

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R S.1061-1\*

**Применение стратегических мер и способов борьбы с замираниями  
в фиксированной спутниковой службе**

(1994-2007)

**Сфера применения**

Спутниковые системы являются одним из наиболее эффективных способов предоставления услуг высокоскоростной мультимедийной связи. Использование полос более высоких частот из-за ограниченного РЧ спектра и спрос на услуги высокоскоростной связи требуют применения эффективных стратегических мер борьбы с ослаблением в дожде на спутниковой линии. В настоящей Рекомендации представлен обзор таких методов, кратко описано руководство по планированию использования методов борьбы с замираниями в фиксированной спутниковой службе (ФСС).

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что рост потребности в использовании ограниченного РЧ спектра в связи с увеличением спроса на спутниковые службы ведет к работе в более высоких полосах частот;
- b) что одним из главных недостатков, присущих более высокочастотным спутниковым системам, является значительное ослабление сигнала, вызванное осадками;
- c) что, вероятно, будет трудно без значительных затрат, используя только запас по мощности, достичь качественных показателей спутникового канала, установленных в Рекомендациях МСЭ-R S.353, S.522, S.614, S.1062, S.1420, S.1711, S.579 и S.1424;
- d) что для борьбы с ослаблениями в осадках разработано несколько систем, качественные показатели и сложность реализации которых таковы, что их пригодность зависит от конкретного типа рассматриваемой сети,

*рекомендует,*

**1** чтобы данные, приведенные в Приложении 1, служили руководством при планировании использования способов борьбы с замираниями и фиксированной спутниковой службе (ФСС).

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Следует отметить, что рассматриваемые методы могут использоваться даже в сочетании, при условии что между ними не существует какой-либо базовой несовместимости.

---

\* 4-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла в 2001 году редакционные изменения в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 44 (AP-2000).

## Приложение 1

### Методы борьбы с замираниями в спутниковых системах связи

#### 1 Работа в режиме пространственного разнесения

##### 1.1 Общие положения в отношении проектирования

Качественные показатели, достигаемые при разнесении земных станций, зависят не только от дождливости климата, но также и от конфигурации разнесения. Первым типом конфигурации является равноправное разнесение (две разнесенные станции с одинаковыми показателями). Другая конфигурация – неравноправное разнесение. В данном случае, если качество работы одной станции (основной) достаточно велико, то качество другой станции (вспомогательной) может быть существенно уменьшено. Ожидается, что такая неравноправная конфигурация разнесения будет использоваться, когда антенна основной земной станции оборудована фидерами, пригодными для работы в нескольких полосах частот, например в полосе 6/4 ГГц и 14/11 ГГц, и/или когда по техническим или эксплуатационным причинам требуется упростить вспомогательную станцию.

В таблицу 1 сведены результаты вычислений диаметра антенны и максимальной мощности передачи, требуемых для линии с равноправным разнесением с низкими углами места. Оценки сделаны для двух линий с предполагаемым разнесением: (А) Ямагучи-Хофу (дистанция разнесения = 20 км) и (В) Ямагучи-Хамада (100 км); обе линии работают в Японии.

Из этой таблицы видно, что диаметры антенн, требуемые для ЧМ линии в полосе 14/11 ГГц (14 ГГц для линии вверх, 11 ГГц для линии вниз) будут около 28 м и 19 м для случаев (А) и (В), соответственно. Если диаметр антенны главной станции может превышать эти значения, то диаметр, требуемый для вспомогательной станции, становится меньше. Значения, приведенные в этой таблице, получены с использованием множества параметров линии, установленных для спутников Intelsat-V, поэтому, если параметры линии будут отличаться от указанных здесь, результаты будут изменяться.

ТАБЛИЦА 1

**Пример вычисления требуемых показателей работы  
для линий со сбалансированным разнесением с малыми углами места (14/11 ГГц)**

Размещение	(А) Ямагучи-Хофу		(В) Ямагучи-Хамада	
Угол места (градусы)	9,1	9,1	9,1	8,4
Расстояние разнесения (км)	20		100	
ЧМ				
Требуемый диаметр антенны (м)	28/32		19/22	
Требуемая мощность передачи <sup>(1)</sup> (Вт) (максимальное значение)	730		510	
TDMA <sup>(2)</sup>				
Требуемый диаметр антенны (м)	17/19		11/12	
Требуемая мощность передачи (Вт) (максимальное значение)	530		400	

(1) Значения для 792-канального сигнала МЧР-ЧМ (25 МГц).

(2) Значения для 4-фазной КГФМН со скоростью 120 Мбит/с с упреждающей коррекцией ошибок.

*Предположения:*

Частота: 14,5 (линия вверх)/11,7 (линия вниз) ГГц

Орбитальная позиция спутника: 63° в. д., 0° с. ш.

э.и.и.м. спутника: 41,1 дБВт

Диаметры антенн оценивались для двух случаев, а именно:

$$T_s = 50 \text{ К и } T_s = 150 \text{ К}$$

$T_s$  : шумовая температура системы антенны земной станции

Эффективность антенны земной станции: 65%

Оценки основаны на статистических данных о количестве выпавших осадков, полученных для данных местоположений.

Методы вычисления требуемых показателей работы (диаметра антенны и э.и.и.м.) для разнесенных земных станций различны и зависят от конфигурации разнесения. При разработке линии с равноправным разнесением вычисления должны быть основаны на объединенном распределении вероятности ослабления в дожде в обоих направлениях, тогда как для равноправной конфигурации разнесения необходимо знать распределение общего времени ослабления в дожде и условную вероятность этого ослабления.

Условная вероятность  $P(L''/L')$  – это вероятность, с которой ослабление в дожде в месте размещения вспомогательной станции превысит величину  $L''$ , при условии что ослабление в дожде в месте размещения главной станции превысит величину  $L'$ .

Для того чтобы получить достоверные оценки требований к земной станции, необходимо иметь надежные статистические данные, опирающиеся на долговременные измерения условий распространения.

## 1.2 Работа в режиме пространственного разнесения с переключением

Для реализации земных станций с разнесением особое внимание необходимо уделить работе в режиме переключения, поскольку в этом случае кратковременная потеря сигнала или перекрытие могут возникнуть из-за разницы в длине трасс сигнала или из-за отсутствия непрерывности фазы сигнала.

В аналоговой передаче, например ЧМ-FDMA, переключение в ходе передачи всегда будет вызывать сбой фазы сигнала, что будет приводить к появлению переходного процесса в сигнале на выходе демодулятора приемных земных станций. На приемной земной станции переходных процессов, вызванных переключением, можно избежать при тщательном подборе длины электрической трассы для каждой ветви разнесения, измеренной от оборудования переключения до спутника.

При цифровой передаче можно избежать появления переходных процессов даже при переключении на передающей земной станции, предусмотрев наличие пустых интервалов в последовательности передаваемых сигналов и выполняя переключения во время этого пустого интервала. На приемной земной станции пустые интервалы должны быть отброшены в любом случае – было ли или не было выполнено переключение.

Переходное переключение в системе с разнесением как на передающем, так и на приемном конце удобнее всего реализовать в системе с TDMA. Пустые интервалы встраиваются, так как сигнал TDMA занимает только часть кадра. Более того, демодуляторы TDMA способны принимать импульсные сигналы с некогерентной фазой. Следовательно, некогерентность фазы TDMA сигналов не вызывает никаких трудностей. Единственно возможной проблемой при системе TDMA с пространственным разнесением будет необходимость очень точной передачи синхронизирующих сигналов даже для первоначальной передачи с резервной станции. Эта проблема может быть решена либо посредством непрерывной передачи с резервной станции пустых импульсов, либо при помощи получения достаточно точно ранжированных данных о спутнике, что вполне возможно, если в системе TDMA используется открытая цепь синхронизации. При передаче с TDMA длины трасс разнесения могут быть уравнены при помощи сигналов кадровой синхронизации на приеме. Синхронизация на приеме сигналов, приходящих с обеих ветвей разнесения, может выполняться автоматически за счет управления работой схемы с переменной задержкой, введенной в одну из ветвей. Была испытана экспериментальная система, использующая метод пустых импульсов.

Для выбора пути в режиме работы с разнесением необходимо определять качество передачи по различным ветвям разнесения. Так как влияние разнесения может уменьшаться в зависимости от метода измерения качества линии связи, следует очень внимательно подойти к выбору времени измерений и достигаемой точности.

### **1.3 Линия связи с разнесением**

Фактором, который необходимо рассмотреть, является то, что гипотетическая эталонная линия МСЭ-R, описанная в Рекомендации МСЭ-R S.352, и гипотетический эталонный цифровой тракт, описанный в Рекомендации МСЭ-R S.521, включают в свой состав линии связи (ЛСРС) между пунктом переключения разнесенных сигналов и каким-либо дополнительным требуемым оборудованием модуляции/демодуляции. Это означает, что в бюджете шумов системы должно быть учтено влияние ЛСРС.

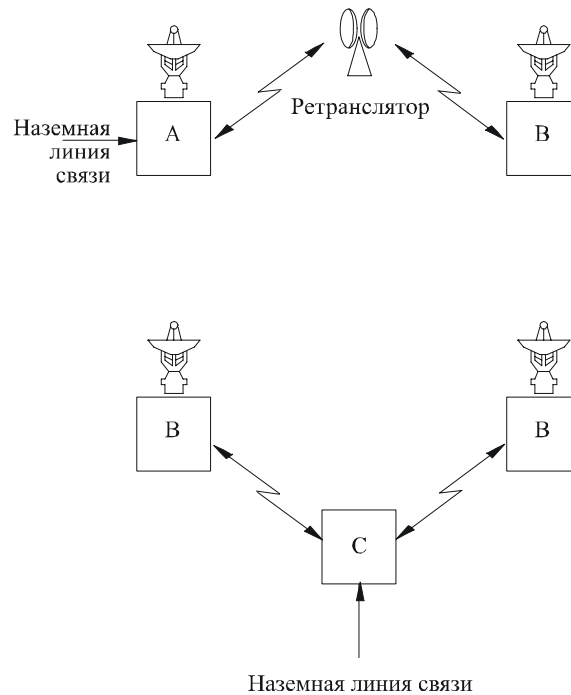
#### **1.3.1 Базовая конфигурация**

##### **1.3.1.1 Физические аспекты**

Существует множество различных конкретных конфигураций, которые можно рассматривать, и имеется множество причин, для того чтобы отдать предпочтение одной из них. В данном Приложении определены и описаны две такие конфигурации (см. рисунок 1):

- главная станция, в состав которой входит переключатель сигналов разнесения и наземный интерфейс. Разнесенные станции соединяются двухпролетной микроволновой ЛСРС с использованием активного или пассивного ретранслятора. (Наличие ретранслятора предполагается, поскольку вероятность того, что разнесенные станции будут находиться на расстоянии прямой видимости, очень невелика);
- две разнесенные станции и отдельная станция управления с интерфейсом и переключателем разнесенных сигналов; однопролетная микроволновая линия соединяет каждую станцию со станцией управления.

РИСУНОК 1  
Конфигурация разнесения



А: главная станция  
В: блоки разнесения  
С: управляющая станция

1061-01

В качестве ЛСРС могут использоваться также кабельные или волноводные линии. Когда на земной станции используются и МЧР-ЧМ и МВР (FDMA или TDMA), как правило, потребуется две параллельные линии связи.

### 1.3.1.2 Требования к модуляции

Когда используется МЧР-ЧМ, потребуется перемодуляция, поскольку обычно модуляция спутниковой линии и структура модулирующего сигнала отличаются от используемых в наземных системах. Основное различие связано с каналообразующим оборудованием. В наземных системах каналы, передаваемые в каждом направлении, обычно объединяются в один или несколько стволов и используют относительно низкий индекс модуляции. Земные станции будут разделять эти стволы на несколько стволов передачи для различных направлений, отличных от применяемых в наземных системах и использующих иной индекс модуляции. Приемных стволов будет еще больше, и они могут состоять только из нескольких каналов, которые должны быть введены в наземные стволы. Для выполнения этого процесса необходимо оборудование модуляции/демодуляции на главной земной станции и на удаленной станции, где используется обычный вариант ЛСРС. Все конфигурации могут быть реализованы за счет использования перемодуляции и установки на удаленной станции дублирующего комплекта оборудования.

