

Лекция 5. Проблемы передачи сигнала и способы противодействия отрицательным воздействиям на радиосигнал

Цель лекции – изучение основных проблем, возникающих при передаче радиосигналов, а также методов и технологий, применяемых для минимизации отрицательных воздействий на качество связи.

Введение

В современном мире передача информации по радиоинтерфейсу играет ключевую роль в обеспечении связи и доступа к данным. С увеличением числа мобильных устройств и потребностей пользователей в высокоскоростной передаче данных, важность качественной передачи радиосигналов возрастает. Однако, процесс передачи сигналов сопряжен с рядом проблем, таких как затухание, теневые зоны, многолучевое распространение, замирания сигнала и временные задержки. Каждая из этих проблем может существенно ухудшить качество связи, привести к ошибкам в передаче данных и снизить общую надежность систем связи. Для эффективного функционирования сотовых сетей необходимо разрабатывать и внедрять методы и технологии, способные минимизировать влияние этих негативных факторов.

Классификация проблем, возникающих при распространении сигналов

Можно выделить следующие основные проблемы, которые возникают при передаче сигналов по радиоинтерфейсу: затухание сигнала, теневые зоны, многолучевое распространение сигналов, замирания сигнала, временные задержки.

Затухание сигнала. Для передачи телекоммуникационных сигналов используются различные среды, такие как электрические и оптические кабели, а также воздушное пространство. При любом способе передачи наблюдается уменьшение первоначальной энергии сигнала, выходящего от передатчика, что приводит к затуханию. Это затухание создает определенные трудности при приеме сигнала, так как если его энергия падает ниже порога чувствительности приемника, информация может быть искажена или утеряна. Основная причина затухания заключается в неидеальности среды передачи. В электрических каналах затухание связано с сопротивлением проводника: чем выше это сопротивление, тем больше потеря энергии, которая рассеивалась в виде тепла. В оптических каналах затухание в основном обусловлено примесями и неоднородностями в проводнике, что приводит к переотражению части полезной энергии обратно к источнику или её выходу за пределы оптического волокна. В радиоканалах существуют различные причины затухания, основная из которых заключается в рассеивании энергии сигнала на тепло, что делает радиопередатчик источником тепла для окружающего пространства. Важно отметить, что потери энергии в радиоканалах имеют предсказуемый и линейный характер. Зная уровень затухания для определенной частоты на единицу длины, можно заранее рассчитать необходимую мощность излучения передатчика для обеспечения передачи сигнала на заданное расстояние. Это знание является ключевым для оптимизации систем связи и повышения их надежности, что позволяет минимизировать риск ошибок в передаче информации.

Теневые зоны. При распространении сигнала от БС он сталкивается с различными препятствиями, как искусственного, так и естественного происхождения. Искусственные преграды включают в себя жилые и производственные здания, мосты, путепроводы и другие сооружения. Естественные препятствия могут быть горными массивами, холмами, высокими

деревьями и другими природными формами рельефа. В зависимости от размеров преграды могут происходить разные сценарии: сигнал может огибать препятствие, за ним образуется так называемая теневая зона с низким уровнем сигнала, или сигнал может полностью отсутствовать. Затенение создает пульсирующую структуру затухания, которая варьируется в зависимости от условий. Обычно объекты, способные создать такие преграды, известны еще до развертывания сети связи, что позволяет учитывать их при проектировании. Существует множество решений для устранения проблем с затенением. Одним из подходов является установка дополнительной базовой станции для покрытия обширных теневых зон, особенно если в этих областях ожидается большое количество пользователей. В этом случае может быть использована станция с малой емкостью. Если же речь идет о малонаселенной территории, более эффективным решением будет установка репитера. Репитер принимает сигнал от ближайшей базовой станции и переизлучает его, тем самым обеспечивая покрытие в сложных местах. Этот подход позволяет значительно улучшить качество связи в затененных зонах и повысить удовлетворенность пользователей.

