

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R F.752-2*

**Методы разнесения для систем фиксированной
беспроводной связи из пункта в пункт**

(1992-1994-2006)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описываются методы разнесения для фиксированных беспроводных систем связи из пункта в пункт. К ним относятся методы разнесения в области пространства, угла, частоты либо их сочетания. Основные методы выбора разнесения при получении либо обработке разнесенных сигналов представлены в Приложении, в котором также описано практическое действие разнесения на основе данных о распространении радиоволн. Методы разнесения с использованием альтернативной среды передачи данных либо разнесения по маршруту/месту расположения, которые могут применяться для повышения доступности системы, в настоящей Рекомендации не рассматриваются.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что частотно-селективные замирания могут приводить к искажениям и уменьшению мощности принимаемых сигналов на трассах прямой видимости и тропосферных трассах и тем самым снижать показатели качества фиксированных беспроводных систем;
- b) что для уменьшения влияния замираний на показатели качества системы целесообразно применять методы разнесения;
- c) что использование разнесенного приема необходимо для обеспечения удовлетворительных показателей качества на дифракционных и тропосферных трассах;
- d) что изучены и используются различные варианты разнесения на трассах прямой видимости, дифракционных и тропосферных трассах;
- e) что применение методов разнесения может обеспечить высокие показатели качества систем прямой видимости, что позволяет эффективно использовать спектр радиочастот;
- f) что дополнительная информация в отношении использования и применения методов разнесения содержится в Рекомендациях МСЭ-R P.530 и F.1093,

рекомендует,

1 что при выборе методов разнесения в системах фиксированной беспроводной связи должна использоваться информация, представленная в Приложении 1 (см. Примечание 1).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В Справочнике МСЭ-R по цифровым радиорелейным системам также содержится соответствующий материал по применению методов разнесения к системам фиксированной беспроводной связи.

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

Приложение 1

Методы разнесения для систем фиксированной беспроводной связи из пункта в пункт

1 Методы получения разнесенных сигналов

Наиболее распространенными методами считаются частотное и пространственное разнесение. При частотном разнесении одна и та же информация передается по нескольким радиостволам. При пространственном разнесении сигнал достигает приемника по нескольким антенным трактам передачи/приема. Описание вариантов реализации разнесения в различных системах, работающих в разных режимах распространения радиоволн, требует более подробного рассмотрения методов пространственного разнесения.

Тропосферные системы используют разнесение как при передаче, так и при приеме. В них применяется многократное разнесение с полной трехмерной гибкостью при размещении антенн, и иногда угловое разнесение, при котором одна антенна имеет несколько лучей или многолучевую диаграмму направленности. Угловое разнесение обеспечивает получение относительно некоррелированных сигналов благодаря различиям в углах прихода на приемник рассеянных лучей.

На трассах прямой видимости пространственное разнесение обычно выполняется при помощи установки на приемной стороне двух антенн с достаточно большим вертикальным разносом между ними для получения двух сигналов, в которых ухудшения, вызванные замираниями вследствие многолучевого распространения, существенно декоррелированы; под ухудшениями подразумевается искажение сигнала и потеря мощности. Озабоченность показателями качества цифровых радиорелейных систем, в которых искажения сигнала являются доминирующими ухудшениями, вызываемыми условиями распространения радиоволн, привела к внедрению методов разнесения, в основе которых лежит использование для декорреляции ухудшений сигнала неравномерности структуры падающего электромагнитного поля вблизи основной приемной антенны, а не пространственного разнесения.

В этой методике, называемой разнесением по диаграмме направленности или угловым разнесением, разнесенный сигнал получают от второй антенны с другой диаграммой направленности или от луча той же антенны, имеющего другую угловую ширину в вертикальной плоскости и/или другой угол возвышения оптической оси. Такие методы разнесения, которые могут быть реализованы с помощью антенн, расположенных на одинаковой или почти одинаковой высоте, или антенн с несколькими облучателями, позволяют ввести на существующем пролете дополнительное разнесение без увеличения высоты башни с целью получения для разнесенного приема дополнительного просвета на трассе. Хотя в одних исследованиях пытаются разграничить угловое разнесение и разнесение по диаграмме направленности, в других эти термины применяют как равнозначные.

Поскольку эффективность любой системы разнесения зависит от корреляции замираний сигналов, разнесение по пространству, углу и частоте имеет важнейшее значение при определении показателей качества системы.

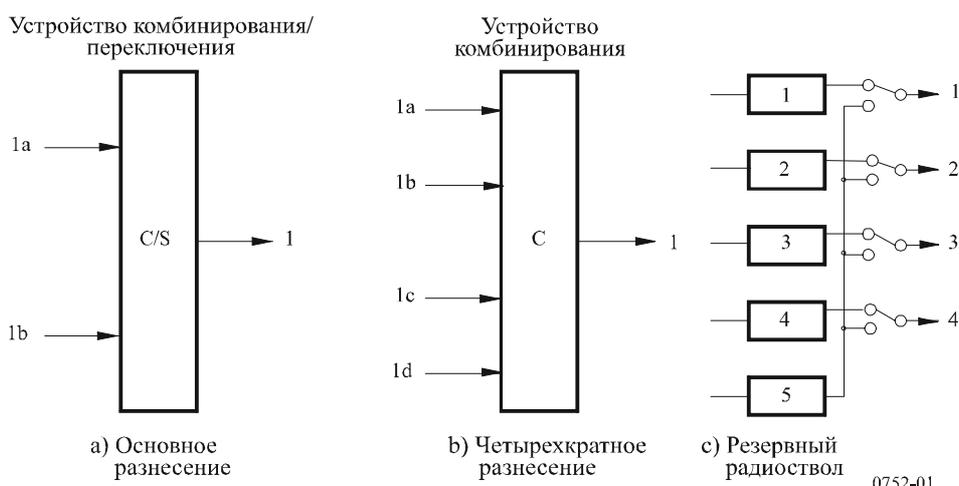
2 Методы обработки сигналов

2.1 Варианты

На рисунках 1а) и 1б) представлены основные варианты разнесенного приема, применяемые в некоторых цифровых системах, в которых для получения общего сигнала на выходе используется два или четыре сигнала. Хотя на трассах прямой видимости для реализации переключения на резерв по схеме 1 + 1 часто используется частотное разнесение, как показано на рис. 1а), в общем случае применяются один или иногда два резервных радиоствола для нескольких рабочих радиостволов. На рис. 1с) показана структурная схема для работы по схеме 1 + 4. Такое резервирование часто используется совместно с пространственным разнесением отдельных радиостволов. В экстремальных условиях, встречающихся на трассах прямой видимости с отраженными сигналами, пространственное разнесение используется в сочетании с частотным резервированием по схеме 1 + 1. На сложных протяженных или надводных трассах также используется четырехкратное разнесение – либо в виде "чисто" пространственного разнесения, либо в комбинации сдвоенного пространственного и сдвоенного частотного разнесения.