Альтернативным методом является использование в наземной системе тех же самых параметров модуляции, которые используются в спутниковой системе. Этот метод представляется более простым, хотя и менее привычным. Выгода заключается в экономии на оборудовании перемодуляции, минус, однако, некоторые дополнительные затраты на наземную систему, хотя на это могут быть потрачены сэкономленные средства. Такой метод применим только ко второй конфигурации на рисунке 1. Когда используется МВР (FDMA или TDMA), может применяться любой из двух методов. В случае TDMA переключение разнесенных сигналов выполняется в промежутках между импульсами (см. п. 1.2). В ЛСРС может использоваться такая же модуляция, как

и в спутниковой системе, хотя скорости передачи данных, как правило, будут такими же, как в обычной наземной цифровой системе радиосвязи.

### **1.3.2 Технические факторы**

#### **1.3.2.1 Выбор частоты**

Выбор частоты для микроволновой ЛСРС требует тщательных исследований, целью которых является подтверждение того, что достигается требуемое общее качество. Информация о распространении наземных микроволновых сигналов содержится в соответствующих документах 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

#### **1.3.2.2 Требования к ширине полосы частот**

Ширина полосы частот, требуемая для создания ЛСРС, может быть связана с шириной полосы земной станции через коэффициент, равный или меньший единицы, в зависимости от того, используется ли перемодуляция или нет. Если используется только преобразование частоты, то требуемые полосы частот должны совпадать с точностью до Мегагерца. Путем перемодуляции можно достичь более высокой плотности каналов и меньших индексов ЧМ модуляции за счет более сложных интерфейсов мультиплексирования.

#### **1.3.2.3 Ослабление в дожде**

Следующими факторами являются ослабление в дожде и характеристики разнесения станций, причем оба они связаны с явлением осадков. Наиболее предпочтительным является сухой климат. Разнесение определяется расположением станций. Ожидается, что номинальным требуемым расстоянием будет 16 км. Предполагается, что наилучшей ориентацией линии, связывающей станции, является направление, перпендикулярное направлению доминирующих атмосферных фронтов, так как при этом ожидается, что наиболее сильные ослабления не будут одновременно проявляться на обеих станциях, и при этом может быть достигнута максимальная эффективность разнесения. Необходимо учитывать воздействие погодных условий и на ЛСРС, особенно если для этих линий используются сравнительно высокие частоты, хотя данный аспект может рассматриваться во вторую очередь.

#### **1.3.2.4 Изменения задержки передачи из-за переключения сигналов разнесения**

Еще один важный элемент связан с дифференциальной задержкой передачи между временем прихода разнесенных сигналов на пункт переключения.

### **1.3.3 Общие положения**

Два отдельных аспекта линий связи между разнесенными станциями (ЛСРС) являются наиболее важными:

- их вклад в общий бюджет шумов системы; и
- их вклад в нарушение работы системы.

Эти вопросы исследуются здесь с целью определить влияние важных параметров и их взаимосвязь с частями системы, относящимися к спутниковым линиям.

Проект линии в режиме с разнесением может разрабатываться на основе двух положений. Если выбрана система с перемодуляцией, то могут использоваться обычные радиорелейные линии. Если выбирается система с преобразованием частоты, то проект может иметь другую схему и будет очень похож на проект спутниковой линии передачи. Для оценки общего качества необходимо учитывать запасы на замирания и слагаемые шумов. В особом случае, когда одни и те же частоты используются и для ЛСРС и для спутниковой системы, необходимо сделать допуски на шумы помех.

#### **1.3.3.1 Бюджеты шумов для МЧР-ЧМ**

Для того чтобы поддерживать качество системы в соответствии с требованиями Рекомендации МСЭ-R S.353, необходимо обеспечить, чтобы шумы, вносимые ЛСРС в общий шум гипотетической эталонной цепи, были бы достаточно малыми.

Представляется разумным предположить, что шумы, вносимые ЛСРС, будут рассматриваться как составляющая бюджета земной станции (обычно 1500 пВт0псоф), поскольку, в действительности, ЛСРС выполняет часть функций, обычно выполняемых земной станцией. Необходимо указать только, что эти шумы могут оставаться настолько малыми, что суммарная величина 1500 пВт0псоф не превышает. Замирания на ЛСРС будут также вносить свой вклад в общий бюджет кратковременных шумов линии.

Шумы, вносимые ЛСРС, будут состоять из множества компонентов в зависимости от реализуемой конфигурации и используемых полос частот. Этими компонентами являются:

a) *Тепловой шум*

В обычных конструкциях радиорелейных линий МСЭ-R его предусматривают равным от 1 до 3 пВт0псоф на 1 км или меньше, а для одного пролета эта цифра может поддерживаться равной 10 пВт0псоф или менее. В специальных конструкциях также достигается небольшая сумма вносимых шумов. Компоненты, изменяющиеся во времени из-за замираний, вызванных многолучевостью и ослаблениями в дожде, являются относительно большими, но для коротких пролетов их величина может оставаться в разумных пределах. Тепловой шум пропорционален (по шкале дБ) глубине замираний, вне зависимости от того, каким механизмом они вызваны.

b) *Внутренний шум*

Это шум в основном спектре, и он проявляется только в конфигурациях с перемодуляцией. Для двоясных основных полос обычными являются уровни шума от 50 до 100 пВт0псоф. Бюджет обычной земной станции предусматривает одно слагаемое такого типа, тогда как в конфигурации с перемодуляцией будет добавлено еще одно слагаемое.

c) *Помехи*

В некоторых случаях другие микроволновые системы, работающие в тех же полосах частот, могут создавать очень небольшие помехи. Этот вклад можно считать пренебрежимо малым. В особом случае, когда применяется один и тот же способ многократного использования частот, можно ожидать, что наличие помех работе земной станции как на линии вверх, так и на линии вниз. Для обычного режима работы, по оценкам, характерны значения порядка 10–100 пВт0псоф. Кроме того, некоторые замирания могут сопровождаться увеличением этого шума вместе с тепловым шумом в течение очень коротких промежутков времени. В этой конфигурации не требуется перемодуляции, поэтому дополнительное слагаемое, связанное с п. b), исключается.

d) *Интермодуляция*

Схема с перемодуляцией будет дополнительно содержать пару модулятор-демодулятор и усилители ПЧ, тогда как схема с преобразованием частоты является обычной для оборудования всех земных станций и, следовательно, вносит очень небольшие шумы интермодуляции.

В таблице 2 показан возможный бюджет шумов:

ТАБЛИЦА 2

Примерные бюджеты – Условия свободного пространства				
	Перемодуляция (2 пролета)		Преобразование частоты (1 пролет)	
	Низкий (пВт0псоф)	Высокий (пВт0псоф)	Низкий (пВт0псоф)	Высокий (пВт0псоф)
Тепловой	2	20	1	10
Интермодуляция в полосе частот модулирующего сигнала	50	100	–	–
Помехи	–	–	10	100
Интермодуляция (РЧ)	100	200	20	50
Всего (пВт0псоф)	152	320	31	160

### 1.3.3.2 Ошибка в бюджете для TDMA

Для того чтобы качественные показатели системы поддерживались в соответствии с настоящей Рекомендацией, вклады, вносимые ЛСРС в общую вероятность ошибки гипотетического цифрового эталонного тракта, должны быть достаточно малыми.

Следует отметить, что в варианте с перемодуляцией ошибки, вносимые ЛСРС, будут аддитивными, тогда как в варианте с преобразованием частоты аддитивным будет влияние шумов.

### 1.3.3.3 Соображения в отношении частот

На основании обычных характеристик микроволнового оборудования можно получить зависимость характеристик замирания от частоты, климата и длины трассы в области дождей. Ослабление в дожде и многолучевые замирания являются независимыми событиями, а фактически – почти всегда взаимоисключающими.

Так как предполагается, что расстояние разнесения земных станций составляет порядка 16–24 км, и поскольку ожидается также, что потребуется либо ретранслятор, либо обычная станция, длины отдельных трасс ЛСРС, вероятно, не будут превышать 16 км. Запасы для трасс такой длины обычно могут быть сделаны достаточно большими, чтобы они учитывали кратковременные нарушения работы, не превышающие 0,001% времени.

## 2 Регулирование мощности передачи на линии вверх

### 2.1 Введение

Регулирование мощности на линии вверх (РМВ) может использоваться как средство уменьшения влияния ослабления сигнала в более высоких полосах частот (например, в полосах 14/11 ГГц и 30/20 ГГц) на линии вверх. Этот метод может использоваться для эффективной работы спутниковой системы связи и для уменьшения помех другим спутникам и наземным линиям за счет уменьшения э.и.и.м. в условиях чистого неба.

### 2.2 Реализация РМВ

Существует множество способов осуществления РМВ. Наиболее широко используются следующие методы.

#### 2.2.1 Метод РМВ с открытой цепью

Методы РМВ с открытой цепью – это метод, в котором контрольный сигнал спутника используется для измерения ослабления в дожде на линии вниз. Благодаря корреляции между ослаблением в дожде на линии вверх и на линии вниз, это измерение можно использовать для оценки уровня ослабления в дожде на линии вверх, и, следовательно, для значений управляющих параметров РМВ. Большинство предсказанных значений совпадает с реальными величинами; однако некоторые значения отличаются, что вызвано такими условиями окружающей среды, как скорость ветра или распределение и размер дождевых капель. В таблице 3 показан пример возможных ошибок при оценке ослабления на линии вверх (14 ГГц) от результатов измерений, выполненных на линии вниз.

Некоторые источники возможных ошибок были исключены, как слишком незначительные для оценки (например, ошибка системы отслеживания антенны, ошибка наведения антенны спутника, ошибка предсказаний, ухудшение коэффициента усиления антенны, влияние рефракции при низких углах места, быстрые флуктуации интенсивности дождя). Также были исключены очень редко встречающиеся источники ошибок (например, большие скопления влажного снега в раскрыве антенны, отказы цепей управления или измерения). Различные комбинации ошибок из этих дополнительных источников могут, возможно, увеличить ошибку при оценке уровня на линии вверх.



ТАБЛИЦА 3

**Пример возможных ошибок в оценках ослабления на линии вверх (14 ГГц)  
по измерениям ослабления на линии вниз (11 ГГц)**

a) Ослабление на линии вверх менее 1,0 дБ			
	Угол места		
	5°	15°	25°
Ошибка оборудования <sup>(1)</sup>	0,725	0,725	0,725
Ослабление в кристаллах льда	0,05	0,05	0,05
Рассеяние в водяных парах	0,20	0,10	0,05
Уровень в условиях чистого неба	0,10	0,10	0,10
Максимальная ошибка на линии вверх (дБ)	± 1,075	± 0,975	± 0,925
b) Ослабление на линии вверх от 1 до 6 дБ			
	Угол места		
	5°	15°	25°
Ошибка оборудования <sup>(1)</sup>	0,725	0,725	0,725
Ослабление в кристаллах льда	0,05	0,05	0,05
Распределение, зависящее от размера дождевых капель	0,10	0,075	0,05
Рассеяние в водяных парах	0,20	0,10	0,05
Уровень в условиях чистого неба	0,10	0,10	0,10
Ошибка поляризации	0,10	0,075	0,05
Ошибка в длине пути	0,20	0,10	0,05
Уровень таяния	0,05	0,05	0,05
Максимальная ошибка на линии вверх (дБ)	± 1,525	± 1,275	± 1,125
c) Ослабление на линии вверх более 6 дБ			
	Угол места		
	5°	15°	25°
Ошибка оборудования <sup>(1)</sup>	0,725	0,725	0,725
Ослабление в кристаллах льда	0,05	0,05	0,05
Распределение, зависящее от размера дождевых капель	0,20	0,15	0,10
Рассеяние в водяных парах	0,10	0,075	0,05
Уровень в условиях чистого неба	0,10	0,10	0,10
Ошибка поляризации	0,20	0,15	0,10
Ошибка в длине пути	0,40	0,25	0,15
Уровень таяния	0,05	0,05	0,05
Максимальная ошибка на линии вверх (дБ)	± 1,825	± 1,550	± 1,325

<sup>(1)</sup> Предполагаемая выше ошибка оборудования, равная ±0,725 дБ, была получена исходя из ошибки в ±0,5 дБ, полученной на частоте 11,7 ГГц (на линии вниз) и, с учетом коэффициента масштабирования 1,45 между частотами 11,7 ГГц и 14 ГГц. Ошибка ±0,5 дБ была получена с использованием опубликованных данных и нуждается в дальнейшей проверке при помощи дополнительных измерений.

