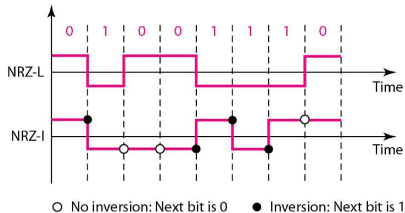


Мультиплексирование

Компьютерные сети и протоколы

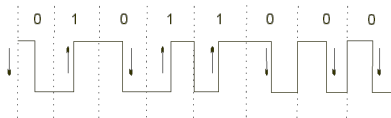
Лекция 4-5

NRZ – Без возвращения к нулю (USB)



4-Bit-Wert Nibble	5-Bit-Wert Symbole	4-Bit-Wert Nibble	5-Bit-Wert Symbole
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Манчестерский код: $Data \otimes Clock$



Скремблирование

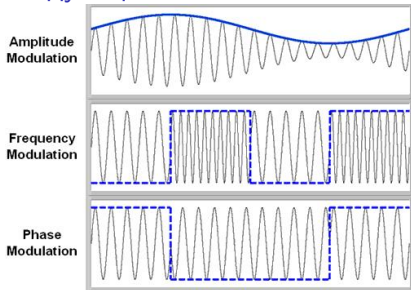
- ▶ Исключающее или $Data \otimes RS$ данных с псевдослучайной последовательностью RS .
- ▶ Последовательность данных предполагается случайной и независимой от скремблирующей последовательности

Симметричные сигналы

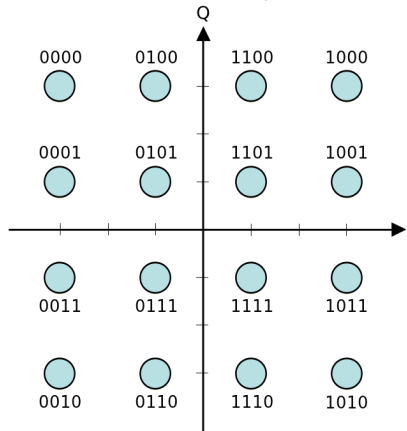
- ▶ Невозможно передавать составляющую постоянного тока (коаксиальный кабель)
- ▶ Нет смысла расходовать лишнюю энергию
- ▶ Использование ± 1 вместо 0, 1 – биполярное кодирование

Передача в полосе пропускания

Модуляция



QAM-16 с кодом Грея



Что такое мультиплексирование?

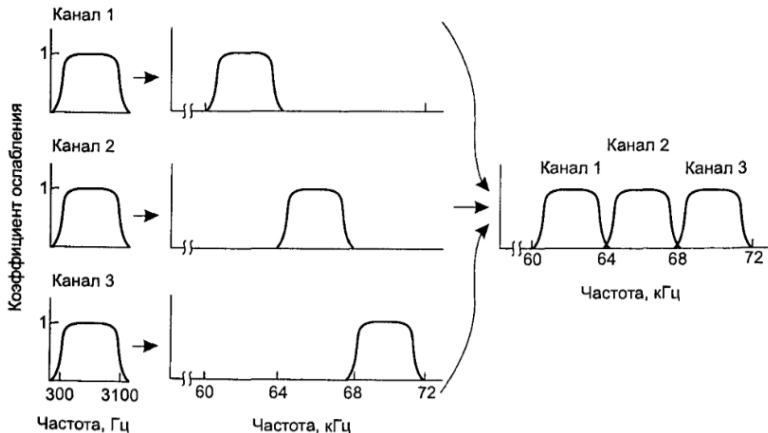
Мультиплексирование – уплотнение канала, передача данных нескольких каналов с меньшей пропускной способностью по одному каналу с большей пропускной способностью.

