



# Раздел 3 Технологии физического уровня

## **Тема 3-14 Технология широкополосного сигнала.**

# Беспроводная связь

## Технология широкополосного сигнала.

Список ключевых слов: техника расширенного спектра, ортогональное частотное мультиплексирование, расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты, начальное число, последовательность псевдослучайной перестройки частоты, медленное расширение спектра, быстрое расширение спектра, прямое последовательное расширение спектра, расширяющая последовательность, чип, чиповая скорость, коэффициент расширения, множественный доступ с кодовым разделением, пилотный сигнал

## Беспроводная связь.

### Технология широкополосного сигнала.

В наше время беспроводные технологии все глубже внедряются в нашу повседневную жизнь. Это прежде всего мобильные телефоны, смартфоны. Но помимо телефонной связи активно используются мобильный Интернет, удаленный доступ к локальной сети и ресурсам различных фирм и компаний через беспроводной доступ.

*Потребность в скоростной передаче информации является преобладающей, поэтому все современные системы беспроводной передачи информации работают в высокочастотных диапазонах, начиная с  $> 800$  МГц.*

# Беспроводная связь.

## Технология широкополосного сигнала.

Сигнал, встретившись с препятствием, может распространяться в соответствии с тремя механизмами: отражением, дифракцией и рассеиванием.

Отражение сигнала происходит когда сигнал встречается с препятствием, которое частично прозрачно для данной длины волны и в то же время размеры которого намного превышают длину волны.

Дифракция - сигнал как бы огибает непроницаемое для него препятствие (*металлическую пластину, двери, автомобиль и пр.*).

Сигнал рассеивается, распространяясь под различными углами при встрече с препятствием, размеры которого соизмеримы с длиной волны.

# Беспроводная связь.

## Технология широкополосного сигнала.

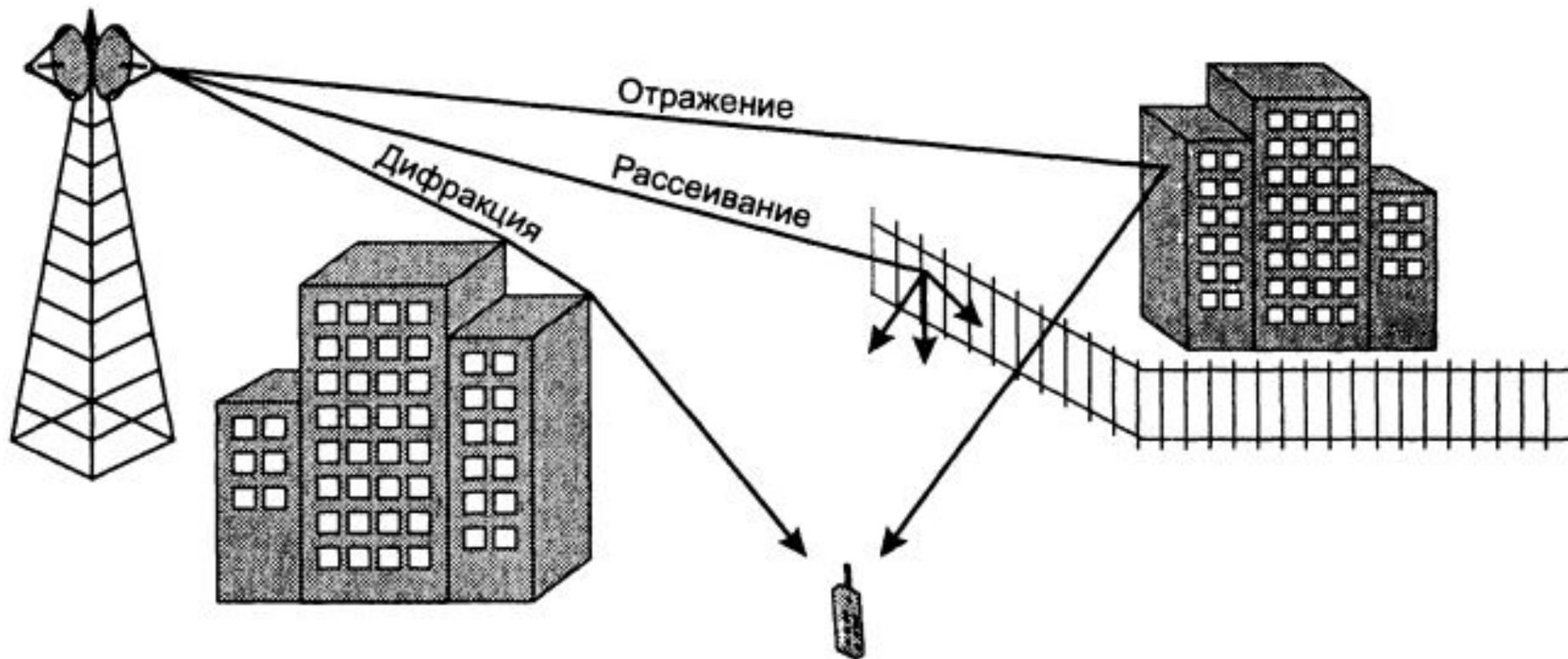


Рис. 3-14.1. Распространение электромагнитной волны

## Беспроводная связь.

### Технология широкополосного сигнала.

В результате подобных явлений приемник получает несколько копий одного и того же сигнала. Такой эффект называется многолучевым распространением сигнала, и крайне отрицательно сказывается на приеме сигнала и приводит к искажению.