### 2.2.2 Метод РМВ с замкнутой цепью

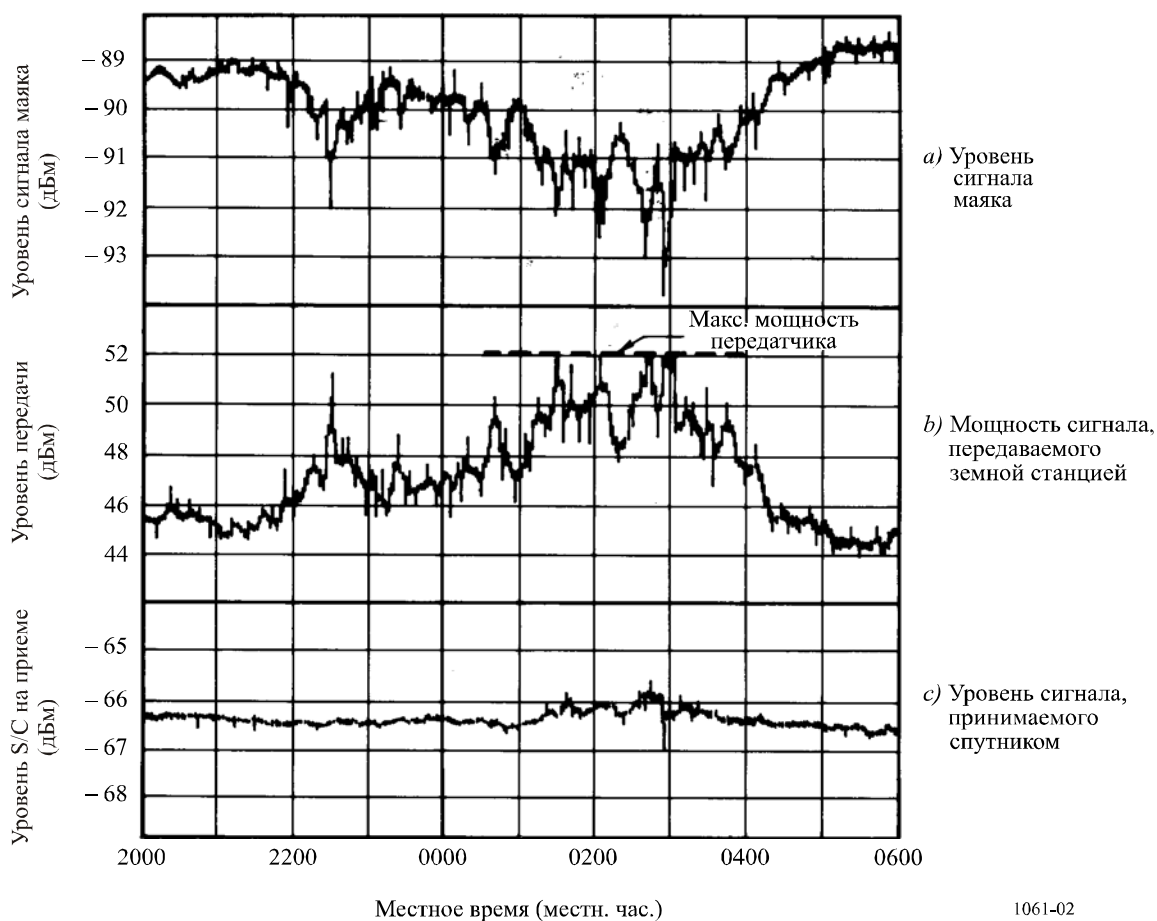
Метод РМВ с замкнутой цепью – это метод, при котором сигнал маяка-спутника сравнивается с отношением  $C/N$  в цепи обратного контроля или с  $S/N$  пилот-сигнала или специального сигнала в канале. Этим способом можно с высокой степенью точности определить ослабление сигнала в дожде на линии вверх и требуемый управляющий параметр РМВ. Однако недостатком такого подхода является необходимость создания кроме канала связи еще и дополнительных каналов управления.

### 2.3 Эксперимент по регулированию мощности на линии вверх (РМВ)

Был проведен эксперимент с использованием РМВ с открытой цепью в полосе 30/20 ГГц, его результаты показаны на рисунке 2. В этом эксперименте значения РМВ определялись на основании данных об ослаблении на линии вниз. На рисунке 2а) показан уровень сигнала маяка, на рисунке 2б) – уровень мощности передачи усилителя большой мощности, а на рисунке 2с) – уровень принимаемого сигнала на спутнике. Как показано, изменение суммарных значений  $C/N$  могут быть удержано в пределах 1 дБ (в размахе), за исключением периода, когда мощность, которую требуется передать, превышает максимальную мощность передачи.

РИСУНОК 2

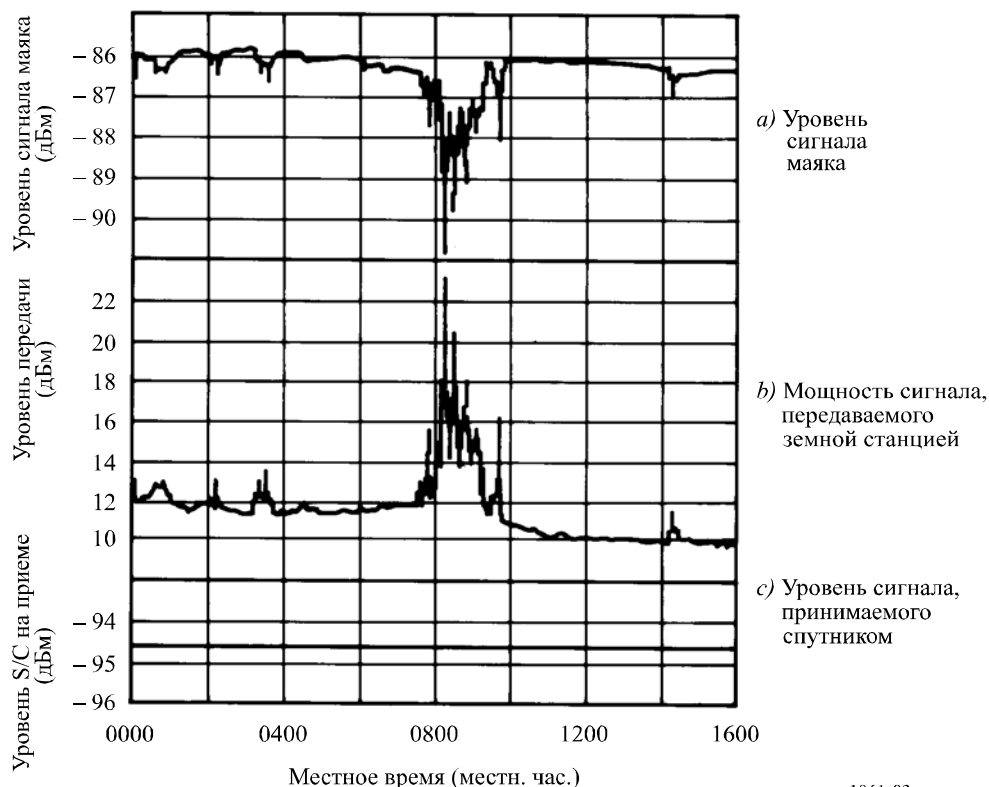
Результаты экспериментов с использованием РМВ с открытой цепью



Кроме того, был проведен эксперимент РМВ с замкнутой цепью в полосе 30/20 ГГц, результаты которого показаны на рисунке 3. Ошибка управления оставалась в пределах 0,3 дБ (в размахе).

РИСУНОК 3

Результаты эксперимента с использованием РМВ с замкнутой цепью



1061-03

#### 2.4 РМВ с открытой цепью и использованием радиометра

Регулирование мощности на линии вверх может быть выполнено с использованием радиометра, применяемого для измерений энергии, излучаемой дождем на протяжении трассы распространения к спутнику. Здесь не требуется ни сигнал маяка, ни пилот-сигнал. При этом устраняются такие ошибки, вносимые приемниками контрольного сигнала, как изменение усиления с изменением температуры МШУ и т. д.

Несколькими исследователями изучалась взаимосвязь между увеличением ослабления в осадках и температурой антенны. Точность вычисленных по результатам измерений температуры антенны ослаблений на трассе распространения, как правило, выше 0,5 дБ для ослаблений, меньших 6 дБ (на 12 ГГц в Канаде). В реальной системе мощность на линии вверх, как правило, не будет существенно превышать 6 дБ. Следовательно, для вычисления ослабления на пути распространения для всего диапазона результатов, представляющих практический интерес, может использоваться радиометр.

В течение нескольких дней до и после равноденствий, когда наклон Солнца приблизительно равен наклону спутника, будут наблюдаться переходы Солнце. Для того чтобы отличить эти моменты повышения температуры антенны от ее повышения из-за ослабления в дожде в другое время достаточно часто вычисляются углы, под которыми видны спутник и Солнце. Когда угловой разнос между осью антенны радиометра и Солнцем меньше, чем выбранный угол, то предполагается, что повышение температуры антенны вызвано влиянием Солнца, и регулирование мощности на линии вверх не выполняется.

Была разработана система регулирования мощности на линии вверх для полосы 14/12 ГГц, в которой радиометр измеряет температуру антенны в полосе частот ниже рабочей полосы линии вверх вычисляет ослабление на пути распространения на желаемой рабочей частоте линии верх и регулирует уровень ПЧ сигнала, подаваемого на преобразователь частоты вверх. Температура антенны измеряется при помощи радиометра нового типа. Принцип его работы фундаментально отличается от обычного радиометра Дикке и позволяет получить очень стабильные результаты измерений температуры антенны. Весь радиометр заключен в цилиндр, смонтированный в главном

фокусе параболического отражателя. Частота радиометра должна отличаться от частоты на линии вверх поэтому, чтобы передаваемая энергия, которая рассеивается из-за дождя по трассе в обратном направлении, не обнаруживалась радиометром, в радиометре используется частота 13,3 ГГц.

В эксперименте с использованием вышеописанной системы уровень сигнала в обратной цепи сравнивался с силой принимаемого сигнала маяка-спутника. Уровни этих сигналов были хорошо коррелированы, что показывает, что уровень сигнала на линии вверх, принимаемого спутником, остается почти постоянным и не зависит от ослабления в дожде. Дополнительный опыт эксплуатации был проведен с использованием двух систем регулирования мощности на линии вверх, установленных в Канаде.

## 2.5 Вывод

Регулировка мощности на линии вверх (РМВ) является одним из наиболее важных способов обеспечения работы спутниковых систем связи в полосах более высоких частот. Путем использования РМВ для полос более высоких частот могут быть уменьшены помехи между соседними спутниковыми системами и наземными сетями. В результате может быть достигнуто более эффективное использование геостационарной спутниковой орбиты и более эффективная работа систем.

Для создания более точных методов РМВ необходимы подробные исследования.

## 3 Адаптивные системы передачи

### 3.1 Введение

Системные показатели качества работы цифровых спутниковых систем связи могут быть улучшены за счет адаптивного уменьшения скорости передачи информации во время неблагоприятных условий распространения. Для изменения скорости передачи информации могут использоваться переменные параметры (тактовая частота и количество состояний фазы) ФМР модуляции, а также переменный коэффициент FEC (упреждающая коррекция ошибок) при кодировании. Для систем TDMA с переменной скоростью передачи может использоваться также метод суммарной синхронизации для демодулированного ФМР сигнала.