РИСУНОК 1

Структурные схемы комбинирования сигналов при разнесении



2.2 Аспекты реализации

В существующих системах разнесение реализуется при помощи устройств комбинирования, работающих на радиочастоте, промежуточной частоте или в основной полосе частот, либо при помощи устройств переключения, работающих на промежуточной частоте или в основной полосе частот. Такие устройства комбинирования могут использовать алгоритмы с равным усилением, алгоритмы выбора по максимуму мощности или алгоритмы с управлением по минимальной дисперсии. Поскольку разница в показателях качества передачи невелика, то при проектировании оборудования выбор конкретного варианта обычно обусловлен соображениями удобства или простоты. Необходимость использования разнесения на данной линии определяется ожидаемой сложностью условий распространения радиоволн и характеристиками передаваемого сигнала.

Реальное улучшение, которое может быть получено в результате разнесения, зависит от многих параметров, включая влияние внутрисполосной дисперсии амплитуд и межсистемных помех на показатели качества радиоствола, и алгоритмы, используемые при реализации разнесения.

В высокоскоростных системах фиксированной беспроводной связи применяются устройства комбинирования сигналов с минимальной дисперсией (МинД), а также приемники со сдвоенным приемом, в которых разнесенные сигналы обрабатываются в устройстве комбинирования сигналов по максимуму мощности (МаксМ), а суммарный сигнал обрабатывается адаптивным корректором (АдК). Применение МаксМ + АдК производит усиленный объединенный эффект, то есть значительно уменьшает коэффициент ошибок по битам. Методы, используемые для комбинирования сигналов при пространственном разнесении "по максимуму мощности", применяемого в приемниках с МаксМ + АдК, можно классифицировать по следующим трем категориям:

- МаксМРУ или комбинирование по максимуму мощности с равным усилением. Этот метод, в котором используется линейное сложение, имеет тот недостаток, что в случае глубоких замираний одного из разнесенных сигналов отношение сигнал/шум на выходе устройства комбинирования на 3 дБ хуже, чем в обычном приемнике.
- МаксМРУ/ПК или комбинирование/переключение по максимуму мощности с равным усилением. В этом методе используется линейное сложение и отсутствуют потери отношения сигнал/шум на выходе сумматора в результате того, что когда входной сигнал первого приемника становится в $(\sqrt{2} + 1)$ раз слабее, чем входной сигнал второго приемника, входной сигнал первого приемника отключается от сумматора. Недостатком этого метода является наличие переходного процесса при переключении, что дает увеличение коэффициента ошибок в высокоскоростных цифровых системах.
- МаксМ/ОптК или оптимальное комбинирование по максимуму мощности. Этот метод не имеет недостатков, присущих системам МаксМРУ и МаксМРУ/ПК. В системе МаксМ/ОптК в ветвях разнесения перед сумматором включены электронные аттенюаторы, затухание которых изменяется автоматически пропорционально отношению мощностей принимаемых пространственно разнесенных сигналов. В устройстве комбинирования МаксМ/ОптК

используется линейное сложение при отношении мощностей сильного сигнала к слабому $\gamma < 7,7$ дБ; при дальнейшем увеличении замираний, в тракт слабого сигнала вводится затухание, плавно изменяемое пропорционально параметру γ . Увеличение отношения сигнал/шум для МаксМ/ОптК по сравнению с обычным приемником практически равно усилению, определенному для устройства комбинирования с оптимальным сложением сигналов (комбинирование по максимальному отношению или МаксОт).

Что касается устройств комбинирования с минимальной дисперсией (МинД) также используемых для комбинирования пространственно разнесенных сигналов, то может быть рассмотрен следующий метод.

2.3 Минимальный КОБ или стратегия взвешивания

Данный метод основан на взвешивании принимаемых ПЧ сигналов (или сигналов в основной полосе частот) и внутриполосной дисперсии с целью сведения к минимуму коэффициента ошибок по битам (КОБ).

Функция КОБ может быть определена в реальном масштабе времени на основании данных об уровне сигнала и внутриполосной дисперсии мощности (ВПДМ) сигнала. Оптимизация определяемой величины КОБ эквивалентна оптимизации для случая отказа на пролете радиорелейной линии.

3 Применение разнесения в тропосферных системах

3.1 Виды разнесения

Существующие системы для получения достаточно некоррелированных вариантов передаваемого сигнала используют пространственное разнесение, угловое разнесение и частотное разнесение либо раздельно, либо в комбинации. Для получения более подробной информации о применении этих методов и расчете их характеристик следует обращаться к Рекомендации МСЭ-R F.1101.

3.2 Типы устройств комбинирования

В тропосферных системах устройства комбинирования обычно ставятся после демодуляторов. Перечислим типы таких устройств в порядке снижения эффективности: устройства комбинирования с максимальным отношением сигнал/шум, устройства комбинирования с равным усилением и устройства комбинирования с автовыбором. Использование комбинирования с равным усилением по сравнению с комбинированием с максимальным отношением сигнал/шум может привести к упрощению аппаратуры и облегчению ее эксплуатации при умеренных потерях качества (приблизительно 1 дБ при четырехкратном разнесении). Дальнейшее уменьшение различия в эффективности может быть достигнуто путем объединения устройства комбинирования с равным усилением с устройством автовыбора. При комбинировании с равным усилением, если уровни сигналов существенно отличаются друг от друга, то наличие ветви приема со слабым сигналом может фактически привести к ухудшению общих показателей качества; однако, если при этих условиях ее отключить, то можно получить общие показатели качества, весьма близкие к показателям при идеальном комбинировании с максимальным отношением сигнал/шум.