*Искажения сигнала из-за многолучевого приема складываются с внешними электромагнитными помехами, которых в городе довольно много.*

Для решения этих проблем была разработана **техника расширенного спектра сигнала.**

## Беспроводная связь.

### Технология широкополосного сигнала.

В результате подобных явлений приемник получает несколько копий одного и того же сигнала. Такой эффект называется многолучевым распространением сигнала, и крайне отрицательно сказывается на приеме сигнала и приводит к искажению.

*Искажения сигнала из-за многолучевого приема складываются с внешними электромагнитными помехами, которых в городе довольно много.*

Для решения этих проблем была разработана **технология широкополосного спектра сигнала.**

# Беспроводная связь.

## Технология широкополосного сигнала.

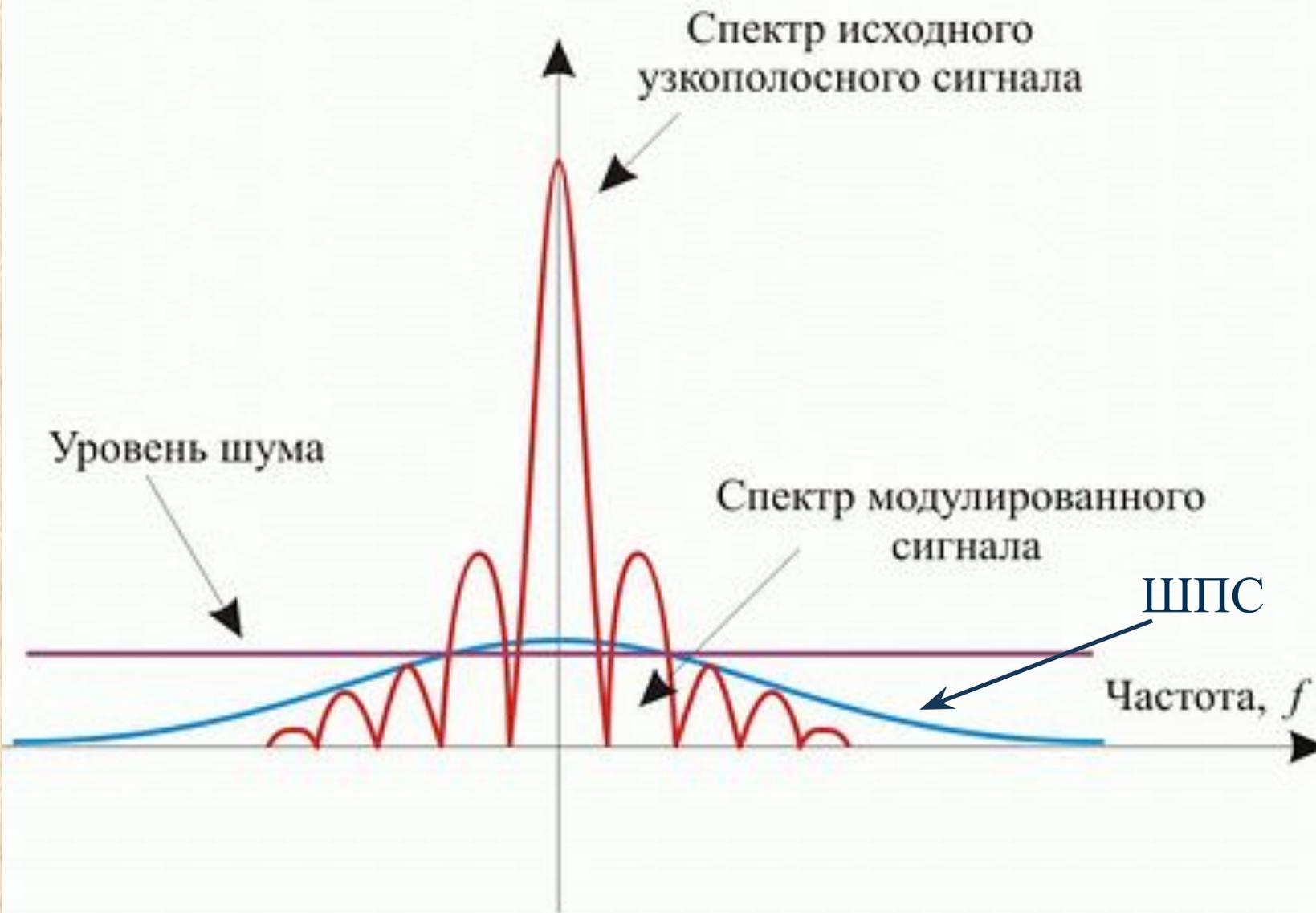


Рис. 3-14.2 Использование  
технологии ШПС

# Технология широкополосного сигнала.

Идея использования широкополосного сигнала (ШПС) состоит в том, что для передачи информации используется значительно более широкая полоса частот, чем это требуется при обычной (в узком частотном канале) передаче. В этом случае при воздействии узкополосной помехи искажается только небольшая часть спектра и приемнику удается информацию восстановить полностью.

Применение ШПС позволяет значительно повысить помехозащищенность, а также как выяснилось снизить уровень передающих устройств, т.е. в данном случае для достижения качественного обмена данными не требуется слишком большие мощности передатчиков.

Так одинаковый эффект дает передача сигнала мощностью 10 Вт с шириной спектра в 1 МГц и сигнала с шириной спектра в 200 МГц, но мощностью всего лишь 200 мВт.

