электромагнитного взаимодействия БС с рецептором ЭМП в точке наблюдения вблизи поверхности, а также к некоторому снижению уровня внутрисетевых помех.

Перечисленные факторы способствуют дополнительному уменьшению как необходимой мощности ЭМИ БС, так и в целом интенсивности электромагнитного фона, образуемого совокупностью ЭМП БС вблизи земной поверхности.

3. Соотношение интенсивностей электромагнитного фона, образуемого БС, и фона, образуемого АС, по крайней мере для сетей стандарта GSM оказывается различным в различные периоды и зависит от интенсивности трафика. В часы наибольшей нагрузки и в местах массового скопления людей электромагнитный фон от АС по уровню может значительно превышать электромагнитный фон от БС, однако в часы наименьшей нагрузки картина может быть обратной. Последнее связано с тем, что в реально функционирующих сетях GSM ЭМИ БС относительно мало зависит от интенсивности трафика.

В качестве иллюстрации данного вывода на рис. 6.8.1, 6.8.2 приведены спектрограммы ЭМО в полосе частот, охватывающей полосы частот ЭМИ АС и БС сотовой связи GSM-1800, в помещении (аудитория Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, расположенного в центре г. Минска). Измерения проведены с использованием измерителя напряженности электромагнитного поля SMR-4518 в комплекте с измерительной антенной Пб-23М в режиме контроля среднеквадратичного значения напряженности ЭМП ($E_{AV \ CISPR}$). В фидерный тракт включен дополнительный аттенюатор с постоянным затуханием 10 дБ для того, чтобы все спектральные компоненты по уровню находились в пределах динамического диапазона измерительного РП SMR-4518, поэтому значения уровней сосредоточенных по спектру компонент ЭМО на спектрограммах меньше истинных: $E_{AV \ qual} = E_{AV \ CISPR} - 10 \ дБ.$

Первая спектрограмма соответствует ситуации, когда мобильные телефоны всех присутствующих отключены. На спектрограмме в правой части наблюдается достаточно интенсивное совокупное ЭМИ БС всех сетей сотовой связи GSM-1800 (3 оператора). Существенно менее интенсивные ЭМП, обнаруживаемые в левой половине спектрограммы и по уровню не менее чем на 20 дБ ниже уровней ЭМП БС, принадлежат АС, находящимся вне помещения (на улице, в других помещениях университета либо внутри других близко расположенных зданий). Напомним, что в сетях GSM-1800 полоса частот, выделенная для ЭМИ АС, составляет 1710...1785 МГц, для ЭМИ БС – 1805...1880 МГц (см. табл. 2.9, 2.10).







Рис. 6.8.2

Вторая спектрограмма соответствует ситуации, когда в этой же аудитории одновременно 14 владельцев АС разговаривают либо пытаются связаться по сотовой связи. И хотя не всем из них сетью предоставлен ресурс в полосе частот GSM-1800, уровни ЭМП АС, находящихся внутри аудитории, как минимум сопоставимы и даже в отдельных каналах заметно превышают уровни ЭМП БС в данном помещении.

В рассмотренном выше случае оценки совокупного уровня ЭМП БС сотовой радиосети выполнялись для точки наблюдения, располагаемой вблизи земной поверхности. Интерес представляют также ситуации, когда эта точка находится на значительной высоте над поверхностью. Качественно оценивая специфику подобных ситуаций, можно придти к следующим предварительным заключениям.

1. Если в рассмотренном ранее случае ЭИИМ БС ограничивалась исходя из требования обеспечения уровней ЭМП БС не выше ПДУ Π_{E4} вблизи земной поверхности, то в данных ситуациях минимальные расстояния от мест возможного нахождения людей до БС определяется размерами санитарнозащитных зон вокруг БС. Эти размеры в главном лепестке ДНА БС обычно составляют десятки метров (те же 30...60 м в зависимости от суммарной мощности ЭМИ всех канальных передатчиков в каждом секторе обслуживания многоканальной БС при использовании методик [9, 10, 13]). Таким образом, соотношения (6.28) – (6.31) адекватны и применительно к данным ситуациям. Различия могут состоять в следующем:

– во-первых, при увеличении высоты точки наблюдения над поверхностью значительно увеличивается радиус (6.3) зоны возможного использования модели условий РРВ в свободном пространстве (модель Окамура–Хата условий РРВ в городской застройке адекватна лишь при высотах над поверхностью $\mathbf{H}_{MS} = 1...10$ м). При высотах точки наблюдения над земной поверхностью 30 м и более $\mathbf{R}_{BP} > 10...20$ км и практически достигает радиуса

242

внешней зоны области потенциального электромагнитного взаимодействия. В результате параметр **v** базовой модели (3.1) условий РРВ уменьшается до значений, близких к v = 2. Это, несомненно, приводит к возрастанию суммарного уровня ЭМП БС в точке наблюдения по сравнению с ранее рассмотренным случаем, причем в основном за счет ЭМП БС внешней зоны; – во-вторых, при увеличении высоты точки наблюдения над поверхностью до значений, сопоставимых с высотой подвеса антенн БС, эта точка оказывается выше области главного лепестка ДНА БС, что связано с наклоном его оси на 5 – 10° вниз относительно горизонтали в городских условиях. Это обстоятельство играет роль сдерживающего фактора по отношению

к возрастанию суммарного уровня ЭМП БС в точке наблюдения в рассматриваемых ситуациях;

в-третьих, при значительном увеличении высоты точки наблюдения над поверхностью до значений 200...300 м, что соответствует верхним этажам самых высотных зданий, смотровым площадкам телебашен, наивысшим точкам рельефа во многих крупных городах, располагаемых вблизи возвышенностей, ситуация не оказывается катастрофической именно вследствие направленности ЭМИ БС к земной поверхности.

В качестве примера оценим типовую ситуацию, которая может быть характерна для смотровых площадок Москвы (Останкинская телебашня) и Парижа (Эйфелева башня). Примем ряд допущений:

а) будем полагать, что ЭИИМ БС GSM-900/1800 в главном лепестке ДНА, наклоненном на 5° – 10° к поверхности, не превышает 1 – 2 кВт, что примерно соответствует 4 – 6 каналам мощностью 20...40 Вт в каждом из трех секторов БС при усилении антенны БС в главном лепестке ДНА 12...15 дБ. Будем также полагать, что ЭИИМ в направлении на точку наблюдения, расположенную на высоте H_{VP} = 300 м, для всех БС во всей области потенциального электромагнитного взаимодействия составляет P_{BS} = 100 Вт (за-

висимостью ЭИИМ БС от углов визирования точки наблюдения из точек размещения антенн БС пренебрегаем);

б) будем полагать, что радиус области потенциального электромагнитного взаимодействия вокруг башен составляет $\mathbf{R}_{max} = 30$ км. Будем полагать также, что количество \mathbf{N}_{BS} случайно равномерно располагаемых БС в пределах этой области составляет примерно 10 000. Этого числа БС более чем достаточно для стопроцентного качественного обслуживания сотовой связью населения мегаполиса численностью 10...15 млн. чел. (см. ниже данные табл. 7.1, 7.2).

Данная ситуация может быть проанализирована с использованием модели (3.37) при свободном РРВ (v = 2) в области значений ППМ ЭМП БС в точке наблюдения $\Pi_{\min} \le \Pi \le \Pi_{\max}$, а также соотношения (6.4):

$$\Pi_{\max} = \frac{P_{BS}}{4\pi (H_{VP} - H_{BS})^2},$$

$$\Pi_{\min} = \Pi_{\max} \left(\frac{H_{VP} - H_{BS}}{R_{\max}}\right)^2 = \frac{P_{BS}}{4\pi R_{\max}^2}.$$

$$\Pi_{\Sigma BS} = N_{BS} m_1 (\Pi_{BS}) \approx N_{BS} \frac{P_{BS}}{2\pi R_{\max}^2} \ln \left(\frac{R_{\max}}{H_{VP} - H_{BS}}\right).$$
(6.32)

Подставляя в (6.32) принятые исходные данные, получим оценку суммарной интенсивности ЭМП БС в рассматриваемой точке: $\Pi_{\Sigma BS} \approx 0.85 \cdot 10^{-3}$ Вт/м² = 0.085 мкВт/см². Полученное значение $\Pi_{\Sigma BS}$ находится ниже экологически значимого уровня ППМ ЭМП Π_{E1} , а также более чем на порядок ниже ПДУ $\Pi_{E3} = 2$ мкВт/см², принятого на территории Москвы и Парижа. И даже при увеличении принятого значения ЭИИМ БС в направлении на точку наблюдения на порядок расчетный совокупный уровень ЭМП БС окажется примерно на 3 дБ ниже уровня Π_{E3} .

2. При размещении точки наблюдения на верхних этажах зданий следует

принимать во внимание экранирующие свойства стен этих зданий, заметно ослабляющих интенсивность электромагнитного фона по сравнению с точками наблюдения вне зданий на аналогичной высоте. Это ослабление может достигать 5...10 дБ и более.

В целом вопрос о влиянии экранирующих свойств (поглощения и отражения ЭМП) стен и других элементов конструкций зданий на уменьшение уровней ЭМП в помещениях требует самостоятельного рассмотрения. Более глубокий и обстоятельный анализ данного вопроса выходит за рамки данной работы, однако представляет безусловный интерес и в значительной степени может быть выполнен на методической основе, представленной в данной работе, в частности, с использованием материала подразд. 4.3.3.

В заключение рассмотрения вопроса об экологической значимости ЭМИ БС сотовой связи отметим следующее.

Данная составляющая электромагнитного фона на территории современного города, безусловно, требует большого внимания. Об этом свидетельствуют как приведенные выше в данном разделе примеры расчета средних уровней совокупного ЭМП БС в городской застройке, так и материалы подразд. 6.3, содержащие оценки вероятности превышения ПДУ ЭМП при интенсивном использовании сотовой связи в условиях присутствия постоянного электромагнитного фона. Совокупное ЭМИ БС может создавать на значительной части городской застройки достаточно интенсивный постоянный электромагнитный фон, по уровню превышающий электромагнитный фон от мощных радиопередатчиков других служб.

Однако если мощные единичные радиопередатчики вещательной и радиолокационной служб, как правило, могут быть вынесены за пределы городской застройки, то многочисленные БС сотовой связи (до нескольких единиц и даже десятков на кв. км) принципиально должны располагаться на территории города и с плотностью, пропорциональной территориальной

плотности абонентов. Вблизи границ санитарно-защитных зон БС, складываясь с электромагнитным фоном от радиопередатчиков других служб и с ЭМП АС сотовой связи, ЭМИ БС могут создавать на территории города многочисленные области, в которых совокупный электромагнитный фон превышает принятые нормы, либо превышение установленных ПДУ происходит с недопустимо большой вероятностью. Поэтому более глубокое рассмотрение данного вопроса представляет большой научный и практический интерес.

6.5. Общая характеристика полученных результатов

Полученные результаты могут быть приняты в качестве предварительных (первичных) оценок, позволяющих сформировать достаточно объективный взгляд на проблему экологической безопасности радиосистем информационного обслуживания населения в условиях их совместного функционирования. Поскольку данная работа является первой попыткой такого рода, в ней принят ряд допущений, практически не снижающих объективности приведенных результатов, но подлежащих учету в дальнейшем. К таким допущениям, в частности, могут быть отнесены указанные ниже.

1. Использованное выше значение максимальной ЭИИМ AC $P_{MS max} = 0,25$ Вт соответствует стандартизованному номинальному значению максимальной выходной мощности AC GSM-900 четвертого класса мощности [12]. Однако диаграмма направленности (ДН) ЭМИ AC отличается от ДН ЭМИ изотропного излучателя – в направлении, перпендикулярном к оси антенны AC, реальная интенсивность ЭМИ AC может быть на 1 – 2 дБ выше. Кроме того, для AC GSM-900 пятого класса мощности и для AC GSM-1800 $P_{MS max} = 0,1$ Вт; для AC других стандартов (IMT-MC-450,

СDMA-2000, UMTS) требуется использовать другие значения максимальной излучаемой мощности. Наконец, в развитых сотовых сетях, где размеры сайтов невелики, реальные значения P_{etr} могут быть значительно ниже средних значений $P_{MS max}/3$, которые использованы выше при получении данных рис.6.6.1а – 6.7.4е и табл. 6.3, 6.4. Вместе с тем в этих сетях из-за достаточно высокого уровня внутрисетевых помех фактически используемые уровни мощности ЭМИ АС могут значительно превышать минимально необходимые значения, определяемые только базовыми потерями при PPB между АС и БС, а также пороговой чувствительностью РПУ БС. Реальные ситуации могли бы быть исследованы подстановкой в (4.49)/(4.51) и (6.13)-(6.27) значений P_{etr} , полученных из статистических данных функционирующих сотовых радиосетей.

2. При оценке средней пространственной плотности АС-источников ЭМП использовались базовые модели трафика в сотовых сетях, основанные на применении простой модели функционирования АС в виде дискретного Марковского случайного процесса с двумя возможными состояниями **0**, **P**_{etr} и заданными вероятностями (4.27) пребывания каждого источника в одном из состояний в произвольный момент времени, определяющими интенсивность использования АС в периоды максимальной нагрузки сети. На самом деле поведение абонента более сложное, особенно при перегрузке сети либо в сети с неудовлетворительным качеством связи, когда абоненту приходится неоднократно повторять вызов. Здесь же следует иметь в виду, что ЭИИМ АС непостоянна: она максимальна в момент вызова, а затем уменьшается до необходимого уровня путем принудительной регулировки под управлением БС. Эти моменты целесообразно учесть при более обстоятельном анализе рассматриваемых вопросов, который может быть выполнен, в частности, с использованием модели поведения абонента [83].

3. Демонстрационные оценки, приведенные в виде кривых на

рис. 6.6.16 – 6.7.4е и в табл. 6.4, сделаны для равномерного случайного размещения AC с заданной средней плотностью ρ_{MS} , AC/м² в окрестности точки наблюдения радиуса $R_{in} = 300$ м. Эти значения могут показаться завышенными. Действительно, размещение излучающих AC со средней плотностью 0,1...1 AC/м² на территориях площадью в несколько гектаров весьма маловероятно. Однако представленные выше математические модели позволяют выполнить эти оценки и для существенно меньших локальных группировок AC-источников ЭМП. В частности, для скопления людей в окрестности точки наблюдения $R_{in} = 30$ м и $R_{in} = 10$ м соответствующие оценки с использованием (6.13)-(6.27) приведены ниже в табл. 6.6.

Таблица	a 6.6

Средняя простран-	Вероятность превышения ПДУ Π_{E4} =10 мкВт/см ² совокупной интенсивно- стью Π_{Σ} ЭМП постоянного электромагнитного фона Π_{BG} и ансамбля ЭМП АС из окрестности точки наблюдения радиуса \mathbf{R}_{in}					
ственная плотность АС- источни-	Учитывается тол ладающего ЭМ АС в точк	лько ППМ П преоб- П в ансамбле ЭМП е наблюдения	Учитывается весь ансамбль ЭМП АС из окрестности точки наблюдения (R _{in} =300м)			
ков ЭМИ р мs [AC/m ²]	H=1 (подавле- ние ЭМП АС отсутствует),	H=2 (устраняется одно наиболее мощное ЭМП АС),	H=1 (подавление ЭМП АС отсут- ствует),	H=2 (устраняется одно наиболее мощное ЭМП АС),		
	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} + \Pi$		
	$\Pi_{BG} = \Pi_{E1} \le 0,1$ мк BT/cm^2					
	R _{in}	= 10 м	R _{in} = 30 м			
0,01	0,0021	$0,4 \cdot 10^{-5}$	0,0021	$0,4 \cdot 10^{-5}$		
0,1	0,023	$0,46 \cdot 10^{-3}$	0,024	$0,49 \cdot 10^{-3}$		
1	1, Π_{BG} + $\Pi_{\Sigma 2}$ > Π_{E4}	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		
	$\mathbf{\Pi}_{\mathbf{BG}} = \mathbf{\Pi}_{\mathbf{E2}} = 1 \text{ mKBt/cm}^2$					
	R _{in}	= 10 м	R _{in} = 30 м			
0,01	0,0023	0,49.10 ⁻⁵	0,0023	0,49.10 ⁻⁵		
0,1	0,026	$0,56 \cdot 10^{-3}$	0,027	$0,6 \cdot 10^{-3}$		
1	1, Π _{BG} +Π _{Σ2} >Π _{E4}	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$	1, Π _{BG} +Π _{Σ2} >Π _{E4}	1, Π _{BG} +Π _{Σ3} >Π _{E4}		

Окончание табл. 6.6

Средняя простран-	Вероятность превышения ПДУ Π_{E4} =10 мкВт/см ² совокупной интенсивно- стью Π_{Σ} ЭМП постоянного электромагнитного фона Π_{BG} и ансамбля ЭМП AC из окрестности точки наблюдения радиуса R_{in}					
ственная плотность АС- источни-	Учитывается то. ладающего ЭМ АС в точк	лько ППМ П преоб- П в ансамбле ЭМП е наблюдения	Учитывается весь ансамбль ЭМП АС из окрестности точки наблюдения (R _{in} =300м)			
ков ЭМИ р мs [AC/m ²]	H=1 (подавле- ние ЭМП АС отсутствует),	H=2 (устраняется одно наиболее мощное ЭМП АС),	H=1 (подавление ЭМП АС отсут- ствует),	H=2 (устраняется одно наиболее мощное ЭМП АС),		
	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} + \Pi$	$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} + \Pi$		
		$\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 3$	$д \mathbf{E} = 5 \text{ мкBt/cm}^2$			
	R _{in}	= 10 м	R _{in}	R _{in} = 30 м		
0,01	0,0042	$0,16 \cdot 10^{-4}$	0,0042	$0,16 \cdot 10^{-4}$		
0,1	0,044	0,002	0,05	0,0024		
1	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$ 1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > 1$		1, Π _{BG} +Π _{Σ2} >Π _{E4}	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		
	$\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 2 \ \text{дБ} = 6,3 \ \text{мкBt/cm}^2$					
	R _{in} = 10 м		R _{in} = 30 м			
0,01	0,0057	$0,3 \cdot 10^{-4}$	0,0057	$0,3 \cdot 10^{-4}$		
0,1	0,072	0,0041	0,08	0,0051		
1	$1, \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4} 1, \Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		
		$\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 1 \mu$	${}_{\rm 4}{\rm B}=7,9~{ m m\kappa Br/cm^2}$			
	R _{in}	= 10 м	R _{in} = 30 м			
0,01	0,01	10 ⁻⁴	0,01	10 ⁻⁴		
0,1	0,16	0,019	0,22	0,03		
1	1, Π_{BG} + $\Pi_{\Sigma 2}$ > Π_{E4}	1, П _{BG} + П _{Σ3} > П _{Е4}	1, Π _{BG} +Π _{Σ2} >Π _{E4}	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		
	$\Pi_{BG} = \Pi_{E4} - 0.1 \ дE = 9,77 \ MKBT/cM^2$					
	$R_{in} = 10 \text{ M}$ $R_{in} = 30 \text{ M}$					
0,01	0,1	0,01	0,12	0,012		
0,1	1, Π _{BG} +Π _{Σ2} >Π _{E4}	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$	1, Π_{BG} + $\Pi_{\Sigma 2}$ > Π_{E4}	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		
1	$1, \overline{\Pi_{BG}} + \Pi_{\Sigma 2} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG}+\Pi_{\Sigma 2}>\Pi_{E4}$	1, $\Pi_{BG} + \Pi_{\Sigma 3} > \Pi_{E4}$		

Анализ данных табл. 6.5, 6.6 свидетельствует о том, что оценки вероятностей $P(\Pi_{\Sigma} \ge \Pi_{E4})$ превышения ПДУ ЭМП совокупной интенсивностью ЭМП АС и внешнего фона в точке наблюдения сравнительно мало зависят от размеров окрестности, но существенно зависят от разницы между ПДУ и уровнем внешнего фона.