- ▶ Частотное мультиплексирование (FDM)
- ▶ Ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM)
- ▶ Спектральное мультиплексирование (WDM)
- ▶ Временное мультиплексирование (TDM)
- ▶ Пространственное мультиплексирование (MIMO)
- ▶ Мультиплексирование с кодовым разделением (CDMA)
- ▶ Плезиохронная цифровая иерархия (PDH)
- ▶ Синхронная цифровая иерархия (SDH)

Необходимость использования мультиплексирования

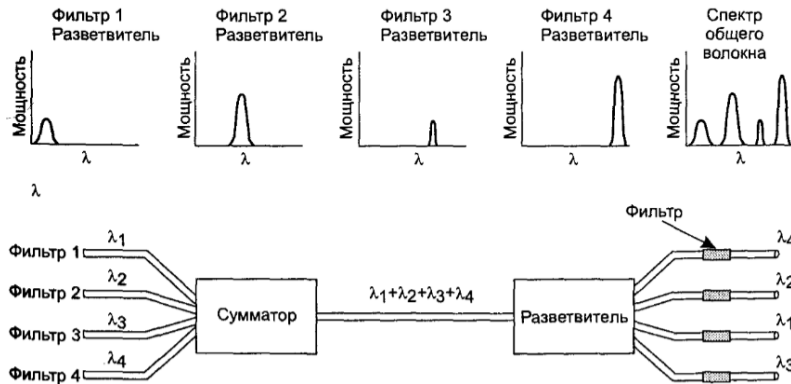
- ▶ Невозможность передачи слишком коротких символов (OFDM)
- ▶ Независимое распространение световых волн по оптоволокну (WDM)
- ▶ Управление множественным доступом к одному общему каналу с высокой пропускной способностью (OFDMA, TDMA)
- ▶ Независимое распространение радиоволн по различным путям (MIMO)

FDM – частотное мультиплексирование (DSL)



Нет идеальных фильтров \Rightarrow всегда нужно оставлять расстояние между соседними частотами

WDM – разделение по длине волны

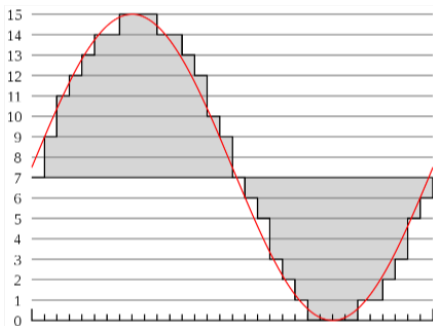


Оцифровка аналоговых сигналов

Преобразование аналогового сигнала в цифровой происходит в несколько этапов:

- ▶ Фильтрация: для голоса – 4КГц.
- ▶ Выборка: для 4КГц, согласно теореме Найквиста, необходимо производить 8000 измерений амплитуды (каждые 125 мкс) в секунду. В результате получается сигнал в виде амплитудно-импульсной модуляции (PAM – Pulse Amplitude Modulation)
- ▶ квантование – сопоставление амплитуды дискретному количеству уровней;
- ▶ кодирование – представление каждого уровня некоторым числом.

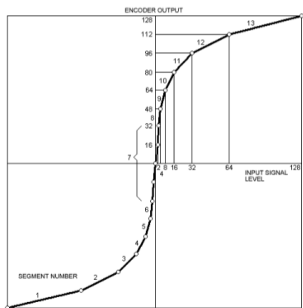
PCM – Pulse Code Modulation



В результате процесса квантования, аналоговые значения амплитуды, измеренные при выборке, округляют до ближайших дискретных уровней. Как правило, для задания значения используют 8 бит, соответственно 256 дискретных значений.

В результате получается сигнал в виде импульсно-кодовой модуляции (PCM – Pulse Code Modulation).

PCM – Pulse Code Modulation



За счёт конечного числа уровней, при дискретизации возникает ошибка дискретизации.

Компандирование – увеличение числа шагов квантования в области малых значений амплитуды входного сигнала.