# Технология широкополосного сигнала.

## *Техника расширенного спектра*

Широкая полоса пропускания позволяет также применять модуляцию с несколькими несущими, когда полоса делится на несколько подканалов, каждый из которых использует свою несущую частоту. Соответственно, битовый поток делится на несколько подпотоков, текущих с более низкой скоростью. Затем каждый подпоток модулируется с помощью определенной несущей частоты, которая обычно кратна основной несущей частоте, то есть  $f_0, 2f_0, \dots, 3f_0$  и т. д. Модуляция выполняется с помощью обычных методов FSK или PSK. Такая техника называется ортогональным частотным мультиплексированием (**Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM**)

# Технология широкополосного сигнала.

## *Техника расширенного спектра*

Перед передачей все несущие сворачиваются в общий сигнал путем быстрого преобразования Фурье. Спектр такого сигнала примерно равен спектру сигнала, кодируемого одной несущей. После передачи из общего сигнала путем обратного преобразования Фурье выделяются несущие подканалы, а затем из каждого канала выделяется битовый поток. Выигрыш в разделении исходного высокоскоростного битового потока на несколько низкоскоростных подпотоков проявляется в том, что увеличивается интервал между отдельными символами кода. Это означает, что снижается эффект межсимвольной интерференции, появляющийся из-за многолучевого распространения электромагнитных волн.

*Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.*

Идея метода расширения спектра скачкообразной перестройкой частоты (**Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS**) возникла во время Второй мировой войны, когда радио широко использовалось для секретных переговоров и для управления военными объектами, например торпедами.

## *Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.*

При кодировке по методу частотных скачков (FHSS) вся отведенная для передач полоса частот подразделяется на некоторое количество подканалов. Каждый передатчик в каждый данный момент использует только один из этих подканалов, регулярно перескакивая с одного подканала на другой. Эти скачки происходят синхронно на передатчике и приемнике в заранее зафиксированной псевдослучайной последовательности, известной обоим; ясно, что не зная последовательности переключений, принять передачу также нельзя. Другая пара передатчик-приемник будет использовать и другую последовательность переключений частот, заданную независимо от первой. В одной полосе частот и на одной территории прямой видимости (в одной «ячейке») таких последовательностей может быть много.

## *Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.*

На каждой несущей частоте для передачи дискретной информации применяются стандартные методы модуляции, такие как FSK или PSK. Для того чтобы приемник синхронизировался с передатчиком, для обозначения начала каждого периода передачи в течение некоторого времени передаются синхробиты.

*Несущая частота меняется в соответствии с номерами частотных подканалов, вырабатываемых алгоритмом псевдослучайных чисел. Псевдослучайная последовательность зависит от некоторого параметра, который называют начальным числом. Если приемнику и передатчику известны алгоритм и значение начального числа, то они меняют частоты в одинаковой последовательности, называемой последовательностью псевдослучайной перестройки частоты.*

# Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.