Отсюда также следует предварительный вывод о том, что интенсивность образуемого совокупностью ЭМП АС электромагнитного фона в точке наблюдения (составляющие $\Pi_{\Sigma 2}$, $\Pi_{\Sigma 3}$) определяется совокупной интенсивностью ЭМИ АС, располагаемых в окрестности данной точки $\mathbf{R}_{in} \leq 100...200$ м, либо на удаленностях $\mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{in} = (0,5...4) \mathbf{R}_{BP}$. Несмотря на значительное увеличение числа более слабых ЭМП от более удаленных АС (что определяется гиперболическим характером распределения (3.37)), их совокупный вклад в компоненты $\Pi_{\Sigma 2}$, $\Pi_{\Sigma 3}$ электромагнитного фона в точке наблюдения быстро уменьшается по мере увеличения их удаленности \mathbf{R} от рассматриваемой точки.

4. Демонстрационные оценки, приведенные выше в подразд.6.2.2, сделаны для типовых исходных данных $P_{etr} = 100$ мВт, а оценки, приведенные в табл. 6.4, 6.5, сделаны для $P_{MSmax} = 250$ мВт. Эти оценки могут показаться завышенными. Однако поскольку в соотношения (4.49) – (4.51) и (6.13) – (6.24) значение ЭИИМ АС и значение территориальной плотности АС входят в виде произведений $\rho_{MS}P_{etr}$ (если ЭИИМ всех АС одинакова) или $\rho_{MS}P_{MSmax}$ (если ЭИИМ всех АС случайна и распределена в интенвале [0, P_{MSmax}] по закону (5.3)/(5.5)), возможно производить оценки требуемых вероятностных характеристик для произвольных значений P_{etr} , P_{MSmax} соответствующей корректировкой значения ρ_{MS} , т.е. простым пропорциональным пересчетом оценок, приведенных в подразд.6.2.2 и в табл. 6.4, 6.5.

5. Приведенные выше соотношения и оценки получены в начальном предположении круговой ДН ЭМИ АС, хотя при равновероятной ориента-

ции системы «голова человека – AC» эти соотношения и оценки инвариантны к направленности ЭМИ, создаваемого этой системой, в силу инвариантности распределения (3.37) к направленности ЭМИ источников ЭМП при равновероятной ориентации последних. Тем не менее голова человека экранирует ЭМИ, и реальная ДН ЭМИ АС существенно отличается от круговой. При этом часть ЭМИ отражается, что приводит к росту интенсивности ЭМИ АС в направлении, противоположном направлению на голову абонента, а значительная часть ЭМИ АС поглощается в тканях человеческого тела, что приводит к провалу ДН ЭМИ АС в соответствующем направлении и к некоторому снижению средней интенсивности ЭМИ АС.

Отличия ДН ЭМИ АС от круговой усиливаются при использовании разнообразных защитных экранов и поглотителей ЭМИ в конструкции корпуса АС либо в качестве дополнения к корпусу АС (наклейки, чехла и т.п.) [7]. Однако использование подобных средств индивидуальной защиты от ЭМП АС приводит к следующему:

- к соответствующему уменьшению средней мощности ЭМИ АС за счет поглощения значительной части мощности ЭМИ АС этими средствами защиты. В результате фактически возрастают базовые потери на трассе PPB между БС и АС, и по команде БС мощность ЭМИ АС увеличивается до необходимого уровня. При этом происходит частичная компенсация уменьшения интенсивности ЭМИ АС в направлении на голову абонента, т.е. снижение эффективности защиты за счет реакции системы сотовой связи на ее применение;
- к увеличению интенсивности электромагнитного фона (составляющих $\Pi_{\Sigma 2}$, $\Pi_{\Sigma 3}$ в (6.17) (6.24) и в табл. 6.4, 6.5) как за счет увеличения отражения ЭМИ АС в направлении от головы владельца АС, так и за счет увеличения мощности ЭМИ АС по команде БС для обеспечения необходимого качества связи. В конечном счете это приводит к возрастанию
вынужденных экологических рисков для окружающих, особенно в ситуациях с высокой территориальной плотностью AC в местах массового скопления людей.

Таким образом, влияние разнообразных средств индивидуальной защиты от ЭМИ АС на экологию сотовой связи требует дальнейших системных исследований, учитывающих их реальное влияние на уровень как добровольных, так и вынужденных экологических рисков, а также позволяющих учесть этот фактор в приведенных выше оценках.

6. При реальной ступенчатой регулировке мощности ЭМИ AC ее среднее значение оказывается больше значения $\mathbf{m}_1(\mathbf{P}_{MS}) = \mathbf{P}_{MS \max}/3$ [19, 21], так что совокупное увеличение реальной интенсивности ЭМП AC, а также образуемого ЭМИ AC электромагнитного фона ($\mathbf{\Pi}_{\Sigma 2}$, $\mathbf{\Pi}_{\Sigma 3}$) по сравнению с рассматриваемой идеализированной ситуацией может достигать 1 – 3дБ.

7. Приведенные выше оценки опираются на прогнозы [97, 98] средней пространственной плотности АС в различных ситуациях, а также на общепринятые оценки [54, 55, 58, 91] интенсивности функционирования АС во времени. Однако эти оценки, по-видимому, в ближайшем будущем потребуют корректировки, поскольку темпы развития радиотелекоммуникационной отрасли опережают самые смелые прогнозы. Пространственная плотность АС мобильной связи фактически превышает плотность населения, расширение возможностей радиосетей по передаче данных в сочетании со снижением тарифов, стимулирующим увеличение интенсивности и продолжительности телефонных разговоров, приведут к необходимости пересмотра этих прогнозов и оценок, особенно с учетом эволюционирования систем информационного обслуживания населения четвертого поколения (4G). Не менее важным фактором является и все более интенсивное использование интерактивных систем беспроводного доступа, радиоинтерфейсов

различного назначения (Bluetooth, DECT и т.п.), систем радиочастотной идентификации (RFID) и т.п., особенно с учетом развития концепции «умного дома» [101] и неизбежным появлением концепций «умного офиса», «умного сервиса» и т.п.

8. Приведенные выше соотношения и оценки получены с использованием известных моделей условий PPB в свободном пространстве (v = 2), модели Введенского (v = 4) и модифицированной модели Окамура – Хата (v = 3,3...4,0). Однако эти модели, возможно, не в полной мере адекватны рассматриваемой задаче; требуется обоснование эмпирической статистической модели РРВ между точкой наблюдения и АС на расстоянии до нескольких сотен метров на частотах современных и перспективных систем сотовой связи и других беспроводных систем информационного обслуживания населения, т.е. на частотах от 0,45 ГГц до 6 ГГц. При этом по крайней мере в окрестности радиуса $\mathbf{R}_{in} = 50...500$ м вокруг точки наблюдения при высокой пространственной плотности абонентов требует дополнительного изучения вопрос о влиянии присутствия последних, а также о влиянии других факторов (например, многократных переотражений радиоволн в городской застройке, в транспортном потоке и т.п.) на характер РРВ в этой области, АС из которой полностью определяют экологию сотовой связи в точке наблюдения на земной поверхности.

9. Приведенные выше оценки получены в предположении постоянства средней пространственной плотности АС. При необходимости они могут быть обобщены на случай произвольной функции средней пространственной плотности АС от координат с использованием подхода [38 – 42].

10. При выполнении оценок, приведенных выше в подразд.6.4, не учитывалась зависимость ЭИИМ БС **Р**_{BS} в вертикальной плоскости от угла визирования точки наблюдения из точки подвеса антенны БС; было приня-

то условие $P_{BS} = const$. Поскольку в рассмотренных выше ситуациях плотность распределения вероятности удаленности БС от точки наблюдения сохраняет вид (3.19), учет указанной зависимости может быть выполнен с использованием преобразования (3.27) с учетом зависимости коэффициента β от расстояния **R** в модели (3.26) условий РРВ, определяемой формой ДНА БС в вертикальной плоскости. По предварительным оценкам, подобное уточнение приведенных в разд. 6.4 оценок не меняет общей ситуации с электромагнитным фоном от ЭМП БС и практически не влияет на корректность сделанных выше предварительных заключений и выводов по данному вопросу.

Как указанные выше моменты, так и любые другие аспекты, учет которых способен уточнить приведенные выше оценки, по мнению автора, должны явиться предметом дальнейших исследований.

В целом приведенные соотношения, а также представленные графически и таблично оценки для ряда ситуаций позволяют в первом приближении сопоставить степень экологической опасности собственной AC и «фона», создаваемого ЭМИ AC других пользователей как своей, так и всех других сотовых сетей, а также:

- оценить влияние электромагнитного фона, создаваемого системами эфирного телерадиовещания и другими радиообъектами, на возрастание экологической опасности сотовых радиосетей;
- оценить влияние массового использования населением средств сотовой радиосвязи, а также все более широкого применения разнообразных радиоинтерфейсов, средств беспроводного доступа и управления на увеличение экологической опасности возведения на территориях современных городов мощных радиотелевизионных передающих центров (телебашен) и других радиообъектов с мощным ЭМИ, создающих интенсивный электромагнитный фон в местах с высокой плотностью населения.

Подобные оценки могли бы быть существенно уточнены как с использованием данных от систем радиомониторинга в крупных городах и данных внутренней статистики сотовых радиосетей, так и с использованием более сложных методик статистического моделирования и экспериментальных исследований, предусматривающих имитацию либо измерение энергетических и временных параметров электромагнитного фона в различных условиях (на открытой местности в местах массового скопления людей, в бытовых помещениях, в деловых центрах и т.п.). И, безусловно, большой интерес представляют соответствующие медико-биологические исследования, направленные на обоснование критериев экологической опасности динамически изменяющегося совокупного электромагнитного поля сложной энергетически-спектрально/временной структуры.

Тем не менее и приведенные выше соотношения и оценки, по мнению автора, достаточно убедительно свидетельствуют о следующем.

Принятые способы нормирования предельно допустимых с точки зрения экологии уровней ЭМИ АС (в форме задания абсолютных значений ППМ ЭМИ или величины SAR) адекватны задаче ограничения воздействия ЭМИ АС на здоровье их владельцев, поскольку условия воздействия ЭМИ АС на человека являются типовыми – в активном режиме АС, как правило (и в наихудшем случае), располагается очевидным традиционным образом у головы абонента; относительное время нахождения АС в активном состоянии, как правило, не превышает 2 – 5% (не более 1 часа в сутки).

Вместе с тем, значительная часть населения не может пользоваться услугами сотовой связи по принципиальным соображениям (дети младшего и лица очень преклонного возраста; лица с повышенной чувствительностью к воздействию ЭМП на самочувствие и здоровье; лица, болезненно воспринимающие ограничение сотовой связью личной свободы либо присутствие у собственного уха источника ЭМИ; неимущие и т.п.). Для этих слоев населения ограничения воздействия ЭМИ на здоровье (ограничения вынужденного экологического риска [14]) должны учитывать и влияние электромагнитного «фона», обусловленного как массовым применением AC сотовой связи, так и другими источниками ЭМИ (мощные радиопередатчики эфирного теле- и радиовещания, связи и передачи данных; оборудование радиоинтерфейсов и систем беспроводного доступа, микроволновые печи, компьютеры и т.п.). Очевидно, что постоянное присутствие этого в ряде случаев достаточно интенсивного «фона», безусловно, не прибавляет здоровья и владельцам AC.

В целом совокупный электромагнитный фон, образуемый как ЭМИ АС при их массовом применении, так и ЭМИ других технических объектов, состоит из следующих достаточно различных по характеру слагаемых:

1. Квазистационарный квазидетерминированный электромагнитный фон, образуемый ЭМИ мощных радиопередатчиков вещания и связи (в т.ч. БС и РРС сотовых сетей), дисплеев, телевизоров, бытовой техники и т.п. Места размещения источников этих ЭМИ стационарны, их уровни достаточно стабильны, периоды относительного постоянства (интервал корреляции) определяются такими временными интервалами, как время непрерывной работы телевизора, время работы за компьютером, время работы вещательного радиопередатчика и т.п.

2. Случайный динамично меняющийся электромагнитный процесс с распределением мгновенных значений (4.9)/(4.10), (4.22)/(4.23) и с нормированной АКФ вида (4.29), определяемой интенсивностями (4.27) перехода АС из активного состояния в пассивное и наоборот, и обусловленный ЭМИ АС, ближайших к точке наблюдения и поочередно формирующих преобладающее ЭМП в данной точке.

3. Случайный динамично меняющийся электромагнитный процесс с нормированной АКФ вида (4.29) и со средней интенсивностью $\Pi_{\Sigma 2}$, $\Pi_{\Sigma 3}$,

обусловленный массовым функционированием случайного числа прочих AC из окрестности точки наблюдения радиуса $R_{in} = (0,5...4) R_{BP}$.

4. Существенно менее интенсивный случайный электромагнитный процесс с нормированной АКФ вида (4.29), обусловленный массовым функционированием большого числа АС в остальной (внешней) части зоны потенциального электромагнитного взаимодействия на дальностях $\mathbf{R}_{in} \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}_{max}$.

С экологической точки зрения, как было показано выше, интерес представляют первые три компоненты. По-видимому, различный характер этих компонент указывает на необходимость различных подходов к нормированию их характеристик, предельно допустимых по экологическим соображениям. Если нормирование уровня квазистационарной квазидетерминированной компоненты может осуществляться традиционным образом, так как это предусмотрено действующими Санитарными Правилами и Нормами [9, 10, 13], то нормирование уровня второй случайно динамично изменяющейся компоненты должно осуществляться вероятностно-статистическими методами по правилам, используемым, например, при нормировании уровней помех для радиосистем различного назначения [102-104]. В соответствии с этими правилами нормируется некоторый предельно допустимый уровень напряженности (или ППМ) электромагнитного поля от отдельного радиосредства либо эквивалентной совокупной ППМ, создаваемой группой РЭС, не превышаемый в течение заданного процента времени и/или процента мест.

Очевидно, что обоснование как величины нормируемого предельно допустимого уровня эквивалентной совокупной ППМ от АС сотовых сетей, так и процентов времени/мест, в течение которых не допускается превышение этого уровня, представляет собой отдельную достаточно сложную, трудоемкую и многоплановую задачу. Решение этой задачи в ближайшем будущем крайне необходимо в связи с массовым охватом населения средствами и услугами мобильной радиосвязи, интенсивным развитием интерактивных систем беспроводного радиодоступа, интенсивным применением бесшнуровых телефонов, микроволновых радиоинтерфейсов, систем радиочастотной идентификации и других радиосредств в условиях продолжающегося развития систем эфирного телерадиовещания и других радиослужб, а также насыщения жилых помещений бытовой и компьютерной техникой, создающей ЭМИ.

В этих условиях, по мнению автора, содержащиеся в данной работе результаты и выводы свидетельствуют о следующем:

– о необходимости отказа от размещения на территории населенных пунктов с высокой плотностью населения мощных систем эфирного вещания в пользу перехода к альтернативным пространственно-распределенным, спутниковым или кабельным/волоконно-оптическим системам раздачи ТВ и вещательных программ, поскольку здесь реально существует возможность альтернативных технических решений, в то время как мобильная радиосвязь принципиально безальтернативна;

– о целесообразности создания прикладных геоинформационных систем анализа и прогноза ЭМО в густонаселенных районах, которые бы обеспечивали получение экспериментальными и расчетными методами, накопление и хранение, а также визуализацию информации об ЭМО на территориях крупных городов и промышленных зон, а также на территориях, прилегающих к радиообъектам с мощным ЭМИ. В связи с большим количеством близких по значению факторов, формирующих электромагнитный фон на густонаселенных территориях, такие системы в перспективе должны сопрягаться с действующими национальными и ведомственными системами радиомониторинга, иметь возможность использовать данные внутренней статистики сотовых радиосетей и данные национальных (региональных, ве-

258

домственных) регистрационных баз данных о характеристиках РЭС и обеспечивать определение реальных границ санитарно-защитных зон вновь размещаемых на данной территории РЭС с учетом присутствия ЭМП от уже функционирующих на данной территории стационарных и подвижных РЭС.