Следует отметить, что в отношении государственных служб может не быть возможности уменьшения скорости передачи информации, в этих случаях будет необходимо применять другие меры борьбы с замираниями.

### 3.2 Системы с адаптивной модуляцией

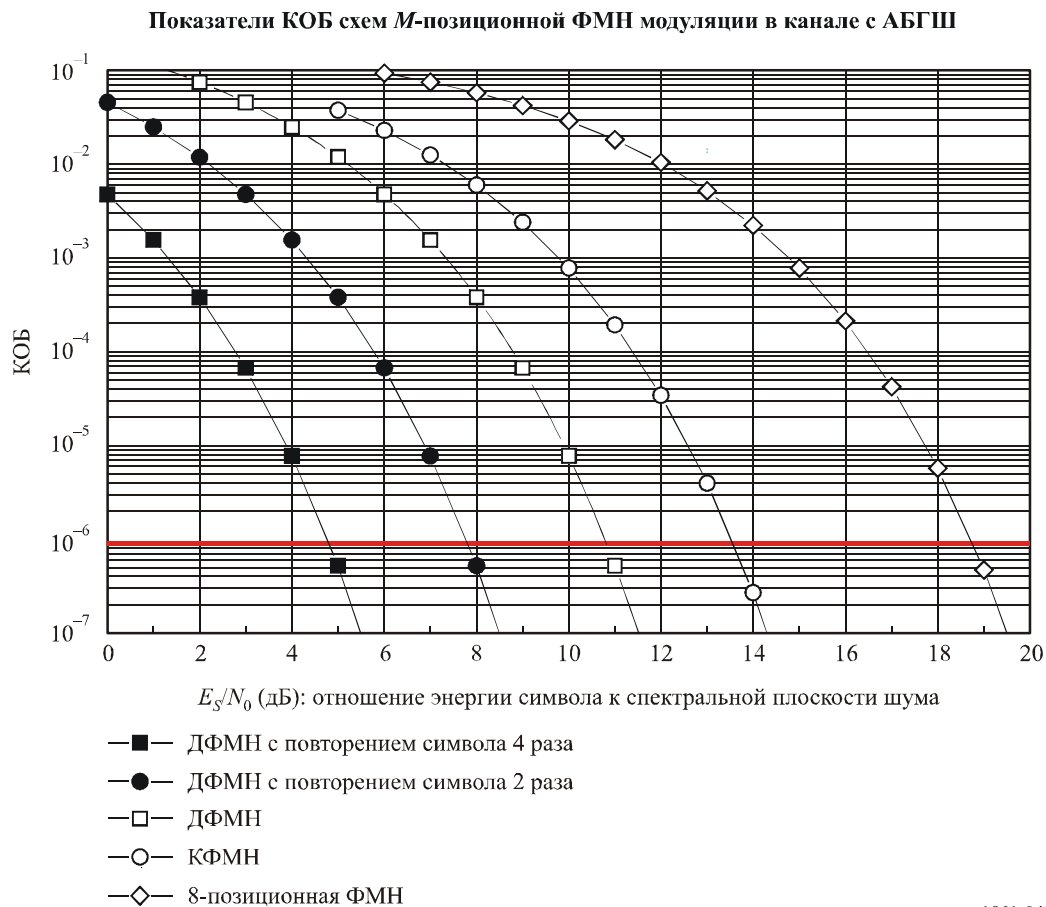
Были разработаны различные виды универсальных ФМН модемов. Эти модемы работают в разных режимах *M*-позиционной ФМН, и частоты их тактовых импульсов на передаче постоянно изменяются. Этот модем может применяться для пакетных сигналов.

Если коэффициент снижения скорости передачи равен  $\gamma$ , то улучшение  $C/N$  определяется как:

$$\Delta(C/N) = -10 \log \gamma \quad \text{дБ.} \quad (1)$$

На рисунке 4 показаны показатели КОБ схем *M*-позиционной ФМН модуляции в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). На этом рисунке  $N$  SR означает повторение символа  $N$  раз. Как показано на данном рисунке, повторение символа два раза ввиду уменьшения скорости вдвое могло бы обеспечить улучшение  $C/N$  на 3 дБ. Изменение схемы модуляции от 8-позиционной ФМН до КФМН могло бы обеспечить улучшение  $C/N$  примерно на 5 дБ, а с КФМН до ДФМН могло бы обеспечить улучшение примерно на 3 дБ при КОБ =  $10^{-6}$ .

РИСУНОК 4



Недавно Комитет по DVB-S2 ЕТСИ (цифровое телевизионное радиовещание – структура формирования кадров, каналное кодирование и системы модуляции второго поколения для радиовещания, интерактивных услуг, сбора новостей и других применений широкополосной спутниковой связи) определил режимы работы при адаптивном кодировании и модуляции (АКМ). В качестве схем модуляции использовались КФМН, 8-позиционная ФМН, 16-позиционная АФМН и 32-позиционная АФМН.

### 3.3 Система с адаптивным кодированием

Совместимые по скорости перфорированные сверточные коды (RCPC) с каскадным кодированием Рида-Соломона (РС) или без него являются наиболее популярными используемыми схемами модуляции. Недавно разработанные совместимые по скорости (СК) схемы кодирования, включающие сверточные турбокоды, блочные турбокоды, могут также эффективно использоваться. Одной из таких реализаций является универсальный кодек с выбираемой скоростью кодирования.

Улучшение  $C/N$  в том случае, когда кодек применяется в системе с переменной скоростью передачи информации, определяется как:

$$\Delta(C/N) = 10 \log (R_o/R_a) + G_a - G_o \quad \text{дБ}, \quad (2)$$

где:

- $R_o$ : скорость кодирования;
- $G_o$ : коэффициент кодирования при работе в условиях ясного неба;
- $R_a, G_a$ : то же, что и выше при работе в условиях дождя.

В таблице 4 показаны примеры улучшения  $C/N$  с помощью различных схем адаптивного кодирования. В таблице 4 схема В использовалась бы в условиях дождя, а схема А – в условиях ясного неба. Усиление при кодировании в таблице 4 – это усиление по сравнению со случаем схемы ДФМН в отсутствие кодирования и при КОБ =  $1 \times 10^{-6}$ . Каскадные коды и совместимые по скорости (СС) турбокоды в таблице 4 – это схемы с FEC, указанные в Рекомендации МСЭ-R ВО.1724.

ТАБЛИЦА 4

Улучшение отношения  $C/N$  с помощью схем адаптивного кодирования

Схема	Схема А (усиление при кодировании)	Схема В (усиление при кодировании п)	Различие усиления при кодировании (А-В) (дБ)	Усиление за счет изменения скорости (дБ)	Общие улучшения (дБ)
Коды RSPC	1/2 сверточный (5,5 дБ)	7/8 сверточный (3,5 дБ)	2,0	2,5	4,5
	1/2 сверточный (5,5 дБ)	3/4 сверточный (4,5 дБ)	1,0	1,8	2,8
	3/4 сверточный (4,5 дБ)	7/8 сверточный (3,5 дБ)	1,0	0,7	1,7
Каскадные коды	1/2 сверточный + РС (204,188) (6,7 дБ)	1/2 сверточный (5,5 дБ)	1,2	0,4	1,6
	1/2 сверточный + РС (71,55) (6,2 дБ)	1/2 сверточный (5,5 дБ)	0,7	1,5	2,2
Совместимые по скорости турбокоды	1/3 турбо (9,0 дБ)	1/2 турбо (8,8 дБ)	0,2	0,8	1,0
	1/3 турбо (9,0 дБ)	2/5 турбо (8,4 дБ)	0,6	1,8	2,4
	1/3 турбо (9,0 дБ)	3/4 турбо (6,9 дБ)	2,1	3,5	5,6
	1/3 турбо (9,0 дБ)	6/7 турбо (5,7 дБ)	3,3	4,1	7,4

### 3.4 Система с переменной скоростью передачи, использующая методы распределения спектра и синхронизирующей суммы

Имеется еще один метод, который попадает в категорию методов переменной скорости передачи. Поток данных в основной полосе (информационные биты или биты исправления ошибок) скремблируются с использованием псевдошумового кода с постоянной тактовой частотой, а затем подвергаются ФМН модуляции. Скорость передачи может изменяться за счет изменения отношения скорости передачи данных и тактовой частоты псевдошумового кода. Выбранное отношение должно быть  $1/n$ , где  $n$  – положительное целое число. В приемнике скремблированный сигнал подвергается ФМН демодуляции с тактовой частотой псевдошумового кода, а затем сжимается при помощи псевдошумового кода. После синхронизации псевдослучайного кода данные, передаваемые в основной полосе, детектируются.

Этот метод применяется в системе TDMA с переменной скоростью передачи, в которой скорость передачи адаптивно изменяется в каждом пакете TDMA. Было подтверждено экспериментально, что ухудшение показателей коэффициента ошибок по битам на 2 дБ меньше теоретического в гауссовском канале, в тех случаях, когда система TDMA работает со скоростью  $8/n$  Мбит/с ( $n = 1, 2, 4, 8, 16, 32$ ).

Этот метод можно рассматривать как модуляцию и демодуляцию, способные изменять скорости передачи, используя постоянную тактовую частоту или переменную скорость кодирования, с постоянным усилением при кодировании, равном 0 дБ.

### 3.5 Алгоритмы управления

В способе адаптивной передачи, используемом для противодействия ослаблению в дожде, применяются эффективные в плане использования спектра схемы передачи в условиях ясного неба и осуществляется переключение на эффективные в плане мощности схемы в условиях дождя. Поскольку операция переключения предусматривает изучение качества ранее принятых сигналов и предсказание качества сигнала в следующей точке осуществления измерений, требуется интеллектуальный метод управления. Механизм управления включает оценку, предсказание  $S/N$  и выбор формата радиосвязи. При предсказании  $S/N$  на приемной стороне следует учитывать задержку кругового пути сигнала на спутниковой линии. Выбор формата радиосвязи обеспечивает адаптивное распределение подходящих схем передачи, таких как схем кодирования и модуляции, передающей и приемной сторонам.

#### 3.5.1 Оценка качества сигнала

В целях адаптивного распределения схем передачи в соответствии с условиями канала важно оценивать качество канала. Одним из возможных вариантов реализации этого мог бы быть "метод среднего" для оценки отношения  $S/N$  принимаемых символов в системе с  $M$ -позиционной ФМН. Оценивается гистограмма принимаемого символа, а затем схема оценки оценивает отношение  $S/N$  на основании линейной комбинации гистограммы и соответствующих весовых коэффициентов. Гистограмма распределения принимаемых символов может быть рассчитана путем подсчета количества символов на каждом уровне квантования. Задавая правильные весовые коэффициенты для гистограммы, мы можем получить желаемую характеристику оценки, которая монотонно уменьшается при увеличении отношения  $S/N$ . То есть

$$L_w = f(S/N), \quad (3)$$

где  $L_w$  – это линейная комбинация гистограммы и весовых коэффициентов. Поскольку решение обратной функции  $f^{-1}$  для получения  $S/N$  на основании  $L_w$  является сложной и трудоемкой задачей, может использоваться справочная таблица.

#### 3.5.2 Предсказание качества сигнала

Адаптивная система компенсации затуханий в дожде необходима для предварительного предсказания значения ослабления в дожде или качества сигнала с учетом задержки кругового пути сигнала. Изменение отношения  $S/N$  на спутниковой линии обусловлено изменением затухания в дожде и сравнительно быстрой сцинтилляцией. Обычно изменение отношения  $S/N$ , вызванное сцинтилляцией, является гораздо более быстрым, чем скорость реакции адаптивной системы, поэтому схема предсказания должна отфильтровывать эти быстрые изменения. Может использоваться схема предсказания, реализующая четыре функции, в том числе дискретную по времени фильтрацию нижних частот (ФНЧ), предсказание затуханий в дожде, исправление средней ошибки изменения  $S/N$  и распределение запаса на гибридное фиксированное/изменяемое предсказание.