4 Применение разнесения в системах прямой видимости

Многолучевые замирания на трассах прямой видимости приводят к потерям мощности, которые могут изменяться селективно в пределах радиоствола. Эти два аспекта – потеря мощности и дисперсия – могут в некоторых случаях учитываться раздельно. Для ЧМ и узкополосных цифровых сигналов показатели качества определяются узкополосной или одночастотной потерей мощности сигнала; для многих цифровых систем большой пропускной способности показатели качества определяются дисперсией. Из-за быстрого развития цифровых радиорелейных систем большой пропускной способности трудно четко определить, какие системы в данном приложении чувствительны только к потере мощности сигнала, какие – только к дисперсии, а какие – к обоим факторам. Хотя многоуровневые методы модуляции по своей природе более чувствительны к влиянию дисперсии, достижения в проектировании оборудования, как, например, достижения за счет улучшенных корректоров, делают систему менее чувствительной к дисперсии.

4.1 Аспекты одночастотных потерь мощности сигнала

В системах прямой видимости, во время многолучевых замираний, сигналы, принимаемые двумя вертикально разнесенными антеннами, редко подвержены замираниям одновременно, если замирания глубоки. Улучшения, получаемые в результате использования такой пары антенн, можно определить как отношение I_0 , в котором числитель представляет собой время, в течение которого уровень сигнала от главной приемной антенны лежит ниже запаса на замирания, а знаменатель – время, в течение которого уровни сигналов от двух приемных антенн одновременно находятся ниже запаса на замирания. Пусть P – часть месяца высокой активности замираний, в течение которого принимаемый сигнал в нерезервируемом радиостволе имеет меньшее значение, чем определенный запас на замирания. Тогда часть времени, в течение которого сигнал системы с пространственным разнесением на этой линии имеет меньшее значение, чем запас на замирания, равна P , отнесенному к I_0 , когда применяется идеальный переключатель, который всегда выбирает из двух принимаемых сигналов более сильный.

Для идеального переключателя, который всегда выбирает из двух сигналов более сильный, коэффициент улучшения при пространственном разнесении эмпирически связан с уровнем замираний, длиной трассы, частотой и относительными коэффициентами усиления антенн для трасс, на которых отражения от земной поверхности пренебрежимо малы.

Коэффициент улучшения, получаемый при использовании устройства комбинирования, может быть больше коэффициента, получаемого при использовании идеального переключателя, вследствие когерентного сложения мощности сигналов, однако он зависит от метода управления комбинированием. Для устройства комбинирования по максимуму мощности с равным усилением, в котором управляются только относительные фазы входных сигналов, теоретический коэффициент улучшения составляет $3/2$ от значения для идеального переключателя.

4.2 Дисперсия

В целях снижения дисперсионного эффекта замираний при использовании разнесения в цифровых системах с большой пропускной способностью и в АМ системах с одной боковой применяются как устройства комбинирования, так и переключатели. Для пространственного и углового разнесения определены алгоритмы управления по максимуму мощности и по минимальной дисперсии. Устройства комбинирования используют относительный фазовый сдвиг во входных сигналах и складывают эти сигналы когерентно для достижения проектных показателей: максимума мощности выходного сигнала для устройств комбинирования по максимуму мощности и равномерности АЧХ выходного сигнала в устройстве комбинирования по минимальной дисперсии.

В случае частотного разнесения обычно используют переключатели в основной полосе частот для выбора, в идеале без ошибок, сигнала с меньшим КОБ.

Оценки методов разнесения для уменьшения дисперсии основаны на данных наблюдений, выполненных в условиях реальной эксплуатации или в условиях частично смоделированной работы систем при полевых испытаниях, а также на результатах исследований условий распространения радиоволн, в ходе которых измерялись линейная амплитудная дисперсия (ЛАД) или внутрисполосная разность мощности сигнала (ВПРМ). ЛАД представляет собой разность, (в децибелах) между ослаблением сигнала, измеренным у краев спектра сигнала; ВПРМ – разность (в децибелах) между наименьшим и наибольшим ослаблением, измеренным в полосе частот сигнала. Использование ЛАД и ВПРМ основано на результатах полевых испытаний, показывающих четкую связь между величинами этих показателей и появлением высоких значений коэффициента ошибок по битам.

4.3 Методы разнесения для систем со многими несущими

В системах со многими несущими через один ретранслятор передается более одной несущей. Соответственно, существуют различные способы получения разнесенных сигналов, т. е. сложение (или переключение) на основе системы и сложение (или переключение) на основе несущей. В данном разделе эти приложения, в частности, рассматриваются для передачи с использованием многих несущих.

