

## Лекция 10. Сотовые системы стандарта CDMA

**Цель лекции** – изучить основные принципы работы сотовых систем стандарта CDMA, её преимущества по сравнению с традиционными системами, а также стандарты и технические требования, обеспечивающие высокое качество связи и эффективное использование радиочастотного спектра.

### Введение

Сотовые системы стандарта CDMA (Code Division Multiple Access) представляют собой одно из наиболее значимых достижений в области мобильной связи. Разработанные компанией Qualcomm, эти системы обеспечивают более эффективное использование радиочастотного спектра и повышают абонентскую емкость по сравнению с традиционными системами, основанными на частотно-временном доступе (TDMA).

В отличие от других методов доступа, CDMA использует кодовое разделение каналов, что позволяет нескольким абонентам одновременно использовать одну и ту же частоту, но с различными кодами. Это обеспечивает не только улучшенное качество связи, но и повышает устойчивость к помехам и улучшает безопасность передачи данных.

Система CDMA включает в себя несколько стандартов, таких как IS-95, IS-96 и другие, которые определяют эфирный интерфейс, интерфейсы мобильных и базовых станций, а также механизмы передачи данных. В этой лекции мы рассмотрим ключевые аспекты работы CDMA, включая принципы модуляции, регулировку мощности и обработку сигналов, что позволит глубже понять преимущества этой технологии в современном мире мобильной связи.

### Принципы CDMA

Компанией Qualcomm (США) была разработана СМС общего пользования с кодовым разделением каналов. Основными стимулами явились увеличение абонентской емкости по сравнению с действующими СМС, основанными на традиционном частотно-временном доступе, улучшение качества обслуживания и повышение информационной безопасности.

Технические требования к системе CDMA (стандарт получил название cdmaOne) сформированы в ряде стандартов TIA: IS-95 – эфирный интерфейс (радиоинтерфейс); IS-96 – интерфейс речевых служб; IS-97 – интерфейс мобильной станции; IS-98 – интерфейс базовой станции; IS-99 – интерфейс службы передачи данных.

IS-95 рассчитана на работу в диапазоне частот 800 МГц, причем для прямого канала (линия «вниз») выделен участок спектра 869,04–893,97 МГц, а для обратного (линия «вверх») – 824,04– 848,96 МГц. Ширина полосы канала связи составляет 1,25 МГц, поэтому при развертывании IS-95 операторы могут осуществлять частотное планирование, исходя из указанных полос.

Технология организации множественного доступа с кодовым разделением каналов основана на применении сложных сигналов, полоса которых значительно превышает ширину спектра информационного сообщения. В широкополосной системе исходный модулирующий сигнал с полосой всего несколько килогерц распределяют в полосе частот, ширина которой может быть несколько мегагерц. Это осуществляется путем двойной модуляции, несущей передаваемым информационным сигналом и широкополосным кодирующим сигналом. Основной характеристикой широкополосного сигнала является его база  $B$ , определяемая как произведение ширины спектра сигнала  $F$  на его период  $T$ . В результате перемножения сигнала

источника псевдослучайного шума с информационным сигналом энергия последнего распределяется в широкой полосе частот, т. е. его спектр расширяется.

Информация может быть введена в широкополосный сигнал (ШПС) несколькими способами. Наиболее известный способ заключается в наложении информации на широкополосную модулирующую кодовую последовательность перед модуляцией, несущей для получения ШПС.

Сущность широкополосной связи состоит в расширении полосы частот сигнала, передаче ШПС и выделении из него полезного сигнала путем преобразования спектра, принятого ШПС в первоначальный спектр информационного сигнала. Перемножение принятого сигнала и сигнала такого же источника псевдослучайного шума (ПСП), который использовался в передатчике, сжимает спектр полезного сигнала и одновременно расширяет спектр фонового шума и других источников интерференционных помех. Результирующий выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе приемника есть функция отношения ширины полос широкополосного и базового сигналов: чем больше расширение спектра, тем больше выигрыш. Во временной области – это функция отношения скорости передачи цифрового потока в радиоканале к скорости передачи базового информационного сигнала. Для стандарта IS-95 отношение составляет 128 раз, или 21 дБ. Это позволяет системе работать при уровне интерференционных помех, превышающих уровень полезного сигнала на 18 дБ, так как обработка сигнала на выходе приемника требует превышения уровня сигнала над уровнем помех всего на 3 дБ. В реальных условиях уровень помех значительно меньше. Кроме того, расширение спектра сигнала (до 1,23 МГц) можно рассматривать как применение методов частотного разнесения приема.

В системе IS-95 реализовано прямое расширение спектра с использованием функций Уолша длины 64 (порядков от 0 до 63) и двух типов псевдослучайных последовательностей (ПСП): короткой и длинной. Все они являются общими для базовых и мобильных станций, однако реализуют разные функции (табл. 1).