В схеме предсказания ФНЧ используется для исключения быстрого изменения отношения  $S/N$ . Затем схема предсказывает уровень сигнала  $\gamma_{t+p}$  по истечении времени предсказания  $p$  на основе предыдущих уровней сигнала с использованием следующей типичной линейной регрессивной фильтрации:

$$\tilde{y}_{t+p} = \sum_{i=0}^{n-1} w_{i,t} y_{t-i}, \quad (4)$$

где:

$n$ : время наблюдения;

$\gamma_t$ : сигнал на выходе ФНЧ.

В одной из простейших реализаций вышеприведенного используется два постоянных значения веса для двух конечных точек периода наблюдения  $w_{0,t} = p/(n-1) + 1$  и  $w_{n-1,t} = -p/(n-1)$  и предполагается, что будущее изменение уровня сигнала останется таким же, как и предыдущее изменение. Данный метод называется предсказанием на основе спада (ПОС). С другой стороны, могут быть применены изменяемые веса с использованием алгоритмов предсказания с адаптивной фильтрацией (ПАФ),

например алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки (АМСО) или рекурсивный метод наименьших квадратов (РМНК). В этом случае веса обновляются в каждый момент осуществления измерения.

Исправление средней ошибки изменения  $S/N$  включает запас на компенсацию ошибки предсказания. Запас необходим ввиду осуществления в схеме предсказания процесса фильтрации для быстрого изменения уровня сигнала. Этот запас представляет собой сумму фиксированного запаса и изменяемого запаса, полученного на основании стандартного отклонения ошибок предсказания.

### 3.5.3 Выбор форматов радиосвязи

Для адаптивной компенсации влияния дождя требуется реальновременной алгоритм выбора соответствующей схемы передачи, обладающей наибольшей эффективностью использования спектра и наилучшим качеством при текущем уровне ослабления. В то же время следует учитывать, что переключение влечет за собой увеличение ширины полосы ввиду обмена данными управления. Следующий алгоритм выбирает схему передачи  $d$ , имеющую максимальную пропускную способность при текущем значении отношения  $S/N$ , так что

$$\arg \max_d \left( \sum_{k=0}^{N-1} \lambda^k S_d(t-k) \right) \quad \text{для } d \in \{0, 1, \dots, d_{\max} - 1\}, \quad (5)$$

где:

$d_{\max}$ : количество имеющихся схем модуляции;

$S_d(t)$ : пропускная способность, нормированная скоростью передачи данных схемы передачи  $d$ .

Значение пропускной способности получают с помощью выражения  $S_d(t) = 1 - P_d(\gamma(t))$ , где  $P_d(\gamma(t))$  – это значение КОБ для предсказанного значения  $\gamma(t)$  отношения  $S/N$ . Если  $P_i(\gamma(t))$  больше требуемого КОБ, то КОБ заменяется значением, равным 1, с целью демонстрации непригодности выбранной схемы. Для учета времени гистерезиса значение полосы пропускания накапливается за предыдущий период длительностью  $N$  с коэффициентом веса  $\lambda$ . Этот коэффициент веса обратно пропорционален величине текущего спада  $S/N$  следующим образом:

$$\lambda = \frac{1}{x|\Delta\gamma(t)|+1}, \quad (6)$$

где:

$\Delta\gamma(t)$ : текущий спад  $S/N$ ;

$x$ : параметр, который корректирует чувствительность  $\lambda$  к спаду.

Поскольку уровень  $S/N$  увеличивается, алгоритм может немедленно переключиться на схему с более высокой скоростью передачи с целью сохранения наивысшей пропускной способности, удовлетворяющей требуемому КОБ. Однако в этом случае отказ в обслуживании может произойти, если отношение  $S/N$  быстро уменьшится ниже определенного порога. Для предотвращения этого в алгоритме возможно использование таймера блокировки. Алгоритм переключается на схему передачи с более высокой скоростью передачи данных, только если эта схема постоянно выбиралась в течение предопределенного периода.

### 3.6 Вывод

В качестве методов поддержания качества сигнала цифровой спутниковой системы связи при неблагоприятных условиях распространения рассмотрено три вида методов адаптивной передачи.

Схема адаптивной модуляции с использованием модема ФМН общего назначения и схема адаптивного кодирования с применением совместимых по скорости кодов пригодны для простой системы связи с относительно экономичным и/или простым оборудованием земной станции.

В адаптивной системе передачи алгоритм управления играет очень большую роль в повышении качества работы системы. Рассмотрен алгоритм управления, предусматривающий оценку качества сигнала, прогнозирование качества сигнала и выбор формата радиосвязи.



## 4 Способы борьбы с замираниями с использованием методов многостанционного доступа с временным разделением (TDMA)

### 4.1 Введение

Способ борьбы с замираниями (СБЗ) с использованием TDMA представляет собой метод борьбы с сильным влиянием осадков на высоких частотах; это адаптивная система, которая предоставляет несущим с замираниями в сети TDMA дополнительный ресурс времени, позволяя таким образом достичь приемлемого значения коэффициента ошибок в условиях с ухудшенным  $C/N$ , что характерно для замираний.

В системе, реализующей СБЗ с TDMA, одна из частей кадра, являющаяся совместно используемым ресурсом, доступна несущим с замираниями. Это означает, что в условиях чистого неба эффективность использования кадра, а, значит, и пропускная способность системы, реализующей СБЗ с TDMA, меньше, чем у эквивалентной обычной системы TDMA. Период кадров, как правило, не является переменным, но любые пакеты, подверженные воздействию замираний, растягиваются во времени в пределах кадра. Это означает, что растянутый пакет содержит то же количество информационных (пользовательских) битов, т. е. скорость передачи информации не изменяется. Следовательно, этот способ особенно пригоден для коммутируемых служб/сетей общего пользования, в которых использование методов изменения скорости передачи информации может быть нецелесообразным (см. п. 3).

Каждый пакет должен растягиваться только до той степени, которая является необходимой для борьбы с замираниями, встречающимися на конкретном маршруте, будь они на линии вверх или на линии вниз, или на обеих линиях, и для получения максимальной эффективности системы.

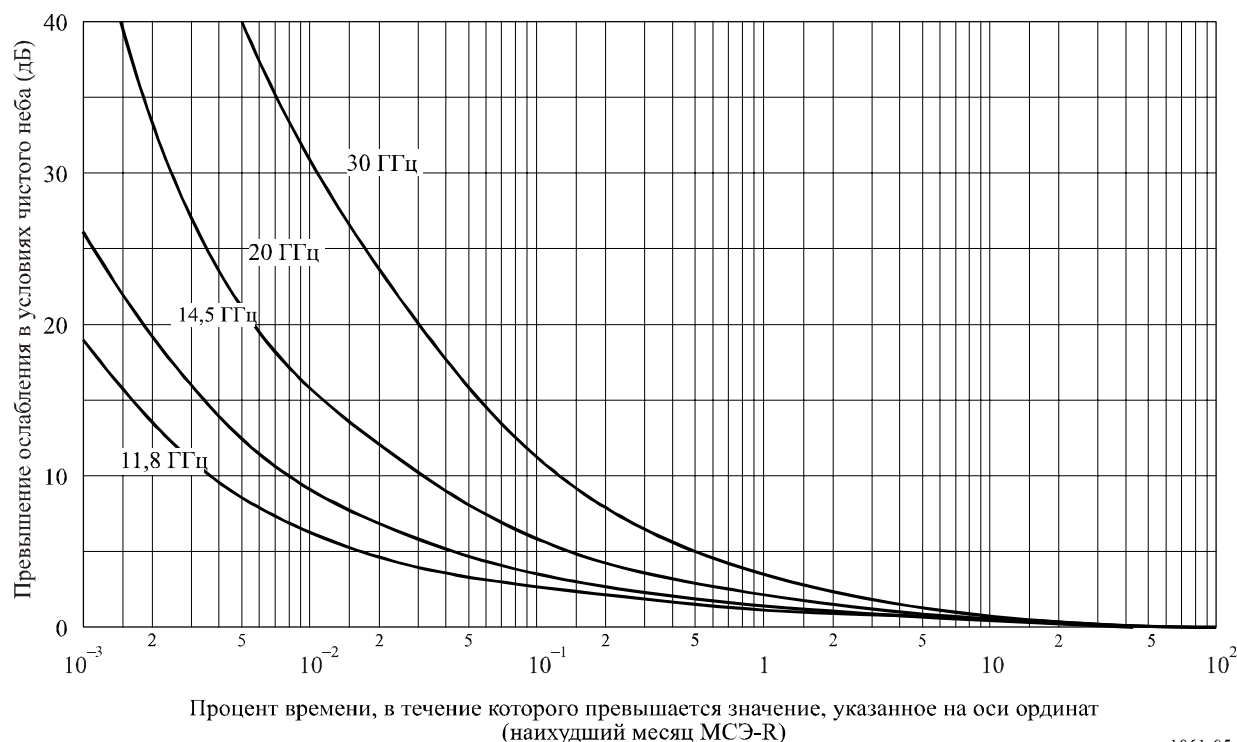
### 4.2 Пространственно-временная статистика атмосферных замираний в диапазонах 30/20 ГГц

В течение 43 месяцев в Мартлешам Хит (Восточное побережье, Соединенное Королевство) (климатическая зона E МСЭ-R) были проведены многочисленные эксперименты на частотах 14/12 ГГц на трассе с углом места  $30^\circ$  к спутнику OTS2. Результаты этих измерений для одного места были масштабированы для частот 30/20 ГГц с использованием коэффициентов частотного масштабирования МСЭ-R, и показаны на рисунке 5, где представлены статистические данные по ослаблению для наихудшего месяца. Затем с использованием данных измерений была создана компьютерная модель, позволяющая статистически предсказывать одновременное возникновение замираний на двух и более линиях в пределах области покрытия спутника, в предположении, что все линии имеют доступ к запасным ресурсам, для того чтобы оценить повышение готовности линии, которое может обеспечить адаптивная система с TDMA.

Одновременные замирания на  $n$  станциях в круговой зоне диаметром  $d$  были смоделированы путем выборки  $n$  моментов времени из полученной базы данных (указанной выше) в пределах промежутка времени  $t$ , где  $t$  и  $d$  связаны через коэффициент 30 км/ч, т. е. "эффективную" скорость ветра, доминирующую в Соединенном Королевстве во время периодов осадков. Долговременные статистические данные затем собирались путем перемещения этого окна шириной  $t$  для всей базы данных по 43 месяцам, и были преобразованы в статистические данные МСЭ-R для наихудшего месяца.

РИСУНОК 5

Типичные зависимости ослабления от готовности одной станции  
(наихудший месяц МСЭ-R)



1061-05

Была проделана значительная работа по сравнению этой модели с результатами непосредственных измерений на известных расстояниях, и для проверки достоверности коэффициента преобразования 30 км/ч. Сравнения были выполнены с использованием:

- модели Ходжа пространственного разнесения (до 10 км);
- корреляции осадков (до 400 км);
- метеорологических данных (до 1200 км).

Отмечено достаточно хорошее совпадение вышеуказанных данных и использованных моделей с коэффициентом преобразования 30 км/ч для расстояний, превышающих 10 км.