Многолучевое распространение сигналов. Радиосигнал на пути распространения от источника к приемнику может встречать какие-либо преграды. При этом сигнал может быть поглощен ими либо отражен. После чего этот сигнал снова может быть отражен в сторону получателя. В этом случае данный сигнал достигнет приемника, однако произойдет это с опозданием. С другой стороны, остальная энергия сигнала может достичь приемник без переотражения за более короткое время или пройти большее число отражений, что в свою очередь приведет к еще большим задержкам. Данный эффект возникает, когда между источником и приемником появляются несколько путей доставки сигнала. При этом энергия сигнала будет распределена между копиями сигнала неравномерно, что в итоге может привести к ситуации, когда приемник не сможет получить достаточно энергии хотя бы в одной из копий для однозначного приема сигнала. Однако данная проблема имеет и пользу. При многолучевом распространении сигнала приемник получает сразу несколько копий сигнала. Сравнив эти копии между собой, можно выявить и даже исправить ошибки, возникшие при распространении сигнала

Замирания сигнала. Многолучевое распространение сигнала может привести к ситуации, когда две копии сигнала достигают приемника в противофазе. Это происходит, когда одна из копий задерживается на время, кратное периоду сигнала, что в итоге может вызвать их взаимную нейтрализацию. Если обе копии несут значительную энергию, это может привести к увеличению количества ошибок и ухудшению качества связи. Это явление называется «замиранием» сигнала, что подразумевает временное прекращение его поступления от источника к приемнику. Одним из факторов, способствующих затуханию сигнала, является релеевское затухание, которое связано с диффузным отражением радиоволн от реальных объектов. В результате на приемник поступает сумма множества идентичных сигналов, отличающихся по фазе и амплитуде. Этот эффект заметен на уровне радионесущей и проявляется в виде пульсаций сигнала, имеющих период, равный половине длины волны. Для стандарта GSM-900, например, этот период составляет 17 см. Замирания могут быть быстрыми или медленными, в зависимости от их причин и воздействия на связь. Медленные замирания чаще всего связаны с неблагоприятными метеоусловиями, и существуют достаточно эффективные методы их устранения. Быстрые замирания возникают в основном из-за движения приемника или наличия близкорасположенных препятствий. Они являются частотно селективными, что означает, что изменение частоты передачи может значительно снизить или даже устранить этот эффект.

Временные задержки. Задержки сигнала, возникающие в зависимости от среды распространения и частоты, могут оказывать значительное влияние на качество связи. Эти

задержки возникают из-за различий в длине пути, пройденного лучами, что приводит к интерференции символов от двух и более лучей. Если задержка остается постоянной и не превышает определенного предела, она обычно не вызывает серьезных проблем. Для борьбы с небольшими задержками, которые могут составлять несколько сотен микросекунд или миллисекунд, в структуру сигнала часто вводят защитные интервалы. Однако, если задержка вызвана переотражением или неоднородностью среды, она может варьироваться и даже выходить за пределы защитного интервала. Это, в свою очередь, может привести к наложению соседних посылок, что негативно скажется на передаче информации. Тем не менее, временные задержки могут иметь и положительное значение. В частности, в сотовой связи длительность задержки сигнала может использоваться для определения расстояния до мобильной станции абонента. Эта информация помогает настраивать мощность излучения передатчика. В стандарте GSM, максимальная дальность связи составляет 35 км, и задержка может достигать 64 единиц, что позволяет определять расстояние до абонента с точностью до 550 метров. Еще одной полезной функцией временных задержек является возможность определения местоположения. Когда мобильная станция получает сигналы от нескольких базовых станций, вычисление местоположения становится задачей геометрии. Чем больше базовых станций участвует в процессе, тем более точным может быть определение местоположения, достигая иногда нескольких десятков метров. При движении источника и приемника сигнала возникает эффект Доплера, проявляющийся в изменении частоты и временных интервалов импульсов. В случае гармонической несущей это также отражается в изменении ее частоты, что добавляет дополнительный уровень сложности в обработку сигнала.