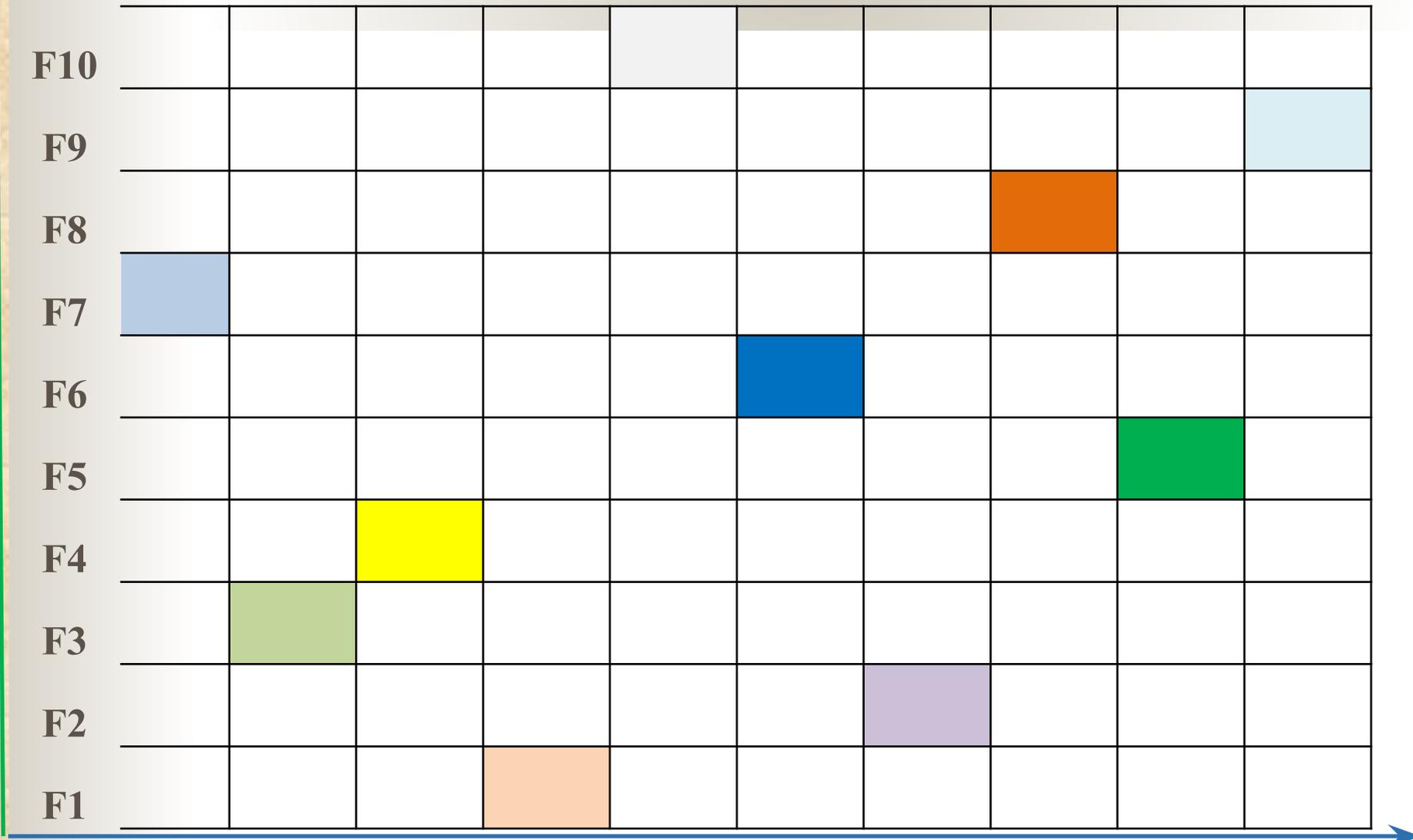


Рис. 3-14.3. Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты

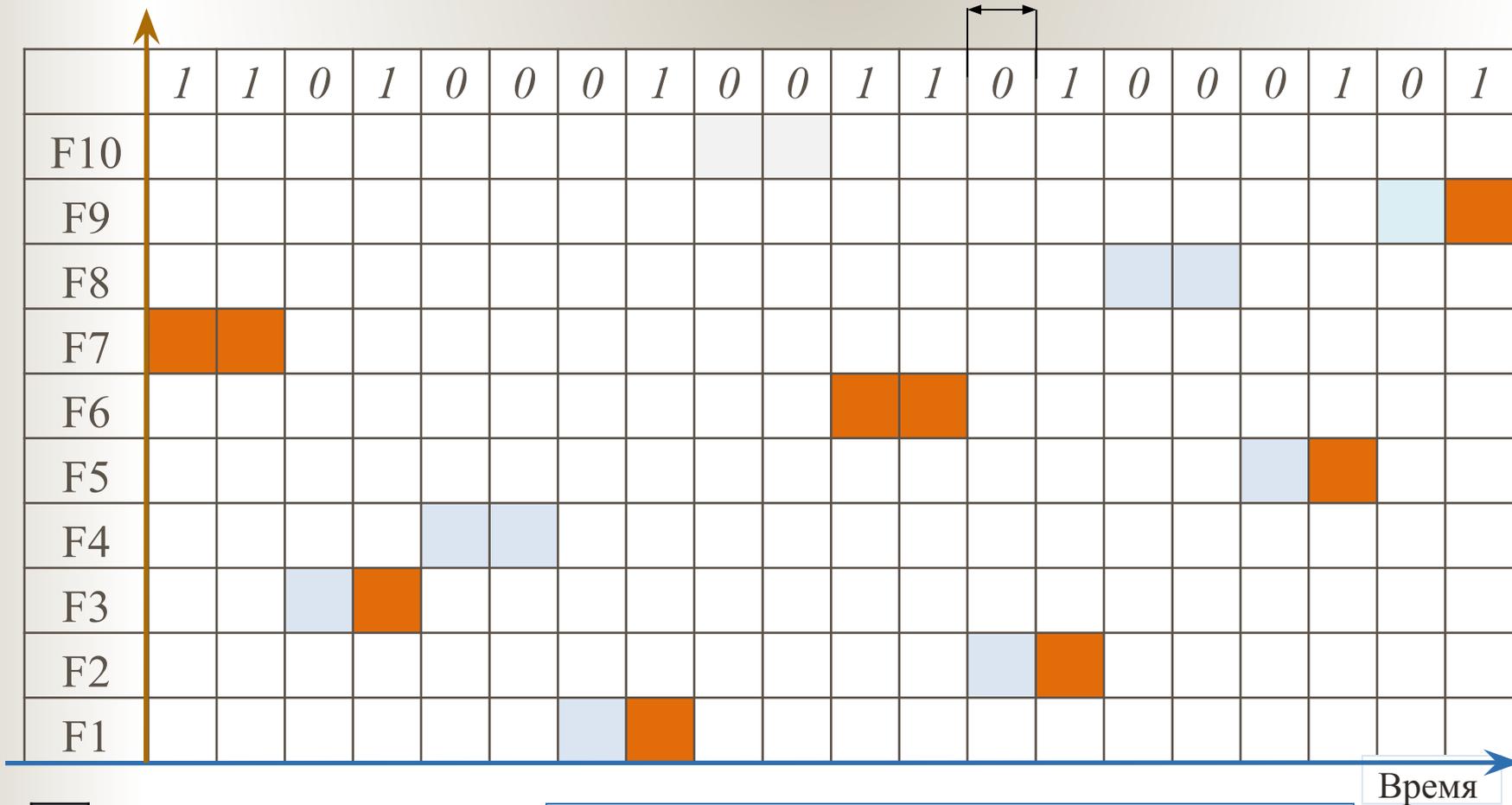
## *Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.*

Если частота смены подканалов ниже, чем скорость передачи данных в канале, то такой режим называют медленным расширением спектра (рис. 3-14.4, а); в противном случае мы имеем дело с быстрым расширением спектра (рис. 3-14.4, б).

*Метод быстрого расширения спектра более устойчив к помехам, поскольку узкополосная помеха, которая подавляет сигнал в определенном подканале, не приводит к потере бита, так как его значение повторяется несколько раз в различных частотных подканалах. В этом режиме не проявляется эффект межсимвольной интерференции, потому что ко времени прихода задержанного вдоль одного из путей сигнала система успевает перейти на другую частоту*

# Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.