Расширение спектра обеспечивается за счет модуляции сигнала ПСП с частотой следования дискретов 1,23 МГц. Более точно эта частота составляет 1,2288 МГц, причем  $1228,8 = 9,6 \cdot 128$ , так что при частоте информационной битовой последовательности 9,6 кбит/с длительности одного бита соответствует 128 дискретов псевдослучайной модулирующей последовательности. Полоса сигнала с расширенным спектром по уровню 3 дБ составляет 1,23 МГц, причем при помощи цифрового фильтра формируется спектр, близкий к прямоугольному.

Число абонентов в системе CDMA зависит от уровня взаимных помех. Согласованные фильтры БС весьма чувствительны к эффекту «ближний – дальний», когда МС, расположенная вблизи базовой, работает на большой мощности, создавая недопустимо высокий уровень помех при приеме других, «дальних» сигналов, что приводит к снижению пропускной способности системы в целом. Эта проблема существует у всех ССС, однако наибольшие искажения сигнала возникают именно в CDMA-системах, работающих в общей полосе частот, в которых используются ортогональные шумоподобные сигналы. Если бы в этих системах отсутствовала регулировка мощности, то они существенно уступали бы по характеристикам сотовым сетям на базе TDMA. Поэтому ключевой проблемой в CDMA-системах можно считать индивидуальное управление мощностью каждой станции. Эффективная работа системы с кодовым доступом возможна лишь при условии выравнивания сигнала от различных абонентов на входе БС. Причем чем выше точность выравнивания, тем больше зона покрытия системы. Прямой канал менее подвержен искажениям сигнала, поскольку на БС всегда существует запас по мощности; поэтому основные проблемы возникают при регулировке мощности в обратном канале – от абонента к БС.

Таблица 1. Параметры кодовых последовательностей в стандарте IS-95

Тип сигнала	Длина кода	Выполняемые функции	
		БС	МС
Кол Уолша	64	Кодовое уплотнение или разделение 64 каналов CDMA	Помехоустойчивое кодирование
Короткий код	32 768	Разделение сигналов БС по величине циклического сдвига	Код с одинаковым фиксированным циклическим сдвигом как опорный сигнал скремблера
Длинный код	$2^{42} - 1$	Прореженный длинный код как опорная последовательность скремблера	Длинный код с разными циклическими сдвигами как адресная последовательность

В стандарте IS-95 регулировка мощности МС осуществляется в динамическом диапазоне 84 дБ с шагом 1 дБ, т. е. с точностью  $\pm 0,5$  дБ. Интервал между соседними измерениями равен 1,25 мс. Биты управления мощностью передаются по каналу трафика со скоростью 800 бит/с. Раздельная обработка многолучевых сигналов с последующим их сложением обеспечивает требуемое отношение сигнал/шум в 6–7 дБ.

Применение нескольких параллельно работающих каналов при раздельной обработке лучей позволяет осуществить «мягкий» режим переключения МС при переходе абонента из одной соты в другую. Абонентская емкость ячейки системы CDMA оптимизируется использованием алгоритма регулировки, который ограничивает мощность, излучаемую каждой МС, до необходимого уровня для получения приемлемой вероятности ошибки.

Процесс регулирования мощности передающих устройств в обратном канале (от абонента к БС) заключается в следующем. Каждая МС непрерывно передает информацию об уровне ошибок в принимаемом сигнале. На основании этой информации БС распределяет излучаемую мощность между абонентами таким образом, чтобы в каждом случае обеспечить приемлемое качество речи. Абоненты, на пути к которым радиосигнал испытывает большее затухание, получают возможность излучать сигнал большей мощности. Основная цель регулировки мощности в обратном канале – оптимизация площади соты.

Регулирование мощности как в прямом, так и в обратном канале, влияет на срок службы аккумуляторов МС. Средняя излучаемая мощность МС в CDMA меньше, чем в системах, использующих другие методы доступа. Это непосредственно связано с такими параметрами радиотелефона, как длительность непрерывного занятия канала и время нахождения в режиме ожидания.

Требуемое качество передачи данных в системе достигается с помощью довольно мощного канального кодирования, выполняемого в несколько этапов (рис. 35). На первом, предварительном этапе цифровой речевой сигнал с выхода вокодера, структурированный в кадры длительностью в 20 мс, кодируется блоковым циклическим кодом для формирования индикатора качества кадра и дополняется «хвостом», необходимым для последующего сверточного кодирования. Введение подобной избыточности увеличивает фактические скорости данных, заменяя первоначальный их набор на 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с.

Следующим этапом является сверточное кодирование. В прямом канале используется код с длиной кодового ограничения 9 и скоростью 12, тогда как код в обратном канале, обладающим меньшей помехоустойчивостью, имеет вдвое большую избыточность, т. е. скорость 1/3 при той же длине кодового ограничения. Наконец, на третьем этапе выполняется

перемежение информационного потока в кадре для нейтрализации эффекта пакетирования ошибок.