Обычно используется выражение для частоты:

$$f'_0 = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{2 \cdot V_{\text{объекта}}}{C}\right), \quad (5.1)$$

где $V_{\text{объекта}}$ – относительная скорость перемещения приемника и передатчика, C – скорость волны в среде ($3 \cdot 10^8$ м/с), f_0 – значение частоты в условиях покоя.

Оценим f'_0 для GSM-900 при $V_{\text{объекта}} = 150$ км/ч (скорость автомобиля):

$$f'_0 = 900 \text{ МГц} \cdot \left(1 \pm \frac{2 \cdot 150 \text{ км/ч}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}\right) = 900 \text{ МГц} \pm 250 \text{ Гц}$$

Видно, что эффект Доплера в данных условиях не играет заметной роли. Эффект Доплера существенен (смещение десятки/сотни кГц) для абонентов в самолетах и для спутниковых систем.

Способы защиты сигналов в сотовой связи

В системах сотовой связи внедрен целый ряд методов борьбы с нежелательными воздействиями на передаваемый сигнал. Некоторые из них используются во многих системах связи, не только радио-, но и проводных (например, помехоустойчивое кодирование). Но существует целый ряд проблем, для которых были специально разработаны уникальные методы, внедренные впервые именно в сотовой связи.

Наиболее значимые способы защиты для сотовой связи следующие: перемежение, разнесенный прием, перескоки по частоте, адаптивная коррекция, помехоустойчивое кодирование, управление мощностью.

Переमेжеение. Когда передаваемый через эфир радиосигнал подвергается помехам, то многие возникающие ошибки не одиночны по времени, а сгруппированы. Это означает, что длительности воздействующего мешающего сигнала достаточно для возникновения ошибок в нескольких подряд идущих битах. Главная опасность такого вида помех заключается в том, что применяемые способы защиты от помех обычно могут распознать и исправить не более одной ошибки. Групповые ошибки эти виды защиты не определяют, что соответственно может привести к ухудшению качества связи.

Для борьбы с такими ошибками в сотовой связи применяется перемежеение. Суть его заключается в том, что перед передачей в эфир биты переставляются местами. Например, вместо последовательности «1, 2, 3, 4, 5, 6 ...» создается последовательность: «5, 2, 4, 1, 3, 6 ...». Причем одна и та же схема перемежения обычно накладывается как маска и применяется циклически к цифровому потоку. После перемежения полученная последовательность подвергается дальнейшим преобразованиям, как и обычный цифровой сигнал (рис. 5.1).

После приема сигнала последовательность подвергается обратной перестановке, чтобы получить исходный сигнал. В случае, если на сигнал будет воздействовать пачечная помеха, например, на подряд идущие биты 3, 6 и 1, то после восстановления исходного потока эти биты окажутся не рядом стоящими и к ним уже можно будет применить стандартные алгоритмы защиты от ошибок (рис. 5.1).



Рисунок 5.1. Пример перемежения

Очевидно, что чем меньше отрезок сигнала, т. е. чем короче кадр по времени будет подвержен перемежению, тем более коротким групповым ошибкам он может противостоять. Однако, чем более длительный отрезок сигнала будет вовлечен в перемежение, тем больше это потребует производственных возможностей и дополнительных временных затрат, что может привести к задержкам сигнала. Поэтому на практике выбирают золотую середину: берут достаточно длительный кадр для перемежения, чтобы можно было противостоять групповым ошибкам, достаточно часто встречающимся в радиоэфире. На практике часто применяют несколько ступеней такого перемешивания битов. После первичного перемежения берется кадр, включающий в себя несколько первых кадров перемешивания, после чего еще раз проводят процедуру. Подобная двойная схема перестановки позволяет очень хорошо защитить сигнал и избежать практически всех длительных ошибок в канале связи.

Также к положительным эффектам процедуры перемежения можно отнести повышение помехоустойчивости канала связи. Дело в том, что схемы такой процедуры могут меняться со временем. Это усложняет для противника процесс выделения полезного сигнала и требует больших временных и вычислительных ресурсов.