A-law algorithm:

$$F(x) = \operatorname{sgn}(x) \begin{cases} \frac{A|x|}{1+\log(A)}, & |x| < A \\ \frac{1+\log(A|x|)}{1+\log(A)}, & \frac{1}{A} < x < 1 \end{cases}$$

Основной цифровой канал - ОЦК

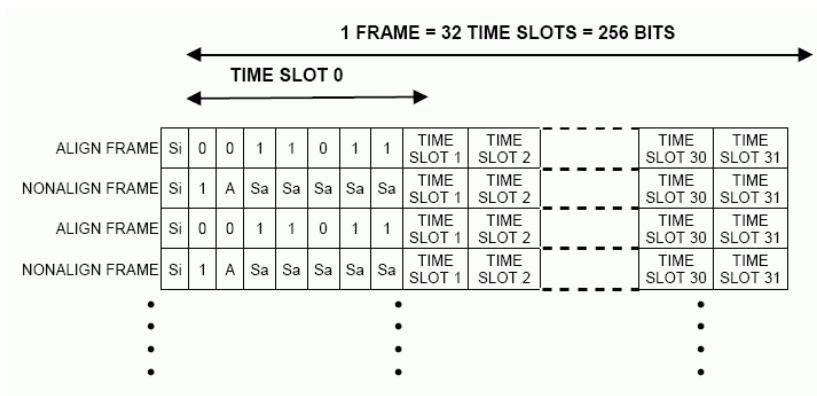
- ▶ Основной цифровой канал (DS0 – Digital Signal 0 или E0) – 64 Кбит/с канал, изначально использовался для передачи оцифрованного голоса, скорость получается из 8000 отсчётов в секунду и 8 бит ИКМ (PCM) на каждый отсчёт.
- ▶ В настоящее время – основной канал мультиплексирования в Плезіохронная цифровой иерархии.

Плезиохронная цифровая иерархия

Плезиохронная цифровая иерархия (PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy) – телекоммуникационная технология предназначенная для передачи голоса и данных в цифровом виде, основанная на временном мультиплексировании ОЦК.

Уровень n	США (Tn)		Европа (En)		Япония (Jn)	
	Каналов ОЦК	Скорость Мбит/с	Каналов ОЦК	Скорость Мбит/с	Каналов ОЦК	Скорость Мбит/с
1	24	1,544	32	2,048	24	1,544
2	96	6,312	128	8,448	96	6,312
3	672	44,736	512	34,368	480	32,064
4	4032	274,176	2048	139,264	1500	97,728

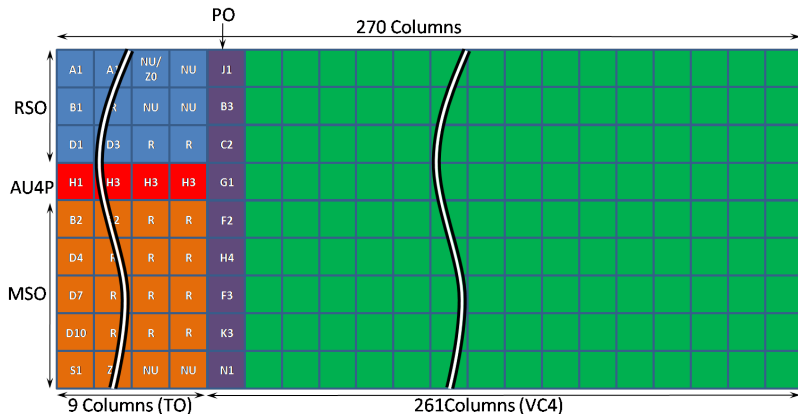
Структура кадра E1



Синхронная цифровая иерархия

Синхронная цифровая иерархия (SDH - Synchronous Digital Hierarchy) – современная телекоммуникационная, использующая согласованную синхронизацию, технология предназначенная для передачи цифровых потоков данных. В основе – временное мультиплексирование синхронных транспортных модулей STM-1. Скорость уровня 1 - 155,52 МБит/с

Структура кадра STM-1



Мультиплексирование в беспроводных сетях

- ▶ OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (IEEE 802.11 DVB, DAB)
- ▶ OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access (IEEE 802.16, LTE)
- ▶ SDMA – Spatial Division Multiple Access (IEEE 802.11n, LTE) based on MIMO
- ▶ CDMA – Code Division Multiple Access (CDMA-2000 3G)

