

# УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ



# Радиопомехи

Горячая линия-Телеком



Перфилов О. Ю.

---

**Перфилов О. Ю.**

# **Радиопомехи**



*Рекомендовано УМО по образованию в области  
Инфокоммуникационных технологий и систем связи в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 –  
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
квалификации (степени) «магистр»*



**Москва  
Горячая линия – Телеком  
2017**

---

УДК 621.396.67

ББК 32.95

П27

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник 16 ЦНИИ Минобороны России *Б. Г. Тележный*; канд. воен. наук, доцент кафедры «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационной безопасности» МАИ (Национального исследовательского университета) *В. В. Василевский*

**Перфилов О. Ю.**

**П27** Радиопомехи. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 110 с.: ил.

**ISBN 978-5-9912-0491-0.**

Систематизированы обширные сведения о радиопомехах различного характера, возникающих в радиосистемах. Рассмотрены различные типы радиопомех – внешние и внутренние, преднамеренные и непреднамеренные (естественные). Приведены оригинальные результаты исследований автора характеристик радиопомех, возникающих в сосредоточенных комплексах радиоэлектронных средств различных типов. При рассмотрении преднамеренных помех описаны силовые радиопомехи, обладающие высоким энергопотенциалом, и интеллектуальные радиопомехи с низким энергопотенциалом. Изложены вопросы, связанные с воздействием на приемные устройства промышленных помех. Рассмотрены механизмы возникновения радиопомех и особенности их распространения. Приведены методики расчета уровней помех при различных механизмах их распространения. Данные представлены с учетом материалов, содержащихся в рекомендации МСЭ-Р Р.452.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации (степени) «магистр», будет полезно аспирантам, преподавателям и специалистам в области обеспечения электромагнитной совместимости и радиоэлектронной защиты радиосистем.

**ББК 31.19**

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

**Перфилов Олег Юрьевич**

**РАДИОПОМЕХИ**

Учебное пособие для вузов

Редактор П. Л. Поляков

Компьютерная верстка П. Л. Полякова

Обложка художника В. В. Казюлина

Подписано в печать 18.11.2015. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 6,88. Тираж 500 экз. (2-й завод 100 экз.)  
ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

ISBN 978-5-9912-0491-0

© О. Ю. Перфилов, 2015, 2017

© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2017

---

## Предисловие

В последние годы отмечается существенное усложнение общей электромагнитной обстановки, связанной с появлением излучающих радиосредств новых радиотехнологий практически во всей используемой полосе частот вплоть до 100 ГГц. Кроме того, высокое комплексирование радиоэлектронных средств (РЭС) приводит к росту уровней радиопомех, размещаемых в сосредоточенных комплексах.

В существующей научно-технической литературе приведены лишь фрагментарные сведения о радиопомехах. В настоящей работе автор постарался систематизировать данные о радиопомехах, собранные из разнородных источников. В книге охвачен практически весь спектр вопросов, связанных с проблемами воздействия радиопомех на средства и системы связи, рассмотрены отдельные вопросы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС.

В первой главе рассмотрены внешние радиопомехи: непреднамеренные и преднамеренные. При рассмотрении непреднамеренных помех проанализированы как природные, так и промышленные радиопомехи. Рассмотрены проблемы внутриобъектовой ЭМС. Отдельно рассмотрены преднамеренные (организованные) радиопомехи — как силовые, так и интеллектуальные.

Анализу внутренних радиопомех посвящена вторая глава, в которой рассмотрены природа их возникновения и основные параметры.

В третьей главе приведены математические модели радиопомех различного типа, а именно импульсных (квазиимпульсных), узкополосных, флуктуационных (шумовых) и пассивных.

В четвертой главе рассматриваются важные вопросы распространения мешающих сигналов. Описаны основные механизмы

---

распространения помех. Приводятся включенные в Рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ) методы прогноза уровней мешающих сигналов: в условиях прямой видимости, дифракции, путем тропосферного рассеяния, за счет волновода и отражений от слоев, за счет экранирования мешающих сигналов локальными неоднородностями, в условиях рассеяния гидрометеорами.

Пятая глава содержит описание технических средств обеспечения ЭМС при воздействии различных помех в системах связи. Такие методы позволяют обеспечить ЭМС РЭС в тех случаях, когда территориальный или частотный разнос взаимовлияющих РЭС оказывается невозможным.

Шестая глава посвящена анализу существующих нормативно-технических документов, определяющих нормы на радиопомехи.

Книга дает российским радиоинженерам профессиональные знания, необходимые на современном этапе развития радиотехники для решения весьма важных и сложных технических задач, связанных с обеспечением ЭМС РЭС и радиоэлектронной защитой РЭС при возникновении помех различных типов.





## Введение

**Электромагнитная помеха** — нежелательное физическое явление или воздействие электрических, магнитных или электромагнитных полей, электрических токов или напряжений внешнего или внутреннего источника, которое нарушает нормальную работу технических средств или вызывает ухудшение технических характеристик и параметров этих средств.

**Радиопомеха**— электромагнитная помеха, возникающая в радиодиапазоне частот (длин волн).

В радиотехнических средствах передачи информации помеха вызывает отклонение принятого сообщения от переданного. При радиовещательном приеме помеха проявляются как трески и шумы, которые ухудшают качество звучания. При телевизионном приеме помехи искажают изображение, при локации они вызывают пропуск реально существующей или обнаружение несуществующей цели (ложная тревога).

Классификационная схема помех по их происхождению приведена на рис. В.1.

По принадлежности к радиотехническим средствам помехи подразделяются на внешние и внутренние.

**Внешние радиопомехи** — это помехи, поступающие на вход электронных устройств вместе с полезным сигналом.

**Внутренние помехи** — это помехи, возникающие в самих электронных устройствах.

По природе возникновения помехи подразделяются на искусственные и естественные.

**Искусственные радиопомехи:**

- индустриальные или промышленные помехи — излучение промышленных установок, бытовых электроприборов и т. д.;

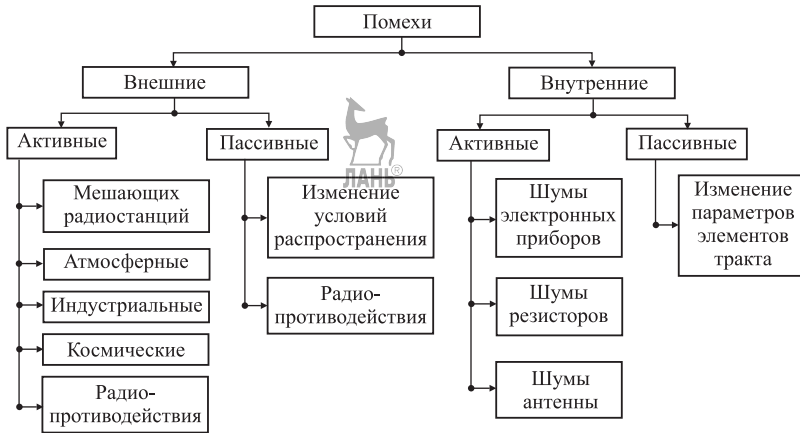


Рис. В.1. Классификационная схема радиопомех по их происхождению

- контактные помехи — помехи, возникающие при переходных процессах;
- станционные помехи — от других радиоэлектронных средств — радиостанций, радиолокаторов и т. д.

#### **Естественные радиопомехи:**

- атмосферные радиопомехи;
- космические радиопомехи;
- радиоизлучения Земли и объектов Солнечной системы.

В некоторых случаях мгновенные значения станционных помех можно определить заранее, поэтому борьба с ними существенно упрощается. Мгновенные значения случайных помех заранее неизвестны и могут быть только предсказаны с определенной вероятностью. Эти помехи, в отличие от детерминированных, полностью устранить невозможно, поскольку они определяются статистическим характером многих физических процессов. Вследствие этого их подавление встречает значительные трудности, как при разработке теории, так и при технической реализации. Значительная часть помех имеет гауссовский или производный от него закон распределения (усеченный гауссовский, логарифмический гауссовский и др.). В числе негауссовских распределений чаще других используются законы Рэлея, Райса и др.

Помеха может влиять на сигнал через электромагнитное, электростатическое, магнитостатическое, акустическое поля, а также кондуктивным путем — через провода, шасси, монтаж и др.

В общем случае на вход радиосистемы поступает смесь сигнала и помехи:

$$U_{\text{см}} = V(U_c, U_p).$$

Если оператором  $V$  определяется сумма  $V(U_c, U_p) = U_c + U_p$ , то помеху называют аддитивной, а если произведение  $V(U_c, U_p) = U_c U_p$ , то мультипликативной. Обычно первая принадлежит классу активных помех, а вторая — пассивных.

Большинство из рассмотренных помех могут быть представлены одной из четырех моделей:

- флуктуационной (шумовой) активной;
- импульсной (сосредоточенной во времени), квазиимпульсной активной;
- узкополосной (сосредоточенной по спектру) активной;
- пассивной.

Математические модели помех перечисленных типов рассматриваются в главе 3.





## ВНЕШНИЕ РАДИОПОМЕХИ



При обработке информации электронными устройствами на их выходе наряду с полезными сигналами наблюдаются помехи — изменения токов, напряжений или других выходных величин, не связанные с полезным сигналом и мешающие его регистрации или использованию. Чем слабее входной сигнал, тем существеннее влияние помех, ограничивающих чувствительность радиоэлектронных устройств. Вследствие этого изучение природы помех и разработка помехоустойчивых методов передачи и обработки информации имеют громадное практическое значение [1].

Часть помех поступает на вход электронных устройств вместе с полезным сигналом. Их называют внешними.

### 1. Непреднамеренные радиопомехи

Внешние помехи могут быть непреднамеренными (естественными) и преднамеренными (организованными). Непреднамеренные помехи создаются грозowymi разрядами и другими процессами в атмосфере и космическом пространстве, промышленным оборудованием, медицинскими установками и т.п. Непреднамеренные помехи могут быть естественными (природными) или промышленными (индустриальными). Типы естественных радиопомех и их математические модели будут рассмотрены позднее.

Все возможные типы непреднамеренных помех промышленного происхождения целесообразно разделить на две большие группы: излучаемые и кондуктивные, причем первая группа состоит из излучаемых (принимаемых) через антенну и помимо антенны.

К излучаемым помимо антенны помехам относятся излучения возбудителей и гетеродинов, индустриальные помехи. Специальным типом помех, характерным для подвижных объектов, явля-

ются контактные помехи, возникающие в движении от облучаемых неплотных контактов между металлическими частями машин, аппаратуры, оборудования. Вопросам изучения контактных помех посвящена отдельная монография [13]. Индустриальные помехи постоянно изучаются СИСПР и нормируются [28]. Существуют нормы на излучения гетеродинов [29].

В настоящей работе особое внимание уделено непреднамеренным помехам, излучаемым через антенну, как представляющим наибольший научный и практический интерес. Если из перечня исключить кондуктивные помехи, распространяющиеся по цепям питания или монтажным проводам, то через антенну могут воздействовать все типы излучаемых внешних помех.

Излучения передатчиков в полосе частот, необходимой для передачи полезной информации своему корреспонденту, одновременно являются потенциальными помехами для других РЭС. Помехи возникают при попадании составляющих спектра основного излучения передатчика в полосы пропускания основных каналов приема «дальних» приемников, имеющих совпадающие рабочие частоты, и в полосы пропускания побочных каналов приема приемников, находящихся на сравнительно небольших расстояниях.

Кроме того, основные излучения передатчиков создают помехи в виде сильного мешающего сигнала для приемников, находящихся в непосредственной близости от передатчиков. Борьба с такими помехами осуществляется путем частотно-территориального разнесения и в некоторых случаях работой передатчиков в режиме пониженной мощности. Однако передатчики способны создавать помехи не только своими основными излучениями.

Современные радиопередающие устройства помимо основного излучения имеют внеполосные и побочные излучения. Рассмотрим более подробно механизм возникновения этих излучений.

Излучения передатчиков на частотах, лежащих за пределами необходимой полосы излучения, называются неосновными и разделяются на внеполосные и побочные.

*Внеполосные излучения* — это излучения на частотах, прилегающих к необходимой полосе излучения. Они обусловлены паразитным действием фона, флуктуационного шума и другими факторами в процессе модуляции сигнала.

Мешающее действие внеполосных излучений особенно велико при расположении приемников в непосредственной близости от передатчиков и вызывает увеличение интервалов между частотами передачи и приема.

Наиболее характерными внеполосными излучениями являются шумовые излучения, создаваемые паразитной модуляцией несущей частоты напряжениями шумов, возникающих в элементах передатчика. Эти излучения занимают спектр, в десятки и сотни раз больший, чем спектр полезного сигнала. Уровень шумовых излучений монотонно уменьшается по мере удаления от несущей частоты сигнала.

Дополнительное уменьшение шумовых излучений достигается применением полосовых фильтров как в тракте передатчика (между каскадами), так и на его выходе.

*Побочными излучениями* передатчика называют излучения, частоты и уровни которых определяются нелинейными процессами, возникающими при прохождении токов высокой частоты по элементам тракта.

Побочные излучения не связаны с модуляцией и подразделяются на следующие основные виды.

*Излучения на гармониках* — побочные излучения в полосах, включающих частоты, кратные частотам основного излучения. Уровень излучения на гармониках зависит от ряда факторов:

- режима работы и характера нелинейности каскадов передатчика (в основном — оконечного каскада);
- характера нагрузки передатчика, ее избирательными свойствами и степенью согласования с выходным каскадом;
- схемы выходного каскада передатчика (однотактной, двухтактной) и типа применяемого электронного прибора.

*Излучения на субгармониках* — побочные излучения, характерные для передатчиков, имеющих в тракте каскады умножения частоты. Уровень излучений на субгармониках определяется степенью фильтрации между каскадами и на выходе передатчика.

*Комбинационные излучения* — побочные излучения, возникающие при формировании колебаний основного излучения путем нелинейных преобразований вспомогательных колебаний. Эти излучения характерны для передатчиков с дискретной сеткой частот.

Наиболее распространенным и действенным методом уменьшения уровней рассмотренных выше побочных излучений является улучшение фильтрации в тракте передатчиков.

*Паразитные излучения* — побочные излучения, не связанные с образованием несущих частот и возникающие вследствие случайного возбуждения каскадов передатчика на частотах, отличающихся от несущей. Меры по устранению этих излучений

должны предусматриваться в процессе разработки и отладки схем и конструкций передатчиков.

В сосредоточенных комплексах РЭС при одновременной работе двух и более передатчиков на близко расположенные или общие антенны могут возникнуть излучения комбинационного характера на частотах, отличных от частот основных и побочных излучений каждого из взаимодействующих передатчиков. Эти излучения возникают на нелинейном элементе выходного каскада одного из передатчиков при воздействии на него колебаний от другого передатчика (или других передатчиков) и носят название интермодуляционных излучений. Меры ослабления уровня интермодуляционных излучений — увеличение развязок между антеннами и улучшение фильтрации на выходе передатчиков, а меры защиты от интермодуляционных помех — рациональный выбор рабочих частот взаимодействующих РЭС.

Помехозащищенность приемника в задачах ЭМС определяется в основном его частотной избирательностью и нелинейными свойствами.

В условиях слабых мешающих сигналов частотная избирательность приемника оценивается по его односигнальной характеристике избирательности (резонансной характеристике), форма которой определяется суммарным эффектом всех резонансных контуров приемника, независимо от их распределения по усилительному тракту. При наличии относительно сильных сигналов, вызывающих нелинейные явления, оценка избирательности приемника проводится по характеристике эффективной (многосигнальной) избирательности, форма которой зависит не только от количества резонансных контуров, но и от условий и места их размещения. В общем случае эффективная избирательность тем лучше, чем более сосредоточены элементы селекции и чем ближе к входу приемника они расположены.

**1.1. Природные радиопомехи.** Как отмечалось выше, к природным (естественным) помехам следует отнести:

- атмосферные радиопомехи;
- космические радиопомехи;
- радиоизлучение Земли и объектов Солнечной системы.

*Атмосферные помехи* — помехи, обусловленные электрическими процессами в атмосфере, прежде всего грозовыми разрядами, которые создают в приемной антенне быстро спадающие импульсы продолжительностью 0,1–3 мс. Спектральная плотность мощности

(СПМ) этих помех уменьшается обратно пропорционально кубу частоты. Напряженность поля атмосферных помех достаточно велика, поэтому даже на расстоянии порядка сотен километров она может достигать сотен милливольт на метр.

Кроме импульсных атмосферных помех, которые возникают во время местных гроз, непрерывно действуют флуктуационные помехи, создаваемые многочисленными разрядами дальних гроз (каждую секунду на Земле в среднем насчитывают до 100 молний). Их интенсивность зависит от времени суток, времени года, места приема и других факторов. Крутизна спада СПМ этих помех составляет примерно 50 дБ на декаду.

Статистическая модель атмосферных помех — квазиимпульсная помеха, которую можно представить в виде двух составляющих: флуктуационной с гауссовским законом распределения и более мощной импульсной негауссовской. Атмосферные помехи проявляются в основном в диапазоне кило- и гектометровых волн.

*Космические помехи* — помехи, обусловленные процессами, которые происходят в различных объектах Вселенной и сопровождаются шумовым излучением в диапазоне радиочастот (от метровых до миллиметровых волн). Энергию космических помех оценивают шумовой температурой антенны  $T_A$ . Последняя определяется как температура эквивалентного сопротивления антенны, на котором выделяется та же мощность, что и мощность принимаемого шумового излучения. Основным видом космических помех являются шумы Галактики. По происхождению галактические излучения подразделяют на тепловые и нетепловые (от колебаний неоднородностей плазмы, процессов обмена зарядами газовых масс и др.). Нетепловые излучения преобладают на более длинных волнах; при  $\lambda < 1,5$  м основным становится тепловое излучение. По пространственному распределению шумы Галактики подразделяют на две группы: фоновый шум, не имеющий определенных источников, и шумы, обусловленные дискретными источниками. Первый зависит от ориентации приемной антенны и частоты. При ориентации на центр Галактики  $T_A$  возрастает в пять-семь раз сравнительно с ориентацией на полюса Галактики. Наблюдается снижение шумовой температуры антенны с повышением частоты по закону

$$T_A = \text{const} \cdot f^{-2.4}.$$

Число известных сегодня дискретных (точечных) источников шумов составляет примерно 2000. Вследствие малых угловых раз-

меров вероятность их приема очень мала, и эти источники можно не учитывать.

Еще один источник космических помех — это Солнце, которое вследствие относительной близости Земли может возбуждать в приемнике с антенной средних размеров мощность, сравнимую с мощностью собственных шумов, а при вспышках и значительно большую. При использовании больших антенн принятое ими излучение Солнца приводит к «ослеплению» приемника, что следует учитывать при программном слежении за ИСЗ.

Земля и планеты также являются источниками космических помех. Так, для спутниковой антенны шумовая температура Земли составляет 290 К. Для наземных антенн шумы Земли воспроизводятся боковыми лепестками диаграммы направленности (ДН),  $T_A \approx 30$  К. Шумовая температура планет соизмерима с температурой Земли.

При определении уровня космических помех на Земле (рис. 1.1) следует учитывать отражение и поглощение радиоволн, которые приходят из космоса сквозь ионизированные слои (особенно в диапазонах длинных, средних и коротких волн (ДВ, СВ, КВ)). В указанных диапазонах космические помехи у поверхности Земли практически не наблюдаются. С учетом этого эффекта и спада интенсивности космических помех с ростом частоты основной максимум космического излучения находится в области 20...30 МГц, где для приемников с малым уровнем собственных шумов и шириной ДН приемной антенны около 20–30° космические помехи превышают собственные.

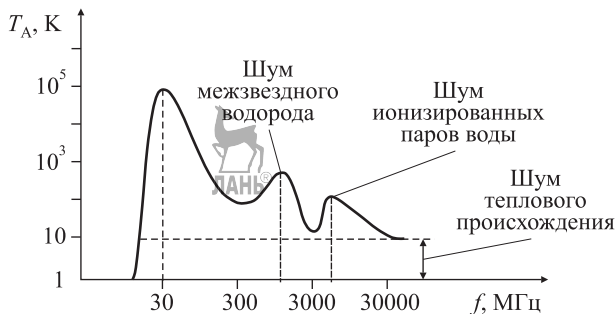


Рис. 1.1. Шумовая температура космических помех

**1.2. Промышленные радиопомехи.** Промышленные (индустриальные) помехи — активные, искусственного происхождения, но непреднамеренные — обусловлены работой электрических устройств, не предназначенных для передачи информации. По виду спектра источники индустриальных помех можно разделить на две группы:

- источники квазигармонических колебаний со сравнительно узким спектром (промышленные и медицинские генераторы, гетеродины приемников, генераторы разверток телевизоров и др.);
- источники с широким спектром — устройства, в которых возникают скачкообразные изменения токов, прерывания контактов и т. п. (электросварочные аппараты, цепи зажигания двигателей внутреннего сгорания, электрические машины со скользящими контактами, токосъемы электрического транспорта, бытовые и осветительные приборы, линии электропередач).

Вследствие импульсного характера помех их спектральная плотность мощности непрерывна и убывает с ростом частоты примерно по гиперболическому закону. Поэтому основная часть энергии индустриальной помехи сосредоточена в области сравнительно низких частот, так что уже в дециметровом диапазоне их уровень меньше уровня собственных шумов приемника.

Индустриальные помехи распространяются в виде электромагнитных излучений или высокочастотных токов проводов, которые могут стать вторичными излучателями помех.

**Основные характеристики индустриальных радиопомех и их влияние на качество приема.** Подвижные объекты связи, наиболее насыщенные по количеству возможных технических устройств, подвержены большему влиянию индустриальных радиопомех (ИРП).

Транспортной базой объекта связи, как правило, служит автомобиль с двигателем внутреннего сгорания. В его составе находится целый ряд источников радиопомех: система зажигания двигателей, коллекторные двигатели, генераторы собственных нужд, реле поворота и другие сервисные устройства транспортной базы.

Кроме средств связи, в состав подвижного объекта могут входить аппаратура автоматизации и вычислительной техники, так называемое автоматизированное рабочее место (АРМ). Функционирование этих устройств сопровождается скачками напряжения или тока, т. е. видеоимпульсами различной формы со случайными и детерминированными параметрами. Для ряда устройств эти

импульсы имеют ярко выраженный периодический характер с постоянными параметрами — амплитудой, частотой следования, длительностью импульсов (вторичные источники питания, приборы автоматики, аппаратура передачи данных и др.). Длительность этих импульсов может доходить до полупериода, частота следования — до сотен кГц, а амплитуда до сотен Вольт.

Работа ряда других устройств сопровождается импульсами, параметры которых имеют случайный характер (коллекторные двигатели, регуляторы, генераторы электрического тока, различное вспомогательное оборудование). Как правило, эти помехи характеризуются малой длительностью видеоимпульсов: от единиц до сотен микросекунд и средней частотой следования от десятков Гц до десятков кГц.

Кроме указанных выше видов ИРП, имеют место источники помех с синусоидальными сигналами (продукты частотообразований, гармоники опорных сигналов) и квазигармонические сигналы, имеющие определенный спектр частот.

Все эти виды помех могут занимать широкий спектр частот и относительно высокий уровень, излучаться в окружающее пространство и распространяться по проводам, оказывая мешающее действие на радиоприемные устройства (РПУ) в широком диапазоне частот. Возникает необходимость решения задачи устранения или уменьшения мешающего действия ИРП на работу РПУ.

На рис. 1.2–1.4 изображены осциллограммы импульсов помех, создаваемых наиболее характерными устройствами источниками радиопомех (РП). Формы напряжений импульсов, изображенные на рис. 1.2, близки к трапецеидальным, на рис. 1.4 — к пилообразным.

Очевидно, что импульсы от различных ИРП могут иметь самый разнообразный вид. Однако большинство из них можно аппроксимировать типовыми формами, которые поддаются исследованию при помощи разложения Фурье. Таким образом, можно преобразовать сигналы, представляющие собой функцию времени, в сигналы, представляющие собой функцию частоты (спектр). Известно, что для периодической последовательности импульсов с амплитудой  $A = f(t)$  можно записать:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \Psi_n),$$

где  $A_0$  — постоянная составляющая напряжения,  $A_n$  — амплитуда  $n$ -й гармоники,  $\Psi_n$  — начальная фаза  $n$ -й гармоники.



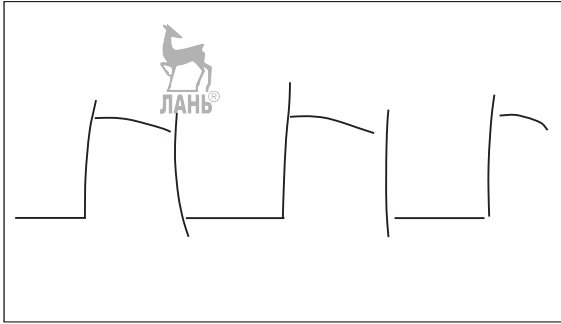


Рис. 1.2. Периодическая последовательность импульсов, создаваемая АРМ

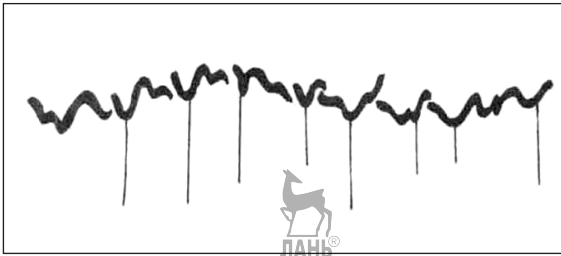


Рис. 1.3. Помеха от коллекторного двигателя

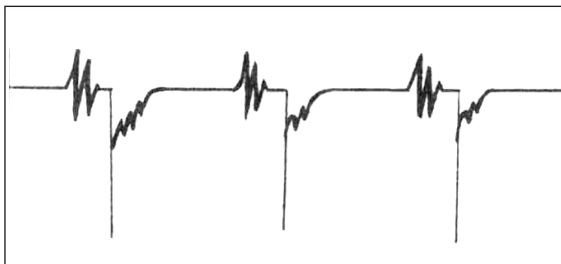


Рис. 1.4. Помехи от свечи зажигания

Величина  $A$  в общем случае, как показано в [30], зависит от формы импульса. Очевидно, что импульсы от различных источников могут иметь различные формы. Однако большинство из них можно с достаточной для практики точностью аппроксимировать типовыми формами, описанными в литературе.

При сложной форме импульсов их спектры можно рассматривать как сумму спектров нескольких последовательностей импульсов, пользуясь теоремой о сумме спектров [30].

