

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R F.1093-2*

Влияние многолучевости распространения радиоволн на проектирование и работу цифровых систем фиксированной беспроводной связи прямой видимости

(Вопрос МСЭ-R 122-4/9)

(1994-1997-2006)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации содержится введение в относящиеся к распространению радиоволн аспекты проектирования и эксплуатации цифровых радиорелейных систем, в котором использована информация из текстов 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи и результаты измерений, проведенных администрациями. В Приложении 1 объясняется роль замираний из-за многолучевости как доминирующего фактора распространения для цифровых радиорелейных систем, работающих на частотах ниже 10 ГГц. В последующем материале обсуждается роль различных методов адаптивной коррекции для улучшения качества каналов.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что замирания сигнала вследствие многолучевости распространения радиоволн могут искажать и ослаблять принимаемые сигналы на трассах прямой видимости и тем самым снижать показатели работы систем фиксированной беспроводной связи (СФБС);
- b) что в Рекомендации МСЭ-R P.530 предоставляются данные и методы для предсказания распространения сигналов СФБС и планирования трасс;
- c) что имеются средства противодействия, направленные на снижение влияния замираний из-за многолучевости на показатели работы систем;
- d) что для сравнения альтернативных разработок необходимы методы проведения анализа влияния замираний из-за многолучевости на помехозащищенность СФБС,

рекомендует,

- 1 чтобы в конструкцию радиосистем включались, по мере необходимости, средства противодействия замираниям из-за многолучевости с целью улучшения помехозащищенности;
- 2 чтобы методы в Приложении 1 использовались для руководства при планировании радиолиний.

* Настоящая Рекомендация должна быть доведена до сведения 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

Приложение 1

Влияние многолучевости распространения радиоволн на проектирование и работу цифровых систем ФБС прямой видимости

1 Введение

Цель настоящего Приложения – предоставить введение по аспектам проектирования и эксплуатации цифровых радиорелейных систем, относящимся к распространению радиоволн, используя информацию, содержащуюся в документах 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи, а также результаты измерений, проведенных администрациями. Первая часть Приложения объясняет роль замираний из-за многолучевости распространения как доминирующего фактора распространения радиоволн для цифровых радиорелейных систем, работающих на частотах ниже примерно 10 ГГц. В последующих разделах рассматривается роль методов разнесенного приема и адаптивной коррекции для некоторого улучшения качества каналов. И наконец, рассмотрены методы прогнозирования качества работы системы в зависимости от указанных выше факторов.

Более подробная информация по применению данного руководства содержится в Справочнике по цифровым радиорелейным системам.

2 Аспекты распространения радиоволн

Документы, разработанные 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи, содержат богатейшую информацию о явлениях распространения радиоволн, которую необходимо учитывать в процессе проектирования и эксплуатации радиорелейных систем. В частности, в Рекомендации МСЭ-R P.530 рассматриваются "данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для радиорелейных систем прямой видимости". Информация в этой Рекомендации излагается в порядке, соответствующем явлениям распространения радиоволн, которые должны учитываться. Соответствующая метеорологическая информация, касающаяся механизмов распространения радиоволн, приведена в других Рекомендациях серии Р, а именно в Рекомендациях МСЭ-R P.834 и МСЭ-R P.676.

Условия распространения радиоволн меняются от месяца к месяцу и из года в год, и изменение вероятности появления этих условий может составлять несколько порядков. Поэтому для получения достоверных заключений по результатам эксперимента по изучению распространения радиоволн может потребоваться от трех до пяти лет. Однако, в соответствии с требованиями применения систем, такого времени часто не бывает в распоряжении, и модели таких изменений для ряда параметров описаны в Рекомендации МСЭ-R P.841.