Необходимость мультиплексирования обусловлена сложным поведением канала передачи и необходимостью множественного доступа в сотовых сетях связи

- ▶ Эффективное использование полосы пропускания.
- ▶ Генерация символов со скоростью Найквиста
- ▶ Соседние поднесущие взаимно ортогональны

$$\text{Baseband Signal: } \sum_{i=-N}^N a_i \cdot \sin(2\pi \cdot i \cdot \omega_0),$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}, T - \text{длительность символа}$$

Эффективная реализация стала возможной только благодаря использованию ДПФ

От интеграла Фурье к ДПФ

Интеграл Фурье – спектр непрерывного сигнала:

$$F(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \nu(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi f t} dt$$

Дискретное по времени преобразование Фурье – спектр дискретизованного сигнала:

$$X_D(f) = \Delta t \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t) e^{-j \cdot 2\pi f k \Delta t}$$

$$x(k\Delta t) = \int_{-\frac{f_D}{2}}^{\frac{f_D}{2}} X_D(f) e^{-j \cdot 2\pi f k \Delta t} df$$

Дискретное Преобразование Фурье

ДПФ – спектр периодического дискретизованного сигнала

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{\frac{-2\pi \cdot j}{N} kn}$$

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{\frac{2\pi \cdot j}{N} kn}$$

Доказательство:

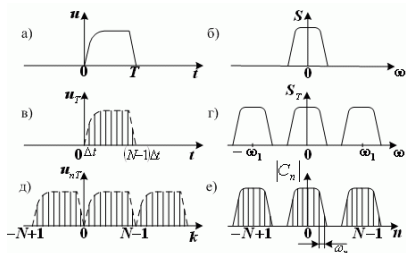
$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{i\omega_k t} - \text{спектр периодического сигнала}$$

$$x(t_n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{j\omega_k t_n} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{\frac{2\pi \cdot j}{N} kn} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{\frac{2\pi \cdot j}{N} kn}$$

$$t_n = \frac{n}{N} T, e^{\frac{2\pi j}{N} (k+mN)n} = e^{\frac{2\pi \cdot j}{N} kn}, X_K = \sum_{l=-\infty}^{\infty} c_{k+lN}$$

Свойства ДПФ

Первая половина отсчётов в частотной области – положительные частоты по возрастанию ($0 \dots \frac{f_D}{2}$). Вторая половина отсчётов – отрицательные частоты по возрастанию ($-\frac{f_D}{2} \dots 0$).



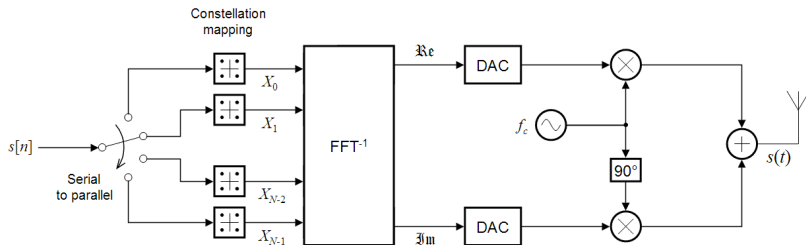
ДПФ в матричном виде

$$\bar{X} = A \cdot \bar{x}$$

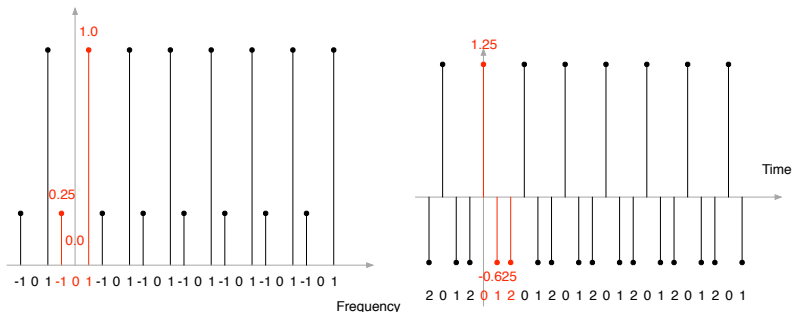
$$A_{mn} = \exp\left(-2\pi j \frac{(m-1)(n-1)}{N}\right)$$