**Оценка возможных путей распространения ИРП на подвижном объекте.** Известно, что основным параметром определяющим дальность связи является чувствительность РПУ. Чувствительность РПУ в свою очередь определяется собственным уровнем его шумов. При конструировании РПУ реализуются все технические возможности по уменьшению его собственных шумов. При отсутствии внешних помех это приводит к увеличению дальности связи или к повышению ее надежности.

Если на объекте будет размещено РПУ, то на его входе может возникнуть напряжение ИРП ( $U_{\text{РП}}$ ), величина которого будет зависеть от величины напряжения на источнике помехи ( $U_{\text{И}}$ ) и ослабления среды распространения ( $K_{\text{СР}}$ ). Если эти величины выразить в децибелах, то можно записать:

$$U_{\text{РП}} = U_{\text{И}} - K_{\text{СР}}.$$

Таким образом,  $U_{\text{РП}}$  — напряжение, возникшее на входе РПУ, может оказаться больше напряжения собственных шумов  $U_{\text{Ш}}$ , приведенных к его входу. В таком случае чувствительность РПУ будет определяться величиной  $U_{\text{РП}}$ .

Если РПУ, установленное на объекте, исходя из задач, решаемых объектом, должно реализовать свою чувствительность, то очевидно, что суммарный уровень  $U_{\text{РП}}$  от всех источников помех и  $U_{\text{Ш}}$  не должны превышать определенной допустимой величины  $U_{\text{Д}}$ , т. е.

$$U_{\text{РП}} + U_{\text{Ш}} \leq U_{\text{Д}}.$$

Очевидно, что величина  $U_{\text{Д}}$  должна незначительно превышать величину  $U_{\text{Ш}}$ , определяться некоторыми условиями и при этом суммарное напряжение  $U_{\text{РП}} + U_{\text{Ш}}$  в тракте высокой частоты РПУ должно носить шумовой характер.

Может случиться, что подавление ИРП на объекте до уровня, позволяющего реализовать собственную чувствительность, технически затруднено или экономически не оправданно, а дальность связи реализуется с определенным запасом. В этом случае  $U_{\text{РП}} + U_{\text{Ш}}$  может быть больше величины  $U_{\text{Д}}$  на определенную величину. При этом, очевидно, будет проявляться характер ИРП при их воздействии на тот или иной вид приема сигналов. Величина  $U_{\text{Д}}$  будет зависеть от вида принимаемого сигнала и характера помехи.

На рис. 1.5 показан упрощенный вариант объекта с одним РПУ с некоторыми устройствами функционального назначения объекта. Объект изображен в виде экранированного объема с общей экранирующей способностью  $\mathcal{E}_k$ . Он имеет дверь, или люк, высококачественный выход (ВЧ выход) для антенны и выход для подключения источника электроснабжения. ВЧ-выход РПУ соединен со штыревой антенной через согласующее антенное устройство (САУ).

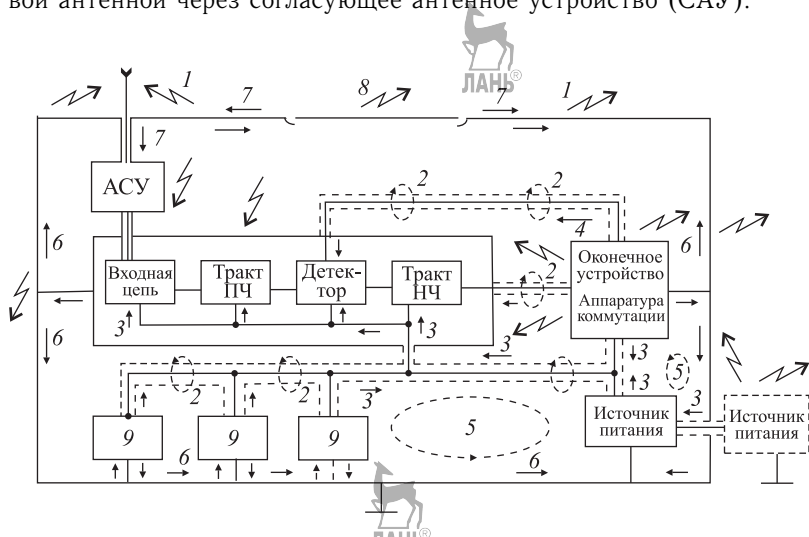


Рис. 1.5. Возможные пути воздействия ИРП на РПУ в подвижном объекте

Для анализа возьмем РПУ и устройства функционирования. Устройства функционирования могут быть подключены к РПУ через устройства коммутации и через цепи питания. Допустим, что эти устройства являются источниками ИРП, тогда в цепях этих устройств относительно корпуса объекта создается напряжение ИРП и как следствие создается излучение ИРП от корпусов и цепей этих устройств. Диапазон частот ИРП перекрывает рабочий диапазон РПУ.

В таком случае РПУ и его антенно-фидерный тракт (АФТ) будут находиться в поле излучения, создаваемого системой электрических цепей 2 и контуров 5, образованных этими цепями, соединениями аппаратуры на корпус самими корпусами за счет протекания по ним токов 3 и 6. По цепям, соединяющим РПУ с окончательным устройством, на РПУ будет подаваться напряжение ИРП.

Необходимо оценить воздействие ИРП на РПУ помимо его АФТ, рассматривая РПУ как устройство, обладающее определенной восприимчивостью к ИРП по электромагнитному полю, а также по цепям питания и управления.

Очевидно, что самой высокочувствительной цепью РПУ является его входная цепь. Далее все пути проникновения ИРП будем рассматривать относительно этой цепи, называя ее входом РПУ. Напряжение ИРП, поступающее в РПУ по цепи питания, будет проникать на его вход по участку цепи питания усилителя высокой частоты. Напряжение ИРП в цепях управления за счет емкостных и индуктивных связей может наводиться либо прямо на вход РПУ, либо через цепи питания. Вследствие излучения ИРП могут наводить ЭДС на входе РПУ через его корпус либо по цепям питания и управления.

Таким образом, восприимчивость РПУ помимо его АФТ является важной характеристикой и определяется степенью развязки входа РПУ по указанным цепям и экранирующей способностью корпуса РПУ.

При дальнейшей оценке путей проникновения ИРП будем считать, что восприимчивость РПУ к действующим на него ИРП помимо антенны достаточно мала, по сравнению с действием ИРП через АФТ. Это упрощение существенно облегчит дальнейший анализ и позволит рассматривать пути распространения ИРП только за счет излучения ИРП.

Как было показано выше, ЭМ поля ИРП создаются вследствие излучения корпусов источников помех, электрических цепей и контуров заземления. Все эти виды излучений в ближней зоне могут создавать электрические, магнитные и электромагнитные поля.

Рассмотрим первый случай, когда корпус источника ИРП создает ЭМ поле излучения в районе АФТ. В этом случае путь распространения ИРП внутри кузова (см. рис. 1.5) будет следующим: источник ИРП — пространство между ним (среда распространения) и АФТ — вход РПУ. Тогда величина  $K_{СР}$  (величина затухания среды распространения по электромагнитному полю) будет определяться затуханием в этом пространстве  $V_{ПР}$  и экранирующей способностью АФТ  $\mathcal{E}_{АФТ}$ , т. е.

$$K_{СР} = V_{ПР} + \mathcal{E}_{АФТ}.$$

Во втором случае излучение может проникать за пределы объекта и наводить ЭДС ИРП в антенне. При этом

$$K_{\text{СР}} = V_{\text{ПР}} + \mathcal{E}_{\text{К}} + K_{\text{А}},$$

где  $K_{\text{А}}$  — коэффициент ослабления антенны,  $\mathcal{E}_{\text{К}}$  — коэффициент экранирования объекта.

Очевидно, что если  $(\mathcal{E}_{\text{К}} + K_{\text{А}}) < \mathcal{E}_{\text{АФТ}}$ , то основным путем проникновения будет антенна РПУ, а если  $(\mathcal{E}_{\text{К}} + K_{\text{А}}) > \mathcal{E}_{\text{АФТ}}$ , то антенно-фидерный тракт.

Если первичным источником излучения служит напряжение ИРП, то ЭМ-поле излучает система, состоящая из цепей питания, управления и контуров заземления.

**Предложения по мерам снижения мешающего действия радиопомех на РПУ, возникающих в подвижных объектах.** Снижение мешающего действия радиопомех на РПУ осуществляется в основном путем увеличения помехозащищенности РПУ, уменьшения уровней помех, образующихся на объекте и ослабления помех на пути распространения.

При исследовании возможных путей уменьшения влияния радиопомех, возникающих на объекте, необходимо рассматривать систему излучения, образованную на РПУ электрическими цепями объекта. Источник радиопомех обычно подключен к какой-то электрической цепи, которая разветвлена в объекте и имеет гальванические, емкостные и индуктивные связи с другими цепями. Так как источник радиопомех нагружен на сложную систему проводов, то полное сопротивление излучения в диапазоне частот будет менять свою величину и знак. При включении и выключении любой аппаратуры общее сопротивление тоже меняется. Благодаря этому меняется и уровень излучения радиопомех. При изготовлении приборов и устройств незначительные изменения в монтаже электрических цепей могут вызвать значительные изменения уровней излучения радиопомех, что и наблюдается на практике. Все это приводит к большим трудностям при расчете уровней радиопомех внутри объекта, вследствие чего можно дать только следующие общие рекомендации по электрическому монтажу объекта.

1. Проводить экранировку помехонесущих цепей объекта.
2. Все соединения экранированных цепей не должны ухудшать их экранирующую способность
3. Экранирующие оболочки цепей целесообразно заземлять через промежутки не менее  $0,2\lambda$  для самой высокой частоты, при-

меняемой на объекте. Перемычки заземления должны быть минимальной длины и иметь большую поверхность.

4. Все соединения должны иметь хороший электрический контакт и защиту от коррозии.

5. Все цепи должны быть минимально возможной длины.

6. Проводить монтаж цепей с разнесом между цепями АФТ и цепями источниками помех.

7. Выполнять фидерный тракт коаксиальным кабелем, не нарушая его экранирующей способности в местах соединений с РПУ САУ и антенным вводом.

8. При настройке АФТ добиваться максимального согласования РПУ с антенной.

9. При наличии большого магнитного поля помех у АФТ целесообразно помещать фидер в магнитный экран (ферритовые трубки, кольца и т. п.).

10. Размещать РПУ или САУ радиостанций на минимально возможном расстоянии от антенного ввода.

11. Проводить технические мероприятия по повышению экранирующей способности объекта.

12. Применять на объекте симметричные антенны, штыревые антенны с центральным питанием или с противовесом, если позволяют технические условия.

13. Применять комплектующую аппаратуру с низким уровнем радиопомех.

14. Устанавливать при необходимости дополнительные фильтры ИРП.

**Примечание.** В Рекомендации МСЭ-Р Р.372 «Радишум» дается информация о базовых уровнях радиочастотного шума в диапазоне частот 0,1 Гц — 100 ГГц. В ней принимается во внимание шум, обусловленный грозowymi разрядами, промышленными источниками, галактическим шумом и температурой в нижних слоях атмосферы. Приведенные данные могут быть использованы для формирования типовой электромагнитной обстановки.

Рекомендация разработана Исследовательской комиссией МСЭ-Р №3 «Распространение радиоволн» (ИКЗ), разрабатывающей новые и совершенствующие существующие модели распространения радиоволн различных диапазонов для проектирования систем радиосвязи и телерадиовещания и исследований их ЭМС. Деятельность ИКЗ важна для проведения исследований технических вопросов, которые рассматриваются другими ИК МСЭ-Р, а также для проведения переговоров между администрациями связи различных стран с целью координации наземных и спутниковых сетей связи.

Радишум определяется в Рекомендации МСЭ-Р V.573 следующим образом: «радио (частотный) шум — изменяющееся во времени электромагнитное явление, имеющее составляющие в радиочастотном диапазоне и явно не передающее информацию, которое может налагаться на полезный сигнал или смешиваться с ним».

В некоторых случаях радиочастотный шум может передавать информацию о некоторых характеристиках своего источника, например о его природе или месте расположения.

Компьютерная программа, связанная с характеристиками и приложениями для расчета атмосферного радишума, обусловленного грозowymi разрядами, промышленным шумом и галактическим шумом (на частотах ниже примерно 100 МГц), которая описана в Рекомендации Р.372, представлена на веб-сайте МСЭ-Р <http://www.itu.int> в части, относящейся к 3-й исследовательской комиссии по радиосвязи.

В Рекомендации МСЭ-Р Р.372 приводятся данные по радишумам, возникающим по следующим причинам:

- излучение от грозowych разрядов (атмосферный шум, вызванный грозой);
- совокупное непреднамеренное излучение от электрических механизмов, электрического и электронного оборудования, линий электропередачи или систем зажигания двигателей внутреннего сгорания (промышленный шум);
- эмиссия от атмосферных газов и гидрометеоров;
- присутствие земной поверхности или других препятствий на пути луча антенны;
- излучение от небесных источников радиоволн.

**1.3. Внутриобъектовая ЭМС.** Актуальность проблемы обеспечения ЭМС РЭС определяется противоречием между непрерывным увеличением количества РЭС и непрерывным уменьшением возможности использования радиочастотного ресурса (РЧР) каждым РЭС. Если ранее каждая радиослужба функционировала в своей полосе частот, то в настоящее время из-за ограниченности РЧР РЭС различных радиослужб функционируют в совмещенных полосах частот [10, 12].

Актуальность проблемы ЭМС РЭС постоянно повышается по мере роста количества РЭС различных назначений. Особенно остро проблема возникает при комплексировании РЭС на объектах и узлах связи (УС), когда РЭС помимо работы в смежных или совмещенных полосах частот оказываются в непосредственной близости друг к другу, что существенно повышает уровень помех.

**Модели комплексов РЭС.** В понятие РЧР входят не только диапазоны рабочих частот РЭС, но и область пространства, в ко-

торой размещается комплекс РЭС, а также временные режимы их функционирования. Поэтому, с точки зрения ЭМС, комплексы РЭС целесообразно различать по степени использования частотного, пространственного и временного ресурсов. Как показано в [12], для последующего исследования целесообразно использовать двухуровневую модель группировки (комплексов) РЭС.

К первому уровню относятся комплексы с относительно небольшим количеством РЭС, ограниченными возможностями удаления их друг от друга (типа технических зданий, автомобилей и т.п. объектов), а также повышенными требованиями к характеристикам ЭМС. Из-за ограниченности пространства объекта для обеспечения ЭМС таких комплексов можно эффективно использовать только частотный и временной ресурсы.

Ко второму уровню относятся комплексы РЭС типа локальных группировок (УС и др.) с достаточно большим количественным составом РЭС и значительными расстояниями между ними. Комплексы второго уровня могут представляться как некоторые совокупности комплексов первого уровня, размещаемых на ограниченных территориях (на узлах связи, в радиоцентрах и т.п.).

Данная классификация полезна при решении конкретных задач ЭМС в комплексах РЭС, так как позволяет по уровню комплекса оценить основные виды непреднамеренных помех, характерных для того или иного комплекса, и обосновать способы борьбы с ними.

Существенными признаками непреднамеренных помех в комплексах первого уровня являются широкополосность мешающего воздействия в результате нелинейных искажений сигналов во входном тракте радиоприемника (РПМ) и образование широкого спектра неосновных излучений радиопередатчика (РПД) (внеполосных, шумовых и т.д.), а также значительного числа узкополосных помех, обусловленных наличием побочных, интермодуляционных и т.п. излучений РПД и каналов приема РПМ, которые появляются из-за нелинейности их радиочастотных трактов. Кроме того, данные комплексы подвержены воздействию такого вида широкополосных непреднамеренных помех, как контактные, электростатические, промышленные и т.п., которые создаются транспортной базой, электрооборудованием подвижного объекта, источниками электроснабжения и воздействуют на радиоприемный тракт не только через антенну приемника, но и по низкочастотным цепям его питания, управления и коммутации. Для анализа ЭМС РЭС этого уровня применимы строгие электродинамические методы расчета параметров ЭМС.



Отличительная черта непреднамеренных помех в комплексах второго уровня по сравнению с первым — это их меньшая широкополосность и более низкие уровни, а также меньшее количество помех побочного и интермодуляционного характера. Для них характерно использование приближенных (инженерных) методик расчета параметров ЭМС.

**Основные типы непреднамеренных помех в комплексах РЭС.** Все возможные типы непреднамеренных помех целесообразно разделить на две большие группы: излучаемые и кондуктивные, причем первая группа состоит из излучаемых (принимаемых) через антенну и помимо антенны.

К помехам, излучаемым помимо антенны, относятся излучения возбудителей и гетеродинов, промышленные помехи. Специальным типом помех, характерным для подвижных объектов, являются контактные помехи, возникающие в движении от облучаемых неплотных контактов между металлическими частями машины, аппаратуры, оборудования. Вопросам изучения контактных помех посвящена монография [13]. Промышленные помехи постоянно изучаются СИСПР и нормируются. Существуют нормы на излучения гетеродинов [14].

В настоящей работе особое внимание уделено непреднамеренным помехам, излучаемым через антенну, как представляющим наибольший научный и практический интерес. Если из перечня исключить кондуктивные помехи, распространяющиеся по цепям питания или монтажным проводам, то через антенну могут воздействовать все типы излучаемых помех.

Среди различных механизмов воздействия РЭС друг на друга связь через антенны наиболее сильна. На ее долю приходится около 90% всех мешающих воздействий. Через другие элементы РЭС — общие источники питания, корпус, фидер и т. д. — уровень взаимодействий не превышает 10% [15]. РЭС, не находящиеся в одной аппаратной или в одном комплексе, взаимодействуют, по сути, только через антенну.

На рис. 1.6 приведены типовые спектры излучения РПД и характеристика многосигнальной избирательности РПМ. Стрелками обозначены возможные механизмы образования (каналы проникновения) непреднамеренных помех различных типов в комплексах радиосвязи.

На рис. 1.6 приняты следующие обозначения: О-О — влияние основного излучения (ОИ) по основному каналу приема (ОКП),

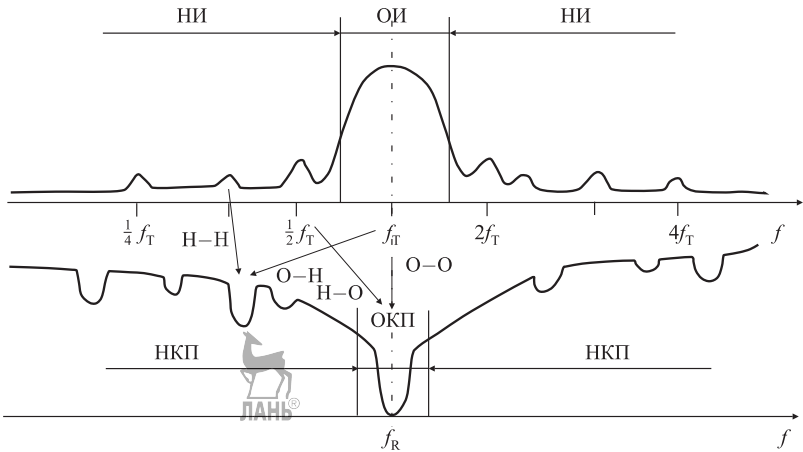


Рис. 1.6. Механизмы образования основных типов непреднамеренных помех в комплексах радиосвязи

Н-О — влияние неосновных излучений (НИ) по ОКП, О-Н — влияние ОИ по неосновным каналам приема (НКП), Н-Н — влияние НИ по НКП.

На рисунке не показаны интермодуляционные помехи, возникающие на нелинейных элементах при воздействии двух и более РПД.

Согласно данным, приведенным в [16], следует, что из общего числа зарегистрированных случаев помех 31,2% составляют помехи, вызванные шумовыми излучениями передатчиков; 25,5% — помехи по соседнему каналу; 14,4% — помехи по побочным каналам приема; 2,1% — помехи из-за комбинационных излучений передатчиков; 26,8% — интермодуляционные помехи, возникающие в приемниках. В табл. 1.1 приведена статистическая вероятность возникновения помех различных типов в комплексе РЭС с учетом проведенной классификации (см. рис. 1.1).

Следует отметить, что количество интермодуляционных помех, возникающих в приемнике, существенно превышает их количество, возникающее в передатчике: 26,8% против 2,1%. Более того, общее число помех, обусловленных недостаточной избирательностью приемников, составляет 70%. В то же время число помех, обусловленных недостаточными характеристиками передатчиков, составляет лишь 30%.

Таблица 1.1

№	Тип помехи	Вероятность возникновения, %
1	О–О	0
2	Н–О	31,2
3	О–Н	39,9
4	Н–Н	0
5	Интермодуляционная	28,9

Как будет показано ниже, уровни помех первых четырех типов рассчитываются с использованием либо методики на основе интегральных уравнений, либо инженерной методики.

Уровни комбинационных излучений  $n$ -го порядка достигают величин, сравнимых с уровнями гармоник того же порядка. В качестве нелинейных элементов могут служить выходные каскады передатчиков, входные усилительные приборы приемников, цепи индикации тока в антенне и вообще любой внешний предмет в поле антенны, обладающий нелинейными свойствами. На этих нелинейных элементах происходит преобразование как сигналов соответствующих передатчиков комплекса, так и любых посторонних. Появляющиеся в результате такого преобразования комбинационные продукты (интермодуляционные составляющие) могут иметь частоты, совпадающие с частотами принимаемых сигналов, что может привести к нарушению связи. Если в сосредоточенных комплексах не приняты специальные меры, то помехи от комбинационных продуктов ощущаются до 20–25-го порядка. Общее число частот, пораженных комбинационными помехами в сосредоточенном комплексе, может составить 60–80% всех рабочих частот. Точно определить уровень интермодуляционной помехи в сосредоточенном комплексе в настоящее время не представляется возможным, поскольку для этого необходимо знание вольт-амперных характеристик нелинейных элементов конкретного РПД (РПМ). Существуют приближенные (инженерные) оценки [17–20].

**Методики оценки ЭМС комплексов РЭС.** Анализ ЭМС комплекса РЭС начинается с составления частотной матрицы. Частотная матрица позволяет определить все возможные каналы (механизмы) проникновения помех, тем самым отсекая большое количество ненужных энергетических расчетов.

Для частотно-энергетического анализа при расположении антенн в дальней зоне используется уравнение, основанное на клас-

сическом уравнении передачи и характеризующее условие обеспечения ЭМС РЭС:

$$L_b(R) + \text{FDR}(\Delta f) \leq P_t + G_r - \Delta G_{tr} - \Delta G_{rt} - \alpha_t - \alpha_r - \delta - I_m, \quad (1.1)$$

где  $L_b(R)$  — потери передачи на расстоянии  $R$  между источником помехи и РПМ (множитель ослабления) (дБ);  $P_t$  — мощность РПД источника помех (дБ·Вт);  $G_t$  — коэффициент усиления антенны источника помех (дБи);  $G_r$  — коэффициент усиления приемной антенны (дБи);  $\Delta G_{tr}$  — потери коэффициента усиления антенны РПД в направлении РПМ (дБи);  $\Delta G_{rt}$  — потери коэффициента усиления антенны РПМ в направлении РПД (дБи);  $\delta$  — поляризационная развязка (дБ);  $I_m$  — максимальная допустимая мощность помехи, при которой не возникает неприемлемого ухудшения качества канала (дБ·Вт);  $\text{FDR}(\Delta f)$  — коэффициент частотной коррекции.

Для нахождения величины  $\text{FDR}(\Delta f)$  воспользуемся следующим выражением [10]:

$$\text{FDR}(\Delta f) = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) H(f+\Delta f) df}, \quad (1.2)$$

где  $P(f)$  — плотность спектра излучения, обычно нормированная на единичную максимальную спектральную плотность мощности (Вт/Гц);  $H(f)$  — избирательность РПМ;

$$\Delta f = f_t - f_r, \quad (1.3)$$

где  $f_t$  — частота настройки источника помехи;  $f_r$  — частота настройки РПМ.

Вычисление интеграла (1.2) является отдельной задачей. Ее решению посвящено достаточно большое число работ [22, 23]. В статье [23] предлагается вычислять интеграл по формуле Симпсона [24] при наличии экспериментальных зависимостей  $P(f)$  и  $H(f)$  в динамическом диапазоне до 60 дБ. Однако часто при проведении анализа ЭМС данные об экспериментальных характеристиках  $P(f)$  и  $H(f)$  отсутствуют. В этом случае в статье [23] предлагается использовать линейную аппроксимацию при наличии данных о характеристиках  $P(f)$  и  $H(f)$  на двух уровнях (3 и 30 (60) дБ).

Однако более точное значение интеграла (1.2), как показано в [11], дает экспоненциальная аппроксимация.

Подстановка соответствующих значений в выражение (1.1) позволяет оценивать ЭМС комплексов РЭС 2-го уровня.

Между тем в ближней зоне многие параметры, входящие в выражение (1.1), теряют смысл. Формула, характеризующая условия обеспечения ЭМС в комплексах РЭС 1-го уровня, выглядит следующим образом:

$$b + \text{FDR}(\Delta f) \geq P_t - I_m, \quad (1.4)$$

где  $b$  — коэффициент развязки между близко расположенными антеннами. Методика вычисления параметра  $b$  подробно рассмотрена в работах [25, 26].

Следует заметить, что один РПД может влиять на ряд РПМ, и один РПМ может находиться под влиянием ряда РПД. Если помехи действуют по одному и тому же каналу, то их необходимо суммировать по квадратичным формулам, что позволяет выработать требование к допустимому значению помехи каждого источника.

Подстановка соответствующих значений в выражение (1.4) позволяет оценивать ЭМС комплексов РЭС 1-го уровня.

## 2. Преднамеренные (организованные) радиопомехи

Преднамеренные (организованные) помехи создаются с целью ухудшить качество принимаемой информации в системах управления войсками и оружием. Преднамеренные помехи могут быть силовыми (заградительного характера) или интеллектуальными. Техника постановки преднамеренных помех может быть наземного, морского, воздушного или космического базирования.

Преднамеренные радиопомехи системам управления войсками создаются в тактическом звене управления, причем преимущественно в звене «батальон–полк», т. е. в тех подразделениях и частях, действия которых в наибольшей степени затрудняются при потере управления.

Целесообразность повышения уровня подавляемого звена управления (дивизия и выше) падает в связи с резким возрастанием инерционности управления (временные нормативы выполнения приказов определяются уже не десятками минут, а часами) и надежным дублированием процесса управления, например, кабельными (оптоволоконными) линиями.

С другой стороны, подавление управления мелких подразделений (ниже батальона) малоэффективно из-за близкого расположения друг к другу корреспондентов сети связи (роты, взвода), что требует неоправданно большой мощности помех.