Наконец, дальнейшее развитие и углубление основных положений и принципов системной экологии сотовых радиосетей и других радиосистем, частично изложенных в [16 – 33] и в данной работе, позволит создать предпосылки для уменьшения экологического риска при использовании средств мобильной связи различными организационными и техническими мерами. В качестве возможных технических мер могут быть предложены реализация в АС простейших функций радиомониторинга и оповещения пользователя АС о высоком уровне электромагнитного фона, введение в системе возможностей взаимного опроса ближайших АС, введение ограничений функциональности АС в условиях мощного ЭМИ одной или нескольких соседних АС и т.п., а также за счет совершенствования этики использования средств мобильной связи в различных условиях. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены ниже в разд. 8.

7. ОГРАНИЧЕНИЕ РАДИОЧАСТОТНОГО РЕСУРСА, ВЫДЕЛЯЕМОГО СОТОВОЙ РАДИОСЕТИ, КАК СРЕДСТВО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Материалы предыдущего раздела посвящены исследованию энергетических характеристик ЭМО в точке наблюдения. Эти характеристики определяют степень вынужденного экологического риска в зоне обслуживания сотовой связи как в ситуациях, когда принимается во внимание только ЭМИ АС, так и в ситуациях, когда в зоне обслуживания сотовой связи присутствует постоянный электромагнитный фон, образуемый радиопередатчиками других радиослужб с непрерывным ЭМИ.

Вместе с тем необходимо иметь в виду, что наибольшую опасность ЭМИ АС представляют для здоровья их владельцев, поскольку при разговоре по мобильному телефону последний находится в непосредственной близости у головы человека, воздействуя электромагнитным излучением на глаза, головной мозг, кровь и кровеносные сосуды, а также на другие системы организма. Экологический риск при пользовании мобильным телефоном является добровольным, поэтому ПДУ ЭМП АС для их владельцев на порядок выше ПДУ ЭМП для населения и согласно [11] равен $\Pi_{E5} = 100 \text{ мкВт/см}^2$. Тем не менее в тех случаях, когда мощность ЭМИ АС велика и интенсивность ЭМП АС у головы человека превышает уровень Π_{E5} , этот риск может стать недопустимым,

Мощность ЭМИ AC зависит от ряда принципиальных факторов, в частности, от следующих:

1. От размеров ячеек (сайтов) сотовой сети: чем больше радиус сайта, тем большая мощность ЭМИ АС требуется для обеспечения нормального качества двухсторонней радиосвязи для большинства абонентов.

2. От наличия в сети регулировки мощности ЭМИ АС. Наличие этой

регулировки позволяет в несколько раз снизить среднюю мощность ЭМИ AC подвижных абонентов и тем самым ослабить вредное влияние этого фактора на здоровье последних (это не касается абонентов, вынужденных использовать AC с максимальным ЭМИ в силу определенных обстоятельств, связанных с размещением мест их работы, проживания, отдыха, пребывания и т.п. вдали от БС сети либо в зоне неудовлетворительных условий PPB от AC к БС из-за затенения растительностью, рельефом, городской застройкой; а также экранирования элементами зданий при пребывании внутри помещения и т.п.).

3. От уровня реальной чувствительности РП БС – чем выше эта чувствительность, тем меньшие уровни ЭМИ АС требуются для обеспечения нормального качества двухсторонней радиосвязи.

4. От параметров внутрисистемной ЭМС сотовой сети, в частности, от уровня суммарной помехи в сети – чем выше этот уровень, тем большую мощность ЭМИ АС необходимо использовать для обеспечения нормального качества двухсторонней радиосвязи.

5. От степени регулярности структуры сети – при случайном размещении БС зоны их ответственности перестают быть симметричными гексагональными и могут иметь относительно удаленные от БС области с повышенными уровнями ЭМИ АС; кроме того, сети со случайной пространственной структурой характеризуются и повышенным уровнем внутрисетевой суммарной помехи (см. выше подразд. 5.7, рис. 5.7), что в совокупности приводит к увеличению средней используемой мощности ЭМИ АС в этих сетях.

Указанные факторы неравнозначны по характеру. В частности, второй и третий из них могут быть отнесены к разряду ограничений принятого стандарта (системы, поколения) мобильной связи – в ранних стандартах сотовой связи и во многих системах производственной связи регулировка мощности AC отсутствует; чувствительность радиоприема БС «по полю» определяется шумовыми параметрами РП БС и шириной полосы частот приема, а также усилением приемной антенны и требуемым (минимально допустимым) значением отношения «сигнал/шум».

Определенные особенности имеют системы мобильной связи с CDMA, в которых чувствительность радиоприема БС зависит от количества одновременно работающих АС в одном частотном канале одного сектора БС и при пиковой нагрузке является наихудшей. Однако с уменьшением нагрузки на БС ее чувствительность радиоприема увеличивается (минимально необходимый уровень полезного сигнала от АС уменьшается) в связи с уменьшением уровня суммарной помехи в канале пропорционально уменьшению числа одновременно работающих абонентов. Кроме того, в сетях CDMA-2000 (IMT-MC) принципиально предусмотрено выделение системных ресурсов для организации радиоприема сигнала АС несколькими ближайшими БС, что может способствовать дополнительному снижению требуемой мощности ЭМИ АС.

Что же касается первого, четвертого и пятого факторов, то они связаны со структурой и стратегией развития сети и особенностями использования выделенного сети радиочастотного ресурса (РЧР), в частности, с принятыми вариантами обеспечения ее внутрисистемной ЭМС на основе частотного планирования сети. Ниже рассмотрим этот вопрос более подробно.

Многозоновая радиосеть (сотовая, транкинговая и т.п.) создается для охвата территории и проживающего на ней населения (либо размещенного на ней персонала) соответствующими услугами радиосвязи. При проектировании радиосети прежде всего прогнозируется нагрузка (трафик), и, исходя из этого прогноза, выделяется необходимый радиочастотный ресурс (число физических радиоканалов на определенной территории) и выбирается необходимый вариант частотно-территориального планирования сети (размерность кластера, коэффициент повторения частот в основных территориальных фрагментах сети).

Если для развития радиосети можно было бы выделить неограниченный РЧР, то можно было бы ожидать построения сети с использованием минимально возможного числа сайтов максимально возможного размера. В этом случае:

 – среднее значение используемой мощности ЭМИ АС максимально, и такое решение наиболее неблагоприятно с экологической точки зрения;

– требуемая пропускная способность радиосети обеспечивается применением в каждом сайте большого числа физических радиоканалов, достаточного для обработки трафика прогнозируемой интенсивности (количество секторов, на которое разделен сайт, в данном случае роли не играет);

– требуются минимальные затраты на инфраструктуру (при таком построении радиосети межсайтовые информационные потоки максимальны, однако современные волоконно-оптические линии (ВОЛС) и микроволновые цифровые радиорелейные линии (ЦРРЛ) способны обеспечить практически любые необходимые скорости передачи данных в межсайтовых соединениях без существенного увеличения стоимости линий связи);

– требуются наибольшие затраты на оплату использования РЧР, что малосущественно в случаях, когда стоимость РЧР занижена либо принципиально учтена в размере лицензионного платежа.

Если же, наоборот, выделяемый для развития радиосети РЧР существенно ограничен, то для обеспечения требуемого качества связи необходимо уменьшать размеры сайтов в сочетании с организацией многократного повторения частот в различных сайтах до уровня, достаточного для обработки трафика прогнозируемой интенсивности. При этом:

- чем меньше выделено РЧР для реализации сети, тем в большей степени

263

требуется уменьшать размеры сайтов для обработки трафика прогнозируемой интенсивности (интенсивность трафика, приходящегося на отдельно взятую БС, падает с уменьшением размера соответствующего сайта при любой конечной пространственной плотности AC), тем меньше требуемая средняя мощность ЭМИ AC и тем лучше сеть с точки зрения экологии;

– при необходимости использования одинаковых частот в различных сайтах сети важное значение приобретает выбор варианта частотнотерриториального планирования сети – тип и размерность кластера. Теория этого вопроса рассмотрена выше в подразд. 5.6. Этот параметр связан с объемом РЧР, доступным для отдельного сайта, и определяет как коэффициент повторения частот в основных территориальных фрагментах сети, так и уровень суммарной помехи в ней. Последний фактор определяет необходимость дополнительного увеличения мощности ЭМИ АС;

– затраты на инфраструктуру сети значительно увеличиваются и тем выше,
 чем меньше размер сайта;

– затраты на оплату использования выделяемого сети РЧР уменьшаются,
 что существенно в случаях, когда стоимость РЧР велика.

Изложенное позволяет сделать следующий принципиальный вывод.

В конкретных условиях (для которых характерны определенная пространственная плотность абонентов и их активность, тип местности – город, пригород, сельская местность; принятый стандарт сотовой связи и т.п.) всегда существует некоторый предельно допустимый объем выделяемого оператору сотовой связи радиочастотного ресурса, при котором могут быть обеспечены <u>необходимые с точки зрения экологии</u> <u>тенденции развития радиосети</u>. При этих ограничениях естественная борьба оператора за расширение абонентской базы (при сохранении приемлемого качества связи, а также в условиях естественного расширения номенклатуры предоставляемых услуг и соответствующего роста удельной интенсивности использования РЧР в расчете на одного абонента) неизбежно сопровождается уменьшением размеров сайтов и соответствующим уменьшением средней мощности ЭМИ АС.

Ниже предлагается следующая методика определения предельно допустимого объема РЧР, выделяемого оператору сотовой связи, при котором будут обеспечены необходимые с точки зрения экологии тенденции развития радиосети [16 – 20, 25, 27]:

 Определяется наибольший размер сайта, в пределах которого ЭМИ АС не превышает уровня, приемлемого с экологической точки зрения. Этот размер (максимально возможная дальность R_{c max} между БС и АС в пределах сайта и его площадь S_{sp}) зависит от ряда факторов, в частности:
 от характера условий PPB (город (большой, средний/малый), пригород, открытая (сельская) местность),

от минимального используемого уровня полезного сигнала на входе РП
 AC и БС (для систем FDMA/TDMA), определяемого с учетом чувствительности РП АС и БС, принятого размера кластера и уровня внутрисетевых помех;

– от ПДУ излучаемой мощности ЭМИ AC, определяемого с учетом действующих ограничений [11] на ПДУ ППМ AC у поверхности тела человека.

Значения ПДУ ЭМИ АС могут быть различными в различных диапазонах частот в силу различной степени поглощения излучения тканями головы от частоты, и могут быть различными в разных странах в силу различий в действующей нормативной базе, регламентирующей экологические аспекты ЭМИ АС. В многодиапазонной сети (GSM 900/1800 и т.д.) следует использовать наименьшее из значений ПДУ ЭМИ АС для выделенных сотовой сети диапазонов частот.

Если ПДУ излучаемой мощности ЭМИ АС равен **P**_{MS max} [Вт], а минимальный используемый уровень полезного сигнала на входе РП БС равен $P_{0 BS}$ [Bт], то при использовании модели PPB Окамура-Хата величина $R_{c max}$ может быть определена из следующего уравнения:

$$R_{c \max} = \arg \begin{cases} 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(H_{BS}) + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(H_{BS})] \lg(R_{c \max}) + a_x(H_{MS}) = \\ = 10 \lg(P_{MS \max}G_{aMS}/P_{0 BS}G_{aBS}) \end{cases}, \quad (7.1)$$

где значения высот подвеса антенн базовой H_{bs} и абонентской H_{ms} станций выражены в метрах, частота f ЭМИ AC – в мегагерцах, расстояние $R_{c max}$ – в километрах; G_{aMS} и G_{aBS} – коэффициенты усиления антенн AC и БС соответственно, $a_x(H_{MS})$ – коэффициент, отражающий зависимость базовых потерь при PPB от высоты AC над поверхностью.

2. Выполняются прогноз пространственной плотности абонентов рассматриваемой сети в час максимальной нагрузки и расчет планируемого в этот момент предельного числа абонентов в сайте предельного размера, при котором обеспечивается ПДУ ЭМИ АС.

При равномерном случайном размещении AC со средней плотностью $\rho_{MS}[AC/\kappa m^2]$ по всей территории сайта площадью S_{sp} [κm^2] предельно допустимое число абонентов в сайте, для которых использование сети экологически безопасно, будет равно

$$N_{S\max} = \rho_{MS} S_{sp} \approx \rho_{MS} \pi R_{c\max}^2.$$
(7.2)

3. На основе известных данных о средней нагрузке, создаваемой одним абонентом сети (0,025 эрл., либо из диапазона 0,03 – 0,08 эрл. с учетом существующих тенденций), оценивается объем V_S РЧР, минимально необходимый для обслуживания абонентов отдельного сайта предельного размера и сети в целом в час максимальной нагрузки и определяемый с учетом размерности кластера, используемого при ее частотном планировании.

В частности, для систем FDMA/TDMA требуемое число частотных каналов для сайта и для сети в целом при одинаковой нагрузке в отдельных

сайтах определяется соотношением

$$V_{S} \approx int \left\{ \frac{L+1}{M} \right\} + 1, \quad V_{N} = V_{S} N_{CL},$$
(7.3)

где

- V_{S} , V_{N} число частотных каналов в секторе сайта и в сети соответственно;
- int{...} преобразование в целое число отбрасыванием знаков после запятой;
- М число временных слотов, формирующих М каналов связи с временным разделением в одном частотном канале; в системах стандарта GSM M = 8, в системах стандарта TETRA M = 4;
- N_{CL} размерность кластера, образуемого **n**-секторными ячейками; число ячеек в кластере **j** = N_{CL}/n ;
- Параметр, имеющий смысл требуемого числа каналов трафика и определяемый исходя из принятой в системе модели обработки блокированных вызовов:
- a) для модели "Erlang B" (блокированные вызовы аннулируются):

$$\mathbf{L} = \arg\left\{\frac{\mathbf{E}^{\mathbf{L}}/\mathbf{L}!}{\sum_{\mathbf{j}=\mathbf{0}}^{\mathbf{L}} \left(\mathbf{E}^{\mathbf{j}}/\mathbf{j}!\right)} = \mathbf{P}_{\mathbf{b}}\right\}, \quad \mathbf{E} = \frac{\mathbf{N}_{\mathbf{S}\max}\mathbf{E}_{\mathbf{0}}}{\mathbf{n}_{\mathbf{S}}},$$
(7.4)

где

- Е [эрл.] интенсивность трафика в секторе сайта в час максимальной нагрузки;
- Е₀ [эрл.] средняя нагрузка, создаваемая одним абонентом в час наибольшей нагрузки (Е₀ = 0,025 эрл.);
- **Р**_b допустимая вероятность блокирования вызова в сети; в сотовых

сетях
$$P_{h} \leq 1 - 2\%$$
;

 \mathbf{n}_{s} – число секторов в одном сайте сети (как правило, $\mathbf{n}_{s} = 3$, но возможно и $\mathbf{n}_{s} = 1, 2, 4, 6, ...$);

б) для модели "Erlang C" (блокированные вызовы ставятся в очередь и обслуживаются по мере освобождения каналов связи; время ожидания не ограничено):

$$\mathbf{L} = \arg \left\{ \frac{\frac{\mathbf{E}^{L}}{L!} \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L} - \mathbf{E}}}{\sum_{j=0}^{L-1} \frac{\mathbf{E}^{j}}{j!} + \frac{\mathbf{E}^{L}}{L!} \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L} - \mathbf{E}}} = \mathbf{P}_{\mathbf{b}} \right\}.$$
 (7.5)

4. Объем РЧР, выделяемого оператору сотовой связи, не должен превышать величины V_N , полученной в процессе выполнения оценок по п. 3, тогда будут обеспечены

 необходимые с точки зрения экологии тенденции развития (предпосылки к требуемому дроблению элементов) радиосети для охвата планируемого числа абонентов;

– угроза утраты оператором части потенциальных абонентов в силу ухудшения качества связи в периоды максимальной нагрузки и соответствующее снижение экономических показателей сети в случае хронического нарушения «экологических» рекомендаций по уменьшению размеров сайтов до безопасного уровня.

Проиллюстрируем основные положения этой методики примерами.

В табл. 7.1 приведены расчетные предельные размеры сайтов в диапазонах 450, 900 и 1800 МГц, полученные с использованием модели Окамура – Хата для различных условий РРВ при следующих параметрах: высота АС над поверхностью 1,5 м, высота подвеса антенны БС 60 м, усиление антенны АС 0 дБ, усиление антенны БС 15 дБ с учетом затухания в фидере, чувствительность РПУ БС –107 дБм, вероятность связи 0,9. Очевидно, что для двухдиапазонной сети (GSM 900/1800) следует использовать данные, полученные для диапазона 1800 МГц.

М	Предельно допустимые размеры сайта								
Мощность ЭМИ АС.	450M	Гц	900M	Гц	1800МГц				
BT ¹⁾	Предельная	Площадь	Предельная	Площадь	Предельная	Площадь			
	дальность	сайта,	дальность	сайта,	дальность	сайта,			
	связи, км	КВ.КМ	связи, км	КВ.КМ	связи, км	КВ.КМ			
Открытая местность (Open area)									
0,1	15,2	604	10,8	301	7,75	156			
0,2	17,9	835	12,9	430	9,12	216			
0,3	19,6	999	14,2	526	10,2	268			
0,5	21,8	1240	16,1	670	11,6	348			
0,7	23,4	1422	17,3	782	12,6	412			
1,0	25,1	1637	18,8	915	13,7	490			
1,5	27,1	1910	20,5	1088	15,1	594			
2,0	28,6	2124	21,7	1225	16,1	677			
Пригород (Suburban area)									
0,1	5,07	66,8	3,19	26,4	1,97	10,1			
0,2	6,20	99,9	3,92	39,9	2,42	15,2			
0,3	6,96	126	4,42	50,6	2,73	19,4			
0,5	8,04	168	5,13	68,3	3,18	26,3			
0,7	8,82	202	5,65	83,0	3,51	32,0			
1,0	9,72	245	6,26	102	3,90	39,5			
1,5	10,8	305	7,03	128	4,39	50,1			
2,0	11,7	354	7,62	151	4,78	59,3			
Город (Urban area)									
0,1	2,88	21,6	1,62	6,78	0,86	→ 1,94			
0,2	3,54	32,6	1,98	10,2	1,06	2,94			
0,3	4,00	41,5	2,24	13,0	1,20	3,74			
0,5	4,64	56,0	2,61	17,7	1,40	5,08			
0,7	5,12	68,2	2,88	21,6	1,55	6,23			
1,0	5,68	83,8	3,21	26,7	1,72	7,70			
1,5	6,38	106	3,62	34,0	1,94	9,82			
2,0	6,93	125	3,94	40,2	2,12	11,7			

T (1
Гаолина	. I
1	

¹⁾ Примечание: здесь указаны значения импульсной мощности сигнала в сетях GSM, в восемь раз превышающей среднюю мощность ЭМИ АС.