Помимо перемежения, для борьбы с быстрыми замираниями в системе использовано и многолучевое разнесение, т. е. приемники на основе алгоритма RAKE. Для этого на БС используется минимум четыре, а на МС – три параллельно работающих коррелятора. Помимо этих корреляторов, настраиваемых на определенную задержку, в каждом приемнике имеется еще и сканирующий по задержке канал, позволяющий осуществлять настройку RAKEканалов на сигналы с наибольшей интенсивностью. Наличие нескольких параллельных каналов корреляционной обработки позволяет осуществить мягкую эстафетную передачу при переходе МС из одной соты в другую.

Состав оборудования сетей стандарта CDMA во многом схож с составом оборудования сетей стандарта GSM и включает в себя МС и БС, цифровые коммутаторы, центр управления и обслуживания, различные дополнительные системы и устройства; функциональное сопряжение элементов системы осуществляется с помощью ряда интерфейсов. Конфигурация сотовой сети стандарта CDMA представлена на рис. 1.

Основное отличие от сетей GSM заключается в том, что в состав сети CDMA стандарта IS-95 включены устройства оценки качества и выбора блоков (SU – Selector Unit). Кроме того, для реализации процедуры мягкого переключения между базовыми станциями, управляемыми разными BSC, вводятся линии передачи между SU и BSC. В центре коммутации мобильной связи (MSC) устанавливается преобразователь-транскодер TCE, который преобразует выборки речевого сигнала из одного цифрового формата в другой.

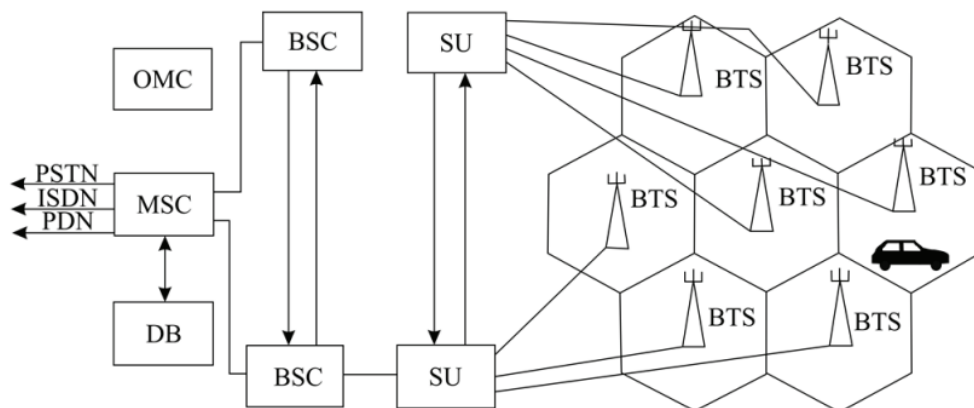


Рис. 1. Конфигурация сети стандарта CDMA: МС – мобильная станция; БС – базовая станция; SU – устройство выбора кадра; MSC – центр коммутации мобильной связи; DB – база данных; BSC – контроллер базовой станции; OMC – центр управления и обслуживания; PSTN – телефонная сеть общего пользования; ISDN – цифровая сеть с интеграцией служб; PDN – сеть пакетной коммутации

В стандарте CDMA (IS-95, IS-96) все каналы передачи сигналов от БС называются прямыми, а от МС – обратными. Именно этот признак был положен разработчиками стандарта в основу структуры каналов. В прямом канале модуляция сигнала функциями Уолша (бинарная фазовая манипуляция) используется для различения разных физических каналов данной БС; модуляция длинной ПСП (бинарная фазовая манипуляция) – с целью шифрования сообщений; модуляция короткой ПСП (квадратурная фазовая манипуляция двумя ПСП одинакового периода) – для расширения полосы и различения сигналов разных БС. В обратном канале (рис. 36) модуляция сигнала короткой ПСП используется только для расширения

спектра, причем все подвижные станции используют одну и ту же пару последовательностей с одинаковым (нулевым) смещением. Модуляция сигнала длинной ПСП кроме шифрования сообщений несет информацию о МС в виде ее закодированного индивидуального номера и обеспечивает различение сигналов от разных МС одной ячейки за счет индивидуального для каждой станции сдвига последовательности.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое CDMA и каковы его основные преимущества по сравнению с TDMA?
2. Какой стандарт был разработан компанией Qualcomm для систем CDMA, и какие основные документы его описывают?
3. В чем заключается принцип работы кодового разделения каналов в системе CDMA?
4. Как происходит модуляция сигналов в прямом и обратном каналах CDMA?
5. Что такое регулировка мощности в системах CDMA, и почему она важна для качества связи?
6. Как влияет ширина канала в системе IS-95 на количество абонентов и качество связи?
7. Опишите роль псевдослучайных последовательностей (ПСП) в системах CDMA.
8. Какие этапы включает процесс канального кодирования в системе CDMA?
9. Как обеспечивается мягкое переключение абонента между базовыми станциями в системе CDMA?
10. Каково значение алгоритма RAKE в контексте обработки многолучевых сигналов?