4.3.1 Методы управления сложением сигналов для пространственного разнесения

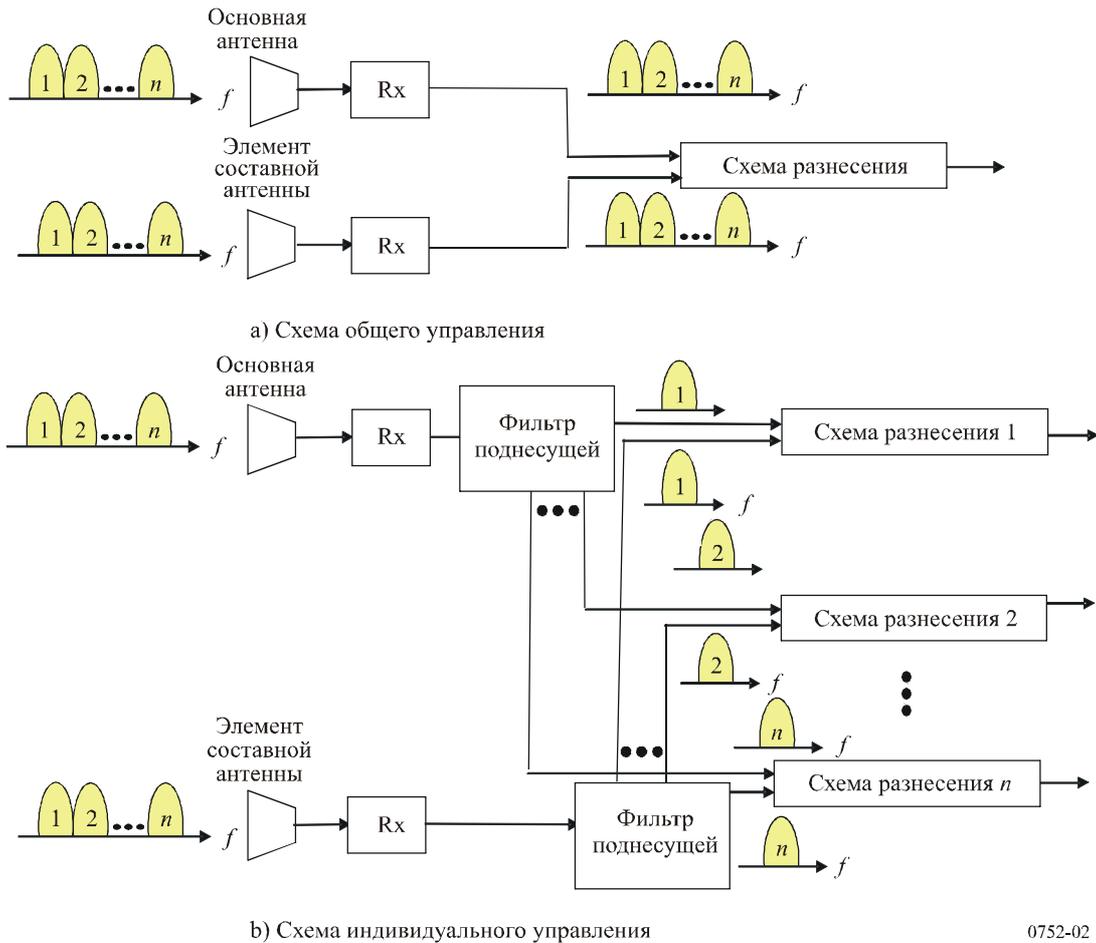
Для методов пространственного разнесения, используемых в системах фиксированной беспроводной связи со многими несущими, существует два способа управления сложением разнесенных сигналов. Одни из них – схема общего управления (основанная на общем числе сигналов в приемниках (рис. 2а)).

При втором способе схема сложения разнесенных сигналов создается отдельно для каждой несущей, как это показано на рис. 2б). При этом способе возможно более точно производить когерентное сложение мощности сигнала и, таким образом, достигать при эффекте многолучевого замирения намного большего улучшения, чем при схеме общего управления.

Преимущество схемы общего управления состоит в том, что она реализуется при относительно простой схмотехнической конфигурации. Однако новейшие технологии БИС позволяют реализовать схему индивидуального управления компактно и экономично.

РИСУНОК 2

Конфигурация способов сложения сигналов для пространственного разнесения в системах со многими несущими



4.3.2 Методы переключения для разнесения по частоте

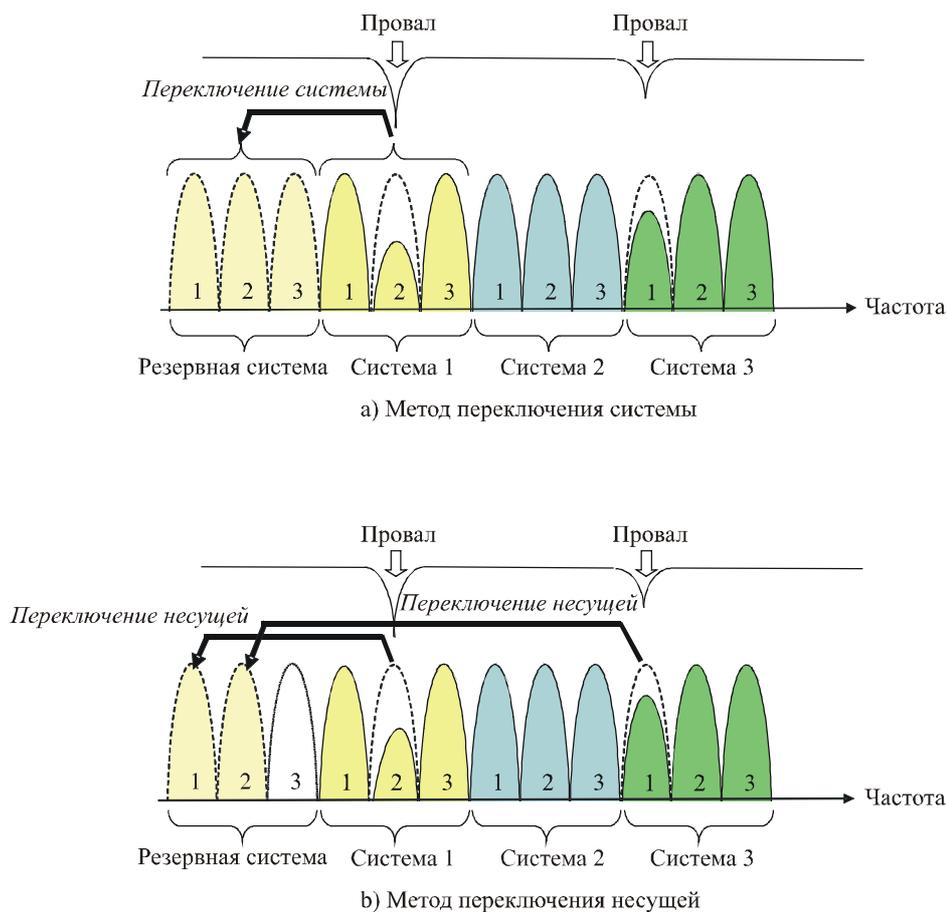
На рис. 3 представлены два возможных способа переключения для разнесения по частоте, используемые в системах со многими несущими. На этом рисунке в качестве примера допускаются три несущие на систему. На рис. 3а) и 3б) отображен механизм переключения для разнесения по частоте методом "переключение системы" либо методом "переключение несущей", соответственно.