Данные приведенной ниже табл. 7.2 иллюстрируют связь между предельно допустимым объемом выделяемого оператору сети GSM радиочастотного ресурса (числа радиоканалов в секторе излучения/приема БС) с территориальной плотностью абонентов в сайте, чел./кв.км. Данные получены с использованием данных табл. 7.1 при условии, что в качестве примера взяты значения ПДУ ЭМИ АС, равные 0,1 Вт для частот 1,8...2,2 ГГц; 0,2 Вт – для частот 0,8...1,0 ГГц и 0,3 Вт – для частот 0,3...0,5 ГГц. Повидимому, эти значения несколько завышены; существуют обоснованные мнения [14, 93], что установленный нормами [11] ПДУ ППМ ЭМИ АС $\Pi_{E5} = 100$ мкВт/см² может превышаться при мощности ЭМИ АС более 30 – 40 мВт.

<u>Пример.</u> В регионе выдано 4 идентичных лицензии на предоставление услуг мобильной связи стандарта GSM, плотность городского населения 10 000 чел./кв.км, 80% населения – потенциальные абоненты сотовой связи, с учетом планируемой вероятности $\mathbf{p} = 0,2$ приобретения одним абонентом двух AC в целях экономии на межсетевых звонках. В этом случае абонентская база каждого из операторов сотовой связи составляет 96% от четверти городского населения (2400 чел./кв.км)

Очевидно, что в данной ситуации речь идет о двухчастотных сетях GSM 900/1800, поэтому необходимо ограничиться площадью сайта 1,94 кв.км (выделено в строке 1 раздела "Urban area" табл. 7.1). При этом максимальное число абонентов в сайте каждой сети составит 1,94·2400 = 4656 чел.

Далее обратимся к табл. 7.2. Приемлемым является вариант трехсекторной БС с использованием шести несущих ($\mathbf{n} = 6$) в каждом секторе (выделено в строке 5 раздела «Трехсекторные БС» табл. 7.2), при котором максимальное число абонентов в сайте равно 4120. Это число несколько меньше прогнозируемого числа абонентов, равного 4656, что призвано способ-

ствовать уменьшению размеров сайтов до необходимого уровня и позволяет сформировать некий «защитный интервал», учитывающий как влияние случайности пространственной топологии сотовой сети на ее экологичность в предположении обеспечения покрытия ею территории с заданным качеством связи, так и ожидаемый рост средней нагрузки, создаваемой одним абонентом сети по сравнению с принятой (0,025 эрл.). При использовании кластера размерности 12 ($\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{s} = 4 \cdot 3 \cdot 6$) каждому оператору должно быть выделен РЧР в объеме не более 72 радиоканалов, например 24 канала в диапазоне 900 МГц и 48 каналов в диапазоне 1800 МГц.

Если пространственная структура сети достаточно регулярна, при наличии такого ресурса возможен переход к кластеру размерности 9 ($\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{s} = 3 \cdot 3 \cdot 8$), для которого «критическое» значение максимального числа абонентов в сайте равно 5860 чел. (строка 7 разд. «Трехсекторные БС» табл. 7.2). Последнее обеспечивает оператору возможность обработки трафика прогнозируемой интенсивности без уменьшения размеров сайтов до экологически безопасного предела при некотором снижении качества связи. Поэтому с экологической точки зрения, возможно, следует ввести дополнительные рекомендации, связанные с прямым ограничением размера сайта или ужесточением требований к качеству связи (связанному с уровнем внутрисистемной суммарной помехи). В частности, последнее, как правило, предусматривается в условиях получаемых операторами лицензий на предоставление услуг сотовой связи.

Таким образом, изложенная методика обеспечивает принципиальную возможность оценки предельно допустимого объема РЧР, выделяемого оператору сотовой связи, при котором будут обеспечены необходимые с точки зрения экологии тенденции развития радиосети. Приведенные выше оценки носят предварительный характер, иллюстрируя методику определения «экологических» ограничений на выделяемый сети РЧР в различных условиях. Учитывая высокую стоимость любых ограничений в данной сфере бизнеса, разработка практической методики оценки предельно допустимого объема РЧР, выделяемого оператору сотовой связи, должна предполагать уточнение целого ряда моментов, в частности:

- уточнения энергетического критерия опасности уровня ЭМИ АС в отдельных диапазонах частот (ПДУ ЭМИ АС). В настоящее время данные о границах допустимости уровней ЭМИ АС в различных диапазонах частот, приведенные в различных источниках, в частности, в [4, 6, 7, 14, 93, 105], являются взаимно противоречивыми. Взятые в качестве примера при составлении табл. 7.2 ПДУ ЭМИ АС, судя по данным этих публикаций, являются завышенными, однако установить однозначную связь между мощностью ЭМИ АС, с одной стороны, и нормируемыми величинами (ППМ или SAR), используя опубликованные данные, довольно затруднительно;

уточнения прогнозов ожидаемого роста средней нагрузки, создаваемой одним абонентом сети, по сравнению с общепринятым базовым уровнем 0,025 эрл., по крайней мере для перспективных сетей 3G, 4G;

– уточнения эмпирико-статистических моделей РРВ для различных условий, в частности, уточнение характеристик затухания радиоволн между АС и БС в городской застройке на расстояниях менее 1км (общеизвестные модели – модель Окамура – Хата, модели в соответствии с [102, 103, 106] и др. неадекватны для расстояний менее 1 км) и при наличии растительности различных типов; уточнение модели условий РРВ в многоэтажной городской застройке с учетом расположения АС на верхних этажах зданий;

– уточнения влияния степени нерегулярности (случайности) пространственного размещения БС в сети на появление в сайтах областей, удаленных от БС на расстояния, превышающие $\mathbf{R}_{c\ max}$, а также на появление в сайтах локальных областей с повышенными уровнями внутрисетевых помех, в которых требуется повышенная мощность ЭМИ АС;

272

Таблица 7.2

Параметры сайта			Территориальная плотность абонентов в сайте, чел./кв.км.									
Макс. чис-	Интенсивность	тра-	Число									
ло радио-	фика в час м	макс.	абонен	450 МГц			900 МГц			1800 МГц		
каналов/	нагрузки при вер	роят-	тов в	(ЭИМ АС ≤ 0,3 Вт)			(ЭИМ АС ≤ 0,2 Вт)			(ЭИМ АС ≤ 0,1 Вт)		
каналов	ности блокиров	вания	сайте	Открытая	Приго-	Город	Открытая	Приго-	Город	Открытая	Приго-	Город
трафика	вызова 1%, эрл.			местность	род		местность	род		местность	род	
БС с круговыми диаграммами направленности антенн												
2/15		8,11	324	0,32	2,58	7,81	0,75	8,17	31,6	2,08	32,1	167
3/23		14,5	580	0,58	4,61	14,0	1,35	14,5	56,6	3,72	57,5	299
4/31		21,2	848	0,85	6,74	20,4	1,97	21,2	82,8	5,43	84,1	437
5/38		27,3	1090	1,09	8,68	26,3	2,54	27,4	107	6,70	108	563
6/46		34,3	1370	1,37	10,90	33,1	3,19	34,4	134	8,79	136	707
7/54		41,5	1660	1,66	13,19	40,0	3,86	41,6	162	10,6	165	856
8/62		48,8	1950	1,95	15,51	47,1	4,54	48,9	191	12,5	194	1010
Трехсектор	ные БС											
2/15		24,3	973	0,97	7,73	23,5	2,26	24,4	95,0	6,24	96,5	502
3/23		43,5	1740	1,74	13,8	42,0	4,04	43,6	170	11,2	173	897
4/31		63,6	2540	2,55	20,2	61,4	5,91	63,7	248	16,3	252	1310
5/38		81,9	3280	3,28	26,0	79,0	7,61	82,1	320	21,0	325	1690
6/46		103	4120	4,12	32,7	99,3	9,56	103	402	26,4	408	2120
7/54		124	4980	4,98	39,6	120	11,6	125	486	31,9	494	2570
8/62		146	5860	5,86	46,5	141	13,6	147	572	37,5	581	3020
Шестисекто	рные БС											
2/15		48,7	1950	1,95	15,5	46,9	4,52	48,8	190	12,5	193	1000
3/23		87,0	3480	3,48	27,7	83,9	8,09	87,2	340	22,3	345	1790
4/31		127	5090	5,09	40,4	123	11,8	128	497	32,6	505	2620
5/38		164	6550	6,56	52,1	158	15,2	164	640	42,0	650	3380
6/46		206	8230	8,24	65,4	199	19,1	206	804	52,8	816	4240
7/54		249	9960	9,97	79,2	240	23,2	250	973	63,8	988	5130
8/62		293	11700	11,7	93,1	282	27,2	293	1140	75,1	1160	6040

учета влияния электромагнитного фона, создаваемого сотовыми телефонами других пользователей, системами эфирного телерадиовещания и другими радиообъектами, на ухудшение экологической безопасности сотовых радиосетей, а также влияния массового использования населением средств сотовой радиосвязи на увеличение экологической опасности размещения на территориях современных городов мощных радиотелевизионных передающих центров и других радиообъектов с мощным электромагнитным излучением, создающих интенсивный электромагнитный фон в местах с высокой плотностью населения;

– уточнения степени влияния параметров регулировки мощности излучения AC в сети, влияния особенностей организации многостанционного доступа (особенностей функциионирования технологий CDMA, FDMA, TDMA) на среднюю мощность ЭМИ AC и на вероятность превышения ею допустимых значений в произвольный момент времени в произвольной точке зоны обслуживания сети в присутствии внутрисетевых помех;

– уточнения данных табл. 7.1, 7,2 с учетом влияния местоположения абонента над поверхностью и требований к качеству связи в многоэтажной городской застройке во всей зоне обслуживания, принимая во внимание увеличение уровня внутрисетевых помех с увеличением высоты АС над поверхностью.

При реализации большинства из перечисленных выше уточнений существенную пользу принесло бы использование данных внутренней статистики сотовых радиосетей различных стандартов при различных вариантах частотно-территориального планирования (с использованием кластерной структуры, с использованием эвристических алгоритмов оптимизации частотных планов и т.п.).

Очевидно, что приведенные выше положения и результаты могут быть определены в форме, обеспечивающей введение экологических огра-

ничений на объем РЧР, выделяемый сотовой сети, на основе принятых ограничений на предельно допустимые уровни плотности потока мощности ЭМИ АС, [Вт/м²], или усредненных уровней удельной поглощенной мощности (SAR), [Вт/кг], регламентируемых международными (ICNIRF) или национальными стандартами в каждом из используемых диапазонов частот. В частности, используемые выше значения ПДУ ЭМИ АС, безусловно, пропорциональны значениям предельно допустимых уровней плотности потока мощности ЭМИ АС и значениям предельно допустимых уровней удельной поглощенной мощности ЭМИ АС; однако однозначная количественная связь между этими характеристиками не определена. Тем не менее эти работы должны быть завершены, поскольку только определение ограничений на мощность ЭМИ АС позволяет корректно определить необходимые ограничения на системные характеристики сотовых радиосетей, в частности, ограничения на выделяемый сети РЧР.

В целом, изложенный в данном разделе системный экологический взгляд на выделяемый сотовой сети радиочастотный ресурс позволяет количественно определить связь экологических характеристик сети с объемом и качеством выделенного сети РЧР, параметрами внутрисистемной (внутрисетевой) ЭМС, а также сформулировать ряд следующих возможных направлений, способствующих улучшению экологичности сотовых радиосетей:

1. Ограничение выдаваемого оператору РЧР; в этих условиях для обработки интенсивного трафика оператор должен развивать инфраструктуру сети в условиях ограниченного РЧР, т.е. дробить сайты, увеличивая коэффициент повторяемости частот, что также приведет к снижению уровней ЭМИ АС в сети.

2. Контроль за соблюдением заявляемых при участии в тендерах темпов развертывания сотовой радиосети для максимального сокращения

сроков функционирования радиосети в начальных экологически неблагополучных фазах; отдание предпочтения участникам тендеров, предлагающим наибольшие темпы развертывания сети и наибольшую пространственную плотность БС и готовых ограничиться наименьшим объемом выделяемого РЧР.

3. Ограничение минимально допустимой пространственной плотности БС (максимального размера сайта) по крайней мере в городской застройке, введение ограничений на минимально допустимое число сайтов на начальных стадиях развития сети.

4. Там, где это возможно, отдание предпочтения относительно низкочастотным (более экологичным) диапазонам (400...450 МГц, 800...900 МГц), особенно в сельских местностях и в пригородах; радиочастотный ресурс в диапазонах 1800...2200 МГц целесообразно использовать только в условиях, где плотность БС велика, и большая ЭИИМ АС не требуется (микро- и пикосоты).

5. При планировании РЧР для перспективных сетей мобильной связи (3G, 3G+, 4G) с точки зрения экологии целесообразно для этих сетей наряду с полосами частот диапазонов 800/900 МГц и 2 ГГц повторно рассмотреть возможность и целесообразность высвобождения полос частот, ранее выделенных сухопутной подвижной службе (300...350 МГц, 400...450 МГц и т.п.) для обработки речевого трафика сельских местностей, пригородов, зон отдыха и т.п.

6. Дальнейшее развитие методов и алгоритмов оптимизации частотных планов и обеспечения внутрисетевой ЭМС, призванных уменьшить уровень суммарной помехи внутри сети, в частности, в сети с нерегулярной структурой.

7. Углубленный сравнительный системный экологический анализ технологий сотовой связи (FDMA, TDMA, CDMA) в интересах определения

наилучших с экологической точки зрения решений на каждом из иерархических уровней перспективных радиотелекоммуникационных сетей (3G, 3G+, 4G).

8. В сельских районах и других районах с малой пространственной плотностью абонентов развитие фиксированных систем радиодоступа с антеннами вне помещений, использование локальных ретрансляторов в структуре сети сотовой связи.

9. Регулирование размеров экологических налогов в зависимости от степени экологической безопасности сотовой радиосети. Если сеть экологически безопасна, что достигнуто развитием ее инфраструктуры, дроблением сайтов и снижением мощности ЭМИ АС, налог должен отсутствовать. Наоборот, там, где сайты и средняя мощность ЭМИ АС велики, налог должен быть ощутим.

10. Организация независимой экспертизы экологической безопасности сотовых радиосетей, позволяющей оценить фактическое распределение мощности ЭМИ АС в зоне обслуживания каждой из сетей, качество системного проектирования и применения организационных и технических мер (регулировка мощности ЭМИ АС, применение микро БС и т.п.), способствующих повышению экологической безопасности радиосетей; широкая популяризация усилий операторов в этой области.

Последнее в связи с повышением роли качества услуг как главного фактора конкуренции среди операторов подвижной связи [83, 107] может обеспечить принципиальное улучшение конкурентных позиций операторов, уделяющих наибольшее внимание обеспечению реальной экологической безопасности сотовых радиосетей.

277

8. ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОЙ ЭКОЛОГИИ СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Приведенные выше результаты демонстрируют применение системного подхода к анализу ряда аспектов проблемы экологии сотовой радиосвязи «в узком смысле», т.е. на системном радиотехническом уровне. Автор надеется, что изложенный материал может быть использован в качестве начальной методической основы дальнейшего более глубокого системного анализа данной проблемы.

Вместе с тем представленный выше материал, безусловно не исчерпывает тематики системного подхода к данной проблеме. Этот подход, как уже отмечалось ранее, должен быть принципиально многосторонним, поскольку данная проблема должна исследоваться на различных уровнях: на системном радиотехническом уровне, на системном медико – биологическом и социальном уровнях, на системном политико – экономическом уровне и т.п.

В этой связи представляется полезным, подводя некоторые итоги, попытаться обобщить представленный материал в форме первичной систематизации основных принципов системной экологии сотовой радиосвязи как научного направления, способного предложить новые (и вспомнить хорошо забытые старые) пути решения данной проблемы и, в целом, сформировать весьма представительный и эффективный арсенал разнообразных методов ее решения в различных ситуациях. По мнению автора, подобное обобщение полезно, в частности, в интересах планирования исследований, разработок и организационно-технических мероприятий в рассматриваемой области. Приведенный ниже материал не может претендовать на завершенность и является всего лишь попыткой предложить данное обобщение в качестве предмета для широкого обсуждения, анализа и углубления. Ниже приводится краткая формулировка ряда принципов системного подхода к решению проблем экологии мобильной (сотовой) радиосвязи.

1. <u>Принцип потенциальной опасности ЭМИ АС</u>

Внешняя среда характеризуется присутствием естественного электромагнитного фона, образуемого электромагнитными излучениями земного, атмосферного и космического происхождения на частотах от сверхнизких (менее 1Гц) до частот рентгеновского и гамма-излучения. Естественный фон по уровню может быть приемлемым и даже необходимым для нормального существования живых организмов, либо вредным по крайней мере в отдельных местах для отдельных форм жизни (например, в местах с повышенным уровнем рентгеновского излучения, электрического либо магнитного полей и т.д.). Значительное увеличение интенсивности электромагнитного фона в отдельных полосах частот за счет функционирования радиосистем представляет потенциальную опасность для живых организмов уже в силу того, что данный фактор меняет базовые физические характеристики среды обитания.