Воздействие преднамеренных радиопомех, как правило, не предусматривает полного срыва управления войсками противника, его цель — внести в процесс управления неопределенность, задержку, сомнение. Постановка радиопомех должна заставить противника делать ошибки, использовать повторные передачи сообщений, в том числе в открытом режиме. Хотя при определенных условиях возможна постановка и силовых радиопомех с целью полного срыва процесса управления.

Тактика использования техники постановки радиопомех имеет следующие разновидности:

- постоянное нарушение процесса управления оружием противника;
- непрерывное избирательное подавление РЭС противника в интересах обеспечения ведения радиоразведки;
- кратковременное применение заградительных шумовых помех в критические моменты боя (атака, отступление);
- крытие своей связи посредством «ослепления» радиоразведки противника пространственно ориентированными (в сторону переднего края) помехами;
- использование постановщиков радиопомех в качестве средств связи повышенной мощности, способных вести радиообмен через помехи, создаваемые противником.

Ввод в заблуждение противника преследует практически те же цели, что и постановка помех силового характера, но при успешном применении оказывается более эффективной мерой (см. далее). Как правило, он осуществляется в рамках более крупной операции по дезинформации и имеет три разновидности:

- дезинформация манипуляцией (MED — manipulative electronic deception);
- дезинформация имитацией (SED — simulative electronic deception);
- дезинформация с подключением в радиосети противника (IED — imitative electronic deception).

Первые два варианта выполняются с помощью штатных РЭС боевых частей и подразделений, а для третьего привлекаются специальные силы и средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Дезинформация манипуляцией имеет целью обмануть противника относительно текущего состояния войск, их готовности и намерений. Она достигается изменением общего «электромагнитного профиля» своих сил, характерного для выполнения определенной боевой задачи, посредством изменения уровня интенсивности связи, ее режимов, создания ложных пиков радиобмена.

При осуществлении дезинформации имитацией противник вводится в заблуждение посредством имитации войсковых частей, систем оружия, создания ложных районов сосредоточения и развертывания. Для этого привлекаются радиосети, РЛС и другие несвязные РЭС, имитирующие, например, наличие ложной войсковой части, тогда как работа на излучение РЭС действительно существующей части прекращается.

Наиболее трудна для передачи и в то же время наиболее ответственна по результату дезинформация с подключением в радиосети противника и вводом в них ложной информации. Скрытый корреспондент-дезинформатор должен действовать до тех пор, пока ошибочная информация не будет надежно воспринята противником. Этот вид дезинформации требует хорошего всестороннего знания противника, сложного технического обеспечения и высокой квалификации операторов.

**2.1. Силовые радиопомехи.** К силовым радиопомехам относятся высокоэнергетические помехи, т. е. помехи, обладающие высоким энергopotенциалом. Они широко применяются, несмотря на их сравнительно низкую эффективность, так как не требуют большого времени на тонкий анализ сигналов и могут быть поставлены практически мгновенно. Силовые помехи скрывают (маскируют) полезный сигнал и потому относятся к классу маскирующих. Маскирующие помехи искажают структуру принимаемых сигналов и затрудняют (или полностью исключают) возможность обнаружения сигнала и выделения информации в приемном устройстве, снижают точность измерения параметров сигналов. С увеличением мощности помех их маскирующее действие возрастает.

Преднамеренные помехи силового характера, которые иногда называют «видимыми помехами», можно классифицировать по соотношению параметров помех и сигналов как *прицельные, заградительные, гребенчатые и скользящие*.

Прицельные помехи занимают сравнительно узкую полосу частот, не превышающую трехкратной (обычно 1,5–2) эффективной полосы пропускания приемника, а заградительные (шумовые) —

перекрывают весь спектр в широкой полосе частот, превышающей полосу пропускания приемника в десятки и сотни раз. Кроме заградительных помех при подавлении линий ППРЧ возможно использование помехи «вслед» (со следящей (запаздывающей) погоней за параметрами). Иногда такой тип помех называют прицельно-заградительным, поскольку помеха является прицельной по каждой из частот сетки, а в целом является заградительной. В этом случае необходимо применение быстродействующих систем радиоразведки и формирователя радиопомех.

При гребенчатых помехах в широкой полосе частот чередуются пораженные и непораженные участки. Скользящие (последовательно-заградительные) помехи создаются перестройкой передатчика узкополосных помех в широкой полосе частот, например, ЛЧМ — линейная частотная модуляция. По временным свойствам помехи могут быть непрерывными или импульсными, например, ХИП — хаотичная импульсная последовательность («chirped-помеха», т. е. помеха типа «щебетания», «чиркания»), по способу модуляции — немодулированными или модулированными по амплитуде, частоте, фазе с закономерным или случайным модулирующим сигналом.

Итак, под силовой заградительной радиопомехой следует понимать целенаправленное воздействие электромагнитной помехи на полезный сигнал без учета его «тонкой» структуры. В этом случае противник фиксирует факт применения средств радиоэлектронного противодействия, что заставляет противника прибегнуть к смене частот и позывных. Грубое силовое воздействие применимо в случае отсутствия времени на тонкий технический анализ принимаемых сигналов или в случае начала активных боевых действий.

В противном случае (когда обстановка позволяет провести детальный анализ принимаемых сигналов) целесообразна постановка «тонких» узкополосных помех (прицельных по частоте и предельно коротких по времени включения), мощность которых едва превышает уровень полезного сигнала (имитационные помехи). Модуляция мешающего сигнала в идеале должна соответствовать модуляции полезного сигнала. В этом случае блокируются ключевые слова и цифровые данные сообщения таким образом, чтобы противник принимал радиопомехи за сбои в работе своей аппаратуры [4].

**2.2. Интеллектуальные радиопомехи.** Понятие «интеллектуальная радиопомеха» не гостировано. Под интеллектуальной по-



мехой будем понимать помеху, сформированную таким образом, чтобы условный противник воспринял радиопомеху в качестве полезного сигнала (имитирующая помеха) или, по крайней мере, не зафиксировал факт воздействия преднамеренных помех (так называемые «невидимые помехи»). При этом уровень такой радиопомехи должен быть соизмеримым с уровнем полезного сигнала, что должно привести к вводу в заблуждение противника. Для постановки таких помех требуется, как правило, знание структуры передаваемого полезного сигнала на основе данных, полученных от средств радиотехнической разведки или других источников.

К такого рода помехам относятся среди прочих помехи типа DRFM (от digital radio frequency memory — цифровое устройство запоминания радиочастот). Современные подходы к построению таких систем постановки помех предполагают так называемую технологию цифровой радиопамяти, при которой принимаемый зондирующий сигнал запоминается в цифровом виде, модифицируется требуемым образом (изменяется частота, фаза, амплитуда, добавляются задержанные копии сигнала и т. п.) и затем переизлучается с требуемой задержкой.

Технология DRFM дает возможность перепрограммировать весь процесс радиоэлектронного подавления, включая модуляцию сигнала помех, настройку по частоте, регулировку уровня мощности и момент излучения — это означает, что по мере совершенствования радиоэлектронных средств управления оружием нет необходимости создавать новую аппаратуру РЭП, а достаточно только обновить ее математическое обеспечение. DRFM начали использовать в РЭБ в конце 1990-х гг. Но сами DRFM появились во второй половине 80-х.

Технология цифрового запоминания пространственных частот DRFM-S является естественным обобщением обычной технологии DRFM и имеет дополнительные преимущества, связанные с учетом направлений приема и передачи сигналов.

Другой способ создания интеллектуальной помехи — это перехват управления РЭС. Он характерен для сетей связи, построенных по сотовому принципу. Строго говоря, это не радиопомеха в чистом виде, а формирование ложного канала управления системой.

Еще один способ реализации принципа интеллектуальной помехи основан на обнаружении включенного сотового телефона в момент его выхода в эфир и формирование помехи на частоте

канала управления базовой станции таким образом, что абонент не фиксирует наличие помехи, предполагая, что передается сигнал легитимной базовой станции.

Внешние помехи можно существенно ослабить, применяя узконаправленные антенны, экранировку линий связи и т. д.



## ВНУТРЕННИЕ РАДИОПОМЕХИ

Внутренние помехи — это помехи, возникающие в самих электронных устройствах. Часть внутренних помех обусловлена тем, что источники тока, электровакуумные, полупроводниковые приборы и другие элементы электронных систем изменяют свои характеристики вследствие нестабильности внешних условий, а также со временем вследствие старения. В результате непрерывно, случайным образом изменяются параметры электронного устройства в целом, что проявляется в изменении сигнала на выходе, т.е. приводит к появлению помех. Эти помехи, обусловленные техническим несовершенством аппаратуры, также можно частично устранить [1].

Другая часть внутренних помех связана с электрическими флуктуациями, обусловленными дискретностью структуры вещества, дискретной природой электрического заряда и электромагнитного излучения. Параметры любого сигнала (напряжение, ток, напряженность поля и т.п.) являются средними величинами, которые характеризуют поведение большого числа заряженных частиц. Статистические флуктуации этой совокупности частиц и вызывают появление электрических флуктуаций. Характерной особенностью флуктуационных помех является то, что они порождаются явлениями микроскопических масштабов и принципиально не могут быть устранены. Термин «шум» обычно используется для обозначения именно этих флуктуационных помех. Очевидно, что борьба со случайными помехами представляет наибольшие трудности.

С физической точки зрения, случайные помехи порождаются различного рода *флуктуациями*. Флуктуациями в физике называют случайные отклонения тех или иных физических величин от их средних значений. Так, источником шума в электрических цепях постоянного тока могут быть флуктуации тока около среднего

значения, обусловленные дискретной природой носителей заряда (ионов и электронов). Это явление носит название *дробового эффекта*.

Наиболее универсальной причиной шума являются флуктуации, обусловленные тепловым движением. Случайное тепловое движение носителей заряда в любом проводнике вызывает случайную разность потенциалов на его концах. Эта разность потенциалов флуктуирует около среднего значения, равного нулю; ее средний квадрат пропорционален абсолютной температуре. Возникающая помеха называется *тепловым шумом*.

Из сказанного видно, что флуктуации и обусловленные ими помехи заложены глубоко в природе вещей.

Флуктуации есть результат дискретного строения вещества и статистической природы ряда физических величин. Действительно, многие физические величины представляют собой результат усреднения по большому числу индивидуальных частиц, поведение и действие которых подчиняется законам случая. Поэтому флуктуации этих физических величин принципиально неустранимы, и можно лишь ставить вопрос о том, какова относительная величина флуктуаций и каким образом мы можем на нее повлиять находящимися в нашем распоряжении средствами.

Имеется еще один источник принципиально неустранимого шума. Речь идет о дискретной природе электромагнитного излучения. Как известно, вещество излучает электромагнитную энергию дискретными порциями — квантами. Энергия кванта равна  $h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота. Квант электромагнитного излучения называется *фотоном*. В настоящее время в технике наблюдаются две ясные тенденции: к увеличению расстояний и к повышению частоты. Увеличение расстояний означает уменьшение потока энергии, а повышение частоты — «укрупнение» фотонов. Таким образом, при определенных условиях не только начинает ощущаться квантовая, фотонная структура излучения, но и обусловленный этой причиной шум может превзойти все остальные помехи. Канал, работающий при таких условиях, получил название *фотонного канала*.



## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАДИОПОМЕХ



Перейдем к вопросу о математическом описании помех. Помеху можно представить как случайную функцию времени. Случайную функцию дискретного времени называют обычно *случайной последовательностью*, случайную функцию непрерывного времени — *случайным процессом*. Случайные функции характеризуются своими распределениями. Применяются также числовые характеристики в виде моментов распределения. Обычно рассматриваются стационарные случайные процессы.

Среди всех случайных процессов особое место занимает процесс с нормальным распределением (гауссов процесс). Дело в том, что большое число известных нам из опыта случайных процессов — как раз гауссовы. Это обстоятельство объясняется известной теоремой Ляпунова, согласно которой распределение суммы независимых случайных величин (при некоторых достаточно широких условиях) сходится к нормальному независимо от характера распределения слагаемых. А многие процессы, наблюдаемые нами, представляют собой как раз совокупность множества отдельных независимых случайных актов. Так обстоит дело во всех явлениях, где мы имеем дело с множеством частиц или квантов. Гауссов процесс обладает также многими замечательными с математической точки зрения свойствами. Эти свойства подробно описаны в руководствах по теории вероятностей и теории случайных процессов. Отметим здесь лишь то очень важное для расчетов обстоятельство, что гауссов процесс полностью определяется своим смешанным моментом второго порядка.

### 1. Импульсные радиопомехи

Импульсные помехи представляют собой отдельные импульсы или регулярные, а чаще нестационарные, случайные последовательности отдельных видео- или радиоимпульсов (рис. 3.1).

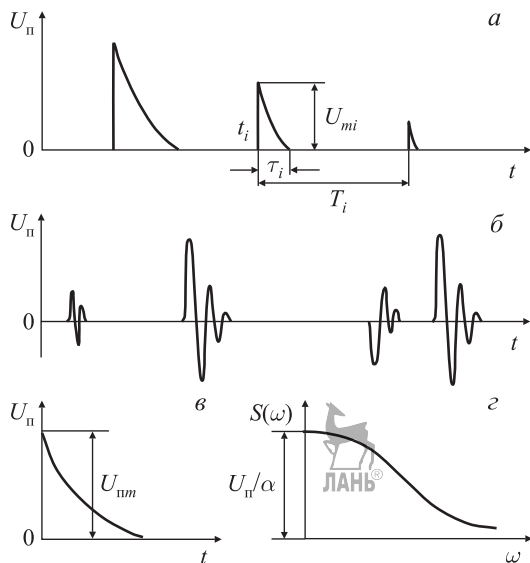


Рис. 3.1. Импульсные помехи

Обозначения на рисунке:  $t_i$  — время появления  $i$ -го импульса,  $\tau_i$  — его продолжительность,  $T_i$  — интервал следования,  $U_{\max i}$  — максимальное значение напряжения для  $i$ -го импульса. Для импульсных помех характерны следующие неравенства:

$$\tau_i \ll T_i, \quad T_i \gg \tau_{уст}, \quad \tau_i < \tau_c, \tag{3.1}$$

где  $\tau_{уст}$  — время установления цепи, на которую воздействует импульсная помеха;  $\tau_c$  — длительность элементарной посылки сигнала.

Импульсные помехи создаются в основном индустриальными и атмосферными источниками. Аналитическая запись реализации случайного импульсного процесса имеет вид

$$u_n(t) = \sum_{i=1}^n U_{ni} \varphi(t-t_i, \tau_i). \tag{3.2}$$

Параметры процесса могут быть как случайными, так и регулярными величинами. Неравенства (3.1) позволяют рассматривать импульсное воздействие как воздействие одиночного импульса, что принципиально отличается от флуктуационных помех, которые перекрываются. Типовая экспоненциальная форма импульсной по-

мехи показана на рис. 3.1, в соответствии с которым

$$u_n(t) = \begin{cases} U_{nm} e^{\alpha t} & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t < 0, \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, характеризующий скорость спада помех.

Спектральная плотность амплитуд импульсной помехи в соответствии с преобразованием Фурье:

$$S(j\omega) = \int_0^{\infty} u_n(t) e^{j\omega t} dt = \int_0^{\infty} U_{nm} e^{\alpha t} e^{-j\omega t} dt, \quad (3.4)$$

откуда

$$S(j\omega) = \frac{U_{nm}}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}, \quad (3.5)$$

т. е. для импульсной помехи характерен широкополосный спектр, убывающий с частотой. Чем меньше время действия помехи, т. е. чем больше коэффициент  $\alpha$ , тем спектр шире и равномернее по частоте. Ширина спектра импульсной помехи, как правило, больше, чем ширина спектра сигнала. Распределение амплитуд (в частности, для атмосферных помех) удовлетворительно описывается логарифмическим гауссовским законом

$$W(U_{nm}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp \left[ - \left( \frac{\lg^2 U_{nm}}{2\sigma_n^2} \right) \right], \quad \sigma_n^2 = \overline{\lg^2 U_{nm}}. \quad (3.6)$$

Распределение импульсов во времени близко к распределению Пуассона

$$F(k, \theta) = \left[ \frac{\theta/T_{cp}}{k!} \right] e^{-\theta/T_{cp}}, \quad (3.7)$$

где  $F(k, \theta)$  — вероятность появления  $k$  импульсов за время  $\theta$ ,  $T_{cp}$  — средний период следования импульсной помехи.

**Квазиимпульсная помеха** — последовательность импульсов, у которой  $T_i < \tau_{уст}$ , вследствие чего ее можно рассматривать как совокупность импульсных и флуктуационных помех, характеристики которой зависят от соотношения уровней импульсных и флуктуационных составляющих.

## 2. Узкополосные помехи

Немодулированные или модулированные, гармонические или квазигармонические колебания, основная часть мощности которых находится в узкой полосе частот, не превышающей ширины

спектра сигнала,

$$u_{\text{п}}(t) = \sum_k U_k \cos(k\omega t + \theta_k), \quad (3.8)$$

где  $U$ ,  $\theta$ ,  $\omega$  — случайные величины, называется сосредоточенными по спектру, или узкополосными.

Основной источник узкополосных помех — непреднамеренные системные помехи сторонних радиостанций и гетеродинов, обусловленные чрезмерной полосой спектра сигнала передатчика, недостаточными стабильностью его частоты и уровнем фильтрации гармоник мощных радиостанций, нарушением регламента рабочих частот, нелинейными процессами в пространстве распространения радиоволн. Кроме того, сосредоточенные по спектру помехи могут создаваться различными радиочастотными генераторами, которые используются в производственных процессах, а также возникать в самом приемнике (комбинационные помехи). Сосредоточенные по спектру помехи подразделяют на внутрисполосные, которые расположены в рабочей полосе РПДУ, и внеполосные. Статистические свойства сосредоточенных по спектру помех описывают их распределениями по уровню и частоте. Общепринятые модели: гауссовский и логарифмический гауссовский законы по уровню и равномерное распределение по частоте. Мешающее действие помех, сосредоточенных по спектру, сильнее всего проявляется в диапазоне кило- и декаметровых волн.

### 3. Флуктуационные радиопомехи

Флуктуационные помехи представляют собой хаотическую последовательность кратковременных импульсов, следующих друг за другом с интервалами намного меньшими, чем продолжительность переходных процессов в цепях, на которые воздействуют импульсы. Вследствие этого отдельные возмущения перекрываются, создавая непрерывный во времени случайный стохастический процесс. Типичные примеры флуктуационных помех — это внутренние и космические шумы, которые существуют в широком диапазоне частот. Флуктуационный характер имеют также суммарные колебания, создаваемые большим числом соразмерных по интенсивности составляющих, сосредоточенных по спектру или во времени (индустриальных, атмосферных, помех мешающих радиостанций). Статистические свойства флуктуационных помех позволяют рассматривать их как стационарный эргодический случайный процесс



с нулевым средним и гауссовским распределением. Так, одномерная плотность вероятностей мгновенных значений флуктуационной помехи

$$W(U_{пм}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{п}} \exp \left[ - \left( \frac{u_{п}^2}{2\sigma_{п}^2} \right) \right], \quad (3.9)$$

где дисперсия

$$\sigma_{п}^2 = \overline{U_{п}^2} = U_{эф}^2.$$

Характерная особенность флуктуационных помех — малая вероятность появления больших уровней помех. В этом смысле флуктуационную помеху называют также гладкой помехой (пик-фактор  $k_{п} = U_{\max}/U \approx 3-4$ ). Фаза флуктуационной помехи имеет равномерное распределение.

Спектральную характеристику флуктуационных помех оценивают зависимостью спектральной плотности мощности от частоты  $G_{п}(\omega)$ . В качестве модели широко используют *белый шум* — стационарный случайный процесс с равномерным спектром в очень широком диапазоне частот (до  $10^{12} \dots 10^{13}$  Гц). Два произвольных временных сечения белого шума, разделенных сколь угодно малым интервалом, некоррелированы, т. е. реализации такой помехи непредсказуемы, что существенно затрудняет борьбу с ней. В то же время при ограниченной полосе некоррелированными можно считать значения помехи, разделенные временным интервалом, который превышает интервал корреляции.

Флуктуационную помеху на выходе полосового фильтра можно рассматривать как узкополосный случайный процесс. При этом флуктуационную помеху представляют в виде квазигармонического колебания  $u_{п}(t) = U_{п}(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)]$  со случайными огибающей  $U_{п}(t)$  и фазой  $\theta(t)$ .

Следует отметить, что в отличие от импульсных и сосредоточенных по спектру помех устранить флуктуационные помехи принципиально невозможно. Кроме того, с учетом типов помех, воздействие которых оценивают, различают понятия помехоустойчивости и помехозащищенности:

*помехозащищенность* — способность радиосистемы (устройства) противостоять воздействию преднамеренных помех;

*помехоустойчивость* — способность радиосистемы (устройства) противостоять воздействию непреднамеренных помех.

Для радиосистемы передачи информации помехоустойчивость количественно определяют как способность с заданной вероятностью выделить сообщение из смеси сигнала и помехи, поступающей к месту приема. При этом под сигналом понимают физиче-

ский процесс, который несет сообщение, содержит информацию. Для радиосистемы извлечения информации (например, бинарного обнаружения) помехоустойчивость определяют как способность с заданной вероятностью выделить информацию из смеси сигнала и помехи. При этом информация содержится в самом факте присутствия сигнала. Обе задачи остаются неопределенными до тех пор, пока априорно не задана функция потерь: для системы передачи информации это вероятность ошибки или допустимая потеря качества (искажение сообщения); для системы обнаружения — оценка потерь, возникающих в случае ошибочного обнаружения (например, вероятность ложной тревоги) [5].

#### 4. Пассивные радиопомехи

Мы говорили до сих пор о шуме (аддитивной помехе) и основных его источниках. Обратимся теперь к мультипликативной помехе.

Природа этой помехи состоит в случайном изменении параметров канала передачи. Здесь уместно заметить, что при передаче сигнал подвергается искажениям вследствие того, что коэффициент передачи канала — не постоянное число. Свойства канала описываются частотными или временными характеристиками, определяющими так называемые линейные искажения. Кроме того, канал может вносить и нелинейные искажения, обусловленные нелинейностью тех или иных звеньев канала.

Как линейные, так и нелинейные искажения обусловлены известными характеристиками канала, а потому, по крайней мере, могут быть устранены путем надлежащей коррекции. Поэтому искажения следует четко отделить от действия помехи случайного характера, которая не может быть известна заранее.

Пример медленной мультипликативной помехи — изменение силы принимаемого сигнала, обусловленное интерференцией при многолучевом распространении (замирание). Быстрая мультипликативная помеха возникает при использовании шума в качестве переносчика.

Пассивные помехи — мультипликативные помехи, обусловленные изменением состояния канала связи, — подразделяются на внешние и внутренние. Первые возникают вследствие изменения условий распространения радио- или акустических волн в канале связи или свойств отражающих объектов. Проявляются они при локации протяженных целей, а также в радиосистемах переда-

чи информации, использующих ионо- или тропосферные каналы. Возможны также пассивные помехи от атмосферных образований. Искусственные маскирующие пассивные помехи создаются дипольными противорадиолокационными отражателями из металлизированных полосок и т. п. Плотность распределения вероятностей огибающей сигналов, отраженных от пространственно распределенных рассеивателей, описывают распределениями Рэлея, Райса или логарифмическим гауссовским законом.

Один из распространенных видов пассивных помех в каналах связи — замирание сигналов (фединг), обусловленное многолучевым распространением радиоволн, вследствие чего в месте приема возникает интерференция лучей. Замирания сильнее всего проявляются в дециметровом диапазоне. Различают быстрые замирания с частотой, близкой к частоте модуляции, и медленные, частота которых значительно ниже. Внутренние пассивные помехи обусловлены изменениями параметров элементов тракта, возникающими под влиянием внешней среды или вследствие изменения условий эксплуатации РЭС.



## РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕШАЮЩИХ РАДИОСИГНАЛОВ



### 1. Механизмы распространения помех

Распространение радиопомех, или мешающих сигналов (МС), между станциями различных систем радиосвязи может протекать по долгосрочным и краткосрочным механизмам [6, 7]. При этом каждому из механизмов распространения свойственны определенные особенности. Трассы распространения МС могут иметь самые произвольные характеристики. Поэтому проблема надежного прогнозирования уровней МС связана с трудностью учета большого разнообразия типов и параметров трасс и условий распространения на них. При этом в некоторые периоды времени на определенном расстоянии от передающей станции может преобладать тот или иной механизм распространения МС или же могут одновременно работать несколько механизмов. Особенности основных механизмов распространения МС рассмотрены ниже и проиллюстрированы на рис. 4.1 и 4.2.

*Прямая видимость.* Уровни МС могут значительно увеличиваться в короткие периоды времени из-за многолучевого распространения и фокусирующих эффектов, связанных со слоистой структурой атмосферы.

*Дифракция.* За прямой видимостью и при нормальных условиях эффекты дифракции обычно доминируют там, где обнаруживаются значительные уровни сигнала. Дифракционный прогноз должен достаточно точно учитывать округлость Земли, естественные и искусственные препятствия на трассе распространения МС.

*Тропосферное рассеяние.* Этот механизм определяет уровень фоновой помехи для трасс протяженностью более 100–150 км, когда дифракционное поле становится очень слабым. Тем не менее,

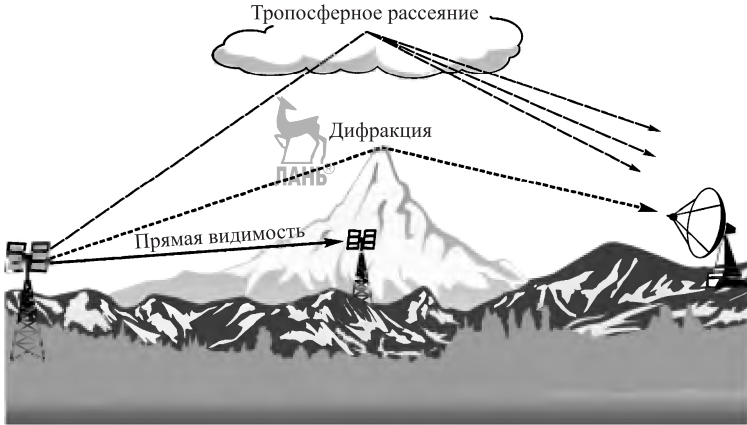


Рис. 4.1. Основные механизмы распространения помех

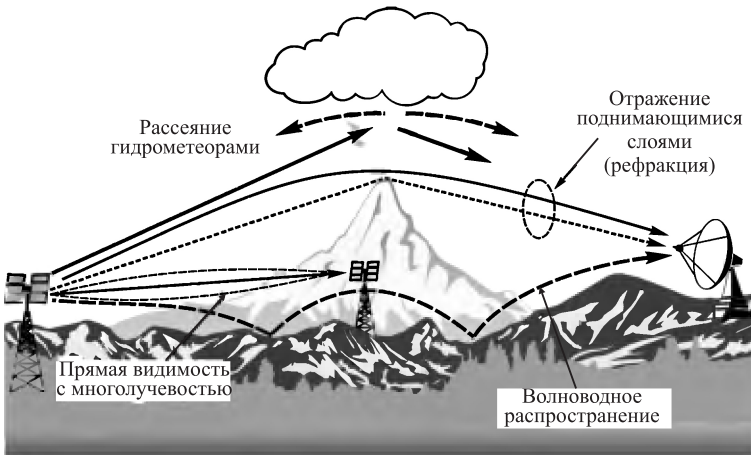


Рис. 4.2. Аномальные механизмы распространения помех

за исключением некоторых специальных случаев (земные станции спутниковых систем связи и станции радиолокационных систем), помехи из-за тропосферного рассеяния остаются на достаточно низком уровне.