Когда происходит частотно-избирательное замирение, принятые уровни отдельных несущих понижаются из-за провалов, вызванных замирениями. В случае переключения системы, показанном на рис. 3а), все несущие (несущие 1, 2 и 3) системы 1 переключаются на резервную систему, если уровень одной из трех несущих понижается. Таким образом, другая несущая с пониженным уровнем (в данном примере несущая 1 в системе 3) не может быть переключена на резервную систему.

В случае переключения несущей, показанного на рис. 3b), только несущая 2 с пониженным уровнем в системе 1 переключается на резервную систему. Это будет возможно для других несущих с пониженным уровнем в различных системах. Таким образом, в борьбе с частотно-избирательным замиранием общий результат метода переключения несущей может быть еще более улучшен путем эффективного использования спектра несущей в резервной системе.

РИСУНОК 3

Механизмы методов переключения при разнесении по частоте в системах со многими несущими

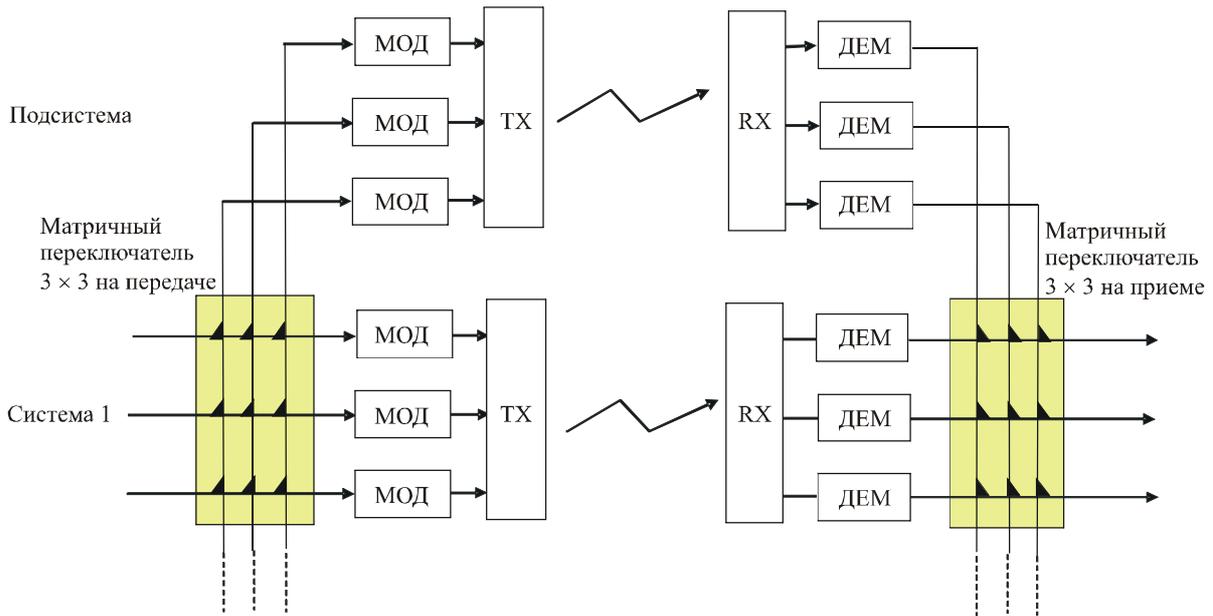


0752-02

На рис. 4 показана конфигурация метода переключения несущей. Сигналы несущей переключаются с помощью матричных переключателей 3×3 , которые могут переключать любую из трех несущих рабочих систем на любой частотный канал резервной системы. Переключение начинается при обнаружении импульсов упреждающей коррекции ошибок (FEC) и проводится при поддержке синхронизации переданных сигналов.

РИСУНОК 4

Конфигурация метода переключения несущей в системах со многими несущими



0752-04

4.4 Данные об условиях распространения радиоволн

Существующие системы для получения достаточно некоррелированных вариантов передаваемых сигналов используют пространственное разнесение, угловое разнесение и частотное разнесение либо раздельно, либо в комбинации.

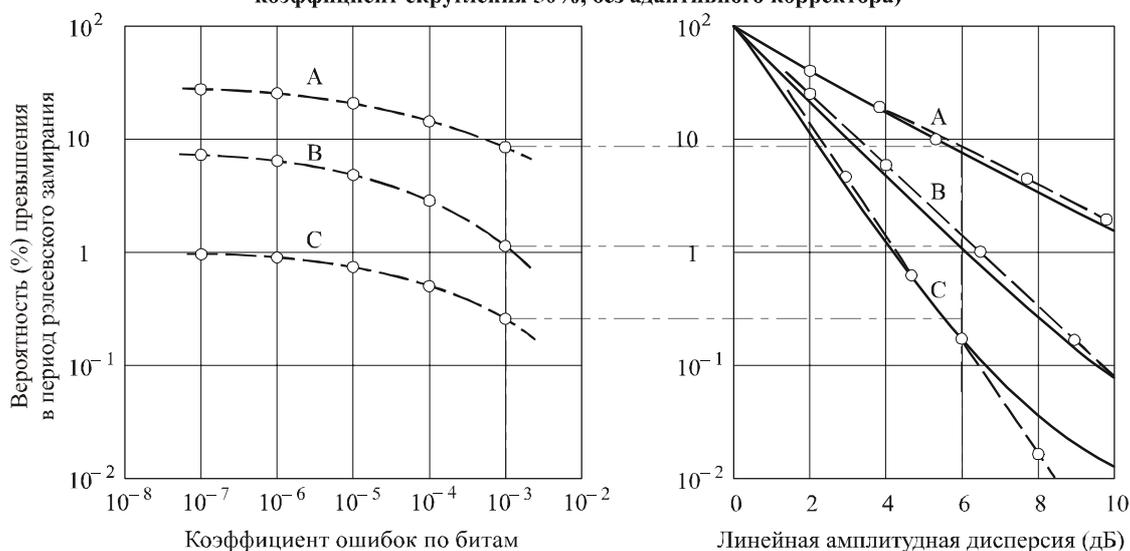
4.4.1 Пространственное разнесение

В одном из экспериментов цифровая радиорелейная система с большой пропускной способностью была оборудована устройствами комбинирования по максимуму мощности сигнала и по минимальной дисперсии. Устройство комбинирования по минимальной дисперсии определяло амплитудно-частотную характеристику, измеряя форму спектра; однако, когда сигнал на выходе устройства комбинирования падал ниже заранее определенного уровня, устройство комбинирования по минимальной дисперсии действовало как устройство комбинирования по максимуму мощности. На рис. 5 показаны результаты расчетов и результаты эксперимента с использованием системы 16-КАМ, и показано повышение вероятности ЛАД при работе обоих устройств комбинирования, а также при работе без разнесения.