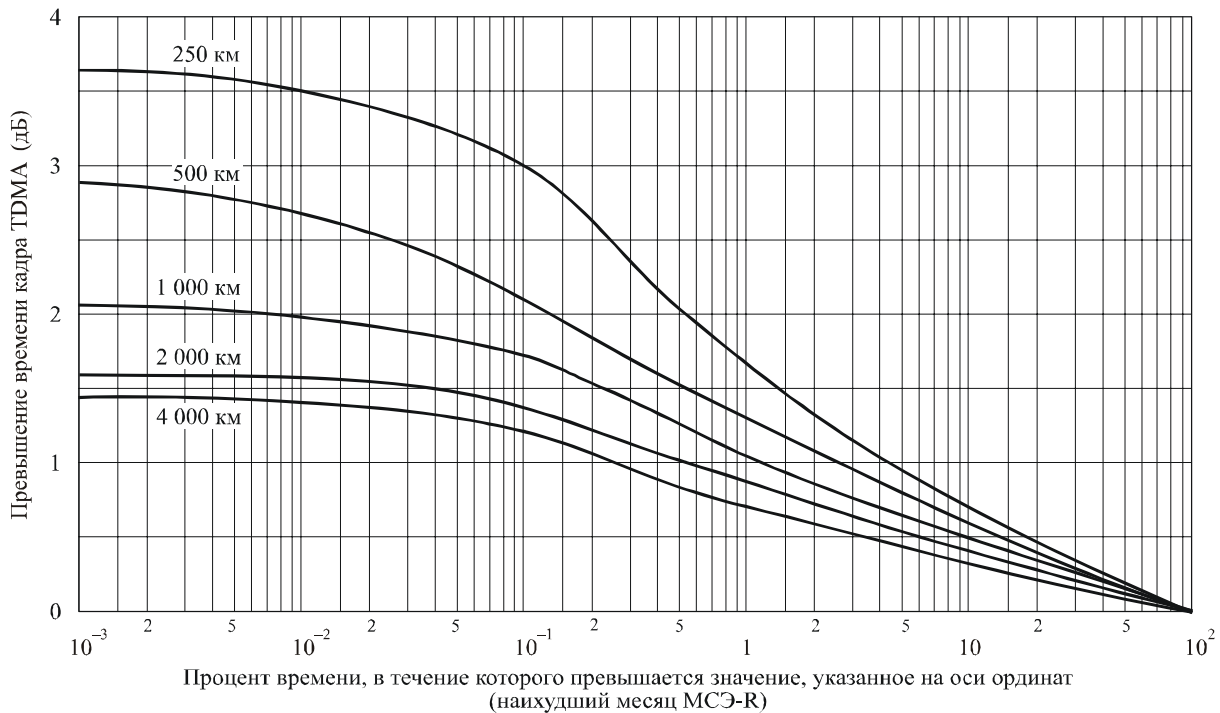
Эта модель использовалась для объединения статистических данных о резервном времени кадра TDMA, необходимом для поддержания на спутнике соответствующей величины  $E_b/N_0$  в полосе 20 ГГц на линиях вниз к гипотетическим сетям, состоящим из различного числа земных станций.

Было обнаружено, что если длительность кадра в резервном участке достаточна для сохранения процента времени отказа (см. рисунок 6) ниже 0,01%, то основной причиной отказа будет отказ на одиночной станции (см. рисунок 5).

Может быть разумным рассмотреть различные методы компенсации замираний на линии вниз (например, изменение скорости) в зависимости от топологии сети.

РИСУНОК 6

Типичные зависимости превышения мощности спутника от готовности системы



100 станций с различными диаметрами зоны, частота 20 ГГц, порог отключения для одной станции 15 дБ

1061-06

#### 4.3 Методы использования расширенного пакета для обеспечения уровня защиты от шумов

Существует несколько способов использования дополнительного времени, полученного за счет расширенного временного интервала для обеспечения более высокой степени защиты от шумов, например следующие:

##### a) FEC

Коррекция FEC с различными коэффициентами избыточности может быть введена на тех участках, где наблюдается увеличение глубины замираний, при необходимости увеличивается продолжительность временного интервала.

##### b) Уменьшение скорости передачи данных

Скорость передачи данных может быть уменьшена, при этом тот же объем информации будет передаваться в пакете увеличенной продолжительности. Если скорость передачи данных уменьшается, то и ширина полосы шума в приемнике также может быть уменьшена, что приводит к повышению помехозащищенности.

##### c) Копирование данных пользователя в пределах пакета

Пакет подверженный замираниям, может быть повторен (скопирован) несколько раз, при этом для восстановления принятого сигнала используется сложная схема демодуляции, вычисляющая среднее значение каждого символа.

Все вышеописанные способы сказываются на конструкции модема, и следует особо тщательно поддерживать синхронизацию тактовой частоты и несущей во время замираний. Более того, если изменяется скорость передачи символов (что приводит к изменению спектра и плотности потока мощности между пакетами), то можно ожидать появления помех.

Глубина замираний, с которой можно эффективно бороться, зависит от используемого метода и от степени сложности, которая может быть реализована в модеме. На практике наиболее предпочтительной может быть сложная система, реализующая СБЗ с TDMA, например может использоваться адаптивная FEC с любым из рассмотренных методов, кроме того, возможен случай, когда при методе c) применяется постоянная FEC.

#### 4.4 Управление системой

Системы, реализующие СБЗ с TDMA, нуждаются в помехоустойчивых протоколах и механизмах управления, необходимых для определения начала и уровня замираний на любом маршруте сигнала, для определения того, какой из пакетов должен быть расширен и насколько, и для выполнения таких расширений с одновременным пересмотром расписания передачи.

#### 4.5 Выводы

Система, реализующая СБЗ с TDMA, должна изготавливаться по заказу. Существует множество системных параметров, которые должны быть определены, например максимальная продолжительность, до которой может быть увеличена длина конкретного импульса, размер шага такого увеличения, обнаружение или время реакции на появление замираний, процент времени кадра, которое считается совместно используемым ресурсом, и т. д. Значения этих параметров будут зависеть от природы сети, климатического региона, максимальной глубины замираний, с которыми предстоит бороться, а также количества мультиплексированных несущих и скорости передаваемых на них данных.

Допустимо также комбинировать системы, реализующие СБЗ с TDMA, с другими системами борьбы с замираниями; например, протоколы для СБЗ с TDMA могут быть разработаны так, что они включают в себя управление мощностью на линии вверх, или система СБЗ с TDMA может быть объединена с системой разнесения по частоте, в результате чего пакеты испытывающие сильные замирания, передаются в дополнительном кадре TDMA на более низкой частоте.

Соединенным Королевством была проведена серьезная работа по моделированию "пространственно-временных" статических данных и по демонстрации возможности реализации адаптивного TDMA с использованием методов копирования данных. Хотя при этом может требоваться, чтобы во время замираний демодулятор работал с очень низкими отношениями  $E_b/N_0$ , в одной из лабораторий были проведены успешные испытания при отношениях  $E_b/E_0$ , достигающих  $-8$  дБ. Однако для разработки практических систем необходима дальнейшая работа как в области моделирования, так и в области проектирования оборудования.

### 5 Метод частотного разнесения

#### 5.1 Введение

Двуполосное частотное разнесение представляет собой адаптивный способ борьбы с ослаблениями сигнала в дожде, оно применимо для спутников, работающих в двух полосах частот, обычно в полосе высоких частот, например 30/20 ГГц, и в полосе низких частот, например в полосе 14/11 или 6/4 ГГц.

Обычно трафик передается в верхней полосе частот 30/20 ГГц, где доступна широкая полоса частот. Когда же запаса мощности в конкретном канале полосы 30/20 ГГц перестает хватать для преодоления ослабления в дожде, трафик из этого канала переключается на полосу более низких частот, которая менее подвержена влиянию дождя.

Резервная емкость, имеющаяся в полосе более низких частот, которая используется совместно теми станциями, которым в определенное время требуется обеспечить защиту от замираний, называется совместно используемым ресурсом или резервной полосой.

Двуполосное частотное разнесение обеспечивает высокое эквивалентное усиление, так как при данных требованиях к общему времени отказа, существенно возрастает допустимое время до отказа для линии, работающей в полосе высоких частот (30/20 ГГц), следовательно, становится допустимым большее ослабление на линии.

Как правило, эффективным решением является использование набора резервных каналов, учитывая, что среднее количество линий, одновременно требующих использование емкости резервных каналов, достаточно невелико.

Теоретический анализ системы с разнесением по частоте выполнен в п. 5.2, в его ходе оценивается число резервных каналов, необходимых для противодействия замираниям в спутниковой сети.

В п. 5.3 отмечены некоторые проблемы, возникающие при разработке системы управления в цепях, предназначенных для борьбы с замираниями.

И наконец, в п. 5.4 описано влияние различных процедур переключения полученных в процессе моделирования системы с использованием сведений, полученных в ходе серий измерений ослаблений на частоте 11,6 ГГц в течение четырех лет.

## 5.2 Системный анализ

Спутниковая сеть связи из  $N$  станций рассматривается как, например, система TDMA, работающая обычно в полосе частот 30/20 ГГц, но имеющая резервную емкость в полосе более низких частот (14/11 или 6/4 ГГц). Отказ на линии между двумя станциями А и В возникает, когда либо на станции А, либо на станции В наблюдаются замирания, глубина которых превышает установленный порог, и именно в это время нет свободной резервной емкости. Это случается, когда резервные каналы уже присвоены для защиты других линий, испытывающих замирания, а значит, запрос на свободные каналы не может быть удовлетворен.

Для оценки вероятности отказа из-за ослабления в дожде необходимо иметь обобщенную статистику замираний на всех  $N$  станциях. Эти статистические данные будут зависеть от конкретной географической конфигурации сети. Для проведения общего анализа используем простую модель.

Годовая усредненная вероятность отказа для данной станции обозначается символом  $p$  (даже если в этом нет необходимости, для простоты предполагается, что  $p$  одинакова для всех  $N$  станций). Следует принять в расчет, что замирания в различных местах расположения, как правило, не являются статистически независимыми ввиду временной (сезонной), так и пространственной (географической) корреляции. Предлагается, что условная вероятность замираний на станции В (событие  $F_B$ ), при условии наличия замираний на станции А (событие  $F_A$ ), не равна просто  $p$ , как это было бы в случае статистической независимости, а увеличивается на множитель  $\alpha \beta$ :

$$P(F_B/F_A) = \alpha \beta p. \quad (7)$$

Коэффициент сезонной корреляции обозначается символом  $\alpha$ , а  $\beta$  – представляет собой коэффициент географической корреляции. Можно предположить, что коэффициент  $\beta$  равен единице, когда станции А и В расположены на достаточно большом расстоянии, но в противном случае он будет намного больше, так как может существовать коррелированность дождей для различных мест расположения, даже отстоящих друг от друга на сотни километров.

Обобщая (7), можно выразить общую вероятность появления замираний на станциях 1, 2, ...,  $M$ , обусловленных событием  $F_A$ , в виде:

$$P(F_1, F_2, \dots, F_M/F_A) = (\alpha \beta)^M P(F_1) \dots P(F_M) = (\alpha \beta p)^M. \quad (8)$$

На основании этой модели можно выполнить оценку вероятности отказа на станции А,  $P(OUT_A)$ , при помощи вычисления вероятности наличия резервной емкости на тот момент, когда на станции А возникают замирания. Если резервная емкость состоит из  $k$  резервных каналов в полосе более низких частот, то вероятность отказа на данной станции А можно получить с использованием уравнения (8):

$$P(OUT_A) = p \sum_{j=k}^{N-1} \frac{j+1-k}{j+1} \binom{N-1}{j} (\alpha \beta p)^j (1 - \alpha \beta p)^{N-1-j}, \quad (9)$$

где:

$k$ : общее количество свободных резервных каналов.