Если N является степенью двойки – то возможно эффективное вычисление ДПФ со сложностью $O(N \log N)$

Передача OFDM сигнала в идеальном канале



Простейший пример OFDM с тремя поднесущими (R) в комплексной области

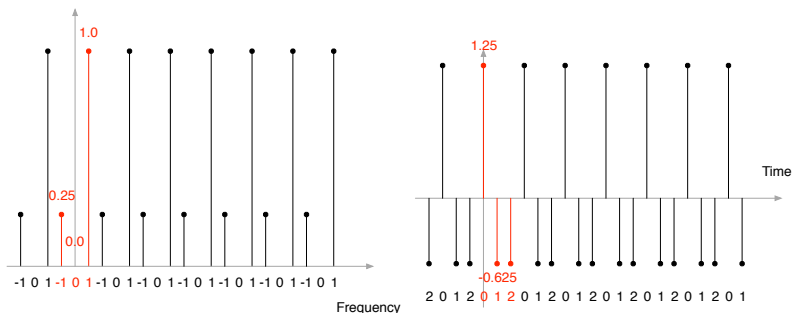


- ▶ Амплитудная модуляция на каждой поднесущей (f_{-1}, f_0, f_1)
- ▶ Пусть на отрицательной частоте передаем 0.25, а на положительной – 1, то есть

$$f(t) = 0.25 \cdot e^{-j\omega t} + 0 + 1.0 \cdot e^{j\omega t}, \omega = \frac{2\pi}{3}, \Delta T = 1$$

0.25 – коэффициент АМ для f_{-1} , 0 – для f_0 , 1 – для f_1

Простейший пример OFDM с тремя поднесущими (R)



Не будем использовать циклический префикс, то есть во временной области имеем 3 отсчёта: 0, 1, 2.

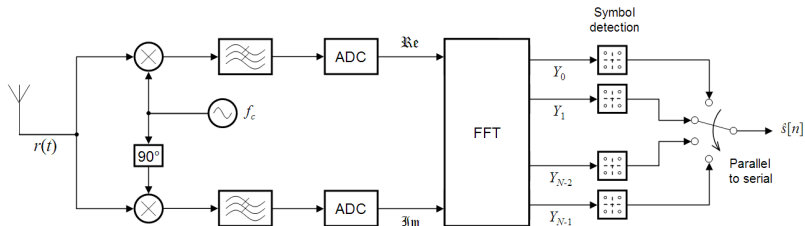
```
> x<-0:2 # 3 поднесущих в частотной области дадут 3 временных отсчёта с номерами 0, 1, 2$
> x
[1] 0 1 2
```

3 отсчёта в частотной области (0, 1, 2 = -1) – это коэффициенты соответствующих ортогональных синусоид:

```
> 0 + 1 * exp (complex (re=0, im=(2*pi/3*x))) + 0.25 * exp (complex (re=0, im=(-2*pi/3*x)))
[1] 1.250+0.0000000i -0.625+0.6495191i -0.625-0.6495191i
> fft (c (0, 1, 0.25), inverse=T) # Получим те же самые коэффициенты с помощью обратного ДПФ
[1] 1.250+0.0000000i -0.625+0.6495191i -0.625-0.6495191i
```

В действительной области $e^{-j\omega t}$ и $e^{j\omega t}$ “неразличимы”

Приём OFDM сигнала в идеальном канале



Циклическая свёртка во временной области ведет к перемножению спектра в частотной:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \Rightarrow Y(f) = H(f) \cdot X(f)$$

При наличии импульсной характеристики канала нужно только умножение в частотной области!