Пространственное разнесение в системах фиксированной беспроводной связи прямой видимости выполняется с помощью вертикально разнесенных (обычно более чем на 5 м) антенн, что является минимальным разнесением, для которого применимы формулы коэффициента улучшения при одночастотном пространственном разнесении (см. Рекомендацию МСЭ-R P.530). Хотя эти формулы предполагают, что с уменьшением разнесения улучшение будет падать, результаты свидетельствуют о том, что когда антенны имеют разные диаграммы направленности в вертикальной плоскости, наблюдается значительное улучшение приема при малом разнесении. Более того, моделирование цифровой радиорелейной системы показало, что коэффициент улучшения при разнесении не может равномерно уменьшаться до нуля, даже если антенны идентичны, вследствие взаимодействия диаграмм направленности с падающей электромагнитной волной. Поскольку различия диаграмм направленности влияют как на одночастотный, так и на дисперсивный коэффициент улучшения, пространственное разнесение с малым разносом должно рассматриваться как вариант разнесения по диаграмме направленности до тех пор, пока не будет разработана более совершенная формулировка коэффициентов улучшения для различных случаев.

РИСУНОК 5

Диаграмма, демонстрирующая влияние пространственного разнесения на вероятность линейной амплитудной дисперсии на примере одного пролета линии, в которой используется модуляция 16-QAM (морская трасса длиной 53 км в Японии, 5 ГГц, 200 Мбит/с, коэффициент скругления 50%, без адаптивного корректора)



- A: без разнесения
 B: комбинирование по максимуму мощности
 C: комбинирование по минимальной дисперсии
 ○ — измеренное
 — вычисленное

0752-05

4.4.2 Разнесение по диаграмме направленности антенны или по углу

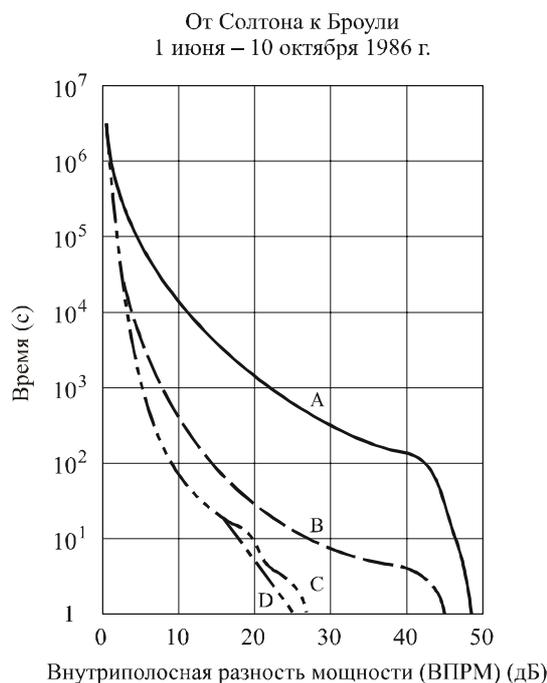
Предварительные исследования, при которых разнесение по диаграмме направленности выполнялось посредством использования двух различных типов волн в приемной рупорной антенне, показали, что применение устройства разнесения с переключением для селективного замирания позволяет достичь лишь незначительного улучшения. Считалось, что возможность получения значительного улучшения, отмеченная при эксперименте, в ходе которого контролировалась работа цифровых радиорелейных систем с модуляцией 4-ФМН на совпадающей частоте с ортогональными поляризациями, обусловлена различием диаграмм направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях передающих и приемных антенн. При исследовании, проведенном на протяженной (105 км) надводной трассе, измерения мощности принимаемого цифрового сигнала (8-ФМН, 45 Мбит/с) в диапазоне частот 7,4 ГГц, показали значительное улучшение, полученное вследствие применения углового разнесения при использовании двухлучевой антенны. Большие значительные улучшения, заключающиеся в уменьшении случаев появления дисперсии вследствие многолучевого распространения (ВПДМ), были получены при эксперименте, в ходе которого две различные антенны с одним и тем же углом направления оптической оси были установлены бок о бок. Результаты эксперимента по измерению замираний с использованием антенной решетки с четырьмя вертикальными лучами в системе с шириной полосы более 90 МГц, работающей в диапазоне 4 ГГц на пролете протяженностью 45 км, служат дополнительным подтверждением преимуществ углового разнесения.

Результаты двух экспериментов по изучению условий распространения радиоволн, которые были построены так, чтобы оценить преимущества использования углового разнесения в цифровых радиорелейных системах с большой пропускной способностью, свидетельствуют в пользу углового разнесения. Первый из экспериментов был поставлен в диапазоне 6 ГГц на трассе длиной 60 км, на которой, как было известно, наблюдались значительные отражения от земной поверхности при нормальных атмосферных условиях. Угловое разнесение было реализовано с помощью двухлучевой антенны, позволяющей получить первую пару разнесенных сигналов как сумму и разность напряжений, и вторую пару — как выходной сигнал от двух лучей. Для сравнения одновременно контролировалось пространственное разнесение с использованием конической рупорной антенны диаметром 3 м, размещенной на 12,8 м ниже основной антенны. Сигналы от разнесенных антенн были

получены с помощью устройства комбинирования по максимуму мощности; замирания контролировались путем измерения мощности принимаемого сигнала на трех частотах. Распределения ВПРМ на выходе устройств комбинирования (рис. 6) показывают, что в период эксперимента при угловом разнесении входных сигналов ВПРМ появлялась реже, чем при пространственном разнесении входных сигналов. В последующие периоды угловое разнесение уменьшало время отказов в 64-КАМ цифровой радиорелейной системе на этой трассе примерно в 400 раз.