Рис. 3-14.3 Соотношение между информационной скоростью и скоростью переключения каналов

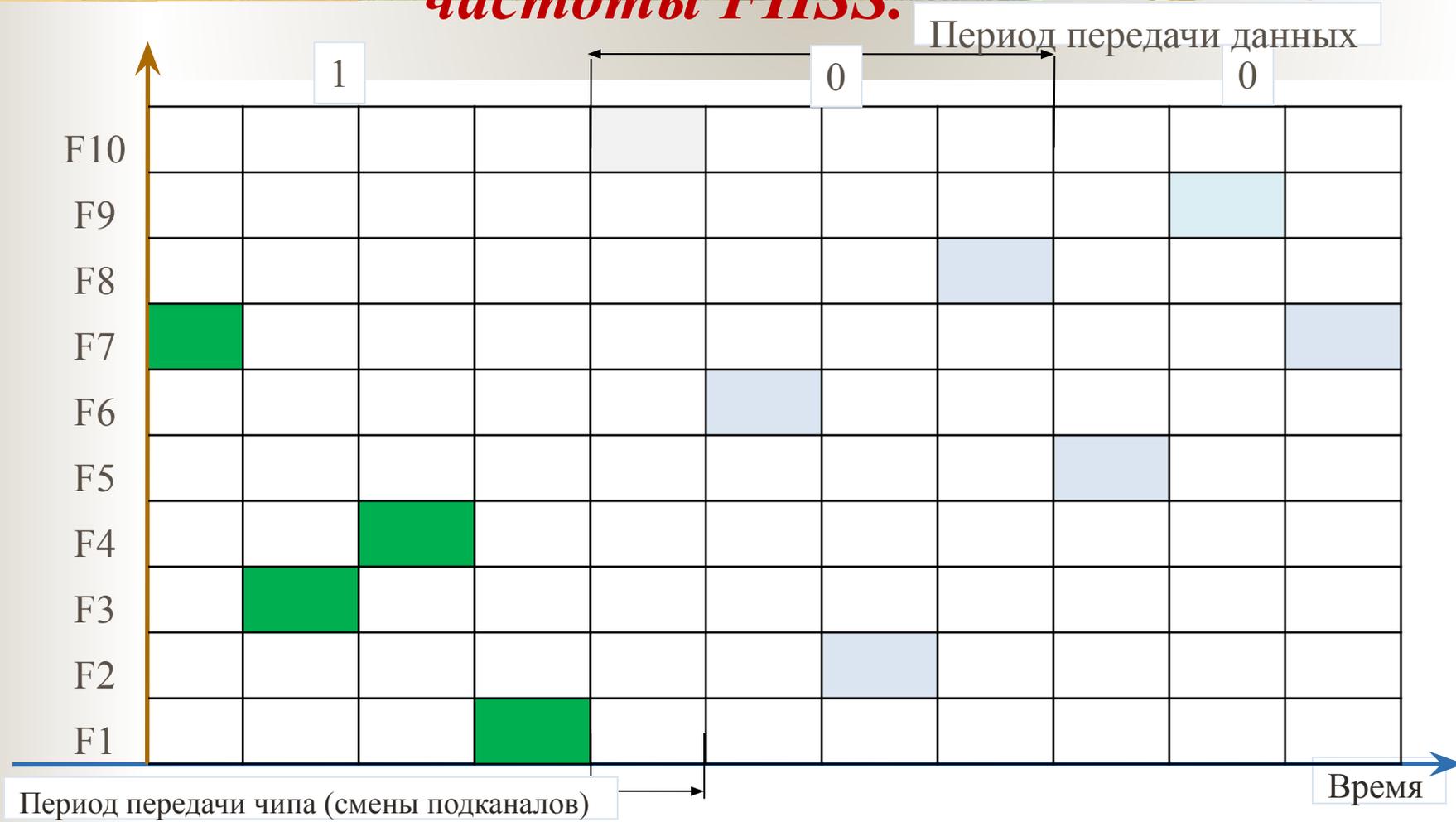


□ Сигнал двоичного нуля  
■ Сигнал двоичной единицы

А) частота смены подканалов ниже, чем скорость передачи данных в канале (скорость передачи данных выше чиповой)

# Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.

Рис. 3-14.3 Соотношение между информационной скоростью и скоростью переключения каналов



Сигнал двоичного нуля  
Сигнал двоичной единицы

**Б)** скорость передачи данных ниже, чем частота смены подканалов выше (ниже чиповой)

## *Расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты FHSS.*

Метод медленного расширения спектра таким свойством не обладает, но зато он проще в реализации и имеет меньшие накладные расходы.

Методы FHSS используются в беспроводных технологиях IEEE.802.11 и Bluetooth.

*Коды расширенного спектра можно использовать также и для мультиплексирования нескольких каналов в широком диапазоне. В частности, методы FHSS позволяют организовать одновременную работу нескольких каналов путем выбора для каждого канала таких псевдослучайных последовательностей, чтобы в каждый момент времени каждый канал работал на своей частоте (конечно, это можно сделать, только если число каналов не превышает числа частотных подканалов). (по стандарту 802.11 таких каналов 79).*

# Прямое последовательное расширение спектра

В методе прямого последовательного расширения спектра (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) также используется весь частотный диапазон, выделенный для одной беспроводной линии связи. В отличие от метода FHSS весь частотный диапазон занимает не за счет постоянных переключений с частоты на частоту, а за счет того, что каждый бит информации заменяется  $N$  битами, так что тактовая скорость передачи сигналов увеличивается в  $N$  раз. А это, в свою очередь, означает, что спектр сигнала также расширяется в  $N$  раз. Достаточно соответствующим образом выбрать скорость передачи данных и значение  $N$ , чтобы спектр сигнала заполнил весь диапазон.