Межсимвольная интерференция?

Многолучевое распространение – межсимвольная интерференция

11

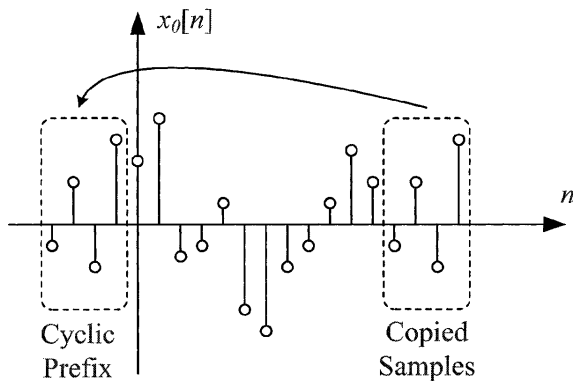


Figure 2.3: The addition of a cyclic prefix.

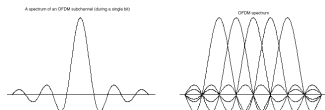
Циклический префикс > импульсной характеристики канала!

Особенности OFDM

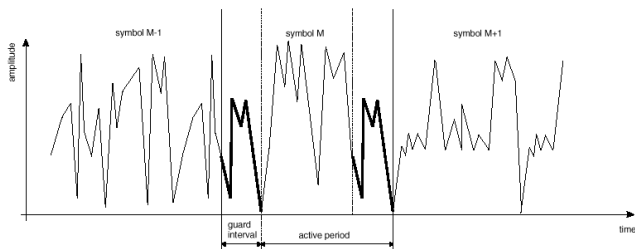
Нужно точно знать импульсную характеристику канала.

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \Rightarrow Y(f) = H(f) \cdot X(f)$$

Необходима точная синхронизация по частоте



Высокий коэффициент линейности принимающего фильтра



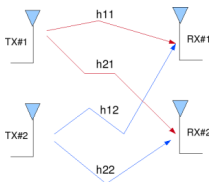
Наличие преамбулы, опорных символов, пилотных поднесущих



Нужно помнить о частоте и времени когерентности канала!

MIMO – Multiple Output Multiple Input

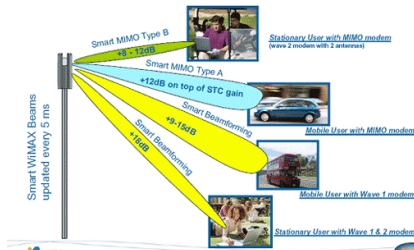
Можно ли “нажиться” на многолучевом распространении?



$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}, \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}$$

- ▶ Выбрать символы для передачи.
- ▶ Подобрать комплексные коэффициенты усиления сигнала, передаваемого с каждой из антенн
- ▶ Выбрать мощность передачи на каждой из антенн

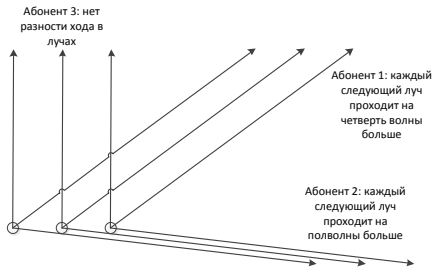
MIMO



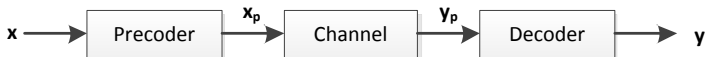
- ▶ Координация интерференции
- ▶ Снижение негативного воздействия многолучевых замираний
- ▶ Пространственное разделение пользователей

Как точно оценивать канал?