Разнесенный прием. Одними из наиболее серьезных проблем, с которыми сталкиваются при передаче информации через радиоэфир, являются замирания сигнала и затухание. Эти явления могут привести к тому, что на приемной стороне уровень энергии сигнала окажется ниже порога чувствительности приемника, что, в свою очередь, может привести к пропуску или ошибочному приему сигнала. Для борьбы с замираниями и затуханиями существует несколько подходов, одним из которых является использование нескольких копий сигнала на приемной стороне. Эти копии могут быть получены различными способами, такими как повторная передача, что обеспечивает временное разнесение, или передача одного и того же сигнала на разных частотах, что представляет собой частотное разнесение. Однако такие методы требуют значительных дополнительных ресурсов. В сотовой связи применяются более экономичные и эффективные подходы: пространственное и поляризационное разнесение. Пространственное разнесение реализуется путем установки на базовой станции нескольких антенн. Обычно используются две антенны, размещенные с горизонтальным или вертикальным разносом. На практике предпочтение отдается горизонтальному разнесению, поскольку оно требует меньшего расстояния между антеннами. Каждая из антенн подключается к отдельному фидеру, а приемники базовой станции обрабатывают сигналы с обеих антенн. Это существенно снижает вероятность одновременного замирания сигнала на обоих приемниках и способствует увеличению суммарной принятой энергии полезного сигнала. Таким образом, использование пространственного разнесения позволяет значительно улучшить качество связи, минимизируя влияние негативных эффектов затухания и замираний.

Перескоки по частоте. Некоторые из помех распределены в частотном диапазоне и равномерно воздействуют на различные частотные каналы. К таким помехам относится белый шум, мощность которого равномерно распределена во всем спектре. Однако некоторые мешающие воздействия сосредоточены в каком-то узком частотном диапазоне и оказывают воздействие только на некоторые частотные каналы. Такие помехи называются частотно-селективными. Причем они могут быть непрерывными во времени или иметь прерывистый характер, также могут дрейфовать и иметь изменяющуюся мощность. Частотно-селективные помехи опасны тем, что они менее предсказуемы, а их мощность может изменяться в широком диапазоне. Для радиосоединений в сотовой связи это может привести к существенному ухудшению качества или полному разъединению и невозможности установить соединение в течение действия помехи.

Одним из возможных способов борьбы с частотно-селективными помехами может быть увеличение мощности. Однако подобный метод не позволяет бороться с высокими выбросами энергии и не является энергетически эффективным. В сотовой связи большее распространение нашел метод, называемый перескоки по частоте. Суть его заключается в том, что во время радиосоединения частотный канал постоянно меняется в пределах заранее заданного набора, известно обоим сторонам передачи (рис. 5.2).

Смена частотного канала происходит синхронно, поэтому качество соединения не ухудшается. Очевидно, что участвующие в перескоках по частоте каналы не должны быть задействованы на той же или соседних базовых станциях. Также имеет значение количество частотных каналов и их разнос друг относительно друга. Чем большее число каналов и чем дальше они разнесены друг от друга, тем меньше вероятности возникновения частотно-селективных помех на других каналах. Таким образом, в результате включения данной процедуры, если на каком-либо канале возникнут помехи, то их воздействие будет распределено между всеми установленными соединениями.

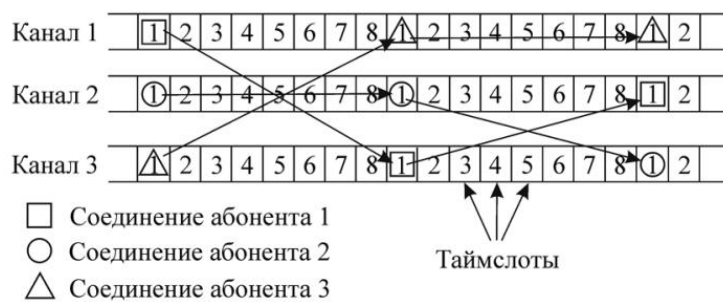


Рисунок 5.2. Пример перескоков по частоте

Применяемые в системах сотовой связи процедуры защиты от ошибок обычно позволяют выявить и исправить только редкие и одиночные ошибки. В результате распределения негативного воздействия общее число ошибок в каждом из соединений уменьшится, а это, в свою очередь, позволит применить алгоритмы защиты от ошибок.