Из данных по распространению радиоволн был сделан вывод о том, что для хорошо спланированной трассы, которая не подвержена воздействию дифракционных замираний или отражений сигнала от поверхности земли, преобладающим фактором замираний при использовании частоты ниже 10 ГГц является многолучевость распространения. Выше этой частоты, при определении допустимой протяженности трассы в зависимости от требований к готовности системы, возрастает влияние осадков. Необходимое сокращение протяженности трассы с возрастанием частоты снижает степень влияния замираний из-за многолучевости распространения. Обычно эти две основные причины замираний являются взаимоисключающими. Учитывая наличие разрыва между готовностью системы и требованиями к помехозащищенности, наличие осадков сказывается в основном на неготовности системы, а влияние многолучевости распространения – на помехозащищенности. На выбор планов размещения частот радиоканалов может также повлиять такой эффект воздействия осадков, как обратное рассеяние в дожде.

Условия распространения радиоволн, возникающие в результате воздействия осадков различного вида, не ведет к дисперсии частоты, тогда как многолучевость распространения из-за многослойности тропосферы может привести, и это может вызвать серьезные искажения информационных сигналов. Быстрое развитие цифровых систем связи потребовало улучшенного понимания этих явлений и поиска средств для их преодоления.

3 Меры противодействия влиянию условий распространения радиоволн

Имеется два метода уменьшения искажений, вызванных условиями распространения, – метод разнесенного приема и использование адаптивных корректоров в каналах, задачей которых является борьба с ослаблением сигнала и искажениями, вызванными средой распространения. Эффективность борьбы с замираниями обычно выражается в единицах коэффициента улучшения. Коэффициент улучшения для отдельной испытываемой трассы – это отношение общего времени отказов в радиорелейной системе, не принимающей мер противодействия условиям распространения, к общему времени отказов при использовании таких мер (см. Примечание 1). Коэффициент улучшения зависит от выбранного порогового значения, соответствующего отказу.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – "Продолжительность отказа" – это общий термин, указывающий период времени, в течение которого в системе превышает выбранное пороговое значение коэффициента ошибок по битам (КОБ).

3.1 Методы разнесенного приема

Наиболее часто используются методы приема с частотным и пространственным разнесением. Другие методы описаны в Рекомендациях МСЭ-R F.752, МСЭ-R P.530 и Справочнике МСЭ-R по цифровым радиорелейным системам (издание 1996 г.).

3.1.1 Пространственное разнесение

Пространственно разнесенный прием является одним из наиболее эффективных методов борьбы с замираниями из-за многолучевости распространения. Проектирование цифровых радиорелейных систем, в которых требования к качеству трудно удовлетворить из-за искажений формы сигнала, вызываемых многолучевостью распространения, должно основываться на использовании пространственного разнесения.

В системах с пространственно разнесенным приемом, сигналы, принятые двумя разнесенными по вертикали антеннами, редко одновременно испытывают глубокие замирания. Коэффициент улучшения, который может быть достигнут в системе при использовании этих двух сигналов, зависит как от параметров распространения радиоволн, так и от конкретной реализации радиосистемы, т. е. от ее чувствительности к потере мощности сигнала и искажениям сигналов из-за многолучевости распространения, а также от метода их обработки. При оценке улучшений, достижимых при пространственном разнесении, принято использовать формулировку коэффициента улучшения для гладких замираний, приведенную в Рекомендации МСЭ-R P.530, или подобные формулировки, уточненные для регионального применения, в частности для тепловых шумов в расчетах вероятностей отказов (см. § 4).

Значительно уменьшая вероятность появления глубоких замираний, пространственно разнесенный прием может снизить влияние различных типов помех. В частности, он может снизить воздействие кратковременных помех от каналов с кроссполяризацией, работающих на тех же или смежных частотах, помех от других систем и помех внутри системы.

Линейная амплитудная дисперсия (ЛАД) является важным компонентом искажения формы сигнала и квадратурных перекрестных помех, и ее можно снизить при помощи пространственно разнесенного приема. Комбинированное разнесение, специально предназначенное для минимизации величины ЛАД (см. Рекомендацию МСЭ-R F.752), является одним из наиболее эффективных методов борьбы с этими искажениями.