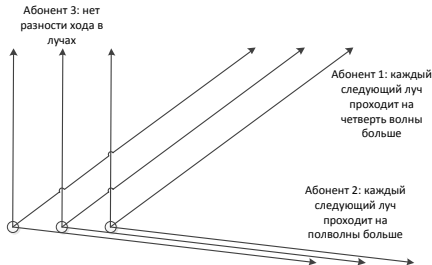
Численный пример: 3×3 MIMO в сотовых сетях



$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & e^{j\frac{\pi}{2}} & e^{j\pi} \\ 1 & e^{j\pi} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{y}_p = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_p$$



Численный пример: 3×3 MIMO в сотовых сетях



$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & e^{j\frac{\pi}{2}} & e^{j\pi} \\ 1 & e^{j\pi} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Каждому абоненту передаем символ $\mathbf{x}_i, i = \{1, 2, 3\}$.

$\mathbf{y}_i, i = \{1, 2, 3\}$ – декодированный сигнал, принятый i -м абонентом. Как сделать $\mathbf{y}_i = \mathbf{x}_i$?

Построение матрицы передаточных характеристик канала (R)

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & e^{j\frac{\pi}{2}} & e^{j\pi} \\ 1 & e^{j\pi} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

```
> channel<-matrix (c(1, 1, 1,  
+ exp (complex (re=0, im=pi/2)),exp (complex (re=0, im=pi)), 1,  
+ exp (complex (re=0, im=pi))), 1,1),  
+ ncol=3)  
> channel  
      [,1] [,2] [,3]  
[1,] 1+0i 0+1i -1+0i  
[2,] 1+0i -1+0i 1+0i  
[3,] 1+0i 1+0i 1+0i
```

Сингулярное разложение матрицы $\mathbf{H} = \mathbf{UDV}^H$

```
> svd(channel)
$d
[1] 2 2 1

$u
      [,1]      [,2]      [,3]
[1,] -0.4082483-0.0000000i 0.2357023-0.6666667i 0.5773503-0.0000000i
[2,] -0.6123724-0.2041241i 0.2154822+0.4511845i 0.0000000-0.5773503i
[3,] -0.6123724+0.2041241i -0.4511845+0.2154822i 0.0000000+0.5773503i

$v
      [,1]      [,2]      [,3]
[1,] -0.8164966+0.0000000i 0.0000000+0.0000000i 0.5773503+0.0000000i
[2,] 0.0000000+0.4082483i -0.6666667-0.2357023i 0.0000000+0.5773503i
[3,] -0.4082483+0.0000000i -0.2357023+0.6666667i -0.5773503+0.0000000i

>
```

- ▶ Передаваемые базовой станцией символы: \mathbf{x}
- ▶ Передаваемые с антенн символы: $\mathbf{x}_p = \mathbf{V}\mathbf{x}$
- ▶ Принимаемые на антеннах получателей символы:
$$\mathbf{y}_p = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_p = \mathbf{UDV}^H \mathbf{x}_p = \mathbf{UDV}^H \mathbf{V}\mathbf{x} = \mathbf{UD}\mathbf{x}$$
- ▶ Декодированные и усиленные символы:
$$\mathbf{y} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}_p = \mathbf{U}^H \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_p = \mathbf{U}^H \mathbf{UD}\mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{x}$$

Численный пример работы MIMO (R)

Выбираем передаваемые абонентам символы (\mathbf{x}):

```
> tx<-matrix (c(1,-1,0.5), ncol=1) # Передаваемые BPSK символы: 3 символа одновременно
> tx
      [,1]
[1,]  1.0
[2,] -1.0
[3,]  0.5
```

Формируем передаваемые с антенн символы (\mathbf{x}_p):

```
> (svd (channel)$v %*% tx) # То, что передали с каждой антенны
      [,1]
[1,] -0.5278214+0.0000000i
[2,]  0.6666667+0.9326257i
[3,] -0.4612212-0.6666667i
```

Принимаемые на антеннах приёмников символы (\mathbf{y}_p):

```
> (channel %*% (svd (channel)$v %*% tx)) # То, что приняли с каждой анткнны
      [,1]
[1,] -0.9992260+1.333333i
[2,] -1.6557093-1.599292i
[3,] -0.3223759+0.265959i
```