*Поверхностный волновод.* Этот наиболее важный краткосрочный механизм распространения МС может вызывать высокие уровни сигнала на очень больших расстояниях (например, над поверхностью моря — более 500 км). Уровень таких МС при опре-

деленных условиях может превысить уровень, соответствующий распространению в свободном пространстве.

*Отражение и преломление поднимающимися слоями.* Отражение и/или преломление от слоев на высотах до нескольких сот метров имеет большое значение как механизм распространения, обуславливающий при благоприятной геометрии трассы уровни МС выше, чем при распространении за счет дифракции. Кроме того, влияние данного механизма распространения может быть существенным на больших расстояниях (вплоть до 250–300 км).

*Рассеяние гидрометеорами* может являться потенциальным источником МС между передатчиками наземных линий связи и земными станциями из-за фактически всенаправленного характера переизлучения радиоволн и может, следовательно, оказывать мешающее влияние по трассам, лежащим вне плоскости большого круга. Уровни таких МС могут быть значительными, так же как и при тропосферном рассеянии, только в специфических случаях (земные станции спутниковых систем связи или станции радиолокационных систем).

*Экранирование локальными неоднородностями* (строения, деревья и т. п.). Этот фактор при распространении МС играет защитную роль, поскольку в определенной степени понижает уровни МС в точке их приема.

## 2. Методы прогноза уровней мешающих сигналов

Методы прогноза уровней МС в диапазоне частот 0,7... 100 ГГц содержатся в Рекомендации МСЭ-Р Р.452. Ниже кратко рассматривается ее основное содержание, касающееся особенностей распространения МС и прогнозирования их уровней в различных условиях.

*Радиометеорологические данные.* В процедурах прогноза характеристик распространения МС применяются три радиометеорологических параметра:

$\Delta N$  — изменение среднего индекса рефракции атмосферы на 1 км высоты;

$P_0$  — процент времени, для которого преломляющее индексное превышение погрешности  $\Delta N > 100$  ед./км может ожидаться на первых 100 м высоты атмосферы;

$N_0$  — индекс рефракции на уровне поверхности моря.

*Радиоклиматические зоны*, для которых применимы методы прогнозирования Рекомендации Р.452 [7], приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

## Радиоклиматические зоны

Тип зоны	Код	Определение
Береговая зона	A1	Береговая земля и области берега, т.е. земля, смежная с морем, с высотой до 100 м относительно среднего уровня моря или воды, но ограниченная расстоянием 50 км от ближайшей морской зоны
Материки	A2	Вся земля, кроме береговой зоны и области берега, определенной выше как «береговая зона»
Моря	B	Моря, океаны и другие большие водные пространства (т.е. покрывающие территории не менее 100 км в диаметре)

*Эффективный радиус Земли.* Медианное значение параметра эффективного радиуса Земли  $k_{50}$  для трассы определяется из соотношения

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N}.$$

С учетом действительного радиуса Земли 6371 км медианное значение эффективного радиуса Земли  $a_{\text{eff}} = 6371 \cdot k_{50}$  км.

**2.1. Распространение мешающих сигналов в условиях прямой видимости.** Основные потери при передаче (дБ), не превышаемые для  $P_0$  % времени:

$$L_{b0}(p) = 92,5 + 20 \lg f + 20 \lg d + E_s(p) + A_g, \quad (4.1)$$

где  $f$  — частота (ГГц);  $d$  — длина трассы (км);  $E_s(p)$  — параметр коррекции, учитывающий эффекты многолучевого распространения и фокусировки (дБ):

$$E_s(p) = 2,6 (1 - e^{-d/10}) \lg(p/50); \quad (4.2)$$

$A_g$  — общее поглощение атмосферными газами (дБ) [7]:

$$A_g = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)]d, \quad (4.3)$$

$\gamma_0$ ,  $\gamma_w(\rho)$  — специфическое ослабление в сухом воздухе и водяных парах соответственно,  $\rho$  — плотность водяных паров.

**2.2. Распространение мешающих сигналов в условиях дифракции.** Основные потери при передаче (дБ), не превышаемые для  $p$  % времени:

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \lg f + 20 \lg d + L_d(p) + E_{sd}(p) + A_g, \quad (4.4)$$

где

$$L_d(p) = L_d(50\%) - F_i(p)[L_d(50\%) - L_d(\beta_0)]. \quad (4.5)$$

Здесь  $L_d(50\%)$  — дифракционные потери для  $p = 50\%$ , вычисляемые в соответствии с Рекомендацией P.526 [11] для  $a_{эфф}(50\%)$ ;  $L_d(\beta_0)$  — дифракционные потери для  $\beta_0$ , вычисляемые в соответствии с Рекомендацией P.526 [11];  $F_i(p)$  — параметр интерполяции, основанный на том, что дифракционные потери для процентов  $\beta_0 < p < 50\%$  подчиняются логнормальному закону распределения;

$$F_i = I(p/100)/I(\beta_0/100), \quad (4.6)$$

где  $I(x)$  — обратная кумулятивная нормальная функция. Подходящая аппроксимация для  $I(x)$ , которая с уверенностью может использоваться для  $x < 0,5$ , представлена в [7, приложение 4 к дополнению].

Следовательно, базовые потери при передаче, которые не превышены для времени  $p\%$ , применительно к трассе дифракции могут быть представлены следующим образом:

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \lg f + 20 \lg d + L_d(p) + E_{sd}(p) + A_g, \quad (4.7)$$

где  $E_{sd}(p)$  — поправка для эффектов многолучевого распространения волн между антеннами и препятствиями горизонта

$$E_{sd}(p) = 2,6 \left(1 - e^{-(d_{lt} + d_{lr})/10}\right) \lg \left(\frac{p}{10}\right) \text{ (дБ)}; \quad (4.8)$$

$d_{lt}$  и  $d_{lr}$  — расстояния (км) от передающей и приемной антенн до их радиогоризонтов;  $A_g$  — поглощение в газах, определенное по уравнениям (11) и (11а) из раздела 4 приложения.

Профили трасс «источник помехи — рецептор помехи» строятся с помощью топографических карт местности. Информация о профиле используется для классификации трасс, а также при расчетах дифракционного ослабления и ослабления при дальнем тропосферном распространении. Методика ориентирована на использование картографической информации (карт местности). Возможно ее использование и при отсутствии картографической информации.

Следует заметить, что в типичной обстановке геометрия препятствия столь сложна, что аналитически решить соответствующую задачу невозможно. Поэтому для расчета полей применяются приближенные методы. Обычно такой метод состоит в том, что рассеиватель представляют как совокупность простых элементов (полуплоскость, конус, сфера, клин) и рассматривают последовательность актов рассеяния на каждом из этих элементов. К недо-



статкам метода следует отнести высокую трудоемкость и недостаточное точное описание поверхности рассеивателя, особенно в местах стыков.

Описание рассеяния на каждой из элементарных форм составляет каноническую задачу дифракции. Известны решения для сравнительно малого количества канонических рассеивателей. Так в радиофизике решены следующие задачи дифракции плоских волн: на бесконечном круговом цилиндре; на сфере (решение Ми); на полуплоскости (метод Винера–Хопфа); на клине (решение в виде интеграла Зоммерфельда) и некоторые другие.

Во многих случаях дифракция на реальных препятствиях может быть представлена как дифракция на полуплоскостях. Однако моделирование затеняющего препятствия с протяженной вершиной с помощью полуплоскости обычно приводит к недооценке ослабления. Аппроксимация такого препятствия проводится с помощью диэлектрического цилиндра. При отсутствии подробной информации о рельефе (профиль трассы) используют формулы дифракции на сфере.

Другой способ решения задач дифракции основан на моделях, связанных с разбиением рассеивателя на элементарные участки (квадратные или треугольные пластины и др.). К недостаткам этого метода следует отнести очень высокую трудоемкость.

Из-за отсутствия аналитических решений задач дифракции широкое применение для расчетов уровней мешающих сигналов находят эмпирические методы, например модель Окумуры—Хаты, на которой основаны расчетные формулы рекомендации МСЭ-Р Р.1546.

**Примечание.** В 1968 г. Ю. Окумура (Y. Okumura) предложил эмпирическую модель распространения радиоволн, основанную на результатах измерений, проведенных в нескольких районах г. Токио (Япония). Первоначально модель представляла собой набор кривых распространения для различных частот излучения и типов местности. В 1980 г. М. Хата (M. Hata), исследуя модель Окумуры, аппроксимировал кривые распространения набором математических формул.

Аналогично в Рекомендациях МСЭ-Р Р.368, Р.370 расчет напряженности электромагнитного поля основывается на кривых распространения радиоволн, полученных также экспериментальным путем.

**2.3. Распространение мешающих сигналов путем тропосферного рассеяния.** При малых процентах времени трудно установить действительный тропосферный эффект распространения, поскольку имеются и второстепенные эффекты такого способа

распространения, такие как тропосферный волновод и отражения слоя. Вследствие этого допустим непрерывный прогноз основных потерь передачи в пределах процентов времени  $0,001\% < p < 50\%$ .

Основные потери при передаче  $L_{h\%}(p)_y$  (дБ), не превышаемые в течение  $p < 50\%$ , могут быть определены по формуле

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20 \lg d + 0,573\theta - 0,15N_0 + \\ + L_c + A_g - 10,1[-\lg(p/50)]^{0,7}, \quad (4.9)$$

где  $L_f$  — потери, зависящие от частоты:

$$L_f = 25 \lg f - 2,5[\lg(f/2)]^2; \quad (4.10)$$

$L_c$  — апертура для медианного переходного затухания (дБ):

$$L_c = 0,051e^{0,055(G_t+G_r)}; \quad (4.11)$$

$N_0$  — преломляющая способность поверхности уровня моря в центре трассы;  $G_t, G_r$  — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно;  $A_g$  — газовое поглощение, полученное с использованием значения  $\rho = 3 \text{ г/м}^3$  для всей длины трассы.

**2.4. Распространение мешающих сигналов за счет волновода и отражений от слоев.** Основные потери передачи  $L_{ba}(p)$  (дБ) для этого механизма распространения МС определяются формулой

$$L_{ba}(p) = A_f + A_d(p) + A_g, \quad (4.12)$$

где  $A_f$  — общие постоянные потери (за исключением потерь из-за локальных инфраструктурных неоднородностей),  $A_d(p)$  (дБ) — потери, обусловленные аномальными условиями распространения в пределах атмосферы, зависят от угла рассеяния. Общие постоянные потери определяются по формуле

$$A_f = 102,45 + 20 \lg f + 20 \lg(d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr}, \quad (4.13)$$

Здесь  $A_{st}, A_{sr}$  — дифракционные потери из-за экранирования местностью для передающей и приемной станций соответственно;  $A_{ct}, A_{cr}$  — параметры коррекции, связанные с волноводным распространением над морем для передающей и приемной станций соответственно.

**2.5. Экранирование мешающих сигналов локальными неоднородностями.** Этот механизм распространения МС является источником дополнительных дифракционных потерь в случае размещения антенн в окружении локальных инфраструк-

турных неоднородностей (строения, растительность и т. п.). Когда достоверная информация о таких неоднородностях отсутствует, потери из-за рассеяния на инфраструктурных неоднородностях не должны учитываться. Потери этого вида рассчитывают для номинальных параметров типовых неоднородностей (высоты и расстояние от неоднородности до антенны), данные по которым представлены в табл. 4.2.



Таблица 4.2

**Номинальные параметры типовых неоднородностей**

Категория неоднородности (по типу местности)	Номинальная высота неоднородности $h_a$ , м	Номинальное расстояние $d_k$ от неоднородности до антенны, км
Поля, парки, редко растущие деревья, сады, редко стоящие дома	4	0,1
Центр деревни	5	0,07
Лиственные леса	15	0,05
Хвойные леса	20	0,05
Тропические леса	20	0,03
Пригород	9	0,025
Пригород с плотной застройкой	12	0,02
Город	20	0,02
Город с плотной застройкой	25	0,02
Промышленная зона	20	0,05

Дополнительные потери из-за экранирования локальными неоднородностями

$$A_n = 10,25 \cdot e^{d_k} \left( 1 - \operatorname{tgh} \left[ 6 \left( \frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33, \quad (4.14)$$

где  $d_k$  — расстояние (км) от номинальной точки мешающих отражений до антенны;  $h$  — высота антенны (м) над местным уровнем земли;  $h_a$  — номинальная высота мешающих отражений (м) над местным уровнем земли.

**2.6. Распространение мешающих сигналов из-за рассеяния гидрометеорами.** Модель этого механизма распространения МС строится исходя из двух фундаментальных предположений:

- рассеяние происходит только в пределах ячейки дождя, имеющей цилиндрическое поперечное сечение, диаметр которой зави-



сит от интенсивности дождя в ячейке. В пределах ячейки дождя интенсивность дождя и, следовательно, отражаемость постоянны вплоть до высоты дождя, среднее значение которой зависит от географической широты, но со специфическим распределением относительно этого значения. Выше высоты дождя принимается линейное уменьшение отражаемости;

- ослабление происходит как внутри, так и снаружи ячейки, но только ниже высоты дождя. Внутри ячейки принимается хорошо известная зависимость специфического ослабления от интенсивности дождя.

С помощью данной модели можно вычислять уровни МС как на длинных трассах (более 100 км), так и на коротких (вплоть до нескольких километров) с произвольными углами возвышения на обоих терминалах, а также на трассах с боковым рассеянием (т. е. вне плоскости большого круга) и на трассах распространения МС через боковой лепесток ДНА одной станции и главный лепесток ДНА другой станции.

Зависимость диаметра дождевой ячейки  $d_c$  (км) от интенсивности дождя  $R$  (мм/ч)

$$d_c = 3,3R^{-0,08} \quad (4.15)$$

Ячейка центрируется на точке пересечения ДНА взаимодействующих станций, как показано на рис. 4.3.

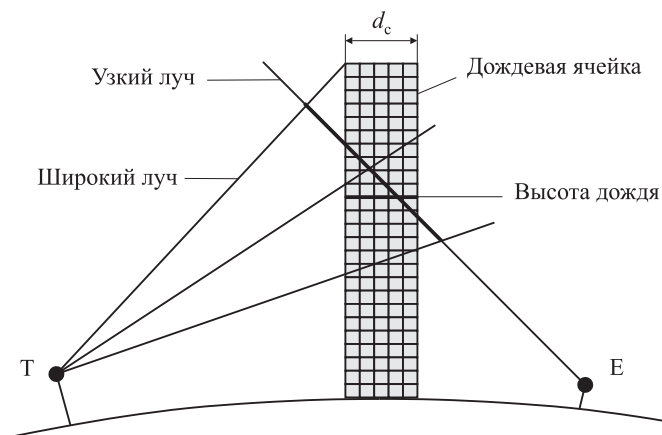


Рис. 4.3. Геометрия трассы распространения МС из-за рассеяния радиоволн дождевой ячейкой

Потери передачи  $L_R$  (дБ) из-за рассеяния гидрометеорами для данной интенсивности дождя  $R$  и высоты дождя  $h_R$  могут быть выражены соотношением

$$L = 197 - 10 \lg \eta_E + 20 \lg d_T - 20 \lg f - 10 \lg z_R + 10 \lg S + A_g - 10 \lg C. \quad (4.16)$$

Здесь  $\eta_E$  — к.п.д. антенны (коэффициент  $< 1$ ) «земной» станции;  $d_T$  — расстояние между станциями через объем рассеяния (км);  $f$  — частота (ГГц);  $z_R$  — коэффициент преломляющей способности при рассеянии в дожде для единицы объема ( $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ):

$$z_R = 400R(p)^{1.4}, \quad (4.17)$$

$R(p)$  — интенсивность точечных дождевых осадков, которая превышена для рассматриваемого процента времени  $p$  (при времени интегрирования 1 мин);  $S$  — поправка на отклонение от рассеяния в дожде по закону Рэлея на частотах, превышающих 10 ГГц (предполагается, что выше высоты дождя  $S = 0$ ):

$$10 \lg S = R(p)^{0.4} \cdot 10^{-3} \cdot \left[ 4(f - 10)^{1.6} \left( \frac{1 + \cos \varphi_s}{2} \right) \right] + \quad (4.18)$$

$$+ 5(f - 10)^{1.7} \left( \frac{1 - \cos \varphi_s}{2} \right) \quad (\text{дБ}) \quad \text{для } f > 10 \text{ ГГц},$$

$$10 \lg S = 0 \quad \text{для } f \leq 10 \text{ ГГц}; \quad (4.19)$$

$\varphi_s$  — угол рассеяния, т.е. угол между направлениями распространения волн, падающих на объем рассеяния и выходящих из него (например,  $\varphi_s = 0$  для рассеяния в прямом направлении и  $\varphi_s = 180^\circ$  для рассеяния в обратном направлении);  $A_g$  — затухание в газах за счет поглощения в кислороде и водяных парах, рассчитанное по формулам Рекомендации МСЭ-Р Р.676 для плотности водяного пара  $7,5 \text{ г/м}^3$ ;  $C$  — функция преобразования эффективного рассеяния:

$$C = g_{T0} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} g_T(h) \zeta(h) A_T(h) A_E(h) \frac{1}{\sin \epsilon_E} dh, \quad (4.20)$$

где  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  — минимальная и максимальная высоты (пределы интегрирования);  $g_{T0}$  — коэффициент усиления антенны по оси наземной станции;  $g_T$  — направленность антенны (коэффициент  $< 1$ ) наземной станции относительно рассматриваемой точки интегрирования (элемента объема);  $\epsilon_E$  — угол места луча земной станции;

$\zeta(h)$  — функция преломляющей способности в объеме рассеяния, нормированная на  $z_R$ :

$$\zeta(h) = 1 \quad \text{для } h \leq \text{высоты дождя}, \quad (4.21)$$

$$\zeta(h) = 10^{-0.65(h-h_R)} \quad \text{для } h > \text{высоты дождя}, \quad (4.22)$$

$h_R$  — средняя высота дождя, определенная в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Р Р.839 (см. приложение, приложение 3 к дополнению);  $A_T$ ,  $A_E$  — затухание в дожде (коэффициенты  $< 1$ ) для трасс от наземной станции до точки интегрирования и обратной трассы соответственно. Для вычисления  $A_T$  и  $A_E$  необходима информация, представленная в дополнении 3.

Соотношение (4.16) допускает учет поляризации для наихудшего случая. Для менее сильного взаимодействия будут иметь место дополнительные потери (см. приложение, приложение 3 к дополнению).

Для того чтобы вычислить суммарные потери при передаче, необходимо провести интегрирование вдоль той части луча антенны земной станции, которая находится либо в пределах дождевой ячейки, либо в пределах луча антенны наземной станции (показано темным цветом на рис. 4.3).

Предполагается, что луч антенны наземной станции имеет гауссову форму. Интегрирование распространяется до точек уровня  $-18$  дБ диаграммы направленности антенны относительно максимального коэффициента усиления, рассчитанного вдоль узкого луча. Чтобы получить аналитическое выражение для интеграла, диаграмма направленности антенны величины  $T$  аппроксимирована гауссовой функцией следующим образом:

$$g_T(h) = \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{h - h_0}{\Delta h_{1/2}} \right)^2 \right], \quad (4.23)$$

где  $\Delta h_{1/2}$  — разность высот этих двух точек на оси антенны земной станции, где функция направленности антенны наземной станции опускается до 0,5 (точка уровня  $-3$  дБ).

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Традиционными методами обеспечения ЭМС РЭС являются организационные меры, применяемые при их планировании и направленные на обеспечение необходимого частотно-территориального разнеса между РЭС, которые могут создавать друг другу помехи. Однако эти методы, будучи пассивными, не позволяют достичь высокой эффективности использования радиочастотного спектра (РЧС). Высокая эффективность использования РЧС может быть достигнута путем применения активных методов — разного рода устройств подавления помех.

В основе расчетов эффективности применения технических мер обеспечения ЭМС при воздействии различных помех в системах связи лежит понятие защитного отношения.

*Защитное отношение* — минимально допустимое (или пороговое) отношение мощности полезного сигнала (ПС) к мощности мешающего сигнала (МС) на входе приемника, которое позволяет получить на его выходе заданное качество полезного сигнала:

$$Q_{\text{мдоп}} = \left( \frac{P_{\text{свх}}}{P_{\text{мвх}}} \right)_{\text{доп}}, \quad (5.1)$$

где  $P_{\text{свх}}$  и  $P_{\text{мвх}}$  — мощности полезного и мешающего сигналов на входе приемника.

Требуемая величина защитных отношений зависит от характеристик модуляции ПС и МС, а также от разности их несущих частот.

На величину защитных отношений влияют следующие факторы:

- частотый разнос между несущими ПС и МС;
- вид и глубина их модуляции;
- способ обработки сигнала;
- метод его кодирования;

• характеристики приемника (чувствительность, избирательность и др.).

Обычно защитные отношения выражаются в децибелах в соответствии с выражением

$$q_{\text{мдоп}} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{свх}}}{P_{\text{мвх}}}_{\text{доп}} \right). \quad (5.2)$$

Защитные отношения наиболее часто используются в качестве критерия ЭМС аналоговых и цифровых систем радиосвязи. Заданное качество приема полезного сигнала в присутствии помех обеспечивается, если выполняется неравенство

$$q_{\text{сп}} \geq q_{\text{мдоп}}, \quad (5.3)$$

где  $q_{\text{сп}}$  — отношение сигнал/помеха на входе приемника (дБ),  $q_{\text{мдоп}}$  — требуемое защитное отношение (дБ).

Помехи, возникающие при работе систем связи в общих либо соседних полосах частот, могут быть как непрерывными, так и импульсными. Непрерывные помехи возникают, в частности, на магистральных (радиорелейных и спутниковых) линиях связи. В течение многих лет на таких линиях применялись системы связи с частотным уплотнением (ЧУ) и частотной модуляцией (ЧМ). Эти системы используются и в настоящее время, хотя в последние десятилетия все большее распространение получают системы связи с цифровыми видами модуляции. Типичный вид непрерывных помех в системах с ЧМ — это помехи от аналогичных систем, также использующих ЧМ. Так, например, на прием сигналов на станциях радиорелейных систем либо на земных станциях спутниковых систем связи могут воздействовать помехи от других станций, которые работают в тех же полосах частот. Для подавления помех в этих случаях могут использоваться как одноканальные, так и многоканальные компенсаторы помех (КП). Универсальные КП — это устройства, которые формируют копию помехи и вычитают эту копию из принимаемого сигнала, содержащего полезную и мешающую компоненты. Такие компенсаторы позволяют бороться с самыми разнообразными мешающими сигналами, включая сигналы, вид модуляции которых совпадает с видом модуляции полезного сигнала.

В тех случаях, когда невозможно применить традиционные методы обеспечения ЭМС радиосистем с помощью их территориального или частотного разнеса, КП позволяют организовать одновременную работу взаимно воздействующих радиолиний. К данной



проблеме примыкает проблема повышения эффективности использования РЧС путем создания систем передачи в общей полосе частот нескольких ЧМ сигналов, с помощью которых передаются независимые сообщения. Применение таких систем позволило бы повысить пропускную способность каналов связи.

Другая важная проблема борьбы с помехами — подавление импульсных помех (ИП), создаваемых системам радиорелейной и спутниковой связи средствами радиолокации и радионавигации. Во многих случаях уровень импульсной помехи оказывается столь значительным, что приводит к блокированию приемника и к «стиранию» пораженных ИП участков полезного сигнала (ПС). В этих случаях эффективны методы подавления ИП и восстановления пораженных участков ПС путем экстраполяции либо интерполяции. Поскольку на практике длительность ИП часто бывает весьма короткой по сравнению с временем корреляции полезного сообщения, частота повторения незначительна, а уровень вполне достаточен для надежного обнаружения помех, то во многих случаях конструкцию устройств подавления ИП можно значительно упростить.

В России существенные проблемы защиты от ИП возникли на станциях тропосферных радиорелейных линий связи (ТРРЛ) сети «Север», которая обеспечивает связью районы Крайнего Севера. Качество приема сигналов на этих станциях заметно снижалось из-за действия ИП со стороны наземных радиолокаторов отечественной системы воздушной радионавигации (ВРН). Подобная проблема возникла также и на земных приемных станциях отечественной спутниковой системы непосредственного телевизионного вещания «Экран», которые испытывали помехи со стороны самолетных радиосистем ближней навигации.

Проблемы подавления непрерывных и импульсных помех возникают и в других системах связи, и для их решения были разработаны разнообразные методы [1]. Следует подчеркнуть, что при разработке структуры устройств подавления помех и оценке их эффективности важную роль играют созданная академиком В. А. Котельниковым теория потенциальной помехоустойчивости и основанная на ней теория оптимального приема сигналов с непрерывными видами модуляции. Эти теории дают инженерам мощный инструмент для создания оптимальных устройств и позволяют определить пределы эффективности подавления помех, которая может быть достигнута при применении этих устройств.

**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ,  
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НОРМЫ  
НА РАДИОПОМЕХИ**

Информация по нормам на параметры ЭМС РЭС содержится в государственных стандартах, общероссийских нормах, Регламенте радиосвязи, рекомендациях Международного консультативного комитета по радио (МСЭ-Р), рекомендациях и стандартах Международного электротехнического комитета (МЭК). Разнообразие нормативно-технической информации о параметрах ЭМС РЭС создает определенные трудности в правильном выборе норм и их применении [27].

В 1981 г. в СССР был введен ГОСТ 23872-79 «Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Номенклатура параметров и классификация технических характеристик», которым определены параметры ЭМС РЭС. Нормирование параметров радиоизлучений и приема РЭС, влияющих на их ЭМС, осуществляется для повышения эффективности использования радиочастотного спектра, обеспечения качественной беспомеховой работы РЭС всех назначений, особенно при использовании этими средствами одних и тех же полос частот, а также для снижения уровней радиопомех приему населением передач телевизионного и звукового радиовещания.

*Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств* [26] определяется способностью этих средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации при воздействии непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим средствам. Параметры радиоизлучений и приема, влияющие на ЭМС РЭС (далее — параметры ЭМС РЭС), были определены ГОСТ 23872-79, согласно которому радиоизлучения передающих устройств подразделяются на основные, нежелательные и излучения помимо антенны.

*Основное радиоизлучение* включает следующие параметры: мощность, которая может быть выражена поверхностной плотностью потока мощности или напряженностью электрического поля; допустимое отклонение частоты; необходимую ширину полосы частот; занимаемую ширину полосы частот; контрольную ширину полосы частот; вид и параметры модуляции (манипуляции); ослабление излучения на несущей (боковой) частоте (полосе частот).

*Нежелательные радиоизлучения* подразделяются на побочные, внеполосные и шумовые. Их значения определяются параметрами:

*побочные* — мощностью, напряжением, поверхностной или спектральной плотностью потока мощности, напряженностью электромагнитного поля, относительным уровнем, номером гармоники, порядком субгармоники, порядком комбинационного радиоизлучения или радиоколебания, порядком интермодуляции;

*внеполосные* — поверхностной плотностью потока мощности, напряженностью электрического поля, спектральной плотностью потока мощности, отстоящей на  $Y$  Гц от рабочей частоты, шириной полосы частот на уровне  $X$  дБ;

*шумовые* — спектральной плотностью потока мощности или напряженностью электрического поля шума на частоте, отстоящей на  $Y$  Гц от рабочей частоты, относительным уровнем.

Восприимчивость радиоприемного устройства (ГОСТ 23872-79) подразделяют на восприимчивость к электромагнитному полю, воздействующему через антенну и фидер или помимо антенны, и восприимчивость по цепям питания и управления. К первой группе относят амплитудно-частотную характеристику приемника, характеристику частотной избирательности по побочным каналам приема и характеристики частотной избирательности по блокированию, интермодуляции и перекрестным искажениям.

Параметры ЭМС РЭС нормируются при определенных условиях — методах измерений параметров, применяемой измерительной аппаратуре, температуре и влажности воздуха и др. При этом из всех перечисленных параметров нормируют наиболее влияющие на ЭМС РЭС. Кроме выполнения требований по электромагнитной совместимости эти параметры должны обеспечить выполнение других технических требований.

Нормы на параметры ЭМС РЭС разрабатываются на основании проводимых в министерствах и ведомствах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Нормы содержат все необходимые и достаточные для их применения данные в соответствии с назначением нормируемых параметров. Они увязаны

с правилами, методами и требованиями других нормативно-технических документов в этой области. Численные значения норм устанавливаются с учетом возможности их технической реализации и экономических затрат. Учитываются также аналогичные нормы международных организаций. Общероссийские нормы обязательны для соблюдения всеми министерствами и ведомствами, а также предприятиями и организациями федерального, регионального и местного подчинения при заказах, разработке, изготовлении, приобретении (в том числе за границей) и эксплуатации радиоэлектронных средств всех назначений.

Однако в области ЭМС РЭС, как и в других областях, основными нормативно-техническими документами являются государственные стандарты. При их разработке на конкретные типы радиоэлектронной аппаратуры учитывают требования общероссийских норм на соответствующие параметры ЭМС РЭС и промышленные радиопомехи. Проверка этой аппаратуры на соблюдение установленных норм проводится в соответствии с государственными стандартами, в которых численные значения норм устанавливаются не ниже требований норм. В свою очередь общероссийские нормы разрабатываются с учетом норм, установленных международными организациями. Наибольшее количество норм на параметры ЭМС РЭС разрабатывается в исследовательских комиссиях МККР в виде рекомендаций, которые являются основой для международного регулирования использования радиочастотного спектра, а также для принятия технических решений на международных административных радиоконференциях. Решения этих конференций учитываются в государственных стандартах и общероссийских нормах.

Существующая система нормирования параметров ЭМС РЭС, как отечественная, так и международная, направлена на максимально возможное ужесточение параметров ЭМС приемников и передатчиков. При этом не учитывается связь между требованиями к параметрам ЭМС РЭС и условиями их эксплуатации в конкретной электромагнитной обстановке (ЭМО) в точке приема. В то же время очевидно, что параметры ЭМС РЭС не должны быть ниже некоторого уровня, гарантирующего заданное качество приема полезного сигнала в типовой ЭМО. Более высокие требования к параметрам ЭМС РЭС приводят к неоправданным экономическим затратам на проектирование и производство РЭС. Кроме того, существующая система нормирования параметров ЭМС не позволяет делать сравнение различных типов РЭС по критерию

их ЭМС, а также оценивать количественно значение каждого из параметров ЭМС на улучшение общей ЭМО. Обычно нормируются следующие параметры приемников и передатчиков, определяющих их ЭМС с другими РЭС [27].

1. Нормы на допустимые отклонения частоты радиопередатчиков, на ширину основного канала приема, на коэффициент прямоугольности.

2. Нормы на уровни побочных излучений радиопередающих устройств:

- уровни гармоник основного колебания;
- уровни комбинационных, паразитных и интермодуляционных побочных колебаний.

3. Нормы на ширину полосы радиочастот и на внеполосные спектры излучений радиопередающих устройств.

4. Нормы на излучаемую радиопередающим устройством мощность.

5. Нормы на параметры избирательности радиоприемников:

- избирательность по соседним каналам приема;
- избирательность по побочным каналам приема (зеркальный, по промежуточной частоте, по комбинационным составляющим).

Таблица 6.1

Радиопередающие устройства	Радиоприемные устройства	Антенные устройства
Основное излучение	Реальная чувствительность приемника	Коэффициент усиления антенны
Внеполосные излучения	Восприимчивость по блокированию	Диаграмма направленности в азимутальной и вертикальной плоскостях
Побочные излучения комбинационного характера	Восприимчивость по перекрестной модуляции	Потери в антенно-фидерном тракте
Побочные излучения типа высших гармоник и субгармоник	Восприимчивость по побочным каналам приема (зеркальному, по промежуточной частоте и т. п.)	
Интермодуляционные излучения	Восприимчивость по интермодуляции	
Шумовые излучения		

#### 6. Нелинейные эффекты:

- блокирование (коэффициент блокирования, динамический диапазон по блокированию, восприимчивость по блокированию);
- перекрестные искажения (коэффициент по перекрестным искажениям, динамический диапазон по перекрестным искажениям, восприимчивость по перекрестным искажениям);
- интермодуляция (коэффициент интермодуляции, динамический диапазон по интермодуляции, восприимчивость по интермодуляции).

#### 7. Нормы внешней помехозащищенности.

Основные характеристики ЭМС РЭС, необходимые для проведения расчетов, приведены в табл. 6.1.

Более подробная информация о нормировании приемных и передающих устройств с точки зрения их ЭМС приведена в справочнике [27].





## Список литературы

1. *Белокопытов Г.В., Ржевкин К.С., Белов А.А., Логгинов А.С., Кузнецов Ю.И., Иванов И.В.* Основы радиофизики / Под ред. проф. А. С. Логгинова. — М., 1996. 256 с.
2. *Харкевич А.А.* Борьба с помехами. Изд. 2-е, испр. — М.: Наука, 1965. 275 с.
3. *Бодров В.В., Исаков М.В., Пермяков В.А.* Внешняя электромагнитная совместимость и антенны / Под ред. доц. В. И. Суркова. — М.: МЭИ, 2005. 82 с.
4. *Афинов В.* Состояние и перспективы развития средств РЭБ армии США // Зарубежное военное обозрение. 1989. №5. С. 20–27.
5. Радиотехника. Энциклопедия / Под ред. Ю. Л. Мазора, Е. А. Мачусского, В. И. Правды. — М.: Додэка-XXI, 2002. 943 с.
6. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем / Под ред. проф. М. А. Быховского. — М., 2002. 256 с.
7. Recommendation ITU-R P.452-11. 04-2003. Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz.
8. Методика расчета статистических характеристик мешающих сигналов в диапазоне 60 МГц — 40 ГГц для географических и климатических условий различных регионов России: НИР «Помеха-2». — М.: НИИР, 1996. 85 с.
9. Дополнение к методике статистических характеристик мешающих сигналов в полосе частот 60 МГц — 40 ГГц. — М.: ГКРЧ, 2002.
10. *Перфилов О.Ю.* Особенности проблемы ЭМС комплексов РЭС // Антенны. 2004. Вып. 6 (85). С. 84–88.
11. Recommendation ITU-R P.526-8. Propagation by Diffraction.
12. *Азаров Г.И., Перфилов О.Ю., Тележный Б.Г.* Проблема использования радиочастотного спектра системами связи в условиях конверсии

- // Технологии и средства связи. Телекоммуникации Московского региона. 2000. №3 (июль). С. 22–24.
13. Клименко А.Я., Панов Б.А., Свешников В.Ф. Контактные помехи радиоприему. — М.: Воениздат, 1979. 116 с.
  14. ГОСТ В 27317-87. Радиоприемники. Метод контроля уровней излучения гетеродинов. 1987.
  15. Поповский В.В., Левчук П.Ф. Проблема ЭМС и ее решение средствами антенной техники. — Л.: ВАС, 1987. 80 с.
  16. Уайт Д.Р.Ж. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Вып. 1 / Пер. с англ. под ред. А.И. Сапгира. М.: Советское радио, 1977. 348 с.
  17. Виноградов Е.М., Винокуров В.И., Харченко И.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. — Л.: Судостроение, 1986. 264 с.
  18. Отчет МСЭ-Р М.739. Помехи, обусловленные продуктами интермодуляции, в сухопутной подвижной службе на частотах между 25 и 1000 МГц. Исследовательская программа 7С/8.
  19. Recommendation ITU-R M.1072. Interference Due to Intermodulation Products in the Land-Mobile Service between 25 and 3000 MHz (Question ITU-R 99/8).
  20. Recommendation ITU-R SM.1134. Intermodulation Interference Calculations in the Land-Mobile Service (Question ITU-R 44/1).
  21. Методы расчета мощности помехи в соседних полосах и каналах: Отчет №654-3 // Отчеты МККР. Приложение к т. 1. Дюссельдорф: МСЭ, 1990. С. 222–234.
  22. Быховский М.А., Яшин В.Д. Методика определения защитных отношений при воздействии на приемник помех, действующих по несомещенному каналу // Труды НИИР. 1989. №4. С. 5–10.
  23. Гребеник В.А., Панченко В.Е. Методика расчета дополнительных потерь при автоматизированной оценке ЭМС РЭС с целью оптимального выбора радиочастот // Электросвязь. 1997. №1. С. 23–25.
  24. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. — М.: Наука, 1975.
  25. Перфилов О.Ю. Метод расчета коэффициентов развязок между антеннами в сосредоточенных комплексах средств радиосвязи // Электросвязь. 2001. №8. С. 28–30.
  26. Перфилов О.Ю. Исследование взаимных влияний проволочных антенн // Антенны. 2002. Вып. 8–9 (63–64). С. 27–31.
  27. Бадалов А.Л., Михайлов А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. — М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
  28. ГОСТ 25803-91. Радиопомехи промышленные от оборудования и объектов. Нормы и методы испытания. 1991.



29. ГОСТ 27317-87. Радиоприемники. Метод контроля уровней излучения гетеродинов. 1987.
30. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. — М. ГИТТЛ, 1953.

### Дополнительная литература

31. *Вакин С.А., Шустов Л.Н.* Основы радиоэлектронной борьбы. Ч. 1. — М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1998.
32. *Атражев М.П., Ильин В.А., Марьин Н.П.* Борьба с радиоэлектронными средствами. — М.: МО РФ, 1972.
33. *Гуржеянц Т.В., Дербин Е.А., Крылов Г.О., Кубанков А.Н.* Информационные операции современности: Учеб. пособие. — М.: ВАГШ, 2004. 286 с.
34. *Куприянов А.И., Сахаров А.В.* РЭС в информационном конфликте. — М.: Вузовская книга, 2003.
35. Методика расчета уровней мешающих сигналов в полосе частот 400 МГц — 20 ГГц. — М.: ГКРЧ СССР, 1980.
36. Методики для определения норм ЧТР и защитных отношений для РЭС гражданского назначения (научно-технический отчет по НИР «Каталог-2»). — М.: НИИР, 1989.
37. Рек. МСЭ-Р Р.525. Расчет ослабления в свободном пространстве.
38. Рек. МСЭ-Р Р.368. Кривые распространения земных волн в полосе частот от 10 кГц до 30 МГц.
39. Рек. МСЭ-Р Р.370. Кривые распространения ОВЧ и УВЧ в полосе частот от 30 МГц до 1000 МГц.
40. Рек. МСЭ-Р Р.372. Радиошум.
41. Рек. МСЭ-Р Р.676. Ослабление в атмосферных газах.
42. Рек. МСЭ-Р Р.833. Ослабление в растительности.
43. Рек. МСЭ-Р F.838. Модель погонного ослабления радиоволн в дожде, используемая в методах прогнозирования.
44. Рек. МСЭ-Р Р.839. Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования.
45. Рек. МСЭ-Р F.840. Ослабление в облаках и тумане.
46. МСЭ. Отчет 882. Рассеяние осадками.
47. Рек. МСЭ-Р V.573. Словарь терминов по радиокommunikациям.
48. МСЭ. Справочник по методам прогноза распространения радиоволн для оценки помех и исследований совмещения. Рабочая группа ЗМ. Исследовательская комиссия №3.
49. *Хелстром К.* Статистическая теория обнаружения сигналов. — М.: Иностранная литература, 1963.
50. *Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Чернышова Т.И.* Электромагнитная совместимость и помехозащищенность РЭС: Учеб. пособие. Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 92 с.

---

## Приложение

### **РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-Р Р.452-10. ПРОЦЕДУРА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СВЧ-ПОМЕХ МЕЖДУ СТАНЦИЯМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ 0,7 ГГц**



(Вопрос МСЭ-Р 208/3)  
(1970–1974–1978–1982–1986–1992–1994–1995–1997–1999–2001)

Ассамблея сектора радиосвязи МСЭ,  
*учитывая,*

а) что из-за перегрузки радиоспектра частотные диапазоны должны совместно использоваться различными наземными службами, системами одной и той же службы, системами наземных служб и служб Земля–космос;

б) что для удовлетворительного сосуществования систем, использующих совместно одни и те же диапазоны частот, необходимы точные и надежные процедуры прогнозирования распространения помех, которые приемлемы для всех заинтересованных сторон;

в) что необходимо, чтобы процедуры прогнозирования распространения помех соответствовали условиям работы в «наихудший месяц» и целям доступности;

г) что необходимы методы прогнозирования для всех типов трасс в любых зонах мира,

*рекомендует*

использовать процедуру прогнозирования СВЧ-помех, приведенную в дополнении, для оценочных вычислений имеющих потерь распространения из-за помех между станциями на поверхности Земли для частот выше приблизительно 0,7 ГГц.

---

Компьютерные программы (REC452 и SCAT), связанные с процедурами прогнозирования, описанными в настоящей рекомендации, можно найти на веб-сайте МСЭ-Р в части, относящейся к работе Исследовательской комиссии по радиосвязи №3.

# Дополнение



## 1. Введение

Перегрузка радиочастотного спектра вызвала необходимость совместного использования многих частотных диапазонов различными радиослужбами и операторами схожих радиослужб. Чтобы обеспечить удовлетворительное сосуществование затронутых наземных служб и служб Земля — космос, необходимо уметь прогнозировать с достаточной точностью потенциальную возможность возникновения помех между ними, используя процедуры и модели прогнозирования, которые являются приемлемыми, точными и надежными для всех заинтересованных сторон.

Между станциями на поверхности Земли, а также между ними и станциями в космосе может существовать множество видов и комбинаций трасс помех, и для каждой ситуации требуются методы прогнозирования. Настоящее приложение посвящено одному из наиболее важных комплексов проблем, связанных с помехами, т.е. относится к ситуациям, когда существует возможность возникновения помех между СВЧ-радиостанциями, расположенными на поверхности Земли.

Процедура прогнозирования применима к радиостанциям, работающим в частотном диапазоне приблизительно от 0,7 до 30 ГГц. Метод включает дополнительный набор моделей распространения, которые гарантируют, что прогнозы охватывают все существенные механизмы распространения помех, которые могут иметь место. Методы анализа радиометеорологических и топографических особенностей трассы предоставлены в таком виде, что прогнозы могут быть подготовлены для любой практической трассы длиной не более 10 000 км помех в рамках рассматриваемой процедуры.

## 2. Механизмы распространения помех

Существует ряд механизмов распространения СВЧ-помех; преобладание того или иного механизма зависит от климата, радиочастоты, интересующего процента времени влияния, длины и топографии трассы. В любой момент времени могут присутствовать один или несколько механизмов. Основными механизмами распространения помех являются следующие:

*Прямая видимость* (рис. 1). Наиболее простая ситуация распространения помех, когда трасса распространения в пределах

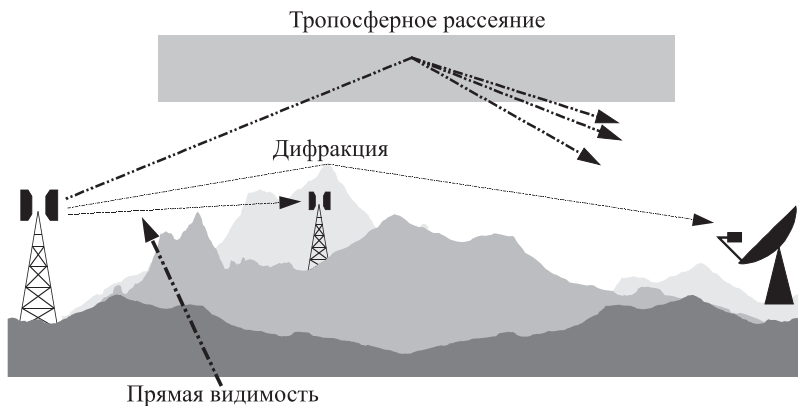
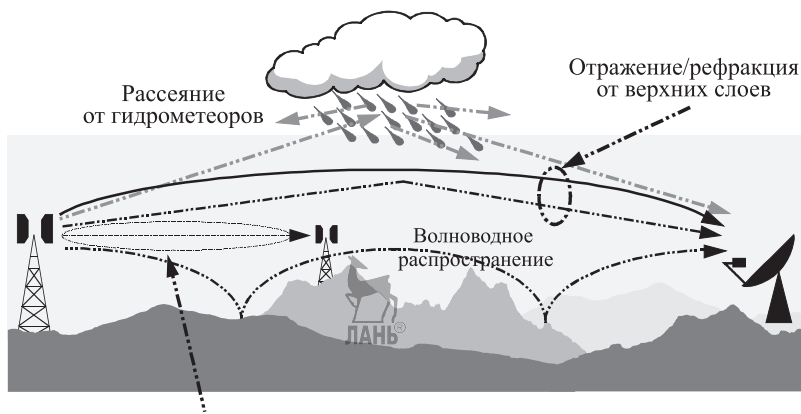


Рис. 1. Механизмы долгосрочного распространения помех

прямой видимости существует при нормальных (т.е. хорошо перемешанных) атмосферных условиях. Однако может появиться дополнительная сложность, если дифракция подтрассы вызывает небольшое увеличение уровня сигнала, превышающее нормально ожидаемое. К тому же на всех трассах, кроме самых коротких (т.е. длиннее приблизительно 5 км), уровни сигнала часто могут значительно возрастать на малые промежутки времени за счет эффекта многолучевого распространения волн и фокусирующего эффекта, обусловленных расслоением атмосферы (стратификация) (рис. 2).

*Дифракция* (рис. 1). Вне прямой видимости и в нормальных условиях эффекты дифракции обычно доминируют везде, где существуют значительные уровни сигнала. Если для службы аномальные краткосрочные проблемы не важны, то точность, с которой может быть промоделирована дифракция, обычно определяет концентрацию систем, которая может быть достигнута. Возможность прогнозирования дифракции способствует получению более точных оценок при учете вариантов гладкой поверхности Земли, дискретных препятствий и местности с неровным (аморфным) рельефом.

*Тропосферное рассеяние* (рис. 1). Этот механизм определяет «фоновый» уровень помех для более длинных трасс (например, превышающих 100–150 км), на которых дифракционное поле становится очень слабым. Однако, за исключением отдельных случаев, включающих высокочувствительные земные станции или ис-



Линия прямой видимости с усилением сигнала вследствие многолучевого распространения

Рис. 2. Аномальные (краткосрочные) механизмы распространения помех

точники помех очень высокой мощности (например, радиолокационные системы), уровень помех при тропосферном рассеянии будет несущественным.

*Приповерхностное (приземное) волноводное распространение* (рис. 2). Это наиболее важный краткосрочный механизм распространения помех над водой и в плоских прибрежных сухопутных районах; он может вызывать высокие уровни сигнала на значительных расстояниях (свыше 500 км от моря). При определенных условиях подобные сигналы могут превзойти эквивалентный уровень распространения в «свободном пространстве».

*Отражение и рефракция в верхних слоях* (рис. 2). Обработка отражения и/или рефракции от слоев на высотах до нескольких сотен метров имеет большую значимость, поскольку подобные механизмы позволяют сигналам очень эффективно преодолевать дифракционные потери на местности в ситуациях с благоприятной геометрией трассы. С другой стороны, влияние может быть значительным на достаточно больших расстояниях (до 250–300 км).

*Рассеяние от гидрометеоров* (рис. 2). Рассеяние от гидрометеоров может быть потенциальным источником помех между передатчиками наземных линий и земными станциями, поскольку они могут функционировать фактически всенаправленно, и поэтому будут подвержены воздействию со стороны трассы помех большого круга. Однако уровни мешающих сигналов достаточно низкие и обычно не представляют существенной проблемы.

Основная проблема в прогнозировании помех (которая, безусловно, является общей для всех процедур прогнозирования распространения в тропосфере) — трудность в обеспечении унифицированного последовательного комплекса практических методов, охватывающих широкий диапазон расстояний и временных процентов, т.е. для реальной атмосферы, в которой статистически преобладающий один механизм постепенно переходит в другой, поскольку метеорологические условия и/или условия трассы меняются. Данный уровень сигнала, особенно в переходных областях, может иметь место для суммарного процента времени, который представляет собой сумму процентов времени при различных механизмах. Подход в этой процедуре заключается в преднамеренном отделении прогнозирования уровней помех от различных механизмов распространения до того момента, где они могут быть объединены в общий прогноз для трассы.

### 3. Прогнозирование помех при ясном небе (при отсутствии гидрометеоров)

**3.1. Общие комментарии.** Данная процедура, касающаяся механизмов распространения при ясном воздухе, описанных выше в разд. 2, использует пять моделей распространения. К ним относятся:

- *прямая видимость* (включая усиление сигнала вследствие эффекта многолучевого распространения и фокусирующего эффекта);
- *дифракция* (охватывающая случаи гладкой поверхности Земли, местности с неровным рельефом и подтрассы);
- *тропосферное рассеяние*;
- *аномальное распространение* (волноводное распространение и отражение/рефракция от слоев);
- *изменение коэффициента усиления по высоте в мешающих отражениях* (когда уместно).

В зависимости от типа трассы, определенного анализом профиля трассы, для обеспечения требуемого прогнозирования основных потерь при передаче используется одна или несколько перечисленных моделей.

**3.2. Получение прогноза. План процедуры.** Для достижения прогнозирования необходимы следующие шаги:

**Шаг 1. Входные данные.** Базовые входные данные, необходимые для процедуры, приведены в табл. 1. Остальная необходимая


**Базовые входные данные**

Параметр	Предпочтительное разрешение	Описание
$f$	0,01	Частота (ГГц)
$p$	0,001	Необходимый процент (проценты) времени, для которого не превышены вычисленные базовые потери при передаче
$\varphi_t, \varphi_r$	0,001	Широта станции (градусы)
$\psi_t, \psi_r$	0,001	Долгота станции (в градусах)
$h_{tg}, h_{rg}$	1	Высота центра антенны над уровнем земли (м)
$h_{ts}, h_{rs}$	1	Высота центра антенны над средним уровнем моря (м)
$G_t, G_R$	0,1	Коэффициент усиления антенны в направлении горизонта вдоль трассы большого круга (дБ)

*Примечание.* Для станций, излучающих помехи и испытывающих воздействие помех: t — источник помех, r — станция, испытывающая воздействие помех.

информация получена из этих данных по ходу выполнения процедуры.

**Шаг 2. Выбор среднегодового прогноза или прогноза наихудшего месяца.** Выбор годового прогноза или прогноза «наихудшего месяца» обычно продиктован качественными целями (т.е. рабочими характеристиками и доступностью) для испытывающей воздействие помех радиосистемы на принимающем конце помеховой трассы. Поскольку помеха часто является двусторонней проблемой, должны быть оценены два комплекса качественных целей для определения направления наихудшего случая, на котором основываются минимально допустимые базовые потери при передаче. В большинстве случаев качественные цели формулируются в терминах процентов «любого месяца», и, следовательно, требуются данные для наихудшего месяца.

Модели прогнозирования распространения определяют годовое распределение базовых потерь при передаче. В среднегодовых прогнозах проценты времени  $p$ , для которых не превышены конкретные значения базовых потерь при передаче, используются непосредственно в процедуре прогнозирования. Если необходимо

прогнозирование для среднего наихудшего месяца годовой эквивалентный процент времени  $p$  процента времени наихудшего месяца  $p_w$  должен быть вычислен для широты центра трассы  $\varphi$  согласно выражению

$$p = 10 \left( \frac{\lg(p_w) + \lg(G_L) - 0,186\omega - 0,444}{0,816 + 0,078\omega} \right) \%, \quad (1)$$

где  $\omega$  — доля трассы, проходящая над водой (см. табл. 3);

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1,1 + |\cos 2\varphi|^{0,7}} & \text{для } |\varphi| \leq 45^\circ, \\ \sqrt{1,1 - |\cos 2\varphi|^{0,7}} & \text{для } |\varphi| > 45^\circ. \end{cases} \quad (1a)$$

При необходимости значение  $p$  должно быть ограничено условием  $12p \geq p_w$ .

Заметим, что широта  $\varphi$  (в градусах) считается положительной в Северном полушарии.

Вычисленный результат будет представлять базовые потери при передаче для требуемого процента времени  $p_w$  % наихудшего месяца.