Улучшение, полученное из-за пространственного разнесения, будет зависеть от обработки двух сигналов в приемнике. Двумя примерами этих методов могут служить переключение без прерывания связи и комбинирование сигналов с переменной фазой (см. Рекомендацию МСЭ-R F.752). При переключении без прерывания связи выбирается сигнал того приемника, на котором более сильный сигнал или коэффициент ошибок которого ниже, а в сумматоре используется либо алгоритм совпадения фаз, либо различные виды алгоритмов управления по минимальной дисперсии. Переключение без прерывания связи и комбинирование сигналов с совпадающими фазами дают очень схожие коэффициенты улучшения.

3.1.2 Частотное разнесение

Улучшение приема разнесенных по частоте сигналов на пролете цифровой радиосистемы с конфигурацией $1 + 1$ зависит от корреляции ухудшений (например, глубины замирания, дисперсии амплитуды и групповой задержки) в двух радиочастотных (РЧ) каналах. Экспериментальные результаты показывают низкую корреляцию амплитудной дисперсии между двумя каналами с шириной полосы по 30 МГц, разнесенных на 60 МГц. Наибольшее улучшение в случае использования частотного разнесения обычно может быть получено при применении междиапазонного частотного разнесения.

В системах типа $N + 1$ степень улучшения из-за частотного разнесения, получаемая в рабочем канале, снижается по мере роста числа рабочих радиоканалов. При рассмотрении использования частотного разнесения в многопролетной коммутируемой секции необходимо учитывать, что улучшение при приеме с частотным разнесением зависит как от корреляции степени ухудшения между РЧ-каналами одного пролета, так и от корреляции степени ухудшения на других пролетах той же коммутируемой секции.

Для того чтобы добиться ожидаемого улучшения при приеме с частотным разнесением в цифровых радиосистемах, система переключения должна работать в режиме без перерыва в связи. Кроме того, общая процедура переключения должна быть завершена до начала значительного ухудшения в каналах передачи. Для этого требуется обеспечить время срабатывания, составляющее примерно 10 мс или менее.

3.2 Адаптивная коррекция канала

В радиоканале обычно требуется применение какой-либо коррекции приемника. Работа корректора должна адаптивно управляться, обеспечивая отслеживание изменения параметров передачи по мере изменения условий распространения радиоволн. Используемые методы коррекции можно разделить на две группы: "коррекция в частотной области" и "коррекция во временной области", в зависимости от того, где более естественно будет описываться режим их работы – в частотной или во временной области.

3.2.1 Коррекция в частотной области

Корректор такого типа содержит одну или несколько линейных цепей, которые создают выходные сигналы амплитуды и групповой задержки, предназначенные для компенсации искажений передачи, считающиеся наиболее вероятными причинами ухудшения показателей качества системы во время замираний из-за многолучевости распространения.

3.2.2 Коррекция во временной области

В цифровых системах обработка сигналов во временной области может рассматриваться как наиболее естественный метод коррекции, так как она непосредственно направлена на устранение межсимвольной интерференции. Информацию управления получают путем сопоставления интерференции, которая появляется в определенный момент, с различными вызывающими ее соседними символами, и используют для регулировки линий задержки с целью получения нужных сигналов компенсации. Корректор такого типа способен одновременно и независимо устранять искажения, вызванные колебаниями амплитудной характеристики и характеристики группового времени запаздывания в канале с замираниями, обеспечивая таким образом компенсацию либо для минимально фазовых, либо для не минимально фазовых характеристик.

Известно, что в системах, использующих квадратурную модуляцию, значительное отрицательное воздействие замираний вызвано перекрестной помехой, возникающей при асимметрии характеристик канала. Следовательно, для поддержания работоспособности корректор во временной области должен обеспечивать компенсацию квадратурных искажений.

3.2.3 Коэффициенты улучшения характеристик

Отказы в цифровых радиосистемах вызываются комбинацией трех основных причин – помех, тепловых шумов и искажений формы сигнала. Коррекция, как правило, эффективно борется только с последней. Следовательно, при рассмотрении проблемы улучшения характеристик при помощи

адаптивных корректоров, становится ясно, что наибольшее уменьшение времени отказов будет обеспечиваться на пролетах, для которых известно, что основной причиной отказа системы являются искажения сигнала.