# Прямое последовательное расширение спектра

В методе прямого последовательного расширения спектра (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) также используется весь частотный диапазон, выделенный для одной беспроводной линии связи. В отличие от метода FHSS весь частотный диапазон занимает не за счет постоянных переключений с частоты на частоту, а за счет того, что каждый бит информации заменяется  $N$  битами, так что тактовая скорость передачи сигналов увеличивается в  $N$  раз. А это, в свою очередь, означает, что спектр сигнала также расширяется в  $N$  раз. Достаточно соответствующим образом выбрать скорость передачи данных и значение  $N$ , чтобы спектр сигнала заполнил весь диапазон.

# *Прямое последовательное расширение спектра*

Цель кодирования методом DSSS та же, что методом FHSS — повышение устойчивости к помехам. Узкополосная помеха будет искажать только определенные частоты спектра сигнала, так что приемник с большой степенью вероятности сможет правильно распознать передаваемую информацию.

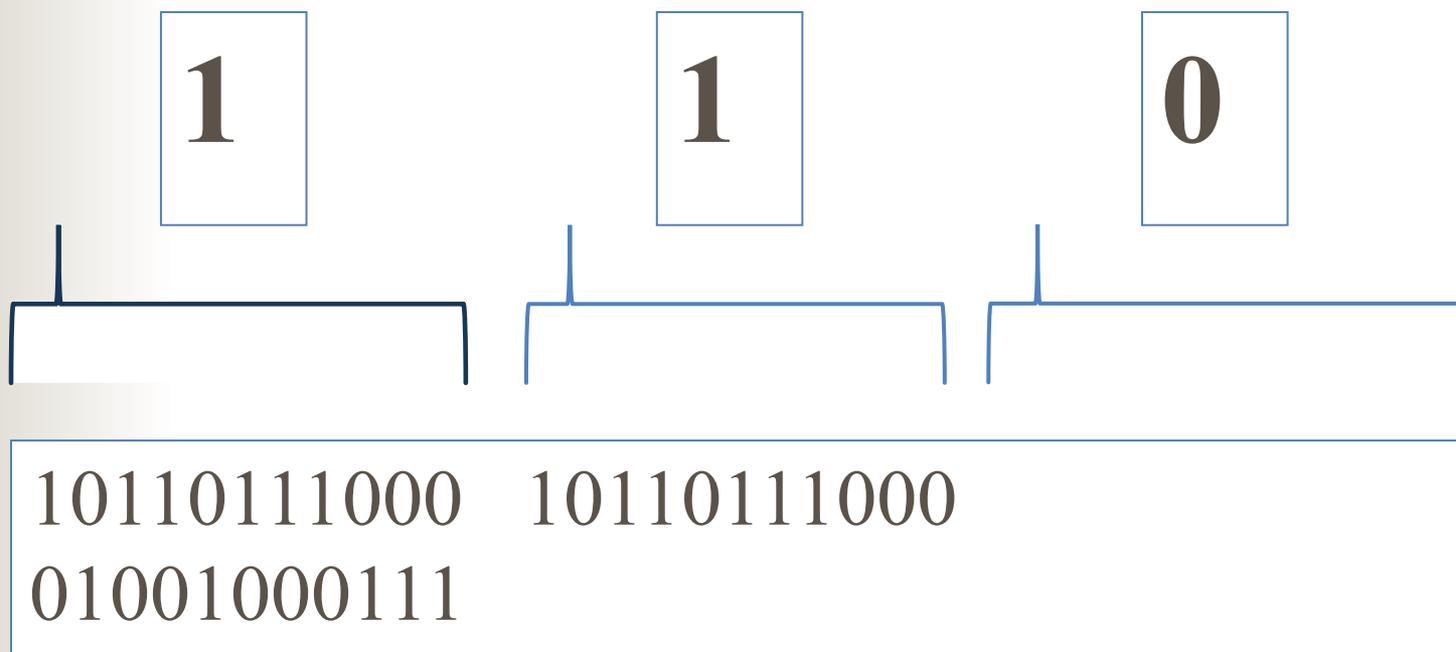
Код, которым заменяется двоичная единица исходной информации, называется расширяющей последовательностью, а каждый бит такой последовательности — чипом. Соответственно, скорость передачи результирующего кода называют чиповой скоростью. Двоичный нуль кодируется инверсным значением расширяющей последовательности. Приемники должны знать расширяющую последовательность, которую использует передатчик, чтобы понять передаваемую информацию.

# *Прямое последовательное расширение спектра*

Количество битов в расширяющей последовательности определяет коэффициент расширения неходкого кода. Как и в случае FHSS, для кодирования битов результирующего кода может использоваться любой вид модуляции, например BFSK. Чем больше коэффициент расширения, тем шире спектр результирующего сигнала и тем больше степень подавления помех. Но при этом растет занимаемый каналом диапазон спектра. Обычно коэффициент расширения имеет значения от 10 до 100.