**Шаг 3: Радиометеорологические данные.** Процедура прогнозирования использует три радиометеорологических параметра для описания вариативности фона и аномальных условий распространения в различных районах по всему миру:

$\Delta N$  (N/км) — вертикальный градиент среднего коэффициента преломления радиоволн в нижнем километре атмосферы — обеспечивает данные, на основании которых рассчитывается соответствующий эффективный радиус Земли для профиля трассы и анализа препятствий, вызывающих дифракцию. На рис. 4 и 5 представлены соответственно мировые карты среднегодовых значений  $\Delta N$  и максимальных месячных средних значений для прогнозов на наихудший месяц. Заметим, что  $\Delta N$  — положительная величина в данной процедуре;

$\beta_0$  (%) — процент времени, для которого может ожидать вертикальный градиент коэффициента рефракции, превышающей 100 N-ед./км в нижних 100 м атмосферы, — используется для оценки относительного изменения полностью разработанного аномального распространения на рассматриваемой широте. Значение  $\beta_r$ , которое нужно использовать, соответствует широте центра трассы;

$N_0$  (N-единицы) — преломляющая способность поверхности уровня моря — используется только в модели тропосферного рассеяния как мера вариативности механизма тропосферного рассеяния. На рис. 6 представлены годовые значения для  $N_0$ . Поскольку



ку вычисление трассы рассеяния основано на геометрии трассы, определяющейся годовым значением и значением наихудшего месяца  $\Delta N$ , отсутствует дополнительная необходимость в значениях  $N_0$  для наихудшего месяца. Правильные значения  $\Delta N$  и  $N_0$  заданы значениями центра трассы, поскольку они получены по соответствующим картам.

Точечное изменение аномального распространения  $\beta_0$  (%) для расположения центра трассы определяется с помощью формулы

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi|+1,67} \mu_1 \mu_4 \% & \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ, \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 \% & \text{для } |\varphi| > 70^\circ. \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi$  — широта центра трассы (градусы).

Параметр  $\mu_1$  зависит от доли прохождения трассы над сушей (удаленной от моря или прибрежной) и водой и вычисляется по формуле

$$\mu_1 = [10^{-d_{tm}/(16-6,6\tau)} + [10^{-(0,496+0,354\tau)}]5]^{0,2}, \quad (3)$$

где значение  $\mu_1$  следует ограничить условием  $\mu_1 < 1$ , при

$$\tau = \left[ 1 - e^{-(4,12 \cdot 10^{-4} \times d_{tm}^{2,41})} \right], \quad (3a)$$

где  $d_{tm}$  — самая протяженная непрерывная сухопутная (удаленная от моря плюс прибрежная) часть трассы большого круга (км);  $d_{lm}$  — самая протяженная непрерывная удаленная от моря часть трассы большого круга (км) (радиоклиматические зоны, которые необходимо использовать для расчета  $d_{tm}$  и  $d_{lm}$ , определены в табл. 2);

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0,935+0,0176|\varphi|) \lg \mu_1} & \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ, \\ 10^{0,3 \lg \mu_1} & \text{для } |\varphi| > 70^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

*Крупные внутренние водоемы.* «Крупным» внутренним водоемом, который нужно рассматривать как лежащий в зоне В, считается водоем, имеющий площадь не менее 7800 км<sup>2</sup>, за исключением площади рек. Острова в таких водоемах должны быть включены в вычисления площади как вода, если более 90% их территории возвышаются над средним уровнем воды менее, чем на 100 м. Острова, которые не удовлетворяют данным критериям, при вычислении площади воды должны расцениваться как суша.

*Большие области внутренних озер или влажной земли.* Большие внутренние области, площадью более 7800 км<sup>2</sup>, содержащие множество мелких озер и сеть рек, должны быть заявлены адми-

Таблица 2

## Радиоклиматические зоны

Тип зоны	Код	Определения
Прибрежная суша	A1	Прибрежная суша и береговые зоны, т. е. суша, соседняя с морем до высоты 100 м относительно среднего уровня моря или воды, ограниченная расстоянием 50 км от ближайшей морской зоны. Там, где точные данные о высоте 100 м не доступны, может быть использовано приблизительное значение, т. е. 300 футов
Суша, удаленная от моря	A2	Вся суша, кроме береговых и прибрежных областей, обозначенных выше как «прибрежная суша»
Море	B	Моря, океаны и другие крупные (т. е. соответствующие кругу, диаметром не менее 100 км в диаметре) водоемы

нистрациями как «прибрежная» зона A1, если область включает более 50 % воды, и более 90 % суши находится на высоте менее 100 м над средним уровнем воды.

Климатические области, принадлежащие зоне A1, — крупные внутренние водоемы, большие внутренние озера и области влажной земли — трудно определить однозначно. Поэтому администрациям рекомендуется регистрировать в Бюро радиосвязи (BR) МСЭ те области в пределах их территориальных границ, которые они хотят определить как принадлежащие к одной из вышеуказанных категорий. При отсутствии зарегистрированных данных наоборот, все области суши будут рассматриваться принадлежащими к зоне A2.

Для максимальной согласованности результатов различных администраций настоятельно рекомендуется проводить вычисления с помощью средств ЭВМ (универсальных или персональных) на основании цифровой карты мира МСЭ-Р (IDWM), которую можно приобрести в Бюро радиосвязи МСЭ.

*Эффективный радиус Земли.* Коэффициент среднего эффективного радиуса Земли  $k_{50}$  для трассы определяется формулой

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N}. \quad (5)$$

Если принять действительный радиус Земли равным 6371 км, то среднее значение эффективного радиуса Земли может быть определено по формуле

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \text{ (км)}. \quad (6)$$

**Шаг 4. Анализ профиля трассы.** Значения ряда параметров, необходимых для вычислений и связанных с трассой, как показано в табл. 3, должны быть получены на основе первоначального

Таблица 3

**Значения параметров, полученные из анализа профиля трассы**

Тип трассы	Параметр	Определение
Загоризонтная	$d$	Длина трассы большого круга (км)
Загоризонтная	$d_{lt}, d_{lr}$	Расстояние от передающей и приемной антенн до их радиогоризонтов (км)
Загоризонтная	$\theta_t, \theta_r$	Углы места для передачи и приема соответственно (мрад)
Загоризонтная	$\theta$	Угловая длина трассы (мрад)
Все	$h_{ts}, h_{rs}$	Высота центра антенны над средним уровнем моря (м)
Загоризонтная	$h_{te}, h_{re}$	Эффективные высоты антенн над уровнем земли (м) (определения указаны в приложении 2)
Все	$d_b^*$	Совокупная длина участков трассы над водой (км)
Все	$\omega^*$	Доля общей трассы над водой $\omega = d_b/d, \quad (7)$ где $d$ — длина трассы большого круга (км), рассчитанная по формуле (42). Для полностью сухопутной трассы $\omega = 0$
Загоризонтная	$d_{ct}^*$	Расстояние от первой станции (источник помех) до берега вдоль трассы помех большого круга (км)
Загоризонтная	$d_{cr}^*$	Соответствующее расстояние для второй (подверженной воздействию помех) станции (км)

\* Эти параметры необходимы только когда трасса имеет один или более участков, пролегающих над водой.

анализа профиля трассы, основанного на значении  $a_e$  (6). Информация о выводе, построении и анализе профиля трассы представлена в приложении 2 к настоящему дополнению. После анализа профиля трасса будет отнесена соответственно к одной из трех геометрических категорий, указанных в табл. 4.

*Примечание.* Определение значений для дополнительных, связанных с профилем параметров, необходимых для вычисления дифракции, описано в Рекомендации МСЭ-Р Р.526.

Таблица 4

**Классификация трасс помех  
и требования к моделям распространения**

<b>Классификация</b>	<b>Необходимые модели</b>
Прямая видимость с учетом размера первой зоны Френеля	Прямая видимость (разд. 4.2) Потери на мешающие отражения (разд. 4.5, когда необходимо)
Прямая видимость с дифракцией подтрассы, т. е. нахождение местности в первой зоне Френеля	Прямая видимость (разд. 4.2) Дифракция (разд. 4.3) Потери отражения (разд. 4.3, когда необходимо)
Загоризонтные	Дифракция (разд. 4.3 для $d \leq 200$ км) Волноводное распространение/отражение от слоев (разд. 4.5 для $d > 20$ км) Тропосферное рассеяние (разд. 4.4) Потери на мешающие отражения (разд. 4.5, когда необходимо)

**Шаг 5. Вычисление прогнозов распространения.** В табл. 4 указаны модели распространения, соответствующие каждому типу трассы. Необходимые уравнения для прогнозов индивидуальных механизмов распространения можно найти в разделах, указанных в таблице. Для формирования общего прогноза прогнозы по индивидуальным механизмам распространения должны быть рассчитаны и скомбинированы, как показано в табл. 5. После реализации вышесказанного для каждого из необходимых процентов времени прогноз считается законченным.

Точные значения для  $d_{ct}$  и  $d_{cr}$  имеют смысл только при условии  $d_{ct}, d_{cr} \leq 5$  км. Если в одном или обоих случаях расстояния явно превышают 5 км, то необходимо отметить условие  $> 5$  км. Некоторые трассы помех действительно потребуют детальной оценки этих двух параметров.



Таблица 5

## Методы получения общих прогнозов

Тип трассы	Необходимые действия
Прямая видимость	<p>Прогноз достигается сложением потерь, представленных моделями прямой видимости и потерь из-за мешающих отражений, т. е.</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + A_{ht} + A_{hr} \text{ (дБ)}, \quad (8a)$ <p>где <math>L_{b0}(p)</math> — прогнозируемые базовые потери при передаче, которые не превышены для значения <math>p</math> % времени, рассчитанного с помощью модели прямой видимости; <math>A_{ht}</math>, <math>A_{hr}</math> — соответствующие дополнительные потери из-за усиления по высоте при мешающих отражениях в данной местности</p>
Прямая видимость с дифракцией подтрассы	<p>Прогноз достигается сложением потерь, представленных моделями прямой видимости и дифракции (подтрассы) и моделями мешающих отражений, т. е.</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + L_{ds}(p) + A_{hl} + A_{hr} \text{ (дБ)}, \quad (8b)$ <p>где <math>L_{ds}(p)</math> — прогноз для <math>p</math> % времени, обусловленный элементом дифракционных потерь подтрассы в рамках общей модели дифракции</p>
Загоризонтная	<p>Общий прогноз может быть достигнут с помощью следующего вспомогательного алгоритма:</p> $L_b(p) = -5 \lg \left( 10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bd}} + 10^{-0,2L_{ba}} \right) + A_{ht} + A_{hr} \text{ (дБ)}, \quad (8c)$ <p>где <math>L_{bs}(p)</math>, <math>L_{bd}(p)</math> и <math>L_{ba}(p)</math> — индивидуальные прогнозируемые базовые потери при передаче для <math>p</math> % времени, заданные моделями тропосферного рассеяния, дифракции и волноводного распространения/отражения от слоев соответственно.</p> <p><i>Примечание.</i> Там, где не предложена модель для трассы (поскольку не соблюдены условия, приведенные в табл. 4), соответствующий элемент в выражении (8с) должен быть опущен</p>

## 4. Модели распространения при ясном небе (при отсутствии гидрометеоров)

**4.1. Общие сведения.** Чтобы рассчитать компоненты общего прогноза, в процедуре, приведенной выше, используется одна или более отдельных моделей распространения. Эти модели распространения приведены в настоящем разделе.

**4.2. Распространение в пределах прямой видимости (включая краткосрочные эффекты).** Для условий прямой видимости базовые потери при передаче  $L_{b0}(p)$ , которые не превышены для процента времени  $p\%$ , представляются выражением

$$L_{b0}(p) = 92,5 + 20 \lg f + 20 \lg d + E_s(p) + A_g \text{ (дБ)}, \quad (9)$$

где  $E_s(p)$  — поправка для эффекта многолучевого распространения и фокусирующего эффекта

$$E_s(p) = 2,6(l - e^{-d/10}) \lg(p/50) \text{ (дБ)}, \quad (10)$$

$A_g$  — суммарное поглощение в газах (дБ)

$$A_g = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)]d \text{ (дБ)}, \quad (11)$$

где  $\gamma_0$ ,  $\gamma_w(\rho)$  — погонное затухание вследствие воздействия сухого воздуха и водяных паров, соответственно. Эти величины можно найти по формулам в Рекомендации МСЭ-Р Р.676;  $\rho$  — плотность водяных паров

$$\rho = 7,5 + 2,5\omega \text{ (г/м}^3\text{)}, \quad (11a)$$

$\omega$  — доля суммарной трассы над водой.

**4.3. Дифракция.** Считается, что вариативность времени избыточных потерь вследствие механизма дифракции является результатом изменений в вертикальном градиенте атмосферной преломляющей способности радиоволн в основной массе атмосферы, т. е. предполагается, что с уменьшением процента времени  $p$  возрастает коэффициент эффективного радиуса Земли  $k(p)$ . Считается, что этот процесс действителен для  $\beta_0 \leq p \leq 50\%$ . Для процентов менее  $\beta_0$  на уровни сигнала воздействуют скорее механизмы аномального распространения, чем характеристики преломляющей способности атмосферы. Следовательно, для значений  $p$  менее  $\beta_0$  величина  $k(p)$  имеет значение  $k(\beta_0)$ .

Значение эффективного радиуса Земли, которое необходимо использовать при вычислении дифракции, вычисляется по формуле

$$a(p) = 6371 \cdot k(p) \text{ (км)}, \quad (12)$$



где  $p$  может принимать значения 50 или  $\beta_0$ ,  $k(50\%)$ : представлен выражением (5),  $k(\beta_0) = 3$ .

Избыточные дифракционные потери (ИДП)  $L_d(p)$  могут быть определены по методу, описанному в разд. 4.5 Рекомендации МСЭ-Р Р.526, в сочетании с логарифмически нормальным распределением потерь между 50% и  $\beta_0$  следующим образом:

для  $p = 50\%$  ИДП  $L_d(50\%)$  вычисляются по методу, описанному в Рекомендации МСЭ-Р Р.526 для медианного эффективного радиуса Земли  $a(50\%)$ ;

для  $p \leq \beta_0$  ИДП  $L_d(\beta_0)$  вычисляются по методу, описанному в Рекомендации МСЭ-Р Р.526 для медианного эффективного радиуса Земли  $a(\beta_0)$ , с использованием клиновидных препятствий, идентифицированных для 50%-го (медианного) случая;

для  $\beta_0 < p < 50\%$  ИДП  $L_d(p)$  представляются выражением

$$L_d(p) = L_d(50\%) - F_i(p)[L_d(50\%) - L_d(\beta_0)], \quad (13)$$

где  $F_i$  — коэффициент интерполяции, основанный на логарифмически нормальном распределении дифракционных потерь относительно диапазона  $\beta_0 < p < 50\%$ :

$$F_i = I(p/100)/I(\beta_0/100), \quad (13a)$$

где  $I(x)$  — обратная кумулятивная нормальная функция. Подходящая аппроксимация для  $I(x)$ , которая с уверенностью может использоваться для  $x < 0,5$ , представлена в приложении 4 к настоящему дополнению.

*Примечание.* Подраздел 4.5 Рекомендации МСЭ-Р Р.526 может быть использован для вычисления потерь дифракции по трассе в пределах прямой видимости с препятствием подтрассы либо по загоризонтной трассе.

Следовательно, базовые потери при передаче, которые не превышены для времени  $p\%$ , применительно к трассе дифракции могут быть представлены следующим образом:

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \lg f + 20 \lg d + L_d(p) + E_{sd}(p) + A_g \text{ (дБ)}, \quad (14)$$

где  $E_{sd}(p)$  — поправка для эффектов многолучевого распространения волн между антеннами и препятствиями горизонта,

$$E_{sd}(p) = 2,6 \left(1 - e^{-(d_{it} + d_{ir})/10}\right) \lg \left(\frac{p}{50}\right) \text{ (дБ)}, \quad (14a)$$

$A_g$  — поглощение в газах, определенное по формулам (11) и (11a).

#### 4.4. Тропосферное рассеяние (примечания)

*Примечание 1.* При процентах времени намного ниже 50 % трудно отделить истинное тропосферное рассеяние от других вторичных явлений распространения, которые вызывают подобные эффекты. Поэтому модель «тропосферного рассеяния», принятая в настоящей рекомендации, является эмпирическим обобщением концепции тропосферного рассеяния, которая также охватывает и вторичные эффекты распространения. Это позволяет создавать последовательный непрерывный прогноз базовых потерь при передаче в диапазоне процентов времени  $p$  от 0,001 до 50 %. Таким образом, связываются модели волноводного распространения и отражения от слоев при малых процентах времени с настоящим «видом рассеяния», свойственным слабому остаточному полю, которое превышено для наибольшего процента времени.

*Примечание 2.* Данная модель прогнозирования тропосферного рассеяния получена для прогнозирования помех и неприменима в вычислениях условий распространения выше 50 % времени, затрагивающих аспекты работы загоризонтных систем радиорелейной связи.

Базовые потери при передаче вследствие тропосферного рассеяния  $L_{bs}(p)$  (дБ), которые не превышены для любого процента времени  $p$  ниже 50 %, представляются формулой

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20 \lg d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\lg(p/50)]^{0,7} \text{ (дБ)} \quad (15)$$

где  $L_f$  — потери, зависящие от частоты:

$$L_f = 25 \lg f - 2,5 [\lg(f/2)]^2 \text{ (дБ)}; \quad (14a)$$

$L_c$  — апертура для медианного переходного затухания (дБ):

$$L_c = 0,051 e^{0,055(G_t + G_r)} \text{ (дБ)}; \quad (14b)$$

$N_0$  — преломляющая способность поверхности уровня моря в центре трассы, полученная из рис. 6;  $A_g$  — газовое поглощение, полученное по формуле (11) с использованием значения  $\rho = 3 \text{ г/м}^3$  для всей длины трассы.

#### 4.5. Волноводное распространение/отражение от слоев.

Прогнозирование базовых потерь при передаче  $L_{ba}(p)$  (дБ), имеющих место в периоды аномального распространения (волноводное



распространение и отражение от слоев), основано на следующем выражении:

$$L_{ba}(p) = A_f + A_d(p) + A_g \text{ (дБ)}, \quad (16)$$

где  $A_f$  — сумма фиксированного переходного затухания (исключая потери из-за мешающих отражений от местности) между антеннами и структурой аномального распространения в атмосфере:

$$A_f = 102,45 + 20 \lg f + 20 \lg(d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \text{ (дБ)}, \quad (17)$$

$A_{st}$ ,  $A_{sr}$  — потери дифракции при экранировании места для излучающих и испытывающих воздействие помех станций соответственно:

$$A_{st,sr} = \begin{cases} 20 \lg [1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2}] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} \text{ (дБ)} \\ \text{для } \theta''_{t,r} > 0, \\ 0 \text{ для } \theta''_{t,r} \leq 0, \end{cases} \quad (18)$$

где

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \text{ (мрад)}, \quad (18a)$$

$A_{ct}$ ,  $A_{cr}$  — поправки на соединение волноводов над морской поверхностью для излучающих и испытывающих воздействие помех станций соответственно:

$$A_{ct,cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct,cr}^2} [1 + \operatorname{tgh}(0,07(50 - h_{ts,rs}))] \text{ (дБ)} \\ \text{для } \omega \geq 0,75, \quad d_{ct,cr} \leq d_{lt,lr}, \quad d_{ct,cr} \leq 5 \text{ км}, \quad (19)$$

$$A_{ct,cr} = 0 \text{ для всех других условий.} \quad (19a)$$

Необходимо отметить ограниченную совокупность условий, при которых требуется использование уравнения (19).

Далее в (16)  $A_d(p)$  — процент времени и величина потерь, зависящие от углового расстояния в рамках механизма аномального распространения:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \text{ (дБ)}, \quad (20)$$

где  $\gamma_d$  — погонное затухание:

$$\gamma_d = 5 \cdot 10^{-5} \cdot a_e f^{1/3} \text{ (дБ/мрад)}; \quad (21)$$

$\theta'$  — угловое расстояние (исправленное, где необходимо (через уравнение (22a)), для учета поправки на применение модели экранирования места в уравнении (18)):

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \text{ (мрад)}, \quad (22)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} \text{ (мрад)} & \text{для } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{t,l,r} \text{ (мрад)}, \\ 0,1 d_{t,l,r} \text{ (мрад)} & \text{для } \theta_{t,r} > 0,1 d_{t,l,r} \text{ (мрад)}; \end{cases} \quad (22a)$$

$A(p)$  — вариативность процента времени® (интегральная функция распределения):

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \cdot 10^{-3} d) \lg \left( \frac{p}{\beta} \right) + 12 \left( \frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \text{ (дБ)}, \quad (23)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \lg \beta)^{1,012}} \cdot e^{-(9,51 - 4,8 \lg \beta + 0,198 (\lg \beta)^2) \cdot 10^{-6} \cdot d^{1,13}}, \quad (23a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \text{ (\%)}, \quad (24)$$

$\mu_2$  — поправка для геометрии трассы:

$$\mu_2 = \left[ \frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha. \quad (25)$$

(значение  $\mu_2$  не должно превышать 1),

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau, \quad (25a)$$

где  $\varepsilon = 3,5$ ,  $\tau$  определено выражением (3a), а значение  $\alpha$  не должно быть меньше  $-3,4$ ;  $\mu_3$  — поправка на неровность местности:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } h_m \leq 10 \text{ (м)}, \\ \exp[-4,6 \cdot 10^{-5} (h_m - 10)(43 + 6 d_i)] & \text{для } h_m > 10 \text{ (м)}, \end{cases} \quad (26)$$

$$d_i = \min(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \text{ (км)}; \quad (26a)$$

$A_g$  — суммарное поглощение в газах, определенное по формулам (11) и (11a).

Остальные величины определены в табл. 1 и 2 и в приложении 2 к настоящему дополнению.

#### 4.6. Дополнительные потери из-за мешающих отражений

**4.6.1. Общие сведения.** Значительный выигрыш в смысле защиты от помех может быть получен из дополнительных дифракционных потерь, полезных для антенн, которые подвержены мешающим отражениям от земной поверхности или наземных предметов (здания, растительность и т. д.). Эта процедура позволяет принимать во внимание потери из-за указанных мешающих отражений на одном или обоих концах трассы в ситуациях, когда характер отражений известен. Там, где есть сомнения относительно среды отражений, эти дополнительные потери не учитываются.

Потери из-за мешающих отражений обозначены как  $A_{ht}$  и  $A_{hr}$  (дБ) для станций, излучающих и испытывающих помехи, соответственно. Возможная дополнительная защита зависит от высоты и поэтому моделируется с учетом усиления по высоте и нормируется для номинальной высоты мешающих отражений. Соответствующие номинальные высоты действительны для определенной области типов мешающих отражений.

Поправки применяются ко всем рассматриваемым в настоящей рекомендации прогнозам распространения при ясном небе (при отсутствии гидрометеоров), т. е. ко всем видам распространения и процентам времени.

**4.6.2. Категории мешающих отражений.** В табл. 6 указаны категории мешающих отражений (или напочвенного покрова), определенные в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Р Р.1058, для которых может быть применена поправка усиления по высоте. Номинальная высота мешающих отражений  $h_a$  (м) и расстояние от антенны  $d_k$  (км) представляют собой, как считается, «средние» значения, наиболее характерные для данного типа мешающих отражений. Однако модель поправки была разработана умеренной (консервативной) из-за неопределенности фактической высоты, имеющей место в конкретных условиях. Там, где параметры мешающих отражений известны более точно, они могут быть заменены значениями из табл. 6.

Номинальные высоты и расстояния, представленные в табл. 6, приближаются (почти соответствуют) к характерной высоте  $H_c$  и ширине просвета  $G_c$ , определенных в Рекомендации МСЭ-Р Р.1058. Однако используемая здесь модель оценки дополнительных потерь вследствие экранирования мешающими отражениями (напочвенным покровом) задумана умеренной (консервативной).

**4.6.3. Модель защиты с учетом высоты.** Дополнительные потери из-за защиты от мешающих отражений от местности представлены выражением

$$A_h = 10,25 \cdot e^{d_k} \left( 1 - \operatorname{tgh} \left[ 6 \left( \frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33, \quad (27)$$

где  $d_k$  — расстояние (км) от номинальной точки мешающих отражений до антенны (рис. 3),  $h$  — высота антенны (м) над местным уровнем земли,  $h_a$  — номинальная высота мешающих отражений (м) над местным уровнем земли.

Таблица 6

## Номинальные высоты мешающих отражений и расстояния

Категория мешающих отражений (напочвенного покрова)	Номинальная высота $h_a$ , м	Номинальное расстояние $d_k$ , км
Поля с высокими посевами Парковые территории Беспорядочно расположенные редкие деревья Фруктовый сад (деревья расположены правильно, с равными интервалами) Редкие дома	4	0,1
Центр деревни	5	0,07
Лиственные деревья (беспорядочно расположенные) Лиственные деревья (правильно расположенные) Смешанный лес	15	0,05
Хвойные деревья (беспорядочно расположенные) Хвойные деревья ) (правильно расположенные)	20	0,05
Влажный тропический лес	20	0,03
Пригородная	9	0,025
Насыщенная пригородная	12	0,02
Городские	20	0,02
Насыщенные городские	25	0,02
Промышленная зона	20	0,05

Для дополнительных потерь из-за экранирования мешающими отражениями (напочвенным покровом) не должны заявляться категории, не представленные в табл. 6.

**4.6.4. Метод применения.** Метод применения поправки усиления по высоте  $A_{nt}$  и  $A_{nt0}$  (дБ) достаточно прост и продемонстрирован на рис. 3.

К базовой процедуре прогнозирования необходимо добавить следующие шаги:

*Шаг 1.* Там, где тип мешающих отражений известен, или можно с уверенностью предположить, отражения какого типа в данном случае присутствуют, главная процедура используется для вычисления базовых потерь при передаче для номинальной высоты  $h_a$ , которая должна быть выбрана из табл. 6 для соответствующего

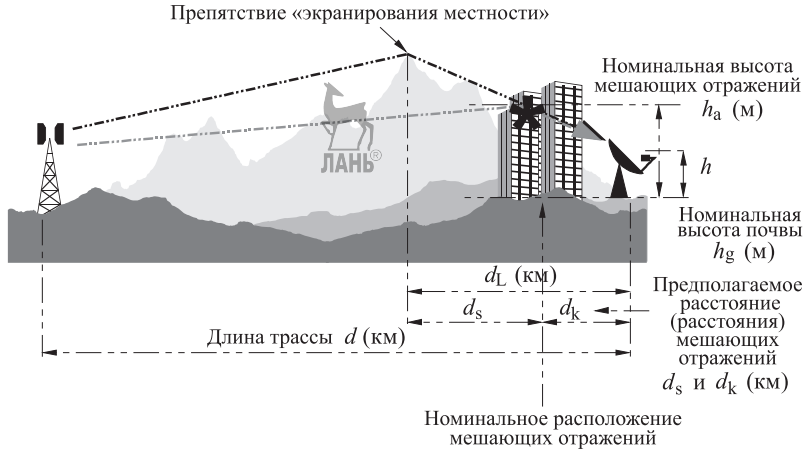


Рис. 3. Метод применения поправки усиления по высоте  $A_{ht}$  или  $A_{hr}$

типа мешающих отражений. Следует использовать длину трассы  $d - d_k$  (км). Однако там, где  $d \gg d_k$ , данной второстепенной поправкой для  $d_k$  можно пренебречь.

**Шаг 2.** Там, где существует препятствие «экранирования местностью», которое обеспечит защиту для оконечной аппаратуры, оно должно быть учтено в базовом вычислении, но потери из-за экранирующего воздействия ( $A_{st}$  или  $A_{sr}$  (дБ)) следует вычислять скорее для высоты  $h_a$  на расстоянии  $d_s$ , чем для  $h$  на расстоянии  $d_L$ , как было бы в противном случае.

**Шаг 3.** После завершения главной процедуры необходимо добавить поправку усиления по высоте из выражения (27), как указано в табл. 6.

**Шаг 4.** Там, где информация об отражении отсутствует, базовое вычисление следует проводить, используя расстояния  $d$  и  $d_L$  (если это подходит) и высоту  $h$ .

**Примечание 1.** Поправки усиления по высоте мешающих отражений должны быть введены для обоих концов трассы, где это уместно.

**Примечание 2.** Там, где необходимы и поправка усиления по высоте на суше, и поправка на соединение морских волноводов ( $A_{ct}$  или  $A_{cr}$  (дБ)) (т.е. антенна расположена близко к морю, но существует мешающее отражение), данные поправки могут быть использованы одновременно, поскольку они являются совместимыми и дополнительными.

*Примечание 3.* Если  $d$  незначительно больше  $d_k$ , то указанная модель неприменима.

**4.7. Вычисление потерь при передаче.** Метод, описанный выше в разделах 4.2–4.6, позволяет вычислить потери при передаче между двумя станциями. Чтобы вычислить уровень сигнала на одной станции, испытывающей воздействие помех от другой, необходимо знать потери при передаче, учитывающие коэффициенты усиления антенн двух станций в направлении радиотрассы (т. е. помеховой трассы) между ними.

Ниже описан метод вычисления потерь при передаче между двумя наземными станциями. В промежуточных шагах данного метода представлены формулы вычисления длины трассы большого круга и углового расстояния на основе географических координат станций, в противоположность выводу этих величин из профиля трассы, как предполагается в табл. 3.

Вычислить угловую длину трассы  $\theta$  из географических координат станций, используя выражение

$$\theta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \text{ (рад)}. \quad (28)$$

Расстояние  $d$  большого круга между станциями равно

$$d = 6371 \cdot \theta \text{ (км)}. \quad (29)$$

Вычислить азимут (азимутальное направление по часовой стрелке от географического (истинного) севера) от станции  $t$  до станции  $r$ , используя выражение

$$\alpha_{tr} = \arccos \frac{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\theta)}{\sin(\theta) \cos(\varphi_t)} \text{ (рад)}. \quad (30)$$

После вычисления по формуле (30) если  $\psi_t - \psi_r < 0$ , то

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \text{ (рад)}. \quad (31)$$

Вычислить азимут  $\alpha_{rt}$  от станции  $r$  к станции  $t$  с учетом симметрии формул (30) и (31).

Затем допустим, что направление главного луча (опорное направление) станции  $t$  определено углами  $(\varepsilon_t, \alpha_t)$  (угол места, азимут соответственно), а направление главного луча станции  $r$  — углами  $(\varepsilon_r, \alpha_r)$ . Для получения углов места  $\varepsilon_{pt}$  и  $\varepsilon_{pr}$  радиотрассы (т. е. помеховой трассы) соответственно на станциях  $t$  и  $r$  необходимо различать трассы в пределах прямой видимости и загоризонтные трассы. Например, для трасс в пределах прямой видимости

$$\varepsilon_{pt} = [(h_r - h_t)/d] - [d/2a_e] \text{ (рад)}, \quad (32a)$$

$$\varepsilon_{pr} = [(h_t - h_r)/d] - [d/2a_e] \text{ (рад)}, \quad (32b)$$

где  $h_t$  и  $h_r$  — высоты станций над средним уровнем моря (км), а для загоризонтных трасс углы места представлены соответствующими им углами горизонта, а именно

$$\varepsilon_{pt} = \theta_t \cdot 10^3 \text{ (рад)}, \quad (33a)$$

$$\varepsilon_{pr} = \theta_r \cdot 10^3 \text{ (рад)}. \quad (33b)$$

Углы радиогоризонта  $\theta_t$  и  $\theta_r$  определены соответственно в подразд. 5.1.1 и 5.1.3 приложения 1 к настоящему дополнению.

Для вычисления углов отклонения  $\chi_t$  и  $\chi_r$  от опорного направления для  $t$  и  $r$  соответственно в направлении помеховой трассы на станциях  $t$  и  $r$  рекомендуется использовать выражения

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})), \quad (34a)$$

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})). \quad (34b)$$

Используя соответствующие углы отклонения от опорного направления, вычислить коэффициенты усиления  $G_t$  и  $G_r$  антенн для станций  $t$  и  $r$  соответственно (дБ). Если фактические ДНА неизвестны, изменение коэффициента усиления с учетом угла отклонения от опорного направления может быть получено с помощью информации, представленной в Рекомендации МСЭ-Р S.465.

Для получения потерь при передаче  $L$  использовать выражение

$$L = L_{b0}(p) + G_t - G_r \text{ (дБ)}. \quad (35)$$

В случаях помех при ясном небе, когда над распространением радиоволн доминирует тропосферное рассеяние, углы места будут слегка превышать углы радиогоризонта  $\theta_t$  и  $\theta_r$ . Использование данных углов должно уменьшить погрешность, которой можно пренебречь, если только они не совпадают с опорными направлениями их станций.

## 5. Прогнозирование помех рассеяния от гидрометеоров

В отличие от представленных выше методов прогнозирования помех при ясном небе, в методе прогнозирования помех при рассеянии от гидрометеоров, представленном ниже, выражение для вычисления потерь при передаче выводится напрямую, благодаря факту, что данный метод основан на некотором знании коэффици-

ентов усиления антенн станций, излучающей помехи и испытывающей воздействие помех.

**5.1. Введение.** Данная модель, для которой в МСЭ можно приобрести программное обеспечение (SCAT), прогнозирует статистику помехового сигнала исходя из статистики интенсивности дождя. Она основана на двух фундаментальных допущениях:

— рассеяние происходит только в пределах ячеек дождевой сетки, имеющих круглые сечения с диаметром, зависящим от интенсивности дождя внутри ячейки. Для любой геометрии линии связи предполагается, что одна ячейка находится в фиксированном положении, которое представляет собой наихудший случай. В пределах ячейки дождя интенсивность осадков и, следовательно, преломляющая способность являются постоянными величинами в пределах высоты дождя. Среднее значение высоты дождя зависит от географической широты, но со специфическим распределением около этого среднего значения, отражающим изменения по высоте в течение года. Предполагается, что с превышением высоты дождя преломляющая способность (дБ) линейно уменьшается;

— затухание происходит как внутри, так и снаружи ячейки, но только ниже высоты дождя. Предполагается, что внутри ячейки действует хорошо изученная зависимость погонного затухания от интенсивности дождя.

Модель предназначена для вычисления уровней помех на длинных ( $> 100$  км) и коротких (до нескольких километров) трассах с произвольными углами места конечных устройств, а также различными геометриями бокового рассеяния (не большого круга) и воздействием по боковым лепесткам. Из-за сложности геометрии трассы она реализована в обобщенной компьютерной форме.

Физические основы метода приведены в приложении 2 к настоящему дополнению, где предполагается пересечение узкого луча (например, земной станции) и широкого луча (например, наземной станции).

В сравнительном тестировании как при прямых измерениях, так и при измерениях с помощью РЛС метод дал хорошие результаты для целого ряда частот и геометрий.

**5.2. Формула потерь при передаче.** Потери при передаче  $L$  (дБ) за счет рассеяния от гидрометеоров для данной интенсивности дождя  $R$  и высоты дождя могут быть выражены следующим образом:



$$L = 197 - 10 \lg \eta_E + 20 \lg d_T - 20 \lg f - 10 \lg z_R + 10 \lg S + \\ + A_g - 10 \lg C \text{ (дБ)}, \quad (36)$$

где  $\eta_E$  — к.п.д. антенны (коэффициент  $< 1$ ) «земной» станции;  $d_T$  — расстояние между станциями через объем рассеяния (км);  $f$  — частота (ГГц);  $z_R$  — коэффициент преломляющей способности при рассеянии в дожде для единицы объема, не превышающий высоту дождя (вершину дождя) ( $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ):

$$z_R = 400 R(p)^{1.4} \text{ мм}^6/\text{м}^3, \quad (37)$$

$R(p)$  — интенсивность точечных дождевых осадков, которая превышена для рассматриваемого процента времени  $p$  (при времени интегрирования 1 мин);  $S$  — поправка на отклонение от рассеяния в дожде по закону Рэлея на частотах выше 10 ГГц (предполагается, что  $S = 0$  выше высоты дождя):

$$10 \lg S = R(p)^{0.4} \cdot 10^{-3} \left[ 4(f - 10)^{1.6} \left( \frac{1 + \cos \varphi_s}{2} \right) \right] + \\ + 5(f - 10)^{1.7} \left( \frac{1 - \cos \varphi_s}{2} \right) \text{ (дБ) для } f > 10 \text{ ГГц}, \quad (38a)$$

$$10 \lg S = 0 \text{ для } f \leq 10 \text{ ГГц} \quad (38b)$$

(здесь  $\varphi_s$  — угол рассеяния, т.е. угол между направлениями распространения волн, падающих на объем рассеяния и выходящих из него (например,  $\varphi_s = 0$  для рассеяния в прямом направлении и  $\varphi_s = 180^\circ$  для рассеяния в обратном направлении));  $A_g$  — затухание в газах за счет поглощения в кислороде и водяных парах, рассчитанное по формулам Рекомендации МСЭ-Р Р.676 для плотности водяного пара  $7,5 \text{ г}/\text{м}^3$ ;  $C$  — функция преобразования эффективного рассеяния:

$$C = g_{T0} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} g_T(h) \zeta(h) A_T(h) A_E(h) \frac{1}{\sin \varepsilon_E} dh, \quad (39)$$

где  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  — минимальная и максимальная высоты для интегрирования,  $g_{T0}$  — коэффициент усиления антенны по оси наземной станции,  $g_T$  — направленность антенны (коэффициент  $\leq 1$ ) наземной станции относительно рассматриваемой точки интегрирования (элемента объема),  $\varepsilon_E$  — угол места луча земной станции,  $\zeta(h)$  — функция преломляющей способности в объеме рассеяния, нормированная для  $z_R$  (значение ниже высоты дождя):

$$\zeta(h) = 1 \text{ для } h \leq \text{высоты дождя}, \quad (40a)$$

$$\zeta(h) = 10^{-0,65(h-h_R)} \quad \text{для } h > \text{высоты дождя}, \quad (40b)$$

где  $h_R$ : средняя высота дождя, определенная в соответствии с Рекомендацией МСЭ-Р Р.839 (см. приложение 3 к настоящему дополнению);  $A_T$ ,  $A_E$  — затухание в дожде (коэффициенты  $\leq 1$ ) для трасс от наземной станции до точки интегрирования и от нее до земной станции соответственно. Для вычисления  $A_T$  и  $A_E$  необходима информация, представленная в приложении 3 к настоящему дополнению.

Выражение (36) допускает учет поляризации для наихудшего случая. Для менее идеального взаимодействия будут иметь место дополнительные потери (см. приложение 3 к настоящему дополнению).

Для вычисления суммарных потерь при передаче необходимо взять интеграл (39) вдоль той части луча антенны земной станции, которая находится либо в пределах дождевой ячейки, либо в пределах луча антенны наземной станции (обозначена жирным отрезком на рис. 9).

Предполагается, что луч антенны наземной станции имеет гауссову форму. Интегрирование распространяется до точек уровня  $-18$  дБ диаграммы направленности антенны относительно максимального коэффициента усиления, рассчитанного вдоль узкого луча. Чтобы получить аналитическое выражение для интеграла, диаграмма направленности антенны  $T$  аппроксимируется гауссовой функцией следующим образом:

$$g_T(h) = \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{h - h_0}{\Delta h_{1/2}} \right)^2 \right], \quad (41)$$

где  $\Delta h_{1/2}$  — разность высот этих двух точек на оси антенны земной станции, где функция направленности антенны наземной станции опускается до 0,5 (точки уровня  $-3$  дБ).

**5.3. Интегральная функция распределения потерь при передаче.** Интегральная функция распределения (годовая) потерь при передаче из-за рассеяния от гидрометеоров оценивается в два шага.

Во-первых, для каждой комбинации интенсивности дождя и высоты дождя потери при передаче высчитываются так, как если бы существовала определенная зависимость от этих параметров. Полагают, что данное значение потерь передачи реализуется с той же вероятностью, что и соответствующая комбинация интенсивности

дождя и высоты дождя в допущении статистической независимости этих двух параметров.

Во-вторых, вероятности всех комбинаций интенсивности дождя и высоты дождя, ведущих к одинаковым значениям потерь при передаче, суммируются для получения совокупной вероятности потерь при передаче. Полученная интегральная функция распределения принимается как спрогнозированное распределение, хотя отсутствует взаимно-однозначная корреляция между отдельными комбинациями интенсивности дождя, высоты дождя и потерь при передаче.

**5.4. Прогнозирование для наихудшего месяца.** Установлено, что значения масштабных коэффициентов  $Q$  (коэффициентов пересчета) наихудшего месяца при рассеянии от гидрометеоров в Европе составляют около 3 при 1% времени, 4,5 при 0,01% времени и около 7 при 0,001% времени. Эта информация основана на ограниченном количестве данных для частот 11 ГГц и выше, поэтому ее следует использовать осторожно. Установлено, что средние значения очень близки к европейским коэффициентам интенсивности дождя и высоты дождя. Поэтому при отсутствии измеренных значений  $Q$  при рассеянии в осадках предполагается, что вместо них могут быть использованы значения  $Q$  для интенсивности дождя (см. таблицы значений  $Q$  в Рекомендации МСЭ-Р Р.841).

В качестве примера. В Великобритании для трассы в 131 км на частоте 11 ГГц потери при передаче 141 дБ были превышены для всех значений годового периода, кроме 0,01% времени. При использовании коэффициента  $Q = 4,5$ , потери при передаче превысили бы все значения годового периода, кроме 0,002% годового распределения, и составили бы 139,3 дБ, что соответствует значению для 0,01% наихудшего месяца. Уменьшение в потерях при передаче, таким образом, – 1,7 дБ.

В принципе коэффициенты для наихудшего месяца должны полностью учитывать так называемый слой таяния. Но идеальные вычисления показывают, что эффект помехового воздействия данного слоя будет существенным, если слой расположен в центре общего объема главных пересекающихся лучей в течение значительного промежутка времени, например в течение «наихудшего месяца». Эффект зависит от частоты, сильнее проявляется на низких частотах порядка 4...6 ГГц и менее заметен на более высоких частотах. Эффект наблюдался при измерениях на 131-ки-

лометровой трассе на частоте 11,2 ГГц (сложный дождевой климат С, D, E). Эти измерения показали, что присутствие слоя таяния летом увеличивает уровень помех в сезонной статистике примерно на 2–3 дБ в диапазоне процентов времени 0,1–0,01 % относительно ожидаемого увеличения в сезонной статистике при отсутствии слоя таяния. На частоте 5 ГГц масштабированное увеличение помех из-за присутствия слоя таяния составило бы 3...4 ГГц. Из-за присутствия слоя таяния увеличение помех в наихудшем месяце немного превышает аналогичное увеличение в самом плохом сезоне года.

## Приложение 1 к дополнению

### **Радиометеорологические данные, необходимые для прогнозирования распространения при ясном небе**

#### **1. Введение**

Процедуры прогнозирования распространения радиоволн при ясном небе основаны на радиометеорологических данных, что обеспечивает вариативность основного расположения для прогнозирования. Эти данные представлены в форме карт, приведенных в настоящем приложении.

#### **2. Карты вертикального изменения данных о преломляющей способности радиоволн**

Для глобальной процедуры радиометеорология трассы при ясном небе характеризуется для непрерывных (долгосрочных) механизмов помех среднегодовым значением  $\Delta N$  (вертикального градиента коэффициента рефракции на первый нижний километр атмосферы), а для аномальных (краткосрочных) механизмов — процентом времени  $\beta_T$  %, для которого градиент рефракции нижнего слоя атмосферы находится ниже  $\nabla 100$  N-ед./км. Эти параметры обеспечивают разумный базис, на основе которого моделируются механизмы распространения при ясном небе, описанные в разделе 2 дополнения. Для каждой из указанных величин в этом приложении приведены данные для вычисления годовых значений и значений для наихудшего месяца:

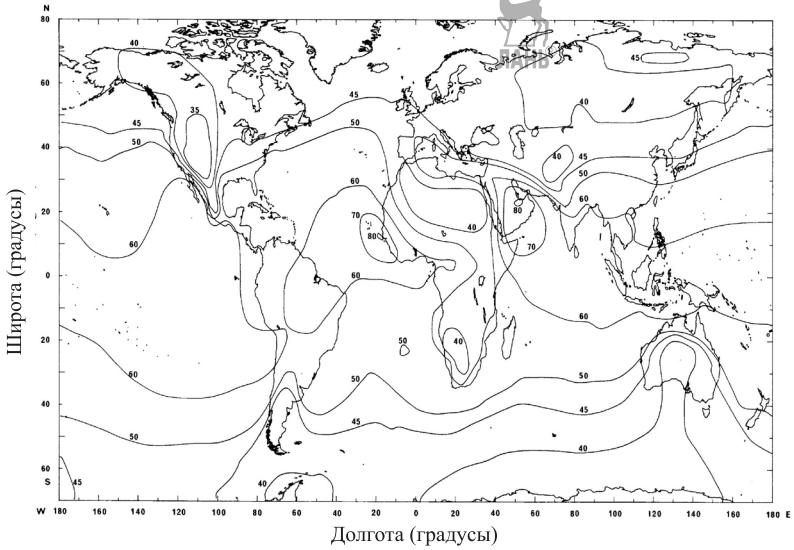


Рис. 4. Среднегодовые значения  $\Delta N$

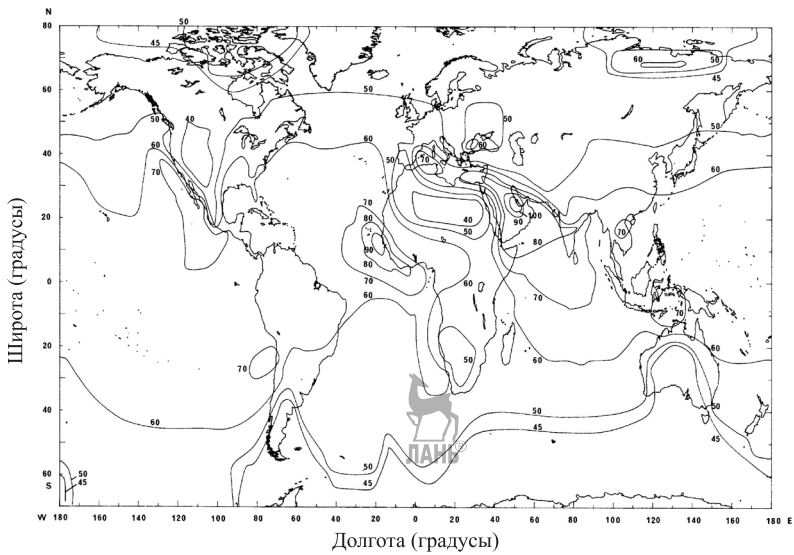


Рис. 5. Максимальные среднемесячные значения  $\Delta N$  (для прогнозов наихудшего месяца)

на рис. 4 представлены среднегодовые данные  $\Delta N$ ;  
на рис. 5 изображены находящиеся во взаимно-однозначном соответствии максимальные среднемесячные контуры  $\Delta N$ .

### 3. Карта преломляющей способности $N_0$

На рис. 6 представлена карта средней преломляющей способности поверхности уровня моря  $N_0$  для модели тропосферного рассеяния.

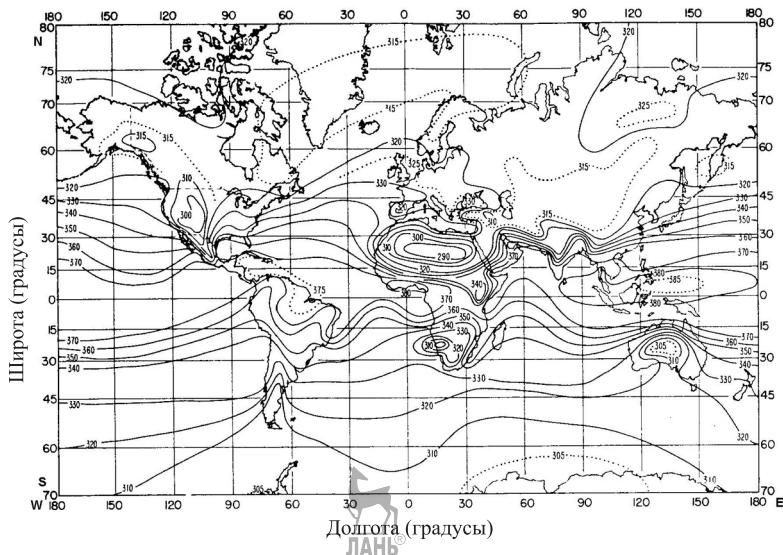


Рис. 6. Преломляющая способность поверхности уровня моря  $N_0$

### 4. Выполнение карт в форме компьютерной базы данных

Для компьютерного выполнения процедур удобно фиксировать карты в цифровой форме и преобразовывать их в простые базы данных, управляемые программным обеспечением.

В глобальных картах коэффициента рефракции целесообразно преобразовать контуры в двумерные решетки широты и долготы размером  $0,5 \times 0,5^\circ$ . Чтобы избежать разрывов в прогнозах при незначительном изменении в расположении или расстоянии, значения для каждой клеточки решетки должны быть получены путем

интерполяции между контурами. Заметим, что контуры начерчены для логарифмически масштабированных интервалов, поэтому рекомендуется логарифмическая интерполяция.

## Приложение 2 к дополнению

### Анализ профиля трассы

#### 1. Введение

Для анализа профиля трассы необходимы топографические высоты (высоты местности) профиля трассы над средним уровнем моря. Параметры, которые необходимо получить из анализа профиля трассы для моделирования распространения, приведены в табл. 7.

#### 2. Построение профиля трассы

С учетом географических координат станций, излучающих помехи ( $\varphi_t, \psi_t$ ) и испытывающих воздействие помех ( $\varphi_r, \psi_r$ ), высоты местности (над средним уровнем моря) вдоль трассы большого круга должны быть получены из базы топографических данных или из соответствующих контурных карт большого масштаба. Предпочтительная разрешающая способность по расстоянию в профиле — та, что дает целое число шагов приблизительно по 0,25 км.

Может быть использован иной шаг возрастания расстояния, но не более 1 км, с некоторым возможным уменьшением точности прогноза. Профиль должен включать высоты суши, где расположены станции, излучающие помехи и испытывающие воздействие помех, в качестве начальной и конечной точек. При оценке высот вдоль трассы должна быть учтена кривизна Земли, выраженная значением  $a_e$ , вычисленным по формуле (6).

Хотя использование точек профиля, расположенных на равном расстоянии, считается предпочтительным, возможно использование точек, расположенных на неодинаковом расстоянии. Это может оказаться целесообразным, когда профиль получают из цифровой карты контуров высот местности. Однако необходимо отметить, что рекомендация была разработана на основе тестирования (испытаний), в котором использовались расположенные на равном расстоянии точки профиля; информация по влиянию на точность применения точек профиля, расположенных не на одинаковом расстоянии, отсутствует.

В настоящей рекомендации точка профиля трассы, где расположена излучающая помехи станция, рассматривается как нулевая точка, а точка местоположения станции, испытывающей воздействие помех, — как точка  $n$ . Следовательно, профиль трассы состоит из  $n + 1$  точки. На рис. 7 приведен пример профиля трассы высот местности над средним уровнем моря с указанием различных параметров, связанных с физическими особенностями местности.

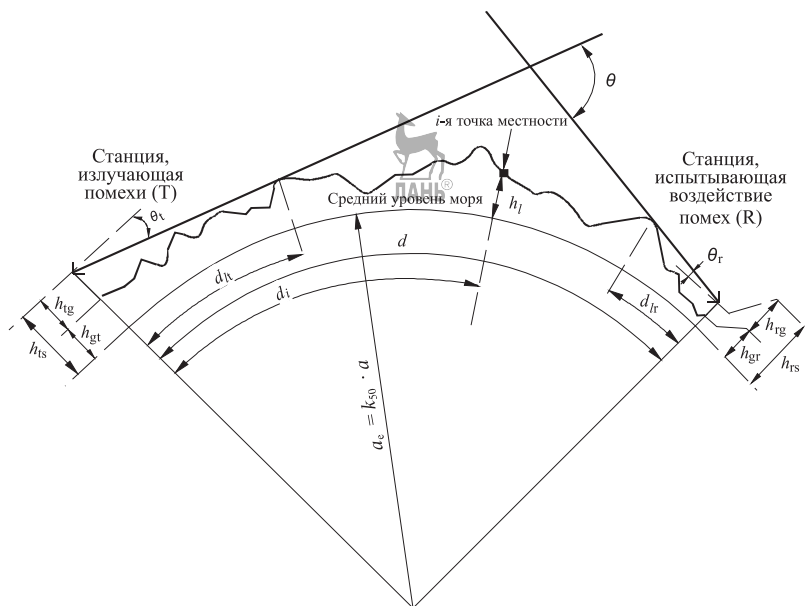


Рис. 7. Пример профиля (загоризонтной) трассы. В данном примере значение  $\theta_t$  отрицательно

В табл. 7 определены параметры, используемые или выведенные в процессе анализа профиля трассы.

Таблица 7

#### Определения параметров профиля трассы

Параметр	Описание
$a_e$	эффективный радиус Земли (км)
$d$	длина трассы большого круга (км)
$d_i$	длина трассы большого круга от источника помех до $i$ -й точки местности (км)



Таблица 7, окончание

Параметр	Описание
$d_{ii}$	возрастающая длина для данных профиля правильной трассы (км)
$f$	частота (ГГц)
$\lambda$	длина волны (м)
$h_{ts}$	высота антенны (м) станции, излучающей помехи, над средним уровнем моря
$h_{rs}$	высота антенны (м) станции, испытывающей воздействие помех
$\theta_t$	угол возвышения горизонта над местной горизонталью (град), измеренный от антенны станции, излучающей помехи
$\theta_r$	угол возвышения горизонта над местной горизонталью (град), измеренный от антенны станции, испытывающей воздействие помех
$\theta$	угловая длина трассы (град)
$h_{st}$	высота гладкой поверхности Земли над средним уровнем моря в месте расположения станции, излучающей помехи (м)
$h_{sr}$	высота гладкой поверхности Земли над средним уровнем моря в месте расположения станции, испытывающей воздействие помех (м)
$h_i$	высота $i$ -й точки местности над средним уровнем моря (м); $h_0$ — высота суши для станции, излучающей помехи, $h_n$ — высота суши для станции, испытывающей воздействие помех
$h_m$	неровности суши (м)
$h_{te}$	эффективная высота антенны, излучающей помехи (м)
$h_{re}$	эффективная высота антенны, испытывающей воздействие помех (м)

### 3. Длина трассы

Для общих случаев длина трассы  $d$  (км) может быть найдена из данных профиля трассы:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \text{ (км)}, \quad (42)$$

однако для профиля правильно размещенной трассы эта формула может быть упрощена:

$$d = n \cdot d_{ii} \text{ (км)}, \quad (43)$$

где  $d_{ii}$  — возрастающая длина трассы (км).

## 4. Классификация трасс

Профиль трассы может быть использован для классификации трассы — отнесения в одну из трех геометрических категорий с учетом эффективного радиуса Земли  $a_e$ . Классификация трасс помех указана в табл. 4.

**4.1. Шаг 1: критерий для загоризонтной трассы.** Трасса — загоризонтная, если угол возвышения физического горизонта, каким он виден из антенны, излучающей помехи (относительно местной горизонтали), больше, чем угол, стягиваемый антенной, подверженной воздействию помех (вновь относительно местной горизонтали станции, излучающей помехи).

Критерий для загоризонтной трассы, следовательно, следующий:

$$\theta_{\max} > \theta_{td} \text{ (мрад)}, \quad (44)$$

где

$$\theta_{\max} = \max_{i=1}^{n-1}(\theta_i) \text{ (мрад)}, \quad (45)$$

$\theta_i$  — угол места для  $i$ -й точки местности,

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2a_e} \text{ (мрад)}, \quad (46)$$

где  $h_i$  — высота (м)  $i$ -й точки суши над средним уровнем моря,  $h_{ts}$  — высота (м) антенны, излучающей помехи, над средним уровнем моря,  $d_i$  — расстояние (км) от источника помех до  $i$ -го элемента местности,

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2a_e} \text{ (мрад)}, \quad (47)$$

где  $h_{rs}$  — высота (м) антенны, подверженной воздействию помех, над средним уровнем моря;  $d$  — суммарная длина (км) трассы большого круга;  $a_e$  — срединный эффективный радиус Земли, свойственный трассе (формула (6)).

Если условие (44) выполнено, то можно провести дальнейший анализ профиля трассы, необходимый для загоризонтной трассы

(см. разд. 5.1). В этом случае шаг 2 классификации трасс не требуется.

Если условие (44) не выполнено, то трасса находится в пределах зоны прямой видимости, с наложением либо без наложения области первой зоны Френеля.

**4.2. Шаг 2: критерий для трассы прямой видимости с дифракцией подтрассы (т.е. без полного устранения первой зоны Френеля).** Незагоризонтная трасса — трасса в пределах прямой видимости с дифракцией подтрассы, если угол возвышения над физическим горизонтом, как он виден из излучающей помехи антенны (относительно местной горизонтали), с учетом гашения, равного радиусу эллипсоида первой зоны Френеля в точке горизонта, больше, чем угол (вновь относительно местной горизонтали излучающей помехи станции), стягиваемый антенной, испытывающей воздействие помех.

На трассе есть дифракция подтрассы, если

$$\theta_{f \max} > \theta_{td} \text{ (мрад)}, \quad (48)$$

где

$$\theta_{f \max} = \max_{i=1}^{n-1}(\theta_i). \quad (49)$$

Для выполнения данной проверки необходима дополнительная величина в формуле (44), чтобы принять во внимание эллипсоид первой зоны Френеля. Раздел 2 Рекомендации МСЭ-Р Р.526 указывает радиус эллипсоида  $R_i$  (м) в любой точке вдоль трассы:

$$R_t = 17,392 \sqrt{\frac{d_i(d-d_i)}{d \cdot f}} \text{ (м)}, \quad (50)$$

где  $f$  — частота (ГГц).

Соответствующий радиус  $R_i$  (м) прибавляется к каждой высоте местности  $h_i$  в выражении (44) и получается приведенное ниже выражение (51). Учитывая гашение (просвет) первой зоны Френеля  $\theta_{fi}$ , угол возвышения антенны оконечного устройства для  $i$ -й точки вычисляется по следующей формуле:

$$\theta_{fi} = \frac{(h_i + R_i) - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2a_e} \text{ (мрад)}. \quad (51)$$

Если условие (48) выполнено, то можно провести дальнейший анализ профиля трассы, необходимый для случаев дифракции подтрассы (см. 4.2 ниже).

Если условие (48) не выполнено, то трасса находится в пределах зоны прямой видимости и дальнейшего анализа не требуется.

## 5. Вывод параметров из профиля

**5.1. Загоризонтные трассы.** Параметры, которые должны быть получены из профиля трассы, приведены в табл. 7.

**5.1.1. Угол возвышения горизонта антенны, излучающей помехи,**  $\theta_t$  — это максимальный угол возвышения горизонта антенны, когда выражение (45) применяется к высотам профиля трассы  $n - 1$ .

$$\theta_t = \theta_{\max} \text{ (мрад)}, \quad (52)$$

значение  $\theta_{\max}$  определено выражением (45).

**5.1.2. Дальность видимого горизонта излучающей помехи антенны**  $d_{\text{lt}}$  — это минимальное расстояние от передатчика, при котором максимальный угол возвышения горизонта антенны вычислен по формуле (45):

$$d_{\text{lt}} = d_i \text{ км для } \max(\theta_i). \quad (53)$$

**5.1.3. Угол возвышения горизонта антенны, испытывающей воздействие помех**  $\theta_r$  — это максимальный угол возвышения горизонта антенны, когда выражение (45) применено к высотам профиля трассы  $n - 1$ ,

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1}(\theta_j) \text{ (мрад)}, \quad (54)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3(d - d_j)}{2a_e} \text{ (мрад)}. \quad (55)$$

**5.1.4. Горизонтальная дальность антенны, подверженной воздействию помех,**  $d_{\text{lt}}$  — это минимальное расстояние от приемника, для которого по формуле (45) вычислен максимальный угол возвышения горизонта антенны,

$$d_{\text{lt}} = d - d_j \text{ (км) для } \max(\theta_j). \quad (56)$$

### 5.1.5. Угловая длина

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \text{ (мрад)}. \quad (57)$$

**5.1.6. Модель «гладкой поверхности Земли» и эффективные высоты антенн**

**5.1.6.1. Общие сведения.** Чтобы определить эффективные высоты антенн и провести оценку неровностей трассы, необходимо получить эффективную «гладкую поверхность Земли» как эталонную плоскость. На ней считается расположенной суша с неправильными физическими особенностями, по которой проходит трас-

са. После этого могут быть получены значения параметров неровности суши (п. 5.1.6.4) и эффективных высот антенн для станций, излучающих помехи и подверженных их воздействию.

**5.1.6.2. Исключения.** Для прямых «морских» трасс, т. е. при  $\omega \geq 0,9$ , и в тех случаях, когда оба горизонта антенны приходятся на морскую поверхность, вычисление гладкой поверхности Земли может быть опущено, если это потребуется. При таких обстоятельствах эталонной поверхностью может служить средний уровень моря (или воды) над всей трассой, неровности суши могут приниматься равными нулю, а эффективные высоты антенн — равными реальным высотам над поверхностью моря.

Для остальных трасс необходимо применить процедуру аппроксимации гладкой поверхности Земли (подробности процедуры представлены в разд. 5.1), и получить эффективные высоты антенн, как указано в п. 5.1.6.4.

**5.1.6.3. Выведение гладкой поверхности Земли.** Получим аппроксимацию прямой линии для высот местности над средним уровнем моря:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \text{ (м)}, \quad (58)$$

где  $h_{si}$  — высота (м) над средним уровнем моря поверхности, вычисленная методом наименьших квадратов на расстоянии  $d_i$  (км) от источника помех;  $h_{st}$  — высота (м) гладкой поверхности Земли в начале трассы, т. е. в месте расположения станции, излучающей помехи;  $m$  — наклон (м/км) поверхности, вычисленный методом наименьших квадратов относительно уровня моря.

Для следующих двух шагов вычисления существуют альтернативные методы. Выражения (59а) и (60а) могут использоваться, если точки профиля расположены на равном расстоянии. Выражения (59b) и (60b) — более сложные, должны применяться, если точки профиля расположены на неодинаковом расстоянии, и могут использоваться в любом случае.

Для точек профиля, расположенных на равном расстоянии:

$$m = \frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2}\right)}{\sum_{i=0}^n \left(d_i - \frac{d}{2}\right)^2} \text{ (м/км)}. \quad (59a)$$

Для любого профиля:

$$m = \left(\frac{1}{d^3}\right) \sum_{i=1}^n 3(d_i - d_{i-1})(d_i + d_{i-1} - d)(h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2(h_i - h_{i-1}) \quad (\text{м/км}), \quad (59b)$$

где  $h_i$  — реальная высота (м)  $i$ -й точки местности над средним уровнем моря;  $h_a$  — среднее значение реальных высот (м) трассы над средним уровнем моря от  $h_0$  до  $h_n$  включительно. Для точек профиля, расположенных на равном расстоянии:

$$h_a = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n h_i \quad (\text{м}). \quad (60a)$$

Для любого профиля средневзвешенная величина вычисляется как

$$h_a = \left(\frac{1}{2d}\right) \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i - h_{i-1}) \quad (\text{м}). \quad (60b)$$

Высота гладкой поверхности Земли для станции, излучающей помехи,  $h_{st}$  представляется выражением

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad (\text{м}), \quad (61)$$

и, следовательно, высота гладкой поверхности для станции, подверженной воздействию помех,  $h_{sr}$  представляется формулой

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad (\text{м}). \quad (62)$$

Если высоты гладкой поверхности Земли по расчетам выше действительной высоты суши, необходимо сделать поправку:

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad (\text{м}), \quad (63a)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad (\text{м}). \quad (63b)$$

Если одно или оба значения  $h_{st}$  и  $h_{sr}$  были изменены согласно (63a) или (63b), то наклон  $m$  гладкой поверхности Земли также должен быть скорректирован:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad (\text{м/км}). \quad (64)$$

**5.1.6.4. Неровность местности.** Параметр неровности местности  $h_m$  (м) есть максимальная высота местности над гладкой поверхностью Земли по трассе между точками горизонта, включая эти точки:

$$h_m = \max_{i=z_{it}}^{i=z_{if}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad (\text{м}) \quad (65)$$

где  $i_{\text{лт}}$  — индекс точки профиля на расстоянии  $d_{\text{лт}}$  от передатчика,  $i_{\text{лр}}$  — индекс точки профиля на расстоянии  $d_{\text{лр}}$  от приемника.

Гладкая поверхность Земли и параметр неровности местности  $h_m$  проиллюстрированы на рис. 8.

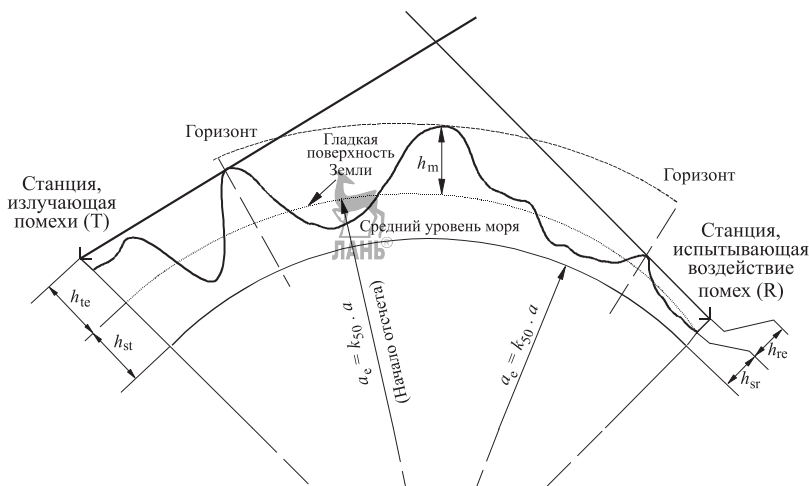


Рис. 8. Пример гладкой поверхности Земли и параметра неровности местности

### Приложение 3 к дополнению

#### Физические основы модели рассеяния от гидрометеоров

Полагают, что рассеяние имеет место только в пределах одной фиксированной цилиндрической дождевой ячейки с круговым поперечным сечением. Диаметр ячейки  $d_c$ , зависящий от интенсивности дождя  $R$  (мм/ч), равен

$$d_c = 3,3 R^{-0,08} \text{ (км)}. \quad (66)$$

Ячейка центрируется относительно пересечения осей двух антенн (или в ближайшей точке, если лучи не пересекаются точно) (рис. 9). Это необходимо как следствие учета геометрий коротких трасс. В пределах ячейки для данной геометрии трассы полагают, что преломляющая способность является постоянной до высоты

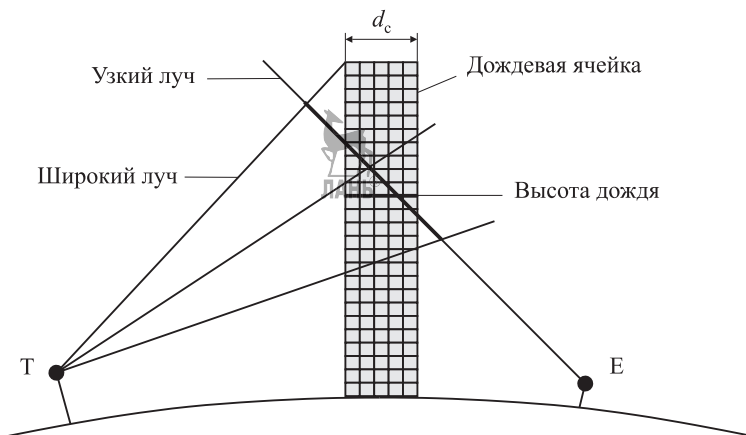


Рис. 9. Положение дождевой ячейки на пересечении широкого и узкого лучей

дождя (или высоты уровня замерзания). Выше высоты дождя преломляющая способность уменьшается со скоростью 6,5 дБ/км. Полагают, что дождь за пределами дождевой ячейки значительно не способствует рассеянию.

Полагают, что затухание в дожде оказывает воздействие только ниже высоты дождя. Внутри ячейки погонное затухание  $\gamma_R$  применяется в соответствии с формулой  $\gamma_R = kR^\alpha$ . Коэффициенты  $k$  и  $\alpha$  приведены в Рекомендации МСЭ Р Р.838 и зависят от частоты, поляризации и направления распространения (угла места) волны. Для затухания  $\Gamma_r$  вне дождевой ячейки (между краем ячейки и точкой на расстоянии  $d$ ) принято экспоненциальное уменьшение:

$$\Gamma_r = \gamma_R r_m \frac{(1 - e^{-d/r_m})}{\cos \varepsilon}, \quad (67)$$

где  $r_m$  — длина шкалы для затухания в дожде, представленная выражением

$$r_m = 600 R^{-0,5} \cdot 10^{-(R+1)^{0,19}}; \quad (68)$$

$\varepsilon$  — угол места.

Выражение (68) справедливо, если вся трасса находится ниже высоты дождя. Если только часть трассы (между интервалами  $d_1$  и  $d_2$  от края ячейки) находится ниже высоты дождя, то

$$\Gamma_r = \gamma_R r_m \frac{(e^{-d_1/r_m} - e^{-d_2/r_m})}{\cos \varepsilon}. \quad (69)$$



Для участков трассы распространения, находящихся выше высоты дождя, принято нулевое затухание из-за дождя.

Поскольку величина горизонтальной длины шкалы стремительно возрастает с уменьшением интенсивности дождя, различия между ячейкой и окружающим дождем будут стираться для величины интенсивности дождя ниже приблизительно 10 мм/ч.

Высота дождя трактуется как случайная переменная  $h_{rd}$  с данной функцией распределения. Важно четко учесть вариативность (вершины) высоты дождя в методе прогнозирования. Так как затухание в дожде проявляется только ниже высоты  $h_{rd}$ , общий объем непосредственно выше значения  $h_{rd}$  может приводить к значительно более низким потерям при передаче (помеховый сигнал более высокого уровня), несмотря на уменьшение преломляющей способности на высотах, превышающих высоту  $h_{rd}$ . Только в случае общего объема, находящегося значительно выше  $h_{rd}$ , уменьшение преломляющей способности компенсирует отсутствие затухания в дожде, а потери при передаче вновь возрастают. Если высота дождя находится выше рассеивающего объема в одном из сезонов года или, напротив, ниже его, над годовой статистикой потерь при передаче в маловероятном диапазоне с малыми потерями может доминировать рассеяние от снега и льда. Такое рассеяние может не попасть в прогноз, если использовалась фиксированная высота дождя над объемом рассеяния. Данный эффект более выражен для высоких частот, но им можно пренебречь для частот ниже 11 ГГц.

Среднее значение распределения  $h_{rd}$  равно средней высоте дождя  $h_r$ , приведенной в Рекомендации МСЭ-Р Р.839. Значение средней высоты  $h_r$  изменяется с географической широтой станции.

Интегральная функция распределения для  $h_{rd}$  представлена в табл. 8, но если доступны долгосрочные значения, полученные непосредственно на местах, следует использовать именно их.

Процедуру необходимо применять, используя распределение интенсивности дождя для конкретной дождевой климатической зоны, как указано в Рекомендации МСЭ-Р Р.837; если доступно распределение интенсивности дождя, измеренное на месте, следует использовать его. Каждому значению интенсивности дождя будет соответствовать свое собственное значение потерь при передаче, которое, для низких значений интенсивности дождя, уменьшается с увеличением интенсивности дождя благодаря увеличению преломляющей способности. Но для общего объема ниже высоты дождя затухание в дожде также возрастает с увеличением интенсивности дождя и, в конечном счете, вероятно, перевесит увели-

Таблица 8

**Интегральная функция распределения высоты дождя относительно медианного значения**

Разность высоты дождя, км	Вероятность превышения, %
-2.125	100.0
-1.875	99.1
-1.625	96.9
-1.375	91.0
-1.125	80.0
-0.875	68.5
-0.625	56.5
-0.375	44.2
-0.125	33.5
0.0	28.5
0.125	24.0
0.375	16.3
0.625	10.2
0.875	6.1
1.125	3.4
1.375	1.8
1.625	0.9

чивающуюся преломляющую способность. Следовательно, минимальные потери при передаче (на трассе ниже высоты дождя) будут найдены при некоторой промежуточной интенсивности дождя, которая уменьшается с увеличением частоты. Поэтому преобразование потерь при передаче как функции интенсивности дождя в интегральную функцию распределения требует дополнительного шага в прогнозировании (см. разд. 5.3).

Используется «узколучевая» аппроксимация, при которой считается, что один из лучей антенны (т.е. луч земной станции) намного уже другого луча (вблизи зоны пересечения) и, следовательно, взаимное влияние эффектов усиления антенны и ширины главного лепестка компенсируют друг друга. Однако к.п.д. антенны с узколучевой диаграммой направленности  $\eta_E$  должен быть учтен. (Если величина не задана, используется значение по умолчанию, равное 0,6.)

Предполагается, что широколучевая антенна имеет диаграмму направленности гауссовой формы. Для учета эффекта влияния боковых лепестков, боковые лепестки антенны с широколучевой диаграммой направленности моделируются с помощью второго лепестка гауссовой формы, который как бы наложен на главный лепесток и при этом шире и ниже его по расположению. Коэффициент усиления второго лепестка на 1 дБ ниже пика самого высокого бокового лепестка, а ширина выбрана таким образом, что относительно самого высокого бокового лепестка его коэффициент усиления на 3 дБ ниже пикового значения. Другими словами: коэффициент усиления  $g^*$  и (двусторонняя) ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности  $\varphi^*$  диаграммы боковых лепестков определяются по формулам

$$g^* = g - |\delta_g| - 1 \text{ (дБ)}, \quad (70)$$

$$\varphi^* = \sqrt{6} \delta\varphi = 2,45 \delta\varphi, \quad (71)$$

где  $g$  — осевое усиление главного лепестка (дБ),  $\delta_g$  — относительное усиление самого высокого бокового лепестка (дБ относительно  $g$ ),  $\delta\varphi$  — позиция (угол отклонения от оси) самого высокого бокового лепестка (градусы).

Усиление вдоль оси главного лепестка должно быть слегка уменьшено для учета наложенных боковых лепестков исходя из того, чтобы сумма двух усилений соответствовала фактическому усилению антенны.

Полагают, что взаимодействие поляризацій в уравнении (36) максимально. На практике рассеяние в дожде анизотропно, и поляризация рассеянного мешающего сигнала может отличаться от поляризации приемной антенны. Соотношение между этими двумя поляризациями будет достаточно сложным, зависящим от поляризацій передающей и приемной антенн, суммарной геометрии системы и, в некоторой степени, от формы рассеивающих частиц. Если предварительные вычисления для случаев взаимодействия главных лепестков указывают на возможность интерференции, теоретически было бы возможно более точно оценить подобное взаимодействие с учетом вышеуказанных параметров.

## Приложение 4 к дополнению

**Аппроксимация обратной интегральной функции нормального распределения для  $x < 0,5$** 

Для  $0,000001 \leq x \leq 0,5$  действительна следующая аппроксимация обратной интегральной функции нормального распределения с ошибкой максимум на  $0,00054$ . Она может с уверенностью использоваться для функции интерполяции в уравнении (13а). Если  $x < 0,000001$ , что предполагает  $\beta_0 < 0,0001\%$ , то  $x$  должно устанавливаться равным  $0,000001$ . Функция  $I(x)$  представляется выражением

$$I(x) = \xi(x) - T(x), \quad (72)$$

где

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]}, \quad (72a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) \cdot T(x) + D_1]T(x) + 1}, \quad (72b)$$

$$C_0 = 2,515517, \quad (72c)$$

$$C_1 = 0,802853, \quad (72d)$$

$$C_2 = 0,010328, \quad (72e)$$

$$D_1 = 1,432788, \quad (72f)$$

$$D_2 = 0,189269, \quad (72g)$$

$$D_3 = 0,001308. \quad (72h)$$





## Оглавление

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<b>Глава I. Внешние радиопомехи . . . . .</b>	<b>8</b>
1. Непреднамеренные радиопомехи . . . . .	8
Природные радиопомехи (11). Промышленные радиопомехи (13). Внутриобъектовая ЭМС (22).	
2. Преднамеренные (организованные) радиопомехи . . . . .	28
Силовые радиопомехи (30). Интеллектуальные радиопомехи (31).	
<b>Глава II. Внутренние радиопомехи . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>Глава III. Математические модели радиопомех . . . . .</b>	<b>36</b>
1. Импульсные радиопомехи . . . . .	36
2. Узкополосные помехи . . . . .	38
3. Флуктуационные радиопомехи . . . . .	39
4. Пассивные радиопомехи . . . . .	41
<b>Глава IV. Распространение мешающих радиосигналов . . . . .</b>	<b>43</b>
1. Механизмы распространения помех . . . . .	43
2. Методы прогноза уровней мешающих сигналов . . . . .	45
Распространение мешающих сигналов в условиях прямой видимости (46). Распространение мешающих сигналов в условиях дифракции (46). Распространение мешающих сигналов путем тропосферного рассеяния (48). Распространение мешающих сигналов за счет волновода и отражений от слоев (49). Экранирование мешающих сигналов локальными неоднородно-	

стями (49). Распространение мешающих сигналов из-за рассеяния гидрометеорами (50).

Глава V. <b>Технические средства обеспечения ЭМС при воздействии различных помех в системах связи</b> . . . . .	54
Глава VI. <b>Нормативно-технические документы, определяющие нормы на радиопомехи</b> . . . . .	57
Список литературы . . . . .	62
Приложение. <b>Рекомендация МСЭ-Р Р.452-10. Процедура прогнозирования для оценки СВЧ-помех между станциями на поверхности Земли на частотах выше 0,7 ГГц</b> . . . . .	65
Дополнение. . . . .	66
1. Введение . . . . .	66
2. Механизмы распространения помех . . . . .	66
3. Прогнозирование помех при ясном небе (при отсутствии гидрометеоров) . . . . .	69
Общие комментарии (69). Получение прогноза (69).	
4. Модели распространения при ясном небе (при отсутствии гидрометеоров) . . . . .	77
Общие сведения (77). Распространение в пределах прямой видимости (включая краткосрочные эффекты) (77). Дифракция (77). Тропосферное рассеяние (примечания) (79). Волноводное распространение/отражение от слоев (79). Дополнительные потери из-за мешающих отражений (81). Вычисление потерь при передаче (85).	
5. Прогнозирование помех рассеяния от гидрометеоров . . . . .	86
Введение (87). Формула потерь при передаче (87). Интегральная функция распределения потерь при передаче (89). Прогнозирование для наихудшего месяца (90).	
Приложение 1 к дополнению. Радиометеорологические данные, необходимые для прогнозирования распространения при ясном небе. . . . .	91
1. Введение . . . . .	91
2. Карты вертикального изменения данных о преломляющей способности радиоволн . . . . .	91
3. Карта преломляющей способности $N_0$ . . . . .	93
4. Выполнение карт в форме компьютерной базы данных . . . . .	93
Приложение 2 к дополнению. Анализ профиля трассы . . . . .	94
1. Введение . . . . .	94
2. Построение профиля трассы . . . . .	94
3. Длина трассы . . . . .	96

4. Классификация трасс . . . . .	97
Шаг 1: критерий для загоризонтной трассы (97). Шаг 2: критерий для трассы прямой видимости с дифракцией подтрассы (т. е. без полного устранения первой зоны Френеля) (98).	
5. Вывод параметров из профиля . . . . .	99
Загоризонтные трассы (99).	
Приложение 3 к дополнению. Физические основы модели рассеяния от гидрометеоров . . . . .	102
Приложение 4 к дополнению. Аппроксимация обратной интегральной функции нормального распределения для $x < 0,5$ . . . . .	107