3.3 Адаптивная коррекция в сочетании с пространственно разнесенным приемом

При многолучевом распространении резкого уменьшения числа отказов можно добиться при сочетании адаптивной коррекции канала с пространственным разнесением. Общие измеренные коэффициенты улучшения по отказам обычно превышают произведение соответствующих коэффициентов улучшений, полученных при раздельном использовании разнесения и коррекции, что свидетельствует о наличии важного синергического взаимодействия.

Для пространственного разнесения, используемого совместно с коррекцией, улучшение приблизительно равно произведению коэффициента улучшения при пространственном разнесении на квадрат коэффициента улучшения при применении корректора. Это, по-видимому, наиболее точные данные в случае разнесения с переключением.

3.4 Аспекты проектирования систем при наличии волноводного распространения

Известно, что в некоторых географических районах волноводы расположены на высотах до 1000 м и выше. В районах, где, как известно, имеются такие волноводы и планируется использование цифровых СВЧ радиорелейных систем, при проектировании этих систем необходимо учитывать следующие факторы:

- ориентацию антенны и ее местоположение,
- ширину диаграммы направленности антенны, требуемой для минимизации количества энергии, излучаемой в направлении отражающих слоев или принимаемой от них, а также от земли,
- схему модуляции, используемой для увеличения длительности символа,
- геометрию трассы, требуемой для сведения к минимуму вероятности создающих помехи отражений.

4 Расчет вероятности отказов

В цифровых системах продолжительность отказов обуславливается искажениями формы сигналов вследствие воздействия частотно-селективного замирания, помех и теплового шума. Общая продолжительность отказов будет зависеть от этих трех факторов. Существуют различные методы расчета продолжительности отказов цифровых систем; они кратко рассмотрены в данном разделе. Типичными входными параметрами для этих методов являются:

- длина трассы,
- рабочая частота,
- диаграмма направленности передающей антенны,
- параметры разнесения,
- неровности рельефа поверхности,
- просвет трассы,
- климатическая зона.

Обычный метод расчета времени отказов для аналоговых систем основан на концепции одночастотных замираний и поэтому не может быть непосредственно применим к цифровым радиорелейным системам с большой пропускной способностью. Увеличение запаса на замирания, который в аналоговых системах будет способствовать снижению влияния тепловых шумов, не будет улучшать эксплуатационные характеристики цифровых систем, если замирания из-за многолучевости уже привели к уменьшению амплитуды глаз-диаграммы до нуля. Отсюда следует, что увеличение мощности передатчика не может служить единственным средством, позволяющим цифровым радиосистемам удовлетворять предъявляемым к ним требованиям по отказам.

При разработке методов предсказания отказов использовались три основных подхода: методы с использованием энергетического запаса, метода сигнатур и методы, использующие ЛАД. Однако для

того, чтобы сделать вывод о том, какой из этих подходов значительно лучше других, данных пока еще недостаточно. Несмотря на это, в Рекомендации МСЭ-R P.530 подробно описан ряд методов для незащищенных и защищенных систем (имеется в виду пространственное, частотное и временное разнесение), включая системы с совмещенными каналами и двойной поляризацией. Ухудшение качества по причине искажений оценивается с использованием метода сигнатур. Рекомендуется использовать методы, описанные в Рекомендации МСЭ-R P.530, если только нет методов, признанных более точными для конкретного региона.

Для упрощения понимания основных подходов и множества их вариантов, используемых в различных странах и регионах мира, их описание дано в последующих параграфах.

4.1 Методы с использованием энергетического запаса

Использование величины энергетического запаса в качестве характеристики системы основано на хорошо известном законе гладких (одинаковых во всем диапазоне частот) многолучевых замираний. Для месяца с наибольшими замираниями время, T , в течение которого уровень напряженности принимаемого сигнала равен или меньше величины L , взятой относительно уровня сигнала при распространении в свободном пространстве, представлено уравнением $T = AL^2$, где A – коэффициент пропорциональности, определяемый числом секунд в месяце и характеристиками трассы.