Коэффициент  $(j+1-k)/(j+1)$  представляет собой вероятность того, что ни один из набора резервных каналов не присваивается станции А в тот момент, когда кроме станции А еще  $j$  станций, испытывающих действие замираний ( $j \geq k$ ), запрашивают резервный канал. Заметим, что вероятность отказа для линии (А, В) примерно вдвое превышает вероятность отказа на станции А (или В), если общая вероятность замираний на А и В много меньше, чем вероятность появления замираний на станции А (или В). Например, на рисунке 7 показаны графики коэффициента уменьшения числа отказов (отношения вероятности отказа с использованием частотного разнесения и без него) как функции от количества резервных каналов  $k$  для конкретного случая, а именно для  $N = 50$  и  $\alpha \beta = 15$ . Эти графики соответствуют двум значениям вероятности отказа  $p$ , когда система не защищена с использованием частотного разнесения. Вероятность  $p$  зависит от запаса по мощности, предусмотренного в передатчике станции. Вероятность того, что данное ослабление будет

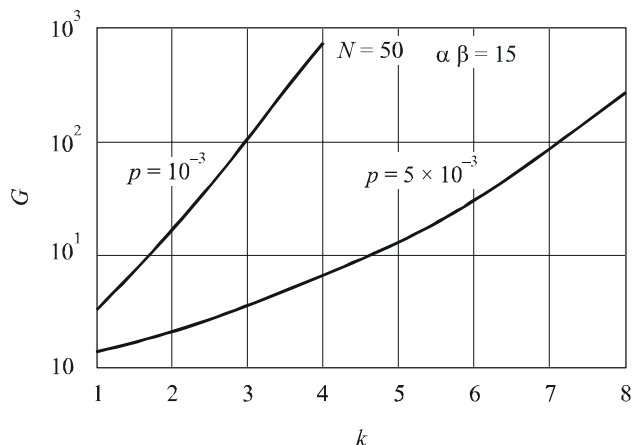
превышено, зависит от частоты и от метеорологических условий в каждом месте расположения станции. Для вычислений, выполненных в данном примере, была предположена следующая зависимость ослабления от суммарной функции распределения:

$$A = A_{0,01} 0,12p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \quad \text{дБ}, \quad (10)$$

где  $p$  – вероятность (в процентах для среднего года) превышения ослабления  $A$ .  $A_{0,01}$  – ослабление, превышаемое в течение 0,01% времени, и зависящее от метеорологических условий в месте расположения станции, угла места пути распространения сигнала и частоты на радиолинии Земля-космос. Для того чтобы продемонстрировать примерные цифровые значения, мы рассматривали конкретную линию на частоте 30 ГГц, для которой  $A_{0,01}$  равняется 28,5 дБ. Ясно, что чем больше значение коэффициента  $\alpha \beta$ , тем больше резервная емкость, которая требуется для обеспечения необходимой готовности. В примере, рассмотренном выше ( $N = 50$  станций,  $\alpha \beta = 15$ ) из уравнения (9) получается, что для линии связи на частоте 30 ГГц с  $p = 5 \times 10^{-3}$  вероятность отказа при применении частотного разнесения составляет менее  $2 \times 10^{-4}$ , если используется резервная емкость  $k = 6$ . В этом случае линия проектируется с запасом по мощности, соответствующим  $p = 5 \times 10^{-3}$ , то есть 4,9 дБ. Для того чтобы получить те же самые результаты относительно отказов без частотного разнесения, в соответствии с уравнением (10), необходим запас по мощности 21,7 дБ. Отметим, что запас по мощности, необходимый при отсутствии частотного разнесения, очень велик. Кроме повышенной стоимости линии, сигнал настолько большой мощности может также создавать помехи другим радиолиниям.

РИСУНОК 7

Коэффициент уменьшения времени отказов  $G$   
в зависимости от числа резервных каналов,  $k$



$p$  : вероятность отказа без частотного разнесения

1061-07

### 5.3 Работа системы адаптивного управления и результаты моделирования

Предыдущий анализ показателей работы систем с частотным разнесением был выполнен для идеального случая, в котором переключение от обычного режима к вспомогательному (*и наоборот*) может быть выполнено мгновенно. В реальной адаптивной системе борьбы с помехами время реагирования не является пренебрежимо малым, особенно, когда используется резервная емкость, назначаемая по запросу; задержка в реализации мер борьбы с замираниями или восстановления изначальных условий, в основном, определяется условиями распространения на линии космической связи (от терминала к главной станции и обратно) и зависит также от используемого протокола.

Для обнаружения замираний адаптивной системе борьбы с замираниями требуется вести измерения условий связи в канале при помощи непосредственного контроля ослабления сигнала или оценки коэффициента ошибок по битам. Из-за того, что система, обеспечивающая борьбу с замираниями, работает с определенной задержкой, она должна учитывать динамические характеристики замираний, в частности, скорость их изменения и наличие быстрых флуктуаций, для того чтобы

заранее предсказать возможное превышение уровня ослабления  $S$ , соответствующего минимально допустимому качеству, и чтобы реализовать возможность своевременного установления противодействия замираниям.

Наиболее простой способ сделать это – начать процедуру установления противодействия в тот момент, когда ослабление достигнет уровня  $S_1 = S - M$ , где  $M$  – подходящий запас, выбранный в соответствии со статистической скоростью изменения ослаблений. Поскольку рассматривается скорость изменения ослаблений, то следует отметить, что для полосы 14/11 ГГц опубликованы некоторые экспериментальные данные.

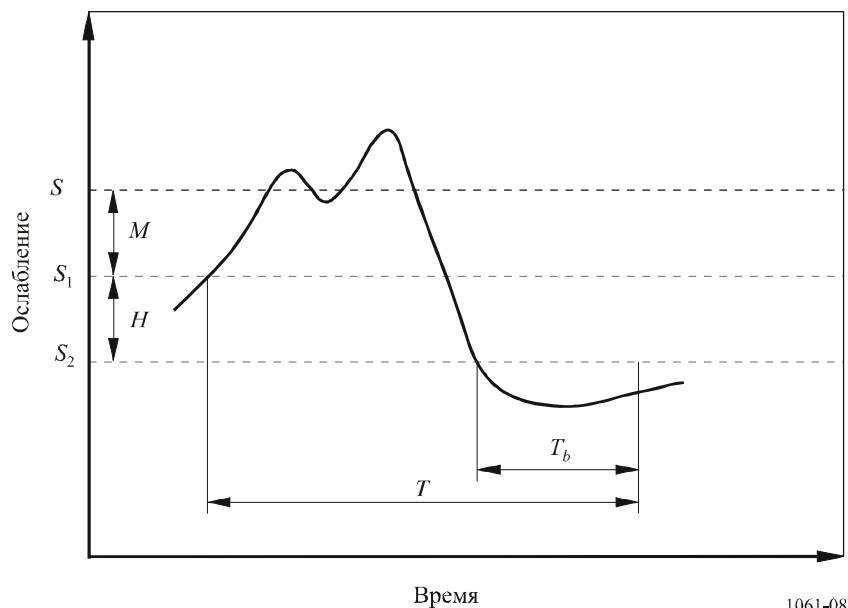
Для того чтобы избежать отказа во время установления противодействия,  $M$  следует выбрать достаточно большим; с другой стороны слишком большое значение  $M$  может привести к неэффективному использованию самой системы борьбы с замираниями. Появление ложных сигналов тревоги означает, что совместно используемый ресурс будет использоваться дольше, чем это необходимо, что может привести к появлению отказов в том случае, когда одновременно имеется множество запросов на использование резервной емкости.

Показатели работы этой процедуры переключения были проанализированы и сравнены с показателями работы, получаемыми при предсказании уровня замираний на основании результатов предыдущих измерений. Были исследованы алгоритмы предсказания ослабления в дожде в реальном масштабе времени, основанные на линейной регрессии. Несмотря на то что регрессионный алгоритм способен предсказать усредненное поведение ослаблений, с его помощью нельзя предсказать очень быстрые флуктуации замираний. Поэтому представленные результаты были получены при помощи использования регрессионного алгоритма для различного количества предшествующих измерений и добавления к предсказанному значению постоянного смещения, обеспечивающего противодействие быстрым флуктуациям. Параллельная линия в последней модели рассматривается совместно с линией регрессии, так как она улучшает качество предсказания.

Наличие относительно быстрых флуктуаций ослабления также должно быть тщательно рассмотрено при выборе процедуры отключения системы борьбы с замираниями при их исчезновении. На практике может быть удобно отфильтровывать колебания ослаблений для поддержания защищенности системы (система противостояния замираниям включена) в то время, когда ослабления колеблются в пределах порога  $S_1 = S - M$ . В случае использования регрессионного алгоритма запас на быстрые флуктуации представлен величиной  $M$ . Решение проблемы заключается в том, чтобы ввести гистерезис  $H$ , а именно отключать систему борьбы с замираниями в момент, когда ослабление уменьшается до уровня ниже  $S_2 = S_1 - H$ . Для того чтобы обеспечить дополнительную защиту от быстрых флуктуаций, отключение системы борьбы с замираниями может быть задержано на соответствующим образом выбранное время  $T_b$ . Отключение выполняется только тогда, когда ослабление сохраняется на уровне ниже  $S_2$  в течение времени  $T_b$  (рисунок 8). Решение, при котором вводится запас  $M$  при включении, а также гистерезис  $H$  и задержка  $T_b$  при выключении, ведет к снижению эффективности системы относительно системы с идеальным управлением, где  $M = H = T_b = 0$ , так как на линии, испытывающей замирания, резервная емкость используется в течение более длительного времени.

РИСУНОК 8

Определение параметров, характеризующих процедуру переключения от нормального режима к вспомогательному, или наоборот



1061-08

Для того чтобы проанализировать и сравнить качество различных систем управления, рассматривается два параметра. Первым является процент появления условий возникновения отказа в течение времени установки относительно числа раз, когда на линии испытывающей замирания, использовалась система борьбы с ними. Второй — общая эффективность системы, определенная с использованием коэффициента  $U = (T_{tot} - T_{ideal}) / T_{ideal}$ , где  $T_{tot}$  — общее время использования резервной емкости в системе, а  $T_{ideal}$  — время использования резервной емкости в системе с идеальным управлением.

Поведение системы моделируется с использованием значений времени замираний на частоте 11,6 ГГц, измеренных с использованием спутника Sirio в течение четырех лет (с 1979 по 1982 год) на станции Спино д'Адда на севере Италии. Полученные статистические результаты являются достаточно надежными, так как количество доступных экспериментальных данных было очень большим.

Хотя анализ процедуры переключения основывался на серии испытаний, проделанных на частоте 11,6 ГГц, полученные результаты моделирования, как было показано выше, являются хорошей оценкой статистических показателей качества переключения для частот 20 и 30 ГГц.

При экстраполяции экспериментальных результатов ослабления в дожде от более низких частот к более высоким следует рассмотреть, по крайней мере, два явления: ослабление в гидрометеорах и сцинтилляции из-за многолучевости распространения (связанная с быстрыми изменениями эквивалентного индекса рефракции, вызванными рассеиванием в воздухе и гидрометеорах).

Была исследована экстраполяция измеренных значений ослабления в дожде, и теперь имеется формула экстраполяции, дающая хорошие результаты. Так как ослабление и сцинтилляции, возникающие на одной частоте, в исходных данных для экстраполяции не разделяются, эта эмпирическая формула экстраполирует на более высокие частоты влияние обоих явлений.

На сегодняшний день частотная экстраполяция в масштабе реального времени невыполнима, однако статистические результаты переключений для фиксированных порогов на частоте 11,6 ГГц, могут быть экстраполированы для получения значений соответствующих порогов на частотах 20 или 30 ГГц. Очевидно, что эти результаты также являются статистически достоверными и для этих более высоких частот. Действительно, в соответствии с некоторыми известными сегодня результатами, эти частоты не настолько высоки, чтобы на них проявлялись неожиданные физические явления. Физическая природа ослабления в дожде хорошо известна, и эксперименты хорошо согласуются с



предсказанными статистическими данными относительно долговременных ослаблений. Кроме того, физическая природа сцинтилляции в чистом или "влажном" воздухе также хорошо известна из теории, и разработанные модели были экспериментально подтверждены. Экспериментальные результаты измерений спектральной мощности сцинтилляции на частоте 11,6 ГГц можно экстраполировать на более высокие частоты с использованием достаточно простых моделей. Например, что касается размеров антенн и частот, то для частотного разнесения был проведен эксперимент с использованием европейского спутника Olympus, который показал, что усредненная спектральная мощность сцинтилляций уменьшается с увеличением частоты  $f$  в соответствии с теоретическим законом  $f^{-8/3}$ , начиная примерно с 0,5 Гц на 20 ГГц и примерно с 0,6 Гц на 30 ГГц; эти цифры становятся равны, соответственно, 1,6 Гц и 2 Гц в 95% случаев. На частоте 12,5 ГГц, соответствующие частоты равны около 0,4 Гц и 1,3 Гц.