# Прямое последовательное расширение спектра

Примером значения расширяющей последовательности является последовательность Баркера (Barker), которая состоит из 11 бит: 10110111000. Если передатчик использует эту последовательность, то передача трех битов 110 ведет к передаче следующих битов:



# *Прямое последовательное расширение спектра*

Последовательность Баркера позволяет приемнику быстро синхронизироваться с передатчиком, то есть надежно выявлять начало последовательности. Приемник определяет такое событие, поочередно сравнивая получаемые биты с образцом последовательности. Действительно, если сравнить последовательность Баркера с такой же последовательностью, но сдвинутой на один бит влево или вправо, то мы получим меньше половины совпадений значений битов. Значит, даже при искажении нескольких битов с большой долей вероятности приемник правильно определит начало последовательности, а значит, сможет правильно интерпретировать получаемую информацию.

# *Прямое последовательное расширение спектра*

Метод DSSS в меньшей степени защищен от помех, чем метод быстрого расширения спектра, так как мощная узкополосная помеха влияет на часть спектра, а значит, и на результат распознавания единиц или нулей

# *Множественный доступ с кодовым разделением CDMA*

В CDMA каждый битовый интервал разбивается на  $m$  коротких периодов, называемых элементарными сигналами, или чипами (chip). Обычно в битовом интервале помешаются 64 или 128 элементарных сигналов. В нашем примере мы будем допускать, что битовый интервал содержит только (пример1): 8 элементарных сигналов на бит, и пример-2 4 элементарных сигналов, это надо воспринимать лишь как упрощение.

## Пример-1

Каждой станции соответствует уникальный  $m$ -битный код, называющийся элементарной последовательностью. Чтобы передать 1 бит, станция посылает свою элементарную последовательность. Чтобы передать бит со значением 0, нужно отправить вместо элементарной последовательности ее дополнение (все единицы последовательности меняются на нули, а все нули - на единицы). Никакие другие комбинации передавать не разрешается.

# *Множественный доступ с кодовым разделением CDMA*

Таким образом, если  $m = 8$  и станции присвоена 8-битная элементарная последовательность 00011011, то бит со значением «1» передается кодом 00011011 (что соответствует элементарной последовательности), а бит со значением 0 передается кодом 11100100 (дополнение элементарной последовательности). Оправдать возросшее в  $m$  раз количество информации, которое необходимо передавать (чтобы скорость составила  $b$  бит/с, нужно отправлять  $m \cdot b$  элементарных сигналов в секунду), можно только за счет увеличения в  $m$  раз пропускной способности. Таким образом, CDMA является одной из форм связи с расширенным спектром (предполагается, что никаких изменений в методах модуляции и кодирования не производилось).

# Множественный доступ с кодовым разделением

## CDMA

Если имеется полоса шириной 1 МГц, на которой работают 100 станций, то при частотном уплотнении каждая из них получила бы свои 10 кГц и работала бы со скоростью 10 Кбит/с (предположим, используется 1 бит/Гц). При CDMA все станции используют всю ширину диапазона (1 МГц), так что скорость передачи элементарных сигналов составляет 1 Мчип/с. При кодировании одного бита элементарными последовательностями, число которых менее 100, эффективная пропускная способность CDMA выше, чем FDM, причем проблема размещения каналов решена. Из педагогических соображений удобнее использовать биполярную запись и двоичный 0 обозначать -1, а двоичную 1 обозначать +1. В скобках будем показывать элементарные последовательности. Так, единичный бит для станции А будет выглядеть как (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1). На рис. 14-а мы покажем элементарные последовательности четырех станций. На рис. 14, б изображены они же, но в биполярной нотации.

# Множественный доступ с кодовым разделением CDMA

A: 0 0 0 1 1 0 1 1  
B: 0 0 1 0 1 1 1 0  
C: 0 1 0 1 1 1 0 0  
D: 0 1 0 0 0 0 1 0

а

A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)  
B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)  
C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)  
D: (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

б

Рис. 14-. Двоичные элементарные последовательности для четырех станций (а); биполярные элементарные двоичные последовательности (б);

# Множественный доступ с кодовым разделением CDMA

-- 1 -	C	$S_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 -	$B + \bar{C}$	$S_2 = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)$
1 0 - -	$A + \bar{B}$	$S_3 = ( 0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)$
1 0 1 -	$A + B + C$	$S_4 = (-1 +1 -3 +3 +1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1	$A + B + C + D$	$S_5 = (-4 0 -2 0 +2 0 +2 -2)$
1 1 0 1	$A + B + \bar{C} + D$	$S_6 = (-2 -2 0 -2 0 -2 +4 0)$

в

$$\begin{aligned} S_1 \quad C &= (1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1) / 8 = 1 \\ S_2 \quad C &= (2 +0 +0 +0 +2 +2 +0 +2) / 8 = 1 \\ S_3 \quad C &= (0 +0 +2 +2 +0 -2 +0 -2) / 8 = 0 \\ S_4 \quad C &= (1 +1 +3 +3 +1 -1 +1 -1) / 8 = 1 \\ S_5 \quad C &= (4 +0 +2 +0 +2 +0 -2 +2) / 8 = 1 \\ S_6 \quad C &= (2 -2 +0 -2 +0 -2 -4 +0) / 8 = -1 \end{aligned}$$

г

В) шесть примеров для узла С и восстановление сигнала станции С (г)

# Множественный доступ с кодовым разделением CDMA

Каждая станция имеет собственную уникальную элементарную последовательность. Обозначим символом  $S$  вектор длины  $T$  для станции  $S$ , а символом  $S^*$  - дополнение  $S$ . Все элементарные последовательности попарно ортогональны. Мы имеем в виду, что нормированное скалярное произведение двух различных элементарных последовательностей  $S$  и  $T$  (пишется  $S \cdot T$ ) равно 0. Известно, как генерировать такие последовательности с помощью метода, известного как коды Уолша. Используя математическую запись, можно выразить сказанное ранее таким образом:

$$S \cdot T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$

# *Множественный доступ с кодовым разделением*

Техника такого мультиплексирования называется множественным доступом с кодовым разделением (Code Division Multiple Access, CDMA). Она широко используется в сотовых сетях.