Характеристики цифровых радиосистем определяются не только запасом на тепловые шумы: необходимо также использовать концепцию "чистого" или "эффективного" энергетического запаса для цифровых систем. Подставляя вместо значения запаса на тепловые шумы значение эффективного энергетического запаса из Рекомендации МСЭ-R P.530, можно получить приблизительное время отказов на пролете. "Чистый" энергетический запас на замирания определяется как глубина (в дБ) гладких замираний, которая превышает в течение того же числа секунд, что и выбранный пороговый коэффициент ошибок, например 1×10^{-3} .

4.2 Методы сигнатур

Сигнатуры могут использоваться при расчете отказов и сравнении относительной чувствительности различных цифровых радиосистем к воздействию частотно-селективных замираний.

4.2.1 Измерение сигнатур

Сигнатуры могут быть измерены путем моделирования реальных замираний на двухлучевом имитаторе. Упрощенная трехлучевая модель имеет функцию передачи:

$$H(\omega) = [1 - b \exp(-j(\omega - \omega_0)\tau)] \quad (1)$$

где предполагается, что прямой луч имеет единичную амплитуду, отраженный луч с амплитудой b задержан на время τ , и a – коэффициент масштабирования. Точка максимума замирания отстоит по частоте на величину f_0 от средней частоты радиоканала и имеет глубину $B = -20 \log \lambda$, где $\lambda = 1 - b$. Здесь сигнатура представляет собой график критических значений B_c как функции от f_0 при коэффициенте ошибок, соответствующем отказу. Хотя значение 6,3 нс для τ использовалось несколькими администрациями, и по результатам изучения большого числа различных случаев замираний были определены соответствующие распределения для b и f_0 , сигнатуры иногда измеряются для других значений τ . Фазы не минимальных замираний могут быть учтены с помощью уравнения (1) при использовании отрицательных величин задержки τ .

В некоторых методах расчета отказов τ принимают за непрерывную произвольную переменную. Поэтому в таких случаях для оценки изменения $b_c(\tau)$ в зависимости от τ . Для $b_c(\tau)$ предложены различные правила изменения масштаба. Линейный закон, применимый только для малых задержек, показывает, что высота, выраженная в длинах волн (λ), пропорциональна τ . Могут применяться и более точные правила изменения масштаба.

Ширина сигнатуры $W(f_0)$ остается практически постоянной при изменении задержки, за исключением случая, когда задержка стремится к нулю, и тогда ширина сигнатуры удваивается при уменьшении задержки в два раза.

4.2.2 Нормированный системный параметр (K_n)

Влияние характеристик оборудования выражается посредством значений нормированного системного параметра K_n , причем данный параметр оценивается на основании измеренных системных сигнатур. По существу, он может считаться нормированным системным параметром, оцениваемым исходя из "нормированной системной сигнатуры". Если последняя приводит системные сигнатуры к конкретному бодовому интервалу (1 нс) и относительной задержке эхосигнала (1 нс), то такие приведенные системные сигнатуры, известные как "нормированные сигнатуры", являются характеристикой таких системных параметров, как метод модуляции, коэффициент сглаживания и тип корректора. Используя для сигнатуры прямоугольную аппроксимацию, получаем формулу для K_n :

$$K_n = (T^2 \cdot W \cdot \lambda_a) / \tau_r \quad (2)$$

где:

T : бодовый интервал системы (нс)

W : ширина сигнатуры (ГГц)

λ_a : средняя величина сигнатуры (линейной) $\lambda_c(f) = 1 - b_c(f)$

τ_r : эталонная задержка для λ_a (нс).

В таблице 1 приведены значения K_n для приемников без адаптивной коррекции. Использование адаптивных трансверсальных корректоров улучшает показатели качества системы так, что численные значения для области нормированной сигнатуры K_n обычно уменьшаются примерно до 1/10 значений, приведенных в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Значения параметра K_n для различных методов модуляции без использования корректоров

Метод модуляции	K_n
64-КАМ	15,4
16-КАМ	5,5
8-ФМН	7,0
4-ФМН	1,0