Адаптивная коррекция. Помехи различных типов часто накладываются друг на друга, оказывая суммарное воздействие на полезный сигнал. Это приводит к появлению помех, которые постоянно меняются по мощности, фазе, частоте и ширине спектра. В таких условиях важен механизм, позволяющий компенсировать негативные влияния, поскольку простое регулирование мощности не всегда эффективно. Время, необходимое для измерения и изменения мощности, может привести к тому, что шумовая ситуация уже изменится несколько раз. В сотовой связи для борьбы с быстрыми изменениями шумовой обстановки используется адаптивная коррекция. Суть этой технологии заключается в том, что вместе с полезным сигналом передается тестовая последовательность, заранее известная как отправителю, так и получателю. Во время передачи эта последовательность также подвержена воздействию помех. На приемной стороне она позволяет получить «слепок» канала, отражающий текущую ситуацию. После получения полезного сигнала и тестовой последовательности активируется эквалайзер Витерби (используемый в стандарте GSM). На основе полученной тестовой последовательности эквалайзер вносит коррективы в обработку полезного сигнала. При передаче следующей порции данных также отправляется новая тестовая последовательность, что позволяет эквалайзеру адаптироваться к изменившимся условиям. Несмотря на свою эффективность, этот метод имеет и недостатки. Во-первых, он требует введения избыточной информации в поток данных, а также дополнительных вычислительных мощностей на приемной стороне. Однако современные телекоммуникационные системы и пропускная способность каналов позволяют справляться с этими требованиями без значительного влияния на процесс обмена информацией. Кроме того, адаптивная коррекция оценивает канал связи только во время передачи тестовой последовательности, что может дать лишь приблизительное представление о состоянии канала в остальное время. Тем не менее, как показывает практика, даже выборочные замеры обеспечивают достаточно полное представление о состоянии канала. Поэтому этот метод активно используется не только в стандарте GSM, но и в последующих стандартах сотовой связи.

Помехоустойчивое кодирование. Защиту от ошибок в системах сотовой связи можно разделить на три основных стадии: предупреждение, обнаружение ошибок и исправление. Перемежение, адаптивная коррекция, разнесенный прием в первую очередь используются для предупреждения появления ошибок. Эти методы в совокупности позволяют достаточно эффективно противостоять помехам, затуханию сигнала и другим негативным факторам. Однако избежать появления ошибок в 100% случаев на практике невозможно.

Для обнаружения и исправления ошибок в сотовых системах связи применяется помехоустойчивое кодирование. Суть его заключается в том, что в передаваемый цифровой поток вносится некоторая избыточность. Обычно помехоустойчивое кодирование разделено на две части: обнаружение и исправление ошибок. Для обнаружения ошибок обычно применяется процедура CRC (Cyclic Redundancy Check). Она реализуется путем вычисления контрольной суммы блока информации и передачи ее вместе с полезной информацией. Причем в зависимости от степени важности и скорости передачи информации контрольная сумма может содержать больше или меньше бит. Чем выше важность информации и скорость передачи данных, тем больше контрольных бит нужно передавать. Кроме CRC в различных стандартах может применяться и другой вид кодирования.

Для исправления ошибок применяются другие коды: сверточные, блочные и т. п. Их задача состоит в том, чтобы добавить к передаваемой информации дополнительные биты, которые помогут восстановить исходный сигнал или его часть в случае возникновения ошибки. В зависимости от стандарта (GSM, UMTS и т. п.) разная по важности информация сопровождается различным объемом дополнительных данных. При этом возможно увеличение объема передаваемых данных в два или даже в три раза.