2. <u>Принцип системной обусловленности параметров ЭМИ АС и БС</u> сотовой связи

Наличие у радиосистем ЭМИ является неизбежным и определяется главным принципом функционирования этих систем – использованием ЭМП для передачи и/или извлечения информации. Параметры ЭМИ элементов радиосистемы (мощность ЭМИ, рабочая полоса частот, параметры модуляции и т.п.) определяются исходя из требуемых характеристик радиосистемы – дальности действия, скорости передачи информации, минимально необходимого уровня принимаемого сигнала по отношению к уровню помех и внутреннего шума радиоприемника и т.п.). В частности, в сетях сотовой связи 2-го поколения и выше мощность ЭМИ АС устанавливается системой принудительно исходя из величины потерь при РРВ между АС и БС, уровня внутрисистемных радиопомех и чувствительности РП БС с учетом минимально необходимого отношения «сигнал/(помеха+шум)» на его входе. Таким образом, мощность ЭМИ АС определяется в значительной степени условиями размещения АС по отношению к БС и системными характеристиками сотовой сети (размерами сайтов, качеством частотно-территориального планирования сети в условиях ограниченности выделенного РЧР, видом и качеством реализации в сети многостанционного доступа, приема и обработки радиосигнала, системными настройками АС и БС и т.п.). Пределы и дискретность регулирования мощности ЭМИ АС определены соответствующим стандартом сотовой связи [12, 60 – 63] и в интересах эффективной работы сети, безусловно, не должны зависеть от каких-либо индивидуальных характеристик модели АС.

Мощность ЭМИ БС устанавливается оператором исходя из требований частотно-территориального плана сети, а также ограничений межсистемной ЭМС в тех регионах, где в полосах частот сотовой связи эксплуатируются другие радиосистемы. В частности, на территории стран СНГ такие ограничения на параметры ЭМИ БС имеют место практически во всех полосах частот сотовой связи выше 800 МГц: в полосе частот GSM-900 в связи с необходимостью обеспечения ЭМС с системами воздушной радионавигационной службы, в полосах частот GSM-1800 и UMTS/IMT – в связи с необходимостью обеспечения ЭМС с радиосистемами фиксированной, радиолокационной и воздушной радионавигационной служб. Попутно отметим, что подобная же ситуация имеет место и в основных полосах частот беспроводного широкополосного доступа (системы WiMax, WiFi) и радиочастотной идентификации (RFID).

Минимально необходимая мощность ЭМИ БС в сети определяется

характеристиками последней: размерами сайтов, уровнем внутрисетевой помехи (качеством частотно-территориального планирования сети в условиях ограниченности выделенного РЧР), чувствительностью РП АС и необходимым отношением сигнал/(шум+внутрисетевая помеха) на его входе и т.п. В то же время в ситуациях, когда требования межсистемной ЭМС, определяющие верхние границы допустимых значений ЭИИМ БС, ослаблены либо отсутствуют, реально используемые уровни ЭИИМ БС могут значительно превосходить минимально необходимые. Технически такие возможности существуют (см. табл. 2.10).

Таким образом, использование операторами уровней ЭМИ БС, близких к минимально необходимым, требует в первую очередь выбора наиболее экологичного стандарта сотовой связи и качественного системного проектирования и планирования сети, в том числе с учетом требований межсистемной ЭМС (там, где это необходимо), а также регулирования административными мерами, пропаганды и должного стимулирования различными способами.

3. <u>Принцип системности мер по обеспечению экологической без-</u> опасности сотовой связи

Поскольку мощность ЭМИ АС определяется системными характеристиками, требованиями и настройками сотовой сети, экологическая безопасность последней должна обеспечиваться выбором соответствующих системных решений. Поскольку сотовая радиосвязь имеет иерархическую структуру и в части организации и нормативно-правового регулирования, и в части создания и развития технических средств, и в части потребления услуг, на каждом из иерархических уровней каждого из этих сегментов возможно принятие решений и мер, способствующих повышению экологической безопасности сотовой радиосвязи.

4. <u>Принцип научной обоснованности критериев экологической</u> опасности ЭМИ сотовой связи

Степень опасности и степень приемлемости увеличения суммарной интенсивности и усложнения спектрально-временной структуры совокупного ЭМП за счет функционирования радиосистем сотовой связи должны определяться по результатам глубоких, широких и всесторонних медикобиологических исследований влияния ЭМИ сотовой связи на биологические ткани и системы, включая исследования отдаленных последствий методами медицинской статистики.

Сегодня единственными практическими критериями экологической безопасности ЭМИ сотовой связи являются принятые санитарные нормы, регламентирующие значения ПДУ ЭМП в различных условиях, в различных диапазонах частот и для различных групп населения. Эти нормы определяют также правила весового суммирования интенсивностей ЭМП различных систем в различных диапазонах частот с различными видами модуляции (спектрально-временными характеристиками) с учетом степени опасности каждого ЭМП отдельно и в совокупности для определения совокупного ПДУ ЭМИ при оценках границ санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки вокруг сложных радиотехнических объектов и систем.

Чрезвычайно интенсивное развитие сетей сотовой связи, сопровождающееся растущим беспокойством в обществе по поводу ее возможной опасности для здоровья людей, требует адекватного значительного расширения и углубления медико-биологических исследований вопросов экологической опасности ЭМИ оборудования сотовой связи, включая уточнение критериев допустимости вынужденных экологических рисков, связанных с присутствием динамично изменяющихся во времени ЭМП АС в условиях высокой пространственной плотности источников ЭМИ сотовой связи и других радиотелекоммуникационных систем.

5. <u>Принцип совместного анализа и обеспечения экологической без-</u> опасности всех источников ЭМИ

Чрезвычайно интенсивное насыщение современного общества разнообразными радиотелекоммуникационными системами (сотовой/мобильной связи различного назначения, беспроводного доступа, радиочастотной идентификации и т.п.), способными в совокупности представлять серьезную экологическую опасность за счет их массового распространения и повсеместного широкого внедрения в экономику, образование и быт, требует адекватного значительного расширения и углубления медикобиологических и системных исследований экологической опасности всей совокупности электромагнитных полей, создаваемых всем радиооборудованием всех назначений любой принадлежности в среде обитания человека.

Анализ экологической опасности радиосистем информационного обслуживания современного общества должен выполняться для всей совокупности этих систем, поскольку для всей площади современной городской застройки невозможно выделить преобладающий по интенсивности источник ЭМП. По-видимому, вынужденные экологические риски от ЭМП сотовой связи и ЭМП систем телерадиовещания являются сопоставимыми. В ряде локальных областей городской застройки к ним могут присоединяться ЭМП других радиотелекоммуникационных систем (радиоинтерфейсов, WiMax, RFID и т.п.), а на ряде локальных территорий пригородной зоны и сельской местности функционирование сотовой связи (с повышенными средними уровнями ЭМП АС и БС за счет малой пространственной плотности последних) происходит в условиях присутствия достаточно интенсивных ЭМП систем радиовещательной и радиолокационной служб.

В этих условиях индивидуальный отказ от использования технических средств с радиоизлучением по экологическим мотивам оказывается сравнительно малоэффективным, поскольку вынужденные экологические риски в местах с высокой плотностью населения, обусловленные присутствием ЭМП от различных РЭС информационного обслуживания населения, оказываются заслуживающими внимания. Пример: отказ от использования РЭС с радиоизлучением в отдельно взятой квартире многоквартирного жилого дома в ситуации, когда владельцы всех других квартир этого дома активно используют сотовую связь, радиоинтерфейсы радиоуправления в системе "smarthouse" [101], охвачены услугами WiMAX или Wi-Fi, используют беспроводные удлинители проводной телефонной связи DECT и т.п. Стены современных жилых домов не обеспечивают большого затухания на частотах указанных систем. Поэтому в подобных ситуациях ограничение вынужденных экологических рисков на приемлемом уровне требует дополнительного внимания и усилий.

Совокупное снижение экологической опасности радиотелекоммуникационных систем также возможно за счет применения на высших иерархических уровнях там, где это возможно, альтернативных вариантов передачи информации и информационного обслуживания: разумного ограничения развития радиотехнологий и радиосистем телерадиовещания, радиорелейных систем передачи данных в сетях сотовой связи, стационарного беспроводного широкополосного радиодоступа и т.п. за счет ускоренного развития кабельного и спутникового телерадиовещания, применения рациональных сочетаний проводной и маломощной беспроводной телефонной связи, развития инфраструктуры сетей сотовой связи в городской застройке на основе волоконно-оптических линий связи и т.п. В результате этих действий в рамках принятых экологических ограничений могут быть значительно облегчено развитие радиотехнологий, радиосистем и услуг, являющихся, по существу, безальтернативными: мобильной/сотовой радиосвязи, мобильного цифрового телерадиовещания, мобильного Интернета, радиочастотной идентификации и т.п.

Необходимость совместного анализа и обеспечения экологической безопасности всех источников ЭМИ дополнительно стимулируется все более выраженной конвергенцией технологий, функций и услуг разрабатываемых новых поколений систем информационного обслуживания общества, в частности, систем четвертого (4G) и более высоких поколений. В этих системах в значительной мере утрачиваются различия между способами реализации услуг связи, телерадиовещания и передачи информации; их реализация предполагается на основе универсальных высокоинтеллектуальных цифровых радиотехнологий и оборудования.

<u>Принцип системности критериев экологической опасности ЭМИ</u> <u>АС сотовой связи</u>

Поскольку экологическая безопасность сети сотовой связи определяется исключительно ее системными характеристиками и настройками, критерии экологической опасности ЭМИ АС должны быть однозначно связаны с возможными ограничениями на технические, структурные, организационные и прочие характеристики элементов сотовой радиосети. В этом смысле наиболее удобным с точки зрения выполнимости и контролируемости условием экологической безопасности отдельно взятой сотовой радиосети могло бы быть ограничение на мощность ЭМИ АС в сети, однако такое ограничение по крайней мере для сетей 2G – 3G привело бы к снижению надежности связи. Кроме того, с точки зрения обеспечения экологической безопасности сотовой связи в условиях электромагнитного фона естественного и искусственного происхождения более удобным является принятый во многих странах критерий экологической безопасности в форме ограничения предельно допустимой интенсивности (ППМ) электромагнитного поля в местах возможного пребывания людей (вынужденный экологический риск), либо у тела человека (добровольный экологический риск абонента сотовой связи), а также ограничение по продолжительности и/или проценту времени превышения совокупной интенсивностью ЭМП от всех источников ЭМИ.

В этом плане также широко используемый критерий **SAR** экологической безопасности AC неудовлетворителен, поскольку он неоднозначно связан как с мощностью ЭМИ AC [7], так и с интенсивностью электромагнитного поля, образуемого на определенном расстоянии от AC. Кроме того, величина **SAR** характеризует лишь один из нескольких механизмов воздействия ЭМИ AC на системы человеческого организма [4, 6, 7]. В этой связи величина **SAR** может использоваться в качестве частной «экологической» характеристики AC, но неприемлема в качестве системного критерия экологической безопасности сотовой связи.

7. <u>Принцип адекватности нормирования предельно допустимых па-</u> раметров электромагнитной обстановки и предельно допустимых параметров ее воздействия на человеческий организм

Нормирование предельно допустимых параметров среды обитания (ЭМО) и параметров воздействия ЭМП на здоровье должно быть адекватно задачам обеспечения электромагнитной безопасности и экологичности функционирования всех иерархических уровней системы беспроводного информационного обслуживания современного общества.

Речь идет об электромагнитной безопасности

- как отдельной АС, так и всей совокупности АС в области потенциального электромагнитного взаимодействия,
- как отдельной БС, так и всего радиооборудования инфраструктуры сотовой радиосети (всей совокупности базовых и радиорелейных станций, а также интегрированных в сеть систем беспроводного широкополосного доступа, систем сбора информации и передачи данных и т.п.);

 как отдельной сотовой радиосети, так и всей совокупности радиосистем, радиосетей и других технических систем различного назначения, формирующих ЭМО в исследуемой точке пространства.

Кроме того, речь идет об однозначности связи нормируемых предельно допустимых параметров электромагнитной безопасности с частными видами теплового и нетеплового воздействия ЭМП на человеческий организм (воздействия на различные ткани и системы организма – нервную, иммунную, кроветворную, кровеносную, репродуктивную и т.п.).

Наиболее конструктивным видом нормирования, по мнению автора, вполне адекватным современному уровню объективности знаний о влиянии ЭМП на человеческий организм, является нормирование энергетических параметров ЭМП, в частности, нормирование ПДУ ППМ ЭМП диапазонов УВЧ, СВЧ и КВЧ (0,3...300 ГГц). Однако и данный вид нормирования, по мнению автора, нуждается в дальнейшем развитии и углублении. Причины в следующем:

1. Принятые значения ПДУ ППМ ЭМП большей частью отражают степень теплового воздействия ЭМП на организм. Нетепловые механизмы воздействия ЭМП этих диапазонов частот на различные системы человеческого организма, а также ряд других проблем, в частности, влияние различных видов модуляции ЭМП, изучены недостаточно. Следует ожидать, что по мере накопления объективных научных данных в указанных и смежных областях может возникнуть необходимость уточнения принятых нормативов (как численных значений, так и формы представления).

2. В разд. 4, 6 данной работы было показано, что при массовом использовании сотовой связи, особенно в условиях внешнего электромагнитного фона, совокупное ЭМП представляет собой случайный процесс с большим динамическим диапазоном и корреляционными характеристиками, определяемыми характеристиками изменения ЭМИ АС во времени. Нормирование
фиксированного ПДУ ППМ ЭМП в этих условиях оказывается недостаточным, требуется нормировать и вероятность (либо относительное время превышения) совокупным ЭМП в рассматриваемой точке принятого значения ПДУ.

3. Ограничение ЭИМ АС и нормирование ПДУ ППМ ЭМП АС на заданном расстоянии от АС чрезвычайно важны и удобны с практической точки зрения, поскольку позволяют вводить однозначные ограничения на реальную мощность ЭМИ АС с учетом всех конструктивных и схемотехнических особенностей АС, включая фактический КПД выходного радиотракта передатчика АС. Именно ограничение ЭИМ АС и нормирование ПДУ ППМ ЭМП АС сделали возможным получение основных научных результатов системного уровня, изложенных в данной работе и связанных с оценками вынужденных экологических рисков от массового использования АС. Тем не менее, применительно к воздействию ЭМИ АС на здоровье владельцев АС (добровольные риски) нормирование лишь ПДУ ППМ ЭМП АС непосредственно у головы абонента (100 мкВт/см²) либо на заданном расстоянии от AC (3 мкВт/см² на расстоянии 370 мм для диапазона частот 0,8 – 2,4 ГГц) в форме [11] представляется неполным, поскольку для весьма специфических условий, когда корпус АС непосредственно соприкасается с головой человека, определить плотность потока мощности в месте соприкосновения невозможно, поскольку это место находится в ближней зоне ЭМИ АС. Поэтому с точки зрения ограничения добровольных рисков абонентов данный вид нормирования можно дополнить (не заменить, а именно дополнить!) нормированием параметра SAR, обеспечивающим в целом приемлемый уровень адекватности ограничения теплового воздействия ЭМИ АС на наиболее критичные области головы человека.

4. Сегодня нет единого мнения о приемлемом значении ПДУ ЭМП для населения. Более того, в ряде случаев факт ически имеет место ситуация

двойных стандартов. И если система двойных стандартов естественна и целесообразна для дифференциации вынужденных и добровольных рисков от использования сотовой связи, то ситуация, когда на территории одного государства существует несколько различных ПДУ для одних и тех же условий и групп населения, представляется некорректной. В частности, чем вызвано различное отношение к здоровью жителей Москвы и всех прочих граждан РФ (ПДУ отличаются в 5 раз)? ЭМО в центре промышленных мегаполисов России не менее сложна, чем в Москве. А если вспомнить, что до середины 80-х годов прошлого века в СССР был принят единый ПДУ ЭМП 1 мкВт/см² [50], а его увеличение сразу в 10 раз "волшебным" образом совпало с началом массового ввода на территории СССР мощных радиообъектов (мощных РЛС, мощных радиотелевизионных передающих центров и т.п.), то вопросов становится еще больше.

Подобная ситуация характерна не только для России. В различных странах Евросоюза значения ПДУ отличаются в 1000 раз [6, 13, 14, 16, 17]. Судя по данным [16, 17], ситуация, аналогичная российской, имеет место во Франции и Бельгии.

Учитывая данную ситуацию, а также принимая во внимание естественное стремление к гармонизации требований в пределах одной страны, одного политико-экономического союза (ЕС, СНГ и т.п.), возможно, имеет смысл ввести параметрический ряд значений ПДУ ППМ в пределах [Π_{E1} , Π_{E5}] (см. табл. 2.15), или в диапазоне 0,1...100 мкВт/см², отдельные значения которого отражали бы различные степени вынужденных и добровольных экологических рисков, а также различный уровень защищенности (различные защитные интервалы) по отношению к объективно установленному уровню опасности, установленному по объективным медикобиологическим либо санитарно-гигиеническим критериям (с учетом всех механизмов действия ЭМП различной интенсивности на все системы организма (иммунную, нервную, репродуктивную, кровеносную, кроветворную и т.п.) и с учетом объективно установленных пороговых уровней, связанных с возникновением болезней, функциональных отклонений и т.п.). Этот ряд значений ПДУ позволял бы дифференцировать территории (включая определение группы санитарно-защитных зон вокруг радиообъектов) по степени электромагнитной безопасности, а следовательно, и по уровню цен на землю и жилье, налогов, страховых и арендных платежей и т.п. При этом возможно было бы допустить в определенных пределах реализацию добровольных экологических рисков при выборе мест проживания, отдыха, обучения и т.п. с уровнями ЭМП в границах, допускаемых рекомендациями ВОЗ и ЕС, либо в пределах, устанавливаемых нормативными актами отдельных государств.