РИСУНОК 6

Распределения, показывающие влияние углового и пространственного разнесения с комбинированием по максимуму мощности на появление внутрисполосной разности мощности сигнала (измеренной на трех частотах в полосе шириной 30 МГц), для трассы длиной 60 км с отражениями от земной поверхности (США) в диапазоне частот 6 ГГц



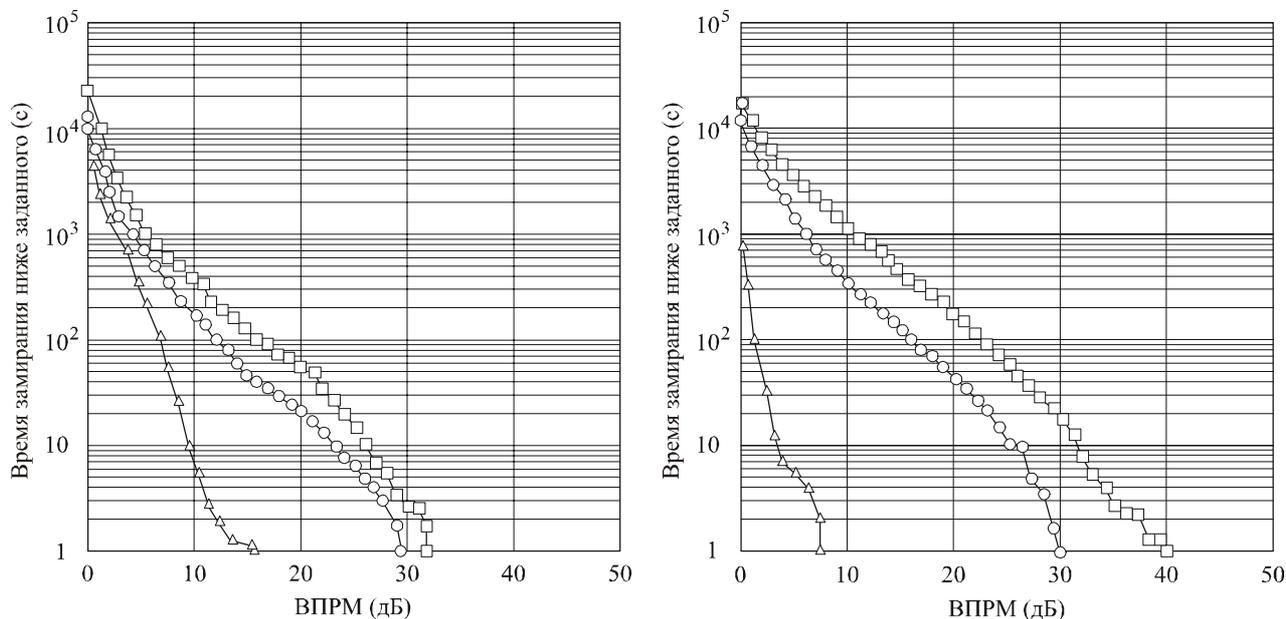
- A: основная антенна, коническая рупорная антенна диаметром 3 м
- B: комбинирование с конической рупорной антенной диаметром 3 м, расположенной на 12,8 м ниже основной антенны
- C: комбинирование с сигналами суммы и разности от параболической антенны диаметром 2,4 м, сигнал к которой подводится в двух точках
- D: комбинирование с сигналами от верхнего и нижнего лучей параболической антенны диаметром 2,4 м, сигнал к которой подводится в двух точках

0752-06

В одном испытании в рамках серии экспериментов по определению влияния малого углового и пространственного разнесения одинаковых и различных антенн на трассе длиной 38 км во Флориде было реализовано угловое разнесение с использованием двух одинаковых пирамидально-рупорных антенн диаметром 3 м, расположенных рядом. В другом эксперименте этой же серии разнесенный сигнал был получен от второй антенны меньшего диаметра (1,8 м), расположенной на башне непосредственно под основной антенной. Замирания регистрировались посредством контроля мощности принимаемого сигнала на 16 частотах при ширине полосы 30 МГц в диапазоне 6 ГГц. На рис. 7 показана статистика времени появления ВПРМ для этих двух конфигураций. Хотя значительное уменьшение времени появления ВПРМ наблюдается при обеих конфигурациях, уменьшение, полученное в данном эксперименте при вертикальном разнесении, оказалось значительно большим.

РИСУНОК 7

Распределения, показывающие влияние разнесения с идеальным переключением (по минимальной дисперсии) на появление внутрисполосной разности мощности (измеренной на 16 частотах в полосе шириной 30 МГц), для трассы длиной 37 км около Гейнсвилла, Флорида, США, в диапазоне частот 6 ГГц



а) Одинаковые антенны, установленные бок о бок. Сдвиг угла по вертикали 1°

б) Различные антенны с разнесением по вертикали 3,6 м, обе по оптической оси

- Пирамидально-рупорная антенна диаметром 3 м (основная)
- Антенна разнесения, пирамидально-рупорная антенна диаметром 3 м
- △ Измерения при разнесении с переключением

- Пирамидально-рупорная антенна диаметром 3 м (основная)
- Антенна разнесения, коническо-рупорная антенна диаметром 1,8 м
- △ Измерения при разнесении с переключением

0752-07

Эксперименты по изучению условий распространения радиоволн, в ходе которых сравнивались угловое и пространственное разнесения, позволили получить дополнительную полезную информацию. При измерениях на трассе длиной 55 км около Дармштадта (Германия) и аналогичных измерениях на трассе длиной 51 км на востоке Англии пространственное разнесение дало лучшие результаты, чем угловое разнесение. Измерения, выполненные на трассе длиной 47,8 км около Ричардсона, Техас (США), показали, что преимущество пространственного разнесения перед угловым зависит от конфигурации углового разнесения. Двухлучевая антенна с нижним лучом, направленным под номинальным углом прихода сигнала, имела значительно лучшие характеристики, чем такая же антенна с лучом, направленным перекрестно этому углу, а конфигурация, использующая сумму и разность сигналов, оказалась лучше, чем конфигурация, использующая сигналы от двух лучей, и дала почти те же результаты, что и пространственное разнесение. Эти результаты были подтверждены данными, полученными в ходе одновременно проводившихся метеорологических измерений.

В ходе экспериментов в штатах Алабама и Миссисипи (США) было проведено сравнение углового разнесения и разнесения по диаграмме направленности с пространственным разнесением. Результаты этого сравнения, полученные в течение одного сезона для замираний в каждой местности, также свидетельствовали о преимуществе нацеливания одной антенны под углом выше номинального угла прихода сигнала при двухантенной конфигурации, и преимуществе пространственного разнесения перед угловым. Преимущество пространственного разнесения в данном случае было отнесено на счет разницы в запасах на замирания в радиорелейных системах и различий в дисперсивности замираний на пролетах. На основе этих и других результатов был сделан вывод о том, что в случае, когда показатели качества цифровых радиорелейных систем определяются влиянием дисперсии, характеристики углового разнесения и пространственного разнесения практически одинаковы, когда же превалирует влияние теплового шума, пространственное разнесение дает лучшие показатели.

В результате эксперимента в диапазоне частот 6 ГГц на пролете протяженностью 124 км с сильными отражениями от поверхности Женевского озера в Швейцарии были получены весьма высокие значения коэффициентов улучшения при угловом разнесении и несколько меньшие значения этих коэффициентов при пространственном разнесении.

В ходе двухлетнего эксперимента в Нидерландах угловое разнесение с двумя лучами дало более значительное улучшение в том случае, когда один из лучей был нацелен под углом ниже номинального угла прихода сигнала. При такой конфигурации улучшение было почти таким же, как улучшение при пространственном разнесении, измеренное на семи сопоставимых пролетах.

4.4.3 Частотное разнесение

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что частотное разнесение является более эффективным средством борьбы с дисперсией, влияющей на цифровые системы, чем с потерей мощности сигнала, воздействующей на узкополосные ЧМ системы. В одной из серий экспериментов исследования условий распространения радиоволн были объединены с измерениями коэффициента улучшения, получаемого при частотном разнесении для цифровой радиорелейной системы 16-КАМ с пропускной способностью 90 Мбит/с, работающей в диапазоне 6 ГГц, на трассе длиной 42 км от Атланты до Палметто в штате Джорджия (США). Согласно данным экспериментов, проведенных в 1980 и 1982 годах, которые были получены при обработке статистических данных о появлении коэффициентов ошибок по битам в двух цифровых радиостволах, работающих с разнесением средних частот на 60 МГц, сигналы которых поступали на входы устройства частотного разнесения, действующего по схеме 1 + 1 с идеальным переключателем, коэффициент улучшения при частотном разнесении составляет, соответственно, 100 и 45, при коэффициенте ошибок по битам 10^{-3} . Это улучшение сравнимо с коэффициентом улучшения при пространственном разнесении, измеренным при разнесении антенн на 9 м в тех же радиостволах на той же трассе. Напротив, стандартные методы, основанные на селективных замираниях, прогнозируют получение коэффициента улучшения, равного 9, для аналоговой ЧМ радиорелейной системы с запасом на замирания 30–35 дБ.

Экспериментальные данные, полученные в цифровой радиорелейной системе с пропускной способностью 90 Мбит/с в диапазоне 6 ГГц при работе по схеме 1 + 1 на трассе длиной 100 км в штате Вайоминг (США) также свидетельствуют о том, что коэффициент улучшения для цифровых радиорелейных систем при частотном разнесении в 10 раз превышает прогнозируемый коэффициент для ЧМ систем.

При экспериментальной оценке частотного разнесения, использующего многоступенчатое резервирование по схеме 3 + 1, получена величина коэффициента уменьшения отказов, равная примерно 5. Оборудование, состоящее из цифровой радиорелейной системы КФМН диапазона 11 ГГц с пропускной способностью 140 Мбит/с, было установлено на одном пролете. Однако улучшение оказалось бы меньше в более типичной ситуации при использовании многопролетной системы с резервированием по схеме 5 + 1.

4.4.4 Четырехкратное разнесение

Об определенных достижениях при применении такого подхода сообщается в работе, описывающей проведенные в Австралии исследования четырехкратного разнесения либо в виде четырехкратного пространственного разнесения, либо в виде комбинации сдвоенного пространственного и междиапазонного частотного разнесения в целях получения показателей качества по ошибкам и готовности цифровой радиорелейной системы для участка высокого качества на сложных трассах, особенно протяженных надводных трассах. Коэффициенты улучшения, измеренные при экспериментах на двух протяженных надводных трассах, представлены в таблице 1.

Кроме того, сообщается о значительном улучшении, полученном при использовании четырехкратного пространственного разнесения на сложной трассе, подверженной длительным глубоким замираниям.

ТАБЛИЦА 1

**Коэффициенты улучшения – четырехкратное разнесение относительно сдвоенного –
наихудший месяц, значение для типичного месяца указано в скобках**

	Эксперимент 1 158 км	Эксперимент 2 116 км
Пораженные секунды	2,6 (15)	6,5 (29)
Минуты пониженного качества	1,6 (10)	6,2 (30)
Секунды с ошибками	1,4 (7,4)	3,7 (4,5)
Секунды неготовности	2,0 (7,0)	25,0 (>25)

4.5 Статистика дисперсии

Опубликованы работы, в которых содержатся статистические описания дисперсионных эффектов многолучевых замираний.

Для тропосферных систем была выполнена теоретическая оценка распределений линейной амплитудной дисперсии с использованием разнесения и без него, в предположении существования рэлеевского распределения для отдельных амплитуд. В последних исследованиях описаны методы прогнозирования вероятности превышения линейной амплитудной дисперсией критического значения на выходе устройств комбинирования, как по максимуму мощности, так и по минимальной дисперсии.

Для обеспечения одновременного описания селективных замираний во всех радиостволах полосы радиочастот было использовано моделирование частотного разнесения с применением широкополосной трехлучевой модели. Для схемы резервирования 1 + 1 на основе моделирования можно предположить, что в отличие от аналоговых радиорелейных систем улучшение показателей качества цифровых радиорелейных систем имеет, с некоторыми ограничениями, тенденцию к увеличению при уменьшении разноса частот между двумя радиостволами.