*Техника CDMA может использоваться совместно с кодированием методом FHSS. однако на практике она чаще применяется в беспроводной сети с методом DSSS.*

Идея CDMA заключается и том, что каждый узел сети использует собственное значение расширяющей последовательности. Эти значения выбираются так, чтобы принимающий узел, который знает значение расширяющей последовательности передающего узла, мог выделить данные передающего узла из суммарного сигнала, образующеюся в результате одновременной передачи информации несколькими узлами.

# Множественный доступ с кодовым разделением CDMA

Поясним идею CDMA на примере-2

Пусть в сети работает четыре узла: А, В, С и D. Каждый узел использует такие значения расширяющей последовательности:

A: 0 0 0 0

B: 0 1 0 1

C: 0 0 1 1

D: 0 1 1 0

Предположим также, что при передаче единиц и нулей расширяющей последовательности (то есть уже преобразованного исходного кода) используются сигналы, которые являются аддитивными и инверсными.

# *Множественный доступ с кодовым разделением*

Таким образом, при передаче единицы исходного кода 4 узла перелают в среду такие последовательности:

A: -1 -1 -1 -1

B: -1 +1 -1 +1

C: -1 -1 +1 +1

D: -1 +1 +1 -1

При передаче нуля исходного кода сигналы расширяющей последовательности инвертируются.

# *Множественный доступ с кодовым разделением*

Инверсность означает, что двоичная единица кодируется, например, синусоидой с амплитудой  $+A$ , а двоичный ноль — синусоидой с амплитудой  $-A$ . Из условия аддитивности следует, что если фазы этих амплитуд совпадут, то при одновременной передаче единицы и нуля мы получим нулевой уровень сигнала. Для упрощения записи расширяющей последовательности обозначим синусоиду с положительной амплитудой значением  $+1$ , а синусоиду с отрицательной амплитудой — значением  $-1$ . Для простоты допустим также, что все узлы CDMA-сети синхронизированы.

# *Множественный доступ с кодовым разделением*

Пусть теперь каждый из 4 узлов независимо от других передает в сеть один бит исходной информации: узел А — 1, узел В — 0, узел С — 0, узел D — 1. В среде S сети наблюдается такая последовательность сигналов:

A: -1 -1 -1 -1

B: +1 -1 -1 -1

C: +1 +1 -1 -1

D: -1 +1 +1 -1

В соответствии со свойством аддитивности получаем:

S: 0 0 0 0 -4

## *Множественный доступ с кодовым разделением*

Если, например, некоторый узел Е хочет принимать информацию от узла А, то он должен использовать свой демодулятор CDMA, задав ему в качестве параметра значение расширяющей последовательности узла А.

Демодулятор CDMA работает следующим образом. Он последовательно складывает все четыре суммарных сигнала  $S$ , принятые в течение каждой такта работы.

При этом сигнал  $S$ , принятый в такте, на котором код расширения станции А равен  $+1$ , учитывается в сумме со своим знаком, а сигнал, принятый в такте, на котором код расширения станции А равен  $-1$ , добавляется в сумму с противоположным знаком.

## *Множественный доступ с кодовым разделением*

Другими словами, демодулятор выполняет операцию скалярного умножения вектора принятых сигналов на вектор значения расширяющей последовательности нужной станции:

$$S * A = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -4) * (-1 \ -1 \ -1 \ -1) = 4.$$

Для того чтобы узнать, какой бит послала станция А, осталось нормализовать результат, то есть разделить его на количество станций сети:  $4/4 = 1$ .

Если бы станция хотела принимать информацию от станции В, то ей нужно было бы при демодуляции использовать код расширения станции В  $(-1 \ +1 \ -1 \ +1)$ :

$$S * B = (0 \ 0 \ 0 \ -4) * (-1 \ +1 \ -1 \ +1) = -4.$$

## *Множественный доступ с кодовым разделением*

После нормализации мы получаем сигнал  $-1$ , который соответствует двоичному нулю исходной информации станции В.

Особенность расширяющих последовательностей, используемых в CDMA, состоит в том, что они являются взаимно ортогональными. Это значит, что если их рассматривать как векторы, то при попарном умножении они дают нулевой результат, например, взаимно ортогональными являются векторы координат пространства:  $(1\ 0\ 0)$ ,  $(0\ 1\ 0)$  и  $(0\ 0\ 1)$ . Однако помимо взаимной ортогональности нужно, чтобы такие векторы были ортогональны с инверсиями членов набора векторов (так как инверсии применяются для кодирования нулей исходной информации).

## *Множественный доступ с кодовым разделением*

На практике CDMA является весьма сложной технологией, которая оперирует не условными значениями +1 и -1, а модулированными сигналами, например сигналами BPSK. Кроме того, узлы сети не синхронизированы между собой, а сигналы, которые приходят от удаленных на различные расстояния от приемника узлов, имеют разную мощность. Проблема синхронизации приемника и передатчика решается за счет передачи длинной последовательности определенного кода, называемого пилотным сигналом. Для того же, чтобы мощности всех передатчиков были примерно равны для базовой станции, в CDMA применяются специальные процедуры управления мощностью.