Декодированные символы ($\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{x}$):

```
> Conj (t (svd (channel)$u)) %*% (channel %*% (svd (channel)$v %*% tx)) # То, что декодировали
      [,1]
[1,]  2.0-0i
[2,] -2.0+0i
[3,]  0.5-0i
> svd(channel)$d # Коэффициенты "растяжения":
[1] 2 2 1
>
```

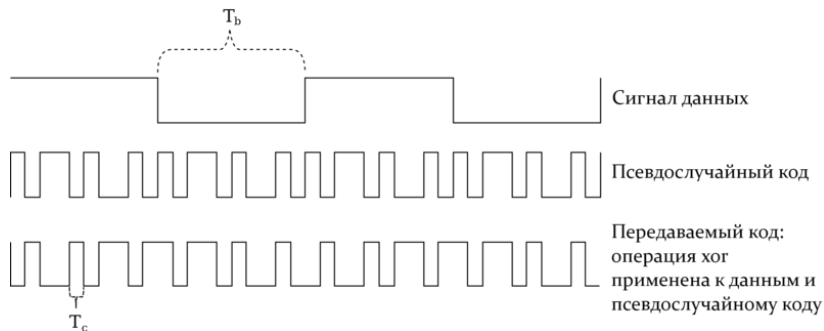
Multi-User MIMO

- ▶ В предложенной схеме каждый абонент должен знать, что приняли остальные.
- ▶ Такая схема работает только в случае одного источника и приемника (3×3)
- ▶ Многолучевое распространение создает "зеркальные отражения" каждой из принимающих антенн, разделяя их в пространстве

Кодирование при отсутствии знаний о символах других абонентов

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_k \end{pmatrix} = \mathbf{HVPX} + \mathbf{N}$$
$$\mathbf{V} = \mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}$$

CDMA – множественный доступ с кодовым разделением



DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum – генерация шумоподобного сигнала, занимающего все время и всю полосу (в отличие от FDMA, TDMA)

CDMA – множественный доступ с кодовым разделением

- ▶ Элементарные последовательности, или чипы:

$$0 = \{-1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, +1\}$$

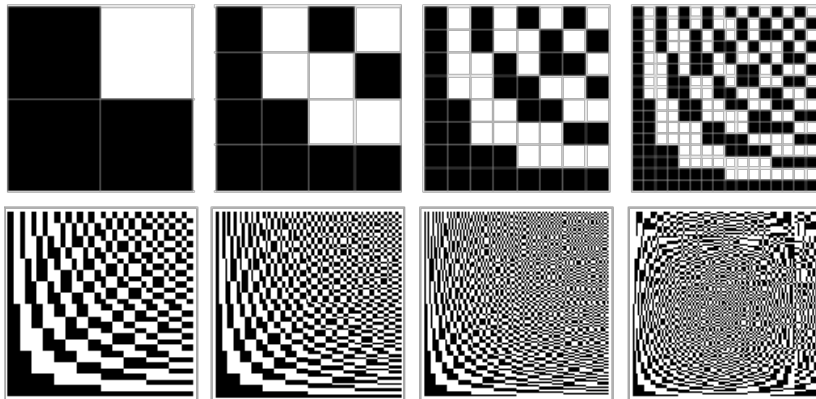
$$1 = \{+1, +1, +1, -1, -1, +1, -1, -1\}$$

- ▶ Уменьшение длительности символа \Rightarrow расширение спектра
- ▶ Каждая станция имеет свою уникальную ортогональную последовательность
- ▶ Все уникальные последовательности ортогональны между собой

Функции Уолша

- ▶ Система ортогональных функций на пространстве $\{1, -1\}$
- ▶ Формирование функций – с помощью строк матриц Адамара

Матрицы Адамара



Асинхронный CDMA

- ▶ Длинные псевдослучайные последовательности практически ортогональны
- ▶ Низкая взаимная корреляция друг с другом
- ▶ Автокорреляция мала за исключением нулевого смещения, возможен приём от несинхронизованных станций
- ▶ Необходимость контролировать мощность передачи, чтобы не нарушить условия взаимной корреляции