Амплитуда сцинтилляций статистически увеличивается гораздо меньше, чем ослабление в дожде. Стандартная девиация сцинтилляций для данной трассы распространения сигнала и при идентичных физических условиях увеличивается всего лишь по закону  $f^{7/12}$ , тогда как ослабление в дожде увеличивается грубо говоря, как  $-f^{1,76}$ . Следовательно, ожидается также, что общее динамическое поведение этих явлений на частотах 20 и 30 ГГц не сильно отличается от значений, измеренных на частоте 11,6 ГГц после того, как значения порогов были увеличены.

#### 5.4 Результаты моделирования

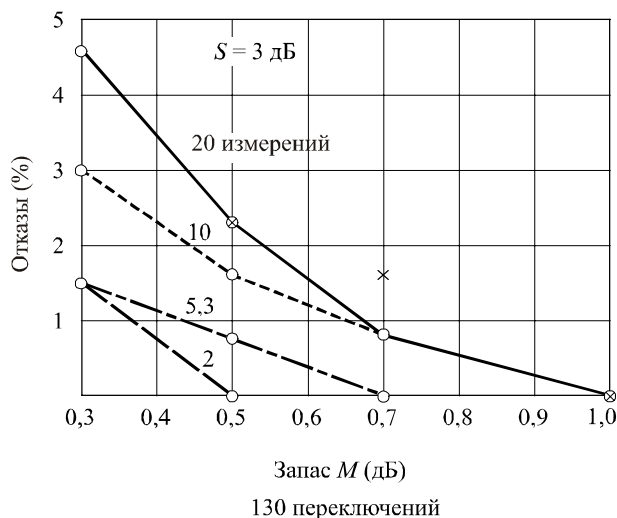
Для того чтобы сравнить процент отказов во время переключения, когда выполняются различные процедуры управления, порог отключения  $S_2$  должен остаться неизменным. На рисунках 8 и 9 показаны результаты моделирования, выполненного для порога  $S=3$  дБ, времени задержки установки  $T_c=2$  с, порога отключения  $S_2=1,8$  дБ и интервала времени  $T_b=20$  с. Порог отказа  $S$  выбран таким, что в Спино д'Адда на частоте 11,6 ГГц превышался с вероятностью порядка  $10^{-3}$ , что соответствует примерно 8 дБ на 20 ГГц.

Алгоритм предсказания основан на результатах 20, 10, 5, 3 и 2 последних по времени измерений и использует запас на быстрые флуктуации, равный 0,3 дБ, 0,5 дБ, 0,7 дБ или 1 дБ. Если уровень ослабления, предсказанный со временем ожидания, равным 2 с (задержка установления) плюс защитный интервал 1 с (ослабление на тактовой частоте), превышает порог  $S$ , то инициализируется процедура переключения. Для алгоритма, использующего фиксированный порог, считалось, что  $S_1$  равен 2,5 дБ, 2,3 дБ и 2 дБ, что соответствует допустимой скорости изменения ослаблений 0,25 дБ/с, 0,35 дБ/с и 0,5 дБ/с.

Этот результат предполагает, что система, реализующая алгоритм с фиксированным порогом, имеет почти такое же качество, что и система с предсказанием, основанным на 20 последних по времени измерениях. Что касается процента отказов, то наилучшее качество достигается при реализации предсказания ослабления на основании только двух последних измерений и добавления запаса на сцинтилляции, равного 0,5 дБ. Очевидно, что, наоборот, уменьшая количество используемых для предсказания предыдущих измерений, увеличивается время использования системы борьбы с замираниями, так как может появляться больше ложных сигналов тревоги. Коэффициент  $U$  возрастает до примерно 1,2; что означает, что время использования системы борьбы с замираниями более чем вдвое превышает время ее использования в идеальном случае. Если имеющаяся резервная емкость невелика, а число земных станций, использующих ее совместно, велико, может быть удобным реализовать алгоритм, который повысил бы эффективность системы, даже если в результате его применения повысится количество кратковременных отказов в течение времени установления. Длительное время использования системы борьбы с замираниями обусловлено также большими гистерезисом  $H$  (0,7 дБ) и задержкой  $T_b$  (20 с), предусмотренными в процедуре восстановления нормальных условий работы. На рисунке 10 показаны результаты моделирования, выполненного для оценки последствий уменьшения задержки  $T_b$ , изначально установленной равной 20 с. Был реализован алгоритм предсказания, использующий только два последних измерения и учитывающий запас на быстрые флуктуации 0,5 дБ и гистерезис  $H=0,2$  дБ. Можно отметить, что эти величины гистерезиса и задержки  $T_b=10$  с являются достаточными для эффективного противостояния быстрым флуктуациям, что приводит к уменьшению коэффициента  $U$  от 1,2 до 0,8.

РИСУНОК 9

Процент ожидаемых отказов в течение времени установления в зависимости от запаса на ожидание

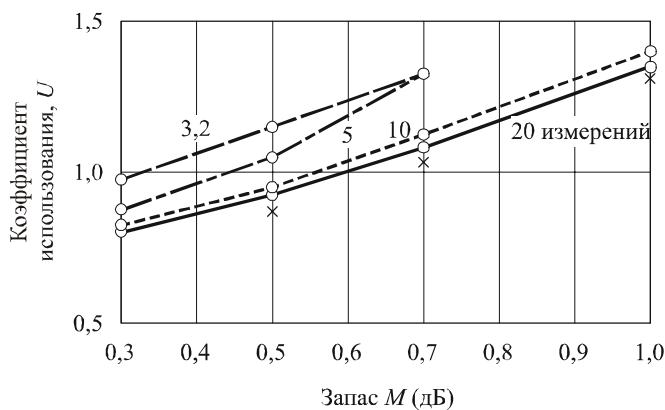


Точки, отмеченные  $x$ , показывают результаты, полученные с использованием алгоритма с предварительно фиксированным порогом. Другие графики показывают результаты, полученные с использованием алгоритма линейного предсказания, с указанием числа учитываемых предыдущих измерений.

1061-09

РИСУНОК 10

Коэффициент использования  $U$  в зависимости от запаса на ожидание



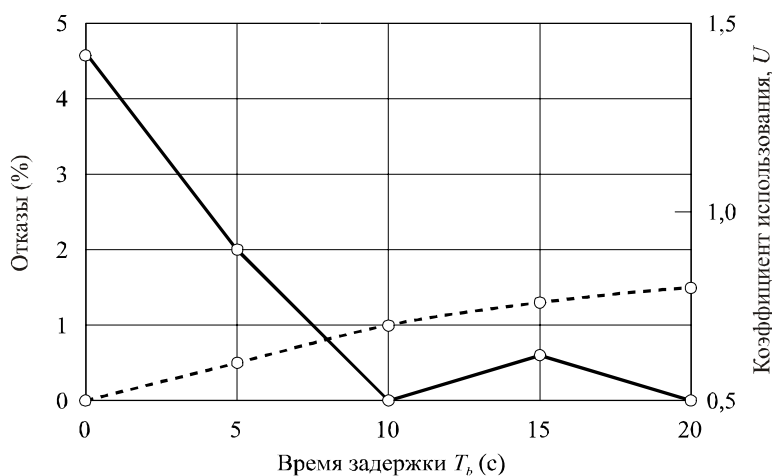
Точки, отмеченные  $x$ , показывают результаты, полученные с использованием алгоритма с предварительно фиксированным порогом. Другие графики показывают результаты, полученные с использованием алгоритма линейного предсказания, с указанием числа учитываемых предыдущих измерений.

1061-10

Результаты моделирования показывают, что природа замираний во время дождя такова, что хорошую методику предсказания придумать трудно. Наиболее простым и наиболее устойчивым методом представляется использование фиксированного запаса на ожидание соответствующей амплитуды. Алгоритмы предсказания, рассмотренные здесь, не позволяют существенно улучшить общее качество (измеряемое количеством отказов и коэффициентом использования), по сравнению с получаемым при применении фиксированного запаса на ожидание. В любом случае всегда можно найти компромисс между количеством отказов (т. е. качеством) и величиной коэффициента использования (т. е. готовностью). Естественно, этот компромисс зависит от требований к конкретной системе связи.

РИСУНОК 11

Процент отказов в течение времени установления (непрерывная линия) и коэффициент использования (штриховая линия) в зависимости от времени задержки  $T_b$ . Линейное предсказание основано на двух предыдущих измерениях, а запас на флуктуации составляет 0,5 дБ



1061-11

## 5.5 Вывод

Метод двуполосного частотного разнесения особенно эффективен в том случае, когда требуется обеспечить малую вероятность отказа.

Метод двуполосного частотного разнесения предусматривает большие запасы по мощности с ограниченной емкостью доступного резервного ресурса. Количество необходимых резервных каналов зависит также от характеристик корреляции процессов ослабления, протекающих в различных местах размещения станций.

## 6 Список сокращений и аббревиатур

ACM	Adaptive coding and modulation	АКМ	Адаптивное кодирование и модуляция
AFP	Adaptive filtering prediction	ПАФ	Предсказание с адаптивной фильтрацией
AWGN	Additive white gaussian noise	АБГШ	Аддитивный белый гауссовский шум
BER	Bit-error rate	КОБ	Коэффициент ошибок по битам
BPSK	Binary phase shift keying	ДФМН	Двухпозиционная фазовая манипуляция
$C/N$	Carrier-to-noise ratio		Отношение несущая/шум
CPSK	Coherent phase shift keying	КГФМН	Когерентная фазовая манипуляция
DIL	Diversity interconnection links	ЛСРС	Линии связи между разнесенными станциями
DVB	Digital video broadcasting		Цифровое телевизионное радиовещание
DVB-S2	DVB system for satellite broadcasting as specified in EN 302 307		Система DVB для спутникового радиовещания, описанная в EN 302 307
e.i.r.p.	Equivalent isotropically radiated power	э.и.и.м.	Эквивалентная изотропно излучаемая мощность

$E_b/N_0$	Bit energy to noise spectral density ratio		Отношение энергии бита к спектральной плотности шума
ETSI	European Telecommunications Standard Institute	ЕТСИ	Европейский институт стандартизации электросвязи
FCM-TDMA	Fade countermeasures using time division multiple access	СБЗ с TDMA	Способы борьбы с замираниями с использованием многостанционного доступа с временным разделением
FDM-FM	Frequency division multiplexing-frequency modulation	МЧР-ЧМ	Мультиплексирование с частотным разделением – частотная модуляция
FEC	Forward-error correction		Упреждающая коррекция ошибок
FM	Frequency modulation	ЧМ	Частотная модуляция
FM-FDMA	Frequency modulation-frequency division multiple access	ЧМ-FDMA	Частотная модуляция-многостанционный доступ с частотным разделением
HPA	High power amplifier	УБМ	Усилитель большой мощности
LMS	Least mean square	АМСО	Алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки
LNA	Low noise amplifier	МШУ	Малозумящий усилитель
LPF	Low-pass filter	ФНЧ	Фильтр нижних частот
PN	Pseudo noise	ПШ	Псевдошум
PSK	Phase shift keying	ФМН	Фазовая манипуляция
QPSK	Quadrature phase shift keying	КФМН	Квадратурная фазовая манипуляция
RCPC	Rate compatible punctured convolutional		Совместимый по скорости перфорированный сверточный код
RF	Radio frequency	РЧ	Радиочастота
SCPC	Single channel per carrier	ОКН	Один канал на несущую
$S/N$	Signal-to-noise ratio		Отношение сигнал/шум
SBP	Slope based prediction	ПОН	Предсказание на основе наклона
SR	Symbol repetition	ПС	Повторение символа
TDM	Time division multiplexer	МВР	Мультиплексор с временным разделением
TDMA	Time-division multiple-access		Многостанционный доступ с временным разделением
UPC	Uplink power control	РМВ	Регулирование мощности на линии вверх
8-PSK	8-ary phase shift keying	8-ФМН	8-позиционная фазовая манипуляция
16-APSK	16-ary amplitude and phase shift keying	16-АФМН	16-позиционная амплитудно-фазовая манипуляция
32-APSK	32-ary amplitude and phase shift keying	32-АФМН	32-позиционная амплитудно-фазовая манипуляция