Помехоустойчивое кодирование – это крайний способ защиты от помех. Если он не поможет справиться с ошибками, то искаженные данные будут переданы пользователю. Поэтому на него накладываются высокие требования по надежности. Однако конкретная реализация зависит от используемого стандарта сотовой связи. В зависимости от поколения, технологий передачи данных и используемых средств может вводиться большая избыточность или могут появиться дополнительные коды, но, в любом случае, главная цель остается неизменной.

Управление мощностью. Наиболее очевидный способ противодействия затуханию сигнала – это увеличение мощности передаваемого сигнала. Однако данный процесс не такой простой, как может показаться на первый взгляд.

Главная сложность заключается в том, что в одной и той же системе работают сразу несколько источников и приемников сигнала, которые близко расположены друг к другу. Для систем UMTS это особенно важно, т. к. необдуманное увеличение мощности одного из передатчиков может привести к снижению качества и обрыву соединений других абонентов и невозможности доступа новых. Кроме того, как МС, так и БС имеют ограниченные энергетические ресурсы. Поэтому лишняя излучаемая мощность может привести к быстрому разряду аккумулятора для МС и высоким затратам на электроэнергию для БС.

Также нельзя забывать о том, что микроволновое воздействие может оказывать нежелательное воздействие на организм человека. В разных стандартах сотовой связи процесс управления мощностью решался по-разному. В системе GSM был реализован принцип обычной обратной связи. Контроллер базовых станций определяет качество соединения по данным, полученным от МС и БС, которые в свою очередь определяются на основе анализа сигнала от противоположного элемента. После оценки уровня ошибок контроллер отдает команду на снижение или увеличение для МС или БС. Также во внимание принимается удаленность МС от БС. Определение расстояния до абонента возможно по задержке сигнала, т. е. смещению его относительно начала кадра, предназначенного для его передачи.

В стандарте UMTS реализованы сразу три механизма управления мощностью и называются они «петлями». Решение об изменении мощности и команды инициируют сразу три элемента сети: МС, БС и контроллер радиосети. Три петли управления мощностью обеспечивают эффективную борьбу с быстрыми и медленными замираниями, уменьшают воздействия помех и компенсируют затухания сигнала. Также в UMTS управление мощностью решает еще одну важную задачу – борьбу с интерференцией. Дело в том, что абоненты в

данной системе работают в одном частотном диапазоне в одной и той же местности. Разделение каналов связи осуществляется на основе принципа WCDMA, т. е. кодового разделения каналов. Из-за неидеальной ортогональности кодов различные соединения могут оказывать воздействие друг на друга, т. е. будет возникать интерференция. Чем больше будет абонентов в зоне действия одной соты, тем выше будет уровень интерференции. Соответственно, будет снижено качество соединений, скорость передачи данных и максимально возможное число абонентов. Наиболее эффективным способом борьбы с интерференцией является снижение уровня мощности. Поэтому для систем сотовой связи стандарта UMTS управление мощностью – это неотъемлемый аспект нормального функционирования системы, и его важность проявляется даже больше, чем в каких-либо других стандартах.

Процесс управления мощностью в системах сотовой связи – это один из наиболее важных и ответственных процессов, от которого зависят качество соединения, количество одновременно обслуживаемых абонентов, степень воздействия на организм и даже стоимость услуг.

Контрольные вопросы

1. Что такое затухание сигнала, и какие факторы влияют на его величину?
2. Как теневые зоны влияют на качество радиосигнала? Приведите примеры препятствий, создающих такие зоны.
3. Опишите эффект многолучевого распространения сигналов и его влияние на прием радиосигнала.
4. Что такое замирание сигнала и какие причины его возникновения? Как оно влияет на качество связи?
5. Как временные задержки могут как негативно, так и позитивно сказаться на передаче данных?
6. Перечислите и кратко объясните методы защиты от негативных воздействий на радиосигналы, используемые в сотовой связи.
7. Что такое перемежение и как оно помогает в борьбе с групповыми ошибками?
8. Как работает метод разнесенного приема, и как он помогает повысить качество сигнала?
9. Объясните принцип перескоков по частоте и его роль в защите от помех.
10. Как осуществляется управление мощностью в системах сотовой связи, и почему это важно?