Возможно, в качестве дополнительной аргументации целесообразности разработки параметрического ряда значений ПДУ ППМ могут быть рассмотрены мнения ряда авторов, в частности, [6, 7], о том, что вид и параметры модуляции ЭМИ связаны со степенью его экологической опасности. Если данная связь существенна, то требуется обоснование группы нормативов (ПДУ ППМ) для ЭМП с различными видами модуляции, а также для суммарной интенсивности ЭМП различного происхождения в типовых условиях.

Нормирование ПДУ ППМ ЭМП представляет собой нормирование параметров воздействующего ЭМП (параметров ЭМО в точке наблюдения). Альтернативным видом нормирования является нормирование результатов воздействия ЭМП на человеческий организм. Наиболее известным и весьма популярным видом такого нормирования является нормирование удельной поглощенной мощности ЭМП АС (параметра **SAR**) для отдельных наиболее критичных областей головы человека. Как было указано выше, для ситуаций, когда интенсивность ЭМП велика, а корпус АС расположен вплотную к голове человека (для этих ситуаций тепловое воздействие ЭМП АС представляет очевидную опасность, при этом корректно определить плотность потока мощности в месте соприкосновения АС с головой пользователя невозможно), нормирование параметра **SAR** наряду с нормированием ПДУ ППМ ЭМП АС на определенном расстоянии от АС представляет собой достаточно эффективный инструмент обеспечения электромагнитной безопасности АС для их владельцев (пользователей). Вместе с тем нормирование параметра **SAR** имеет и существенные недостатки, по мнению автора, состоящие в следующем:

1. Контроль параметра SAR осуществляется в условиях максимального уровня средней выходной мощности AC, однако в процессе функционирования нормально спроектированной сети сотовой связи AC крайне редко функционирует с максимальным уровнем мощности ЭМИ. В связи со сложной нелинейной зависимостью температуры тканей тела человека от мощности ЭМИ AC и времени воздействия установить однозначно и объективно реальную опасность ЭМИ AC в процессе эксплуатации достаточно сложно.

2. Определение значений параметра SAR AC осуществляется как с помощью «фантомов» (физических моделей головы человека с имплантированными датчиками напряженности поля и температуры), так и с помощью компьютерного моделирования. В первом случае фиксированное положение датчиков позволяет использовать конструктивные и схемотехнические решения, снижающие значение параметра SAR для конкретной структуры фантома, однако это может быть достигнуто за счет увеличения интенсивности облучения других тканей и внутренних областей головы, а также за счет некоторого снижения фактической мощности ЭМИ AC. Последнее, в частности, будет компенсироваться в процессе эксплуатации принудительной установкой требуемой мощности ЭМИ AC базовыми станциями. Во втором случае для объективности анализа соответствия AC нормам требуется стандартизация соответствующего программного обеспечения при неизбежной монополизации его разработки и поставки.

3. Параметр SAR AC нормирует только тепловое воздействие ЭМИ AC на определенные критические области головы человека. Однако сегодня объективно доказана и необходимость принимать во внимание нетепловое воздействие ЭМП, представляющее опасность для большинства важнейших систем человеческого организма. Для более объективного нормирования результатов воздействия ЭМП на различные разделы мозга человека и другие органы по мере накопления результатов соответствующих научных исследований требуется постоянное совершенствование «фантомов» в части постоянного усложнения их структуры, введения новых разнообразных датчиков, что неизбежно затруднит процесс нормирования. Для использования SAR для нормирования результатов воздействия ЭМП на весь человеческий организм либо на другие части тела потребуется создание физических моделей (фантомов) этих частей тела или, в конечном счете, фантома всего человеческого организма со множеством датчиков температуры, напряженности поля, химического состава, параметров электрических, биологических и других процессов в различных тканях и на различном уровне и т.п. По мнению автора, в связи с чрезвычайной сложностью человеческого организма и взаимосвязей между его отдельными системами конструктивность подобного пути с практической точки зрения может быть поставлена под сомнение.

Установить однозначную количественную связь между результатом воздействия ЭМП на человеческий организм и параметрами данного физического воздействия при современном уровне развития науки в большинстве случаев невозможно. Поэтому, ограничившись лишь нормированием в той или иной форме степени воздействия ЭМП на человеческий организм

292

либо на отдельные его части, системы, мы фактически теряем возможность корректно ограничить технические характеристики и характеристики функционирования оборудования, являющегося источником данного физического воздействия. И если для нижнего иерархического уровня (АС) этот недостаток в какой-то мере компенсируется вышеуказанными достоинствами, то для более высоких иерархических уровней оборудования сотовой связи (отдельная БС, совокупность БС, сотовая сеть, совокупность сетей, радиоэлектронная обстановка в целом и т.п.) использование параметра SAR для нормирования их электромагнитной безопасности, в том числе на системном уровне, практически неприемлемо. В частности, ограничение системы нормирования электромагнитной безопасности оборудования сотовой связи только нормированием параметра SAR фактически выведет за пределы объективно контролируемых экологических ограничений базовое радиооборудование и радиооборудование инфраструктуры сотовых сетей, а также в целом всю совокупность абонентского и базового оборудования сети, формирующего заметный динамично изменяющийся электромагнитный фон в местах с высокой плотностью населения. Подобный шаг мог бы облегчить условия ведения бизнеса производителям оборудования и операторам сотовой связи, но, по мнению автора, неприемлем с точки зрения электромагнитной безопасности населения.

В свете изложенного адекватность нормирования предельно допустимых параметров ЭМО и предельно допустимых параметров ее воздействия на человеческий организм имеет принципиальное значение для обеспечения электромагнитной безопасности и экологичности всех уровней системы сотовой связи от АС до радиотелекоммуникационной среды информационного обслуживания общества в целом.

8. <u>Принцип обеспечения совпадения интересов и создания благо-</u> приятных тенденций

Телекоммуникационный бизнес относится к числу наиболее выгодных, экономические интересы основных его участников являются безусловно превалирующими. Поэтому по возможности необходимо добиваться решений, когда удовлетворение экономических интересов предприятий телекоммуникационной отрасли естественным образом приводит к снижению экологических рисков. Некоторые примеры:

– введение разумных ограничений на объем выделяемого операторам РЧР в полосах сотовой связи; в этих условиях (см. разд.7) стремление к расширению абонентской базы естественным образом сопровождается дроблением сайтов и уменьшением мощности ЭМИ АС и БС в сети, либо

– научно обоснованное введение достаточно высокой платы за использование выделяемого операторам РЧР в полосах сотовой связи (при одновременном уменьшении тарифов за использование РЧР радиорелейными линиями инфраструктуры сети). Ее размер может быть определен на основе решения задачи оптимизации совокупных затрат оператора (на использование РЧР в полосах сотовой связи и на увеличение территориальной плотности БС, сопровождающееся уменьшением размеров сайтов) при различных уровнях и способах расчета размеров оплаты за использование РЧР. В результате также принципиально могут быть созданы условия, когда стремление оператора к расширению абонентской базы и увеличению прибыли естественным образом будет сопровождаться дроблением сайтов и уменьшением мощности ЭМИ АС и БС в сети;

 разумное контролируемое ослабление ограничений на размещение БС сотовой связи, особенно мини-БС, в городской застройке, облегчающее операторам развитие инфраструктуры сотовой связи и также сопровождающееся дроблением сайтов.

9. <u>Принцип независимости экологической экспертизы</u>

Система организации телекоммуникационной отрасли должна обеспечивать возможность независимой и непредвзятой экологической экспертизы сотовых радиосетей в части системных решений, технических настроек оборудования, темпов развития инфраструктуры, эффективности использования выделенного РЧР и других вопросов, прямо влияющих на степень снижения экологической опасности сотовых сетей. В спорных случаях при проведении такой экспертизы необходимо иметь возможность использовать данные внутренней статистики сотовой сети в интересах объективного системного анализа степени экологической опасности ситуаций на отдельных территориях с повышенным внешним электромагнитным фоном.

В тех случаях, когда государство в лице органа госуправления выступает в качестве собственника (акционера) сотовой сети, интересы этого собственника (акционера) могут расходиться с интересами и абонентов сети, и в целом населения в зоне обслуживания сети в части инвестирования в мероприятия по обеспечению экологической безопасности последней. В подобных случаях экспертиза экологической безопасности должна проводиться независимыми организациями (неправительственными либо принадлежащими другим ведомствам).

10. <u>Принцип глобальной заинтересованности в экологической без-опасности систем радиотелекоммуникаций, включая многоуровневую иерархичность и межведомственный характер возможностей и мер ее обеспечения</u>

Повсеместное интенсивное внедрение средств сотовой связи и других средств радиотелекоммуникаций во все сферы жизни, в частности, практическое сравнение и даже локальное превышение плотностью AC сотовой связи плотности населения, приобрело глобальный характер, затрагивающий абсолютное большинство населения планеты. Поэтому следует ожидать и стимулировать всеобщие заинтересованность и усилия в обеспечении экологической безопасности всей совокупности радиосистем информационного обслуживания общества, в исключении возможных отдаленных негативных последствий (на генетическом, санитарно-гигиеническом, социальном и других уровнях) столь динамичного изменения физических, информационных и других связанных с ними характеристик среды обитания.

Результатом этих усилий на всех уровнях должно быть достижение благоприятного для всего населения планеты баланса между издержками на обеспечение экологической безопасности радиотелекоммуникационных систем массового информационного обслуживания населения и фактическим ущербом экологии среды обитания, здоровью и будущему ближайших поколений.

В частности, по мнению автора, системная иерархия условий и возможностей обеспечения экологической безопасности мобильной радиосвязи выглядит примерно следующим образом.

1. Глобальный (мировой, региональный) уровень

 Выбор диапазона частот для перспективных радиотехнологий и поколений мобильной связи по экологическим критериям.

Выбор технологии многостанционного радиодоступа (Multiple Access)
 по экологическим критериям.

 Разработка перспективных «конвергенционных» технологий массового информационного обслуживания населения с минимизацией экологических рисков.

– Создание условий для быстрого развития сетей (оперативная организация производства и сбыта оборудования, разработка методической базы планирования и проектирования, обеспечение инвестиционной безопасности и привлекательности, организация международного сотрудничества в продвижении привлекательных с экологической точки зрения технологий, оборудования и услуг и т.п.).

— Организация глубоких независимых комплексных научных исследований вопросов экологии сетей мобильной связи, обоснование экологически безопасных технических, системных и организационных решений и вариантов (методик, процедур) реализации этих сетей и т.п.

Постоянный широкий поиск и реализация новых принципов построения радиосистем и радиоканалов мобильной связи у земной поверхности, обеспечивающих снижение уровней ЭМИ АС и БС в перспективных системах радиотелекоммуникаций, снижение мощности ЭМИ в перспективных системах радиочастотной идентификации и т.п.; в качестве частных примеров могут быть приведены предложения по использованию самофокусирующихся и адаптивных антенных систем БС [108, 109], применение систем BLAST/MIMO [110, 111] для реализации высокоэффективного пространственно-временного кодирования и т.п.

2. Национальный (государственный) уровень

Определение (выбор) и реализация оптимальных с точки зрения экологии стратегий развития мобильной связи с учетом высоких темпов насыщения всех сфер человеческой деятельности техническими средствами с излучением (средства мобильной и фиксированной связи, разнообразные системы вещания, системы беспроводного радиодоступа, радиоинтерфейсы дистанционного управления и ПЭВМ, системы радиочастотной идентификации, промышленные и медицинские высокочастотные установки и т.п.), а также развития и внедрения альтернативных технологий и систем массового информационного обслуживания. Введение экологически обоснованных тарифов за использование РЧР (радиочастотного спектра) отдельными радиосистемами и радиослужбами с учетом их экологической опасности – частной (для отдельных радиосистем) и общей (с учетом их вклада в формирование «электромагнитного смога»).

 Введение обоснованных ограничений на объем выделяемого каждой сотовой сети РЧР.

– Лицензирование с учетом электромагнитной экологии объектов телекоммуникационного бизнеса, включая определение состоятельности и способности претендентов выполнить соответствующие требования администрации связи, касающиеся обеспечения высоких темпов развития сети до экологически безопасного уровня.

– Определение порядка, темпов и характеристик развертывания и функционирования сети с учетом необходимости обеспечения минимальных экологических требований в возможно сжатые сроки и полной экологической безопасности в будущем, включая снижение мощности ЭМИ БС по мере увеличения их территориальной плотности.

– Введение обоснованных «экологических» ограничений на технические параметры оборудования мобильной радиосвязи.

 Введение обоснованных «экологических» ограничений на использование мобильной радиосвязи в местах массового скопления людей и на объектах с высокой интенсивностью электромагнитного фона.

– Обеспечение квалифицированной экологической экспертизы проектов, предполагающих насыщение мест проживания, обучения и отдыха людей с высоким уровнем внешнего электромагнитного фона источниками ЭМП различного назначения (РЭС радиотелекоммуникаций, радиоуправления и т.п.).

- Отказ от сооружения мощных источников ЭМИ вблизи населенных

пунктов и на их территории, способных создать на территории с высокой плотностью населения электромагнитный фон, по интенсивности приближающийся к ПДУ.

– Разработка обоснованных санитарных норм на предельно допустимые параметры суммарной интенсивности электромагнитного поля для различных категорий населения с учетом всех компонент электромагнитного фона, перечисленных выше в подразд.6.5, образуемого мощными радиообъектами, средствами мобильной связи, бытовыми техническими средствами (СВЧ-печами, ПЭВМ, телевизорами и т.п.), средствами беспроводного радиодоступа, оборудованием радиочастотной идентификации и радиоинтерфейсов различного назначения и т.п.

– Стимулирование отказа (там, где это допустимо) от строительства ведомственных сетей радиосвязи (конвенциальных, транкинговых и т.п.), функционирующих при существенно более высоких уровнях ЭМИ АС по сравнению с системами сотовой связи общего пользования, в пользу применения сотовой радиосвязи в служебных, производственных целях.

 Создание необходимых условий для беспрепятственного развития инфраструктуры сети (стимулирование увеличения пространственной плотности БС, сокращение ограничений на размещение БС в городской застройке и т.п.).

– Создание условий для роста трафика в проводных сетях связи населенных пунктов, включая введение благоприятной с точки зрения экологии тарифной политики, обеспечивающей снижение тарифов за внутрисетевые звонки и за межсетевые соединения с абонентами проводной сети, обеспечение возможности переадресации на проводные сети связи и т.п.

– Введение независимого мониторинга экологической безопасности, экологичности построения и функционирования сотовых сетей и других РЭС информационного обслуживания населения, включая оценку распределения значений уровня ЭМИ АС по территории и в застройке (жилой, административной, производственной), оценку режимов функционирования (обоснованность уровней ЭМИ БС, настройка функции регулирования мощности ЭМИ АС и т.п.), степени регулярности структуры сети и т.п.

Создание прикладных геоинформационных систем анализа и прогноза
 ЭМО в густонаселенных районах.

 Поддержка слияния мелких операторов, не способных самостоятельно обеспечить интенсивное развитие инфраструктуры сотовой сети, разумный выбор и поддержка инвесторов сотовой связи и радиотелекоммуникационной отрасли в целом.

Поддержка национальных исследований, разработок и производства в области экологической безопасности сотовых радиосетей, поддержка участия национальных научных коллективов, отдельных ведущих ученых и специалистов в международных проектах, касающихся разработки перспективных поколений мобильной связи и обеспечения их экологической безопасности, обеспечение опережающего характера национальных и международных научных исследований и прикладных разработок, касающихся различных аспектов экологии мобильной связи на различных иерархических уровнях, и т.п.

 Подготовка инженерных и научных кадров в области мобильной радиосвязи и других областей современных радиотелекоммуникаций, обладающих необходимыми знаниями в области системной экологии радиотелекоммуникаций.

 Обучение основам электромагнитной экологии в рамках базовых курсов начальной, средней, профессионально-технической и высшей школы, повышение уровня информированности населения в этой области.

300

3. Уровень сети (оператора) сотовой связи

 Реализация всех системных возможностей динамической регулировки мощности ЭМИ АС.

 Качественное частотно-территориальное планирование сети для снижения уровня внутрисетевых помех и максимально возможного уменьшения используемой ЭИИМ АС.

– Регуляризация пространственной топологии сети в интересах максимально возможного уменьшения размеров областей у границ сайтов, где требуется использование повышенных уровней ЭМИ АС для обеспечения нормального качества связи.

– Максимально возможное снижение мощности ЭМИ БС по мере развития сети для уменьшения совокупного электромагнитного фона, образуемого ЭМИ БС на городской территории, а также для снижения уровня внутрисетевых помех, пропорционального необходимой ЭИИМ АС.

– Разумная интеграция с проводными сетями связи, например, с использованием радиоинтерфейса стандарта DECT либо микро-БС сотовой связи в местах экранирования сигналов внешних БС – в глухих и подвальных помещениях, в плотной городской застройке и т.п., а также в местах с повышенными уровнями внутрисетевых помех – на верхних этажах зданий, на возвышенностях при существенных перепадах высот местности на территориях с развитой инфраструктурой мобильной связи и т.п.

– Планирование сети с учетом изменений характеристик ЭМИ АС средствами индивидуальной защиты абонента от ЭМИ АС.

 Постепенный перевод отдельных элементов инфраструктуры сети с РРЛ на ВОЛС по мере развития сети по крайней мере в населенных пунктах и т.п.

301

4. Уровень абонента сотовой связи (персональный)

– Выбор сети по экологическим мотивам (развитость сети, стандарт сотовой связи, диапазон частот, результаты экологической экспертизы и т.п.).

 Выполнение правил общественной электромагнитной гигиены и этики использования мобильных телефонов в общественных местах и в присутствии других людей, особенно в местах их массового скопления.

– Выполнение правил личной электромагнитной гигиены - разумная тактика применения мобильного телефона (при ответе на вызов абонента, при вызове абонента, при использовании в автомобиле, в местах затенения и на большой удаленности от БС и т.п.), предпочтение использованию проводных средств связи там, где это возможно.

 По возможности разумное ограничение разговоров по мобильному телефону в пользу передачи информации.

– Приобретение наиболее экологичного абонентского терминала и т.п.

5. <u>Уровень производителя (разработчика) систем и оборудования мо-</u> бильной связи

Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, разработка системных и технических решений в рамках принятых стандартов мобильной связи, разработка и производство AC с улучшенными экологическими характеристиками (минимальное значение SAR, экранирование ЭМИ AC в сторону головы абонента, разработка технических решений, обеспечивающих удаление антенны AC от головы абонента в условиях повышенной мощности ЭМИ AC (при связи из автомобиля, из производственных, офисных, жилых и иных помещений, из зон затенения плотной городской застройкой, в сельской местности на значительном удалении от БС и т.п.). – Разработка системных решений, обеспечивающих устойчивую связь в условиях существенного отличия ДНА АС от круговой и возможных быстрых и глубоких флуктуаций уровня сигнала АС за счет изменений ориентации ЭМИ АС (в частности, обеспечение приема сигнала АС несколькими соседними БС с последующим суммированием системой сигнала АС, принимаемого ими с нескольких направлений).

Введение в АС функций предупреждения абонента (либо обоих абонентов на линии связи) об экологической опасности соединения, если условия связи неблагоприятны с экологической точки зрения.

- Введение в программное обеспечение AC функции учета опасности использования AC с классификацией по степени опасности и времени и т.п.

В заключение отметим, что группирование перечисленных выше вопросов и направлений по выделенным иерархическим уровням достаточно условно. Ряд вопросов, в частности, касающихся проведения научных исследований и разработок, отнесенных автором преимущественно к высшему иерархическому уровню, безусловно, должны быть объектом внимания и на национальном (государственном) уровне, и на уровне ведущих производителей оборудования и операторов мобильной связи.

Приведенные выше соображения являются результатом первичного обобщения ряда частных попыток применения системного подхода к проблеме анализа и обеспечения экологической безопасности сотовой радиосвязи. Автор уверен в эффективности такого подхода и будет рад усилиям коллег, направленным на развитие, углубление и расширение приведенного материала. Приведенные в данной работе результаты, по мнению автора, могут быть полезны при принятии решений в процессе разработки, проектирования, планирования, настройки и эксплуатации систем мобильной радиосвязи, при обосновании подходов к нормированию характеристик сотовых радиосетей по экологическим показаниям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами данной работы, представляющими интерес с точки зрения экологии сотовой связи, по мнению автора, являются следующие:

1. Изложенная и аргументированная приведенными в работе результатами научных исследований и инженерными расчетами применительно к различным типовым ситуациям точка зрения о том, что реальная безопасность сотовой связи может быть достигнута лишь на системном уровне и что именно на этом уровне могут быть сформулированы и реализованы обоснованные технические, организационные, экономические, правовые, этические и иные требования ко всем элементам сети, обеспечивающие реальную экологическую безопасность сотовой связи в тех или иных условиях.

2. Обзорные материалы, содержащие необходимые сведения о значениях ПДУ электромагнитных полей, регламентируемых действующими нормативными актами для различных условий, а также информацию о значениях мощности ЭМИ радиопередающего оборудования сотовой связи и других средств радиотелекоммуникаций.

Анализ этих материалов позволил сформулировать группу энергетических критериев экологической безопасности ЭМП на рабочих частотах современных и перспективных радиотелекоммуникационных систем, а также придти к заключению, что результаты системного анализа экологии сотовой связи могут интерпретироваться значительно шире в связи с тем, что технические параметры базового и абонентского оборудования других радиотелекоммуникационных систем (беспроводного доступа, транкинговой радиосвязи, радиоинтерфейсов управления, радиочастотной идентификации и т.п.), функционирующих в зонах обслуживания сотовой связи, имеют характеристики ЭМИ, близкие к характеристикам ЭМИ оборудования сотовой связи.

3. Теоретические результаты в области ансамблевого вероятностностатистического моделирования ЭМО в пространственно распределенных группировках РЭС, включающие

– определение базовых моделей, используемых при теоретическом анализе вопросов системной экологии сотовой связи: модели условий PPB, модели случайного пространственного распределения источников ЭМП, пороговой модели рецептора ЭМП, а также пространственной области потенциального электромагнитного взаимодействия между рецептором ЭМП и всей совокупностью принимаемых в расчет источников ЭМИ;

– методику определения вида и параметров закона распределения ЭМП от пространственно рассредоточенных РЭС-источников ЭМИ в точке наблюдения по энергетическому параметру (ППМ) при заданных зависимости пространственной плотности источников от координат по отношению к точке наблюдения, типе условий РРВ и типе пространственного размещения РЭС-источников ЭМИ; а также вероятностно-статистические модели, обеспечивающие возможности прогноза вида распределения ансамбля ЭМП АС и БС в точке наблюдения по энергетическому параметру;

– методику и математические модели, обеспечивающие возможность прогноза динамического диапазона ансамбля ЭМП в произвольно выбранной точке наблюдения в ситуациях, когда пространственное размещение источников излучений в окрестности рассматриваемой точки пространства случайно и близко к равномерному, и вероятностно статистические характеристики ЭМО по энергетическому параметру определяются аналитически с использованием вероятностно-статистической модели случайного пространственного размещения РЭС-источников ЭМП в окрестности точки

305

наблюдения и детерминистической модели условий РРВ в этой области пространства;

– методику и математические модели, обеспечивающие возможность прогноза динамического диапазона ЭМП в ситуациях, когда известно распределение ЭМП по энергетическому параметру в их ансамбле, присутствующем в точке наблюдения, и распределение вероятностей динамического диапазона ЭМП может быть определено как распределение размаха выборки значений энергетического параметра ЭМП в ансамбле ЭМП в точке наблюдения;

– методику и математические модели, обеспечивающие возможность прогноза динамического диапазона ансамбля ЭМП в произвольно выбранной точке наблюдения, в ситуациях, когда возможно устранение каким-либо способом (организационно, технически и т.д.) присутствия в точке наблюдения одного либо нескольких наиболее интенсивных ЭМП от ближайших к точке наблюдения РЭС, а также в ситуациях, когда ЭМП, присутствующие в точке наблюдения, являются бинарными случайными процессами с заданными вероятностями нахождения в активном и пассивном состояниях; – аргументированный вывод о том, что при малых вероятностях превышения динамического диапазона рецептора ЭМП динамическим диапазоном ЭМП ближайших РЭС (либо в области больших уровней ЭМП РЭС в точке наблюдения) суммарная интенсивность ЭМП РЭС определяется уровнем преобладающего ЭМП;

– примеры практического применения изложенных подходов и полученных математических моделей, а также иллюстративный материал, облегчающий и углубляющий восприятие предлагаемых методик и моделей: анализ динамического диапазона сигналов абонентских станций мобильной связи в системах с FDMA, прогноз предельно допустимой сложности ЭМО, оценки

306

выигрыша в динамическом диапазоне ЭМП за счет подавления наиболее интенсивных из них, а также математическая интерпретация полученных вероятностно-статистических моделей.

Следует отметить, что в данной работе не конкретизируется способ подавления (устранения) определенного числа (**H**–1) наиболее мощных сигналов в точке наблюдения. Это может производиться организационными либо техническими способами, а также в значительной мере определяться правилами этики, индивидуальной и общественной гигиены использования сотовой связи. Вариант подавления одного наиболее мощного сигнала (**H** = 2), достаточно подробно проанализированный в разделах 4 и 6, по мнению [34], может интерпретироваться как рассмотренный выше частный случай совмещения точки наблюдения с точкой размещения одного из источников ЭМП (одной из AC), хотя с математической точки зрения подобная интерпретация не отличается строгостью, и даже находится в определенном противоречии с типовой методикой генерации пуассоновской системы случайных точек, располагаемых равномерно с постоянной средней пространственной плотностью в заданной кубической области **m**-мерного евклидова пространства.

4. Результаты анализа влияния ряда системотехнических особенностей сети сотовой радиосвязи на ее экологическую безопасность, включая результаты анализа статистических характеристик мощности ЭМИ АС сотовой связи с учетом наличия в сети ее принудительной регулировки, результаты оценивания влияния пространственно-частотной структуры (кластера) сотовой радиосети с FDMA/TDMA на минимально используемый уровень полезного сигнала и мощность ЭМИ АС, результаты рассмотрения влияния случайности топологии сети на ее экологичность.

5. Результаты анализа экологической опасности электромагнитного фона, образуемого средствами информационного обслуживания общества, в

условиях массового распространения средств мобильной радиосвязи, в частности:

– математические модели, позволяющие определить вероятности превышения принятых значений ПДУ ЭМП совокупной интенсивностью ЭМП в точке наблюдения, представляющей собой сумму интенсивности внешнего постоянного электромагнитного фона от РЭС других служб, интенсивности преобладающего ЭМП АС и суммарной интенсивности электромагнитного фона от остальных АС из области потенциального электромагнитного взаимодействия;

 иллюстративный материал и табличные данные, а также примеры расчетов совокупной интенсивности ЭМП АС и БС сотовой связи в различных типовых ситуациях.

В работе приведена аргументация вывода о том, что с точки зрения экологии сотовой связи в условиях функционирования других радиослужб первоочередной интерес представляют следующие компоненты совокупного ЭМП в зоне обслуживания сотовой радиосети:

a) квазистационарный квазидетерминированный электромагнитный «фон», образуемый ЭМИ мощных радиопередатчиков различных служб, в первую очередь радиотелевизионных передающих центров и РЭС связи;

б) случайный динамично меняющийся электромагнитный процесс изменения во времени ЭМИ одной из ближайших АС, формирующей преобладающее ЭМП в точке наблюдения;

в) случайный электромагнитный процесс, обусловленный массовым функционированием случайного числа прочих АС из окрестности точки наблюдения.

Различный характер этих компонент определяет необходимость различных подходов к нормированию их характеристик, предельно допустимых по экологическим соображениям. Представленные в работе математические модели и примеры расчетов обеспечивают возможность практических оценок вероятностей превышения интенсивностью совокупного ЭМП в произвольно выбранной точке наблюдения в различных условиях при различной интенсивности квазистационарного электромагнитного фона и различной пространственной плотности АС-источников ЭМП.

6. Результаты исследования вопроса о введении ограничений на объем радиочастотного ресурса, выделяемого сотовой радиосети, в интересах обеспечения ее экологической безопасности. Показано, что наличие таких ограничений стимулирует развитие операторами сотовой связи инфраструктуры сети, дробление сайтов в местах высокой плотности абонентов, естественным образом способствуя улучшению экологических характеристик сети в процессе ее развития.

В целом приведенный материал, в завершающей части содержащий первичную систематизацию и обобщение принципов системной экологии сотовой радиосвязи, по мнению автора, позволяет существенно расширить и конкретизировать представления о возможностях системного подхода в решении проблемы экологии сотовой радиосвязи, а также предложить достаточно эффективный арсенал практических мер по обеспечению экологической безопасности современных и перспективных радиотелекоммуникационных средств и технологий. В частности, приведенные выше результаты могут быть положены в основу практических методик (методических указаний) по расчету санитарно-защитных зон передающих радиотехнических объектов с учетом массового применения сотовой связи и других средств радиотелекоммуникаций в местах с высокой плотностью населения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ниже приведено математическое доказательство того, что суммарная интенсивность ансамбля N ЭМП AC, для которого справедливы модели (3.37) и (4.9)/(4.10), определяется уровнем сигнала, преобладающего в этом ансамбле по интенсивности. Данное доказательство приведено в [46, 47] и основано на использовании результатов [49].

В [49] доказана следующая лемма.

Пусть **X** – случайная положительная переменная с регулярно изменяющимся правым «хвостом» плотности распределения вероятности (п.р.в.) w(X), т.е. существует положительное число b > 0, такое, что для a > 1

$$\lim_{x\to\infty}\frac{\Pr\{X>ax\}}{\Pr\{X>x\}}=a^{-b}, \quad \Pr\{X>ax\}=\int_{ax}^{\infty}w(X)dX,$$

И пусть этот «хвост» плотности распределения вероятности w(X) доминирует (преобладает) над правым «хвостом» п.р.в. w(Y) другой положительной случайной переменной Y, т.е.

$$\lim_{\mathbf{x}\to\infty} \frac{\Pr\{\mathbf{Y} > \mathbf{x}\}}{\Pr\{\mathbf{X} > \mathbf{x}\}} = \mathbf{0}.$$
 (A1)

Тогда

$$\lim_{\mathbf{X}\to\infty} \frac{\Pr\{\mathbf{X}+\mathbf{Y}>\mathbf{x}\}}{\Pr\{\mathbf{X}>\mathbf{x}\}} = 1.$$
 (A2)

Используем этот результат применительно к анализу ситуаций, рассмотренных выше в разд. 3 – 6, в которых в точке наблюдения присутствует ансамбль N ЭМП со случайными уровнями $|\Pi_{aj}|$, j=1, ..., N, превышающими порог $|\Pi_{min}|$ и распределенными в ансамбле по гиперболическому закону (3.37). Распределение вероятности (4.9)/(4.10) описывает вероятностностатистические характеристики **H**-го по уровню сигнала в точке наблюдения: $1 \le H \le N$. Представим ансамбль случайных значений $|\Pi_{a1}|$, $|\Pi_{a2}|$, , $|\Pi_{aN}|$ уровней сигналов в ансамбле в упорядоченном виде по мере убывания. Из приведенной выше леммы и вида распределения вероятности (4.9)/(4.10) непосредственно следует, что правый «хвост» п.р.в. $|\Pi_{a1}|$ доминирует над правым «хвостом» п.р.в. $|\Pi_{a2}|$, а также над правым «хвостом» п.р.в. величины (N-1) $|\Pi_{a2}|$ для каждого конечного числа источников (сигналов) N ≥ 2 (т.е. (A1),(A2) охватывают случай X = $|\Pi_{a1}|$, и Y = $|\Pi_{a2}|$, или Y = (N-1) $|\Pi_{a2}|$), т.е.

$$\lim_{x \to \infty} \frac{\Pr\{|\Pi_{a1}| + |\Pi_{a2}| > x\}}{\Pr\{|\Pi_{a1}| > x\}} = \lim_{x \to \infty} \frac{\Pr\{|\Pi_{a1}| + (N-1)|\Pi_{a2}| > x\}}{\Pr\{|\Pi_{a1}| > x\}} = 1.$$

Учитывая, что

$$\Pr\{|\Pi_{a1}| + |\Pi_{a2}| > x\} \le \Pr\{\sum_{i=1}^{N} |\Pi_{ai}| > x\} \le \Pr\{|\Pi_{ai}| + (N-1)|\Pi_{a2}| > x\},\$$

и принимая во внимание, что случайное число сигналов N в ансамбле конечно с вероятностью 1 в случае, когда среднее число сигналов конечно, можно получить следующее:

$$\lim_{x \to \infty} \frac{\Pr\left\{\sum_{i=1}^{N} |\Pi_{ai}| > x\right\}}{\Pr\left\{|\Pi_{a1}| > x\right\}} = 1.$$
(A3)

Полученное соотношение справедливо для случая, когда «хвост» п.р.в. представляет собой медленно изменяющуюся функцию (класс функций «functions of regular variation»; к этому классу, в частности, относятся полиномиальные и гиперболические функции).

Соотношение (A3) показывает, что в области больших интенсивностей ЭМП совокупная интенсивность ЭМП в наблюдаемом ансамбле определяется интенсивностью $|\Pi_{a1}|$ преобладающего ЭМП. Справедливость этого вывода сохраняется и в отношении ансамбля ЭМП с п.р.в. (3.37), в котором устранено несколько наиболее интенсивных слагаемых.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Тучков Л.Т. Естественные шумовые излучения в радиоканалах.- М.: Сов. радио, 1973.
- 2. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Т.1: Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи.- Сост. Д.Р.Ж.Уайт, под ред. А.И.Сапгира.- М.: Сов. радио, 1977.-352с.
- 3. Recommendation ITU-R P.372-9. Radio noise. MCЭ, 2007.
- 4. Попов В. Электромагнитное излучение мобильных телефонов и человеческий организм.- Рига, Рижский технический университет, 1999.
- 5. Кирюшин Г.В., Маслов О.Н., Шаталов В.Г. Проектирование, развитие и электромагнитная безопасность сетей сотовой связи стандарта GSM.-М.: Радио и связь, 2000.-148с.
- 6. Электромагнитные поля и здоровье человека. Под ред. Ю.Г.Григорьева.- М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 2002.- 177с.
- 7. Борботько Т.В., Колбун Н.В., Лыньков Л.М. Электромагнитные излучения средств телекоммуникаций. Методы защиты, безопасность организма человека.- Минск, ОДО «Тонпик», 2004.- 80с.
- 8. Маслов О.Н. Экологический риск и электромагнитная безопасность.-М.: ИРИАС, 2004.- 330с.
- 9. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов (Российская Федерация).
- 10. СанПиН 2.2.4/2.1.8.9-36-2002. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ) (Республика Беларусь).
- 11. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03 (Российская Федерация).
- ETSI EN 300 910, V8.5.1 (2001-11). Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
- 13. Санитарные правила и нормы защиты населения г.Москвы от электромагнитных полей передающих радиотехнических объектов.- М.: 1996.
- 14. Сомов А.Ю., Борисова Л.Н., Голышко А.В. Частотно-территориальное планирование.- «Вестник связи», №5, 2004, с.46-52.
- 15. Consideration for Human Exposure to EMFs from Mobile Telecommunication Equipment (MTE) in Frequency Range 30MHz – 6GHz.- CENELEC, 1997.
- 16. W.Van Loock. Human Safety and Health in Electromagnetic Fields. Pro-

ceedings of the VII-th International symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint-Petersburg, June 26-29, 2007, pp.315-318.

- 17. W.Van Loock. Basic Effects in Humans Exposed to Electromagnetic Energy, Occurrence of Cancer and Protection. - Proceedings of the VIII-th International symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint-Petersburg, June 16-19, 2009, pp.245-248.
- V.Mordachev. Ecological characteristics of cellular network: relationship with its radio frequency recourse and intrasystem EMC. - 17th International Wroclaw Symposium And Exhibition on EMC, Poland, Wroclaw, June 29-July 1, 2004, pp.55-60.
- 19. V.Mordachev, V.Kozel. Limiting the RF Resource Allocated to a Cellular Network as a Means to Ensure its Ecological Safety. International Symposium on Electromagnetic Compatibility "EMC Europe 2004", Netherlands, Eindhoven, Sept. 6-10, 2004, pp.92-97.
- Мордачев В.И. Системные аспекты обеспечения экологической безопасности сотовой радиосети.- Сборник научных трудов VI международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург, 2005, с.287-291
- 21. Козел В.М., Мордачев В.И. Некоторые особенности экологической безопасности сетей сухопутной подвижной службы, использующих технологию CDMA.- Труды 15-й Международной конференции «СВЧтехника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 12-16 сентября 2005, с. 310-311.
- 22. Мордачев В.И., Козел В.М. Влияние системотехнических особенностей сети сотовой радиосвязи на ее экологическую безопасность.- Минск, Вестник БНТУ, №1, 2007.
- 23. Мордачев В.И. Оценка экологической опасности электромагнитного фона, образуемого средствами информационного обслуживания населения, в условиях массового распространения средств мобильной радиосвязи.- Минск: Доклады БГУИР, №3, 2006, с.54-66.
- 24. Мордачев В.И., Яцынович М.Н. Влияние случайности топологии сотовой радиосети на ее экологическую безопасность.- Доклады БГУИР, №2, 2006, с.75-79..
- 25. Мордачев В.И., Козел В.М. Ограничение радиочастотного ресурса, выделяемого сети сотовой связи, как средство обеспечения ее экологической безопасности.- «Мобильные системы», №5, 2006, с.56-59.
- 26. Мордачев В.И. Влияние особенностей структуры и топологии сети сотовой связи на ее экологическую безопасность.- Труды XIX конференции «Мобильный бизнес. Оптимизация, конвергенция и эффективность сетей и услуг», Май 2006, Тунис, с.28-33.

- Мордачев В.И., Козел В.М. Ограничение радиочастотного ресурса, выделяемого сети сотовой связи, как средство обеспечения ее экологической безопасности.- Труды XIX конференции «Мобильный бизнес. Оптимизация, конвергенция и эффективность сетей и услуг», Май 2006, Тунис, с.34-43.
- 28. Мордачев В.И. Оценка экологической опасности электромагнитного фона искусственного происхождения с учетом массового распространения средств мобильной радиосвязи.- Труды XIX конференции «Мобильный бизнес. Оптимизация, конвергенция и эффективность сетей и услуг», Май 2006, Тунис, с.44-56.
- 29. Мордачев В.И. Оценка экологической опасности электромагнитного фона, создаваемого средствами мобильной радиосвязи.- «Электросвязь», № 9, 2007, с.37-41.
- 30. V.I.Mordachev. Principles of system ecology for cellular radio. Proceedings of the VII-th International symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint-Petersburg, June 26-29, 2007, pp.323-326.
- 31. V.I.Mordachev. Environmental Safety of Cellular Networks Taking Into Consideration Electromagnetic Background Produced by Systems of Public Information Service.- Proceedings of the VII-th International symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint-Petersburg, June 26-29, 2007, pp.11-15.
- 32. V.I.Mordachev, V.M.Kozel. Comparative analysis of environmental safety of cellular radio networks with FDMA/TDMA and CDMA.- Proceedings of the VII-th International symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint-Petersburg, June 26-29, 2007, pp.327-330.
- 33. V.I.Mordachev. Estimation of the level of the electromagnetic background formed by mass use of cellular communications.– Proceedings of the VIII-th International symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology, Saint-Petersburg, June 16-19, 2009, pp.249-252.
- 34. Апорович А.Ф. Статистическая теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.- Минск: Наука и техника, 1984.- 215с.
- 35. Апорович А.Ф. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств.- Минск: Бестпринт, 2003.- 308с.
- 36. Мордачев В.И. Вероятностная оценка минимального расстояния до источников непреднамеренных радиопомех.- Междуведомственный тематический научный сборник «Вопросы обработки сигналов в системах пассивной радиолокации», Вып. 1(VI), Таганрог: 1982, с.37-41.
- 37. Мордачев В.И. Оценка уровня нежелательных излучений радиосредств в полосе радиоприема.- Междуведомственный тематический научный сборник «Вопросы обработки сигналов в системах пассивной радиоло-

кации», Вып. 2(VII), Таганрог: 1983, с.74-77.

- 38. Мордачев В.И. Статистические характеристики электромагнитной обстановки в рассредоточенных группировках РЭС.- Отчет инв.№ 02880034534 о НИР № Госрегистрации 01870010932.- Минск: 1987.-182с.
- Мордачев В.И. Статистические характеристики динамического диапазона непреднамеренных помех при рассредоточенном пространственном группировании их источников. – Труды IX Международного Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости, Июнь 1988, с.571-576.
- 40. Мордачев В.И. Типовые модели электромагнитной обстановки при рассредоточенном пространственном размещении источников. – Труды Х Международного Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости, Июнь 1990, с.409-414.
- 41. V.Mordachev. Radiosignals Dynamic Range in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks. 15th Intern. Wroclaw Symp. And Exhib. on EMC, Poland, Wroclaw, June 27-30, 2000, pp.331-335.
- 42. V.Mordachev. Mathematical Models for Radiosignals Dynamic Range Prediction in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks. The IEEE Semi Annual VTC Fall 2000, Boston, Sept. 24-28, 2000, 8 p.
- 43. Мордачев В.И., Яцынович М.Н. Влияние случайности размещения базовых станций сотовых систем связи на их внутрисистемную ЭМС. Материалы VIII международной научно-технической конференции «Современные средства связи», 29 сентября – 3 октября 2003г., Нарочь, Беларусь, с.9-11.
- 44. V.I.Mordachev, S.L.Loyka. A Statistical Model of Interference in Wireless Networks, Network-Scale Fading and Outage Probability-Network Density Tradeoff.- Минск: «Доклады БГУИР», №3(41), 2009, с. 26-40.
- V.Mordachev, S.Loyka. On Node Density Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks.- IEEE Journal on Selected Areas In Communications, Vol. 27, No. 7, September 2009, 12 p.
- V.Mordachev, S.Loyka. On Node Density Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. - Trans. of the 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Canada, Toronto, July 6-11, 2008, pp.191-195.
- 47. V.I. Mordachev, S. Loyka, The Impact of Fading and Interference Cancelation On Node Density - Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks, Canadian Workshop on Information Theory (CWIT-09), May 2009.
- 48. Мордачев В.И. Вероятностные характеристики электромагнитной обстановки, образуемой электромагнитными излучениями наземных радиоэлектронных средств, над поверхностью Земли. - Минск: «Доклады БГУИР», №3(33), 2008, с. 51-58.

- 49. G. Samorodnitsky, M.S. Taqqu, Stable Non-Gaussian Random Processes, Chapman&Hall/CRC, Boca Raton, 1994.
- 50. Санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот, №848-70.- СССР, 1970.
- 51. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на Земле и в космосе.- М.: Атомиздат, 1976.- 255с.
- 52. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов С.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 176с.
- 53. Регламент радиосвязи.- Международный Союз Электросвязи (ITU-R), Женева, 2009.
- 54. J.D.Gibson. The Mobile Communications Handbook.- CRC Press, USA, 1996.
- 55. Sami Tabbane. Handbook of Mobile Radio Networks.- Artech House, Boston-London, 2000.- 619p.
- 56. R.Prasad, W.Mohr, W.Konhauser. Third Generation Mobile Communication Systems.- Artech House, Boston-London, 2000.- 386p.
- 57. Juha Korhonen. Introduction to 3G Mobile Communications.- Artech House, Boston-London, 2001.- 559p.
- 58. Тихвинский В.О. Сети подвижной связи третьего поколения: экономические и технические аспекты развития в России.- М,: Радио и связь, 2001.- 312с.
- 59. Recommendation ITU-R M.1457-6. Detailed specifications of the radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000). – 2006.
- 60. ETSI TS 125 101, V8.5.1 (2009-01). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD) (3GPP TS 25.101 version 8.5.1 Release 8). Technical specification.
- ETSI TS 125 102, V8.2.0 (2009-01). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); User Equipment (UE) radio transmission and reception (TDD) (3GPP TS 25.105 version 8.2.0 Release 8). Technical specification.
- ETSI TS 125 104, V8.5.0 (2009-01). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base station (BS) radio transmission and reception (FDD) (3GPP TS 25.104 version 8.5.0 Release 8). Technical specification.
- ETSI TS 125 105, V8.2.0 (2009-01). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base station (BS) radio transmission and reception (TDD) (3GPP TS 25.102 version 8.2.0 Release 8). Technical specification.
- 64. Specification of the Bluetooth System, Version 1.1.- February 22, 2001.
- 65. IEEE Std 802.16-2001. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.- April 8, 2002.

- 66. IEEE Std 802.11b-1999. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.
- 67. IEEE Std 802.11a-1999. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band.
- 68. RFID Handbook (www.rfid-handbook.com).
- 69. D.Middleton, "A statistical theory of reverberation and similar first-order scattered fields Part 1: Waveforms and the general process", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.13, July 1967, pp.372-392.
- 70. D.Middleton, "Statistical-physical models of man-made radio noise, Part 1: Foundations", *IEEE Trans. Electrom. Compat.*, vol.14, May, 1972, pp.38-56.
- 71. K.Siwiak, Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications. Second edition. Artech House, Boston, 1998, 418p.
- 72. N.Blaunstein, J.B.Andersen. Multipath Phenomena in Cellular Networks. Artech House, Boston, 2002, 296 p.
- 73. Prediction Methods for the Terrestrial Land Mobile Service in the VHF and UHF Bands, Recommendation ITU-R P.529-2, 1995.
- 74. W.C.Y.Lee, Mobile Communications Design Fundamentals. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1993, pp.52-71.
- 75. B.M.Sosin, "HF Communication Receiver Performance Requirements and Realization", "The Radio and Electronic Engineer", 1971, vol.41, No 7, pp.321-329.
- 76. W.Honcharenko, H.L.Bertoni, J.L.Dailing, J.Quan and H.D.Yee, "Mechanisms Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Buildings", IEEE Trans. on Veh. Technol., vol.41, Nov. 1992, pp.496-504.
- 77. M.J.Feuerstein, K.L.Blackard, T.S.Rappaport, S.Y.Seidel, H.H.Xia. "Path Loss, Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenna Height for Microcellular System Design", IEEE Trans. on Veh. Technol., vol.43, Aug. 1994, pp.487-498.
- W.G.Duff, Electromagnetic Compatibility in Telecommunications, A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility, vol.7, Gainesville, Virginia, Interference Control Technologies, Inc., 1988, pp. 4.1-4.70.
- 79. D.D.Weiner, "Nonlinear Interference Effects in EMC", in Proc. of the Tutorial Lectures at the 10-th Zurich Symp. On EMC, March 1993, pp.114-127.
- Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Под ред. М.А.Быховского.- М.: Эко-Трендз, 2006, 376с.
- 81. Богданович Б.М. Радиоприемные устройства с большим динамическим диапазоном.- М.: Радио и связь, 1984. 176с.

- 82. G.A.Korn, T.M.Korn. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems and Formulas for Reference and Review, Second Edition, McGraw-Hill Company, 1988, Section 19.2-6.
- 83. Тихвинский В.О., Терентьев С.В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS.- М.: Эко-Трендз, 2007. 400с.
- 84. N.A.J.Hastings and J.B.Peacock. Statistical Distributions, London.- Butterworhts, 1975
- 85. G.J.Hahn and S.S.Shapiro. Statistical Models in Engineering. New York, Wiley, 1967.
- 86. Бостанджиян В.А. Определение плотности вероятности. Необходимый объем выборки.- М.: Наука, 1971.
- 87. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника.- М.: Радио и связь, 1982.-624с.
- 88. Recommendation ITU-R P.1057-2. Probability distributions relevant to radiowave propagation modeling.- 2001.
- 89. K.Pearson. On the curves which are most suitable for describing the frequency of random samples of a population.- "Biometrika", vol.5, pp.172-175.
- 90. N.L.Johnson. Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation.- "Biometrika", vol.36, p.149.
- 91. A.Mehrotra. Cellular Radio: Analog and Digital Systems.- Artech House Publishers, Boston-London, 1994, 460p.
- 92. Скрынников В.Г., Скрынников О.В. Оценка зоны радиопокрытия сети UMTS на ранней стадии ее развития.- «Мобильные системы», №2, 2006, с.16-22.
- 93. Голышко А.В., Сомов А.Ю. Проблемы эколого-технического развития сетей сотовой связи.- «Вестник связи», №10, 2003, с.60-69.
- 94. T.X.Brown. Analysis and Coloring of a Shotgun Cellular System.- Proc. of 1998 IEEE Radio and Wireless Conference, Colorado Springs, USA, August 9-12, 1998, pp.51-54.
- 95. Мордачев В.И., Козел В.М., Яцынович М.Н. Влияние случайности пространственного размещения БС на характеристики внутрисистемной ЭМС в сетях 2G-3G.- Труды конференции «Мобильные сети связи 2G/2.5G/3G. Технологии. Эффективность. Право. Экономика. Услуги. Качество», Мадейра, Португалия, 20-22 ноября 2002г., 3с.
- 96. V.I.Mordachev, M.N. Yatsinovich. Impact of the base stations random space location in the cellular communication system on its coverage parameters. -17th International Wroclaw Symposium And Exhibition on EMC, Poland, Wroclaw, June 29-July 1, 2004, pp.234-237.
- 97. Recommendation ITU-R M.1390 Methodology For The Calculation Of IMT-2000 Terrestrial Spectrum Requirements.
- 98. Report UMTS Forum N6 UMTS/IMT-2000 Spectrum.

- 99. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн.- М.: Сов.радио, 1972.- 464с.
- 100.International Telecommunication Union. ITU-R Recommendations. Edition 2008-2 Geneva, 2008.
- 101.Шнепс-Шнеппе М.А. Роль телекоммуникаций в концепции «умного дома» (SmartHouse).- «Электросвязь», №3, 2009, с.47-50.
- 102.Recommendation ITU-R 370-7. VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1000 MHz.
- 103.Recommendation ITU-R 1546-1. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range from 30 MHz to 3000 MHz.
- 104.Резолюция 76 (ВКР-2000). Защита сетей ГСО ФСС и ГСО РСС от максимальной совокупной эквивалентной плотности потока мощности, создаваемой несколькими системами НГСО ФСС в полосах частот, для которых приняты пределы совокупной эквивалентной плотности потока мощности.- Сборник рабочих материалов по международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра (Третье издание), том 3.- М.: 204.- С. Res.76-1 – Res.76-7.
- 105.Персон Т., Торневик К. Мобильная связь и здоровье человека.- "Мобильные телекоммуникации", №1, 2004, с.25-30.
- 106.Recommendation ITU-R 1146. The prediction of field strength for land mobile and terrestrial broadcasting services in the frequency range from 1 to 3 GHz
- 107.Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Володина Е.Е., Перфилов Д.В. Методический подход к оценке влияния качества услуг на доходы операторов мобильной связи.- «Мобильные системы», №16 2006, с.22-26.
- 108.R.A.Monzingo, T.W.Miller. Introduction to Adaptive Arrays.- John Wiley & Sons, New York, 1980.
- 109.S.L. Loyka, V.I. Mordachev, On Applications of Self-Phased Array Antennas to Mobile Communications, 1998 IEEE Radio and Wireless Conf. (RAWCON'98), Colorado Springs, Colorado, Aug.9-12, 1998, pp. 233-236.
- 110.H.Jafarkhani. Time-Space Coding: Theory and practice.- Cambridge University Press, 2005.- 320 c.
- 111.Крейнделин В.Б., Варукина Л.А. Совместная демодуляция и декодирование сигналов в системе V-BLAST.- «Электросвязь», №3, 2009, с.23-25.

Научное издание

Мордачев Владимир Иванович

СИСТЕМНАЯ ЭКОЛОГИЯ СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Ответственый за выпуск Т.Е. Янчук

Подписано в печать 06.08.2009. Формат 60х84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать осетная. Усл. Печ. л. 18,6. Уч.-изд. л. 15,5. Тираж 500 экз. Заказ 775.

Республиканское унитраное предприятие «Издательский центр Белорусского госуджарственного университета». ЛИ № 02330/0494361 от 16.03.2009. Ул. Красноармейская, 6, 220030, г. Минск.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика в республиканском унитарном предприятии «Издательский центр Белорусского государственного университета». ЛП № 02330/0494178 от 03.04.2009. Ул. Красноармейская, 6, 220030, г. Минск



Мордачев Владимир Иванович – заведующий научно-исследовательской лабораторией электромагнитной совместимости локальных группировок радиоэлектронных средств (НИЛ ЭМС РЭС) Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР).

Автор более 200 научных публикаций и изобретений. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Основные направления научных работ и прикладных разработок: статистическая теория ЭМС, дискретное нелинейное моделирование поведения радиоприемных устройств в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО), методы и средства контроля характеристик ЭМС РЭС, полунатурное моделирование поведения радиосистем в сложной ЭМО, ЭМС в группировках РЭС, системное проектирование и частотно-территориальное планирование радиосетей, управление использованием радиочастотного спектра, системная экология и системная электромагнитная безопасность РЭС и сложных радиообъектов.

БГУИР является головной организацией в Республике Беларусь по исследованию проблем защиты от непреднамеренных помех и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.06.02 № 775).

Тел./факс: +375-17-2938994, 2938438, e-mail: emc@bsuir.by БГУИР: ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь.

