

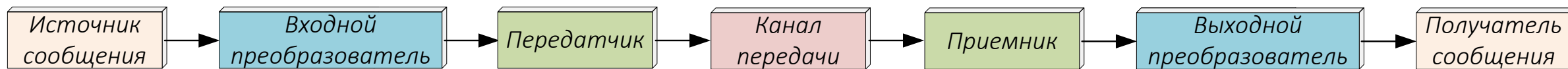
*Модель канала связи OFDM*  
*(Передатчик и приемник)*

*Крюков Яков Владимирович*  
*к.т.н., доцент каф. ТОР, ТУСУР*  
*Email: kryukov.tusur@gmail.com*

# Схема канала связи

*Канал передачи – физическая среда для распространения сигнала от передатчика к приемнику.*

- Проводной (электрический, оптический)
- Беспроводной (оптический, радио, акустический)



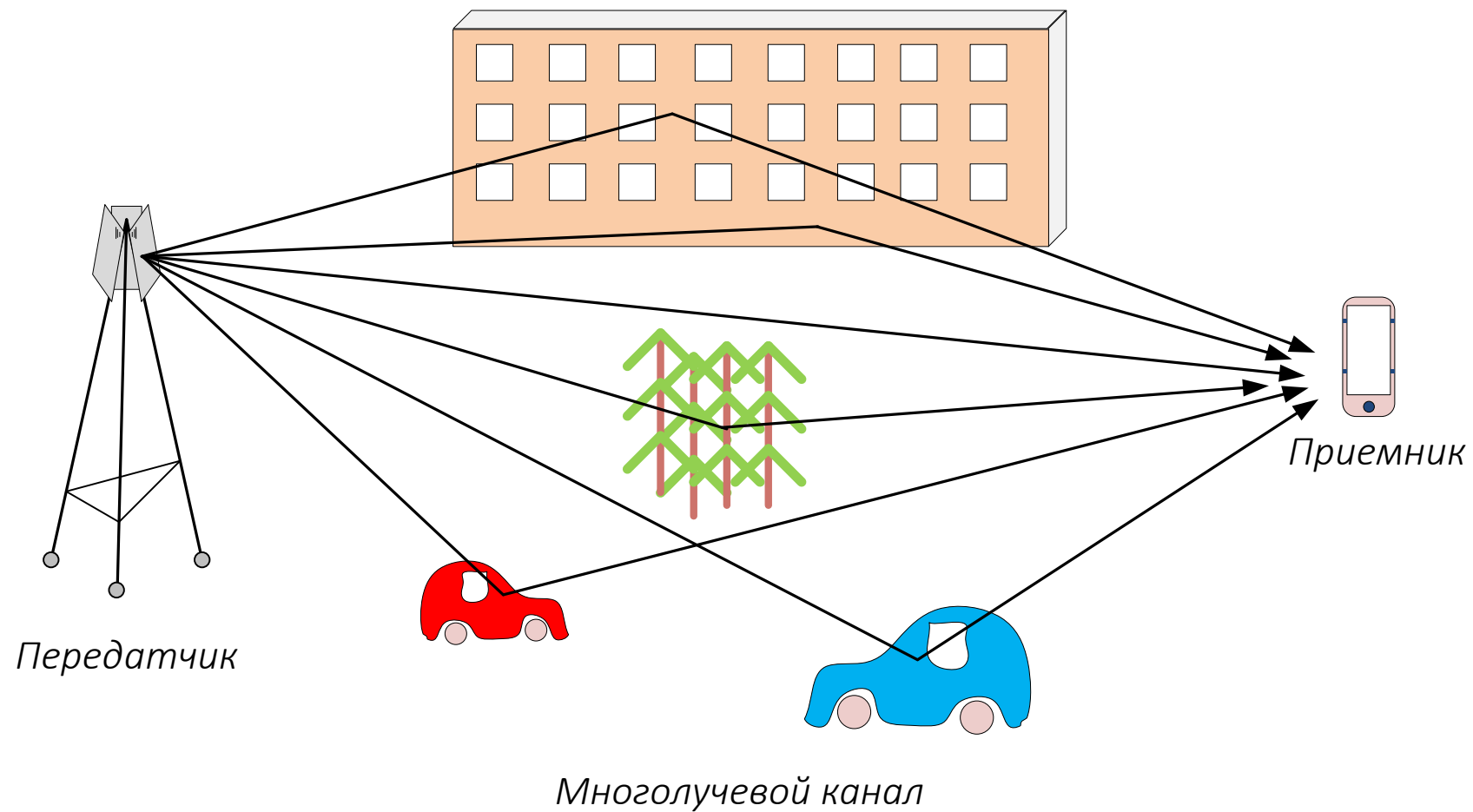
*Передатчик преобразует электрический сигнал в волновой процесс для передачи по каналу.*

- Форматирование
- кодирование источника
- шифрование
- канальное кодирование
- мультиплексирование
- модуляция
- усиление и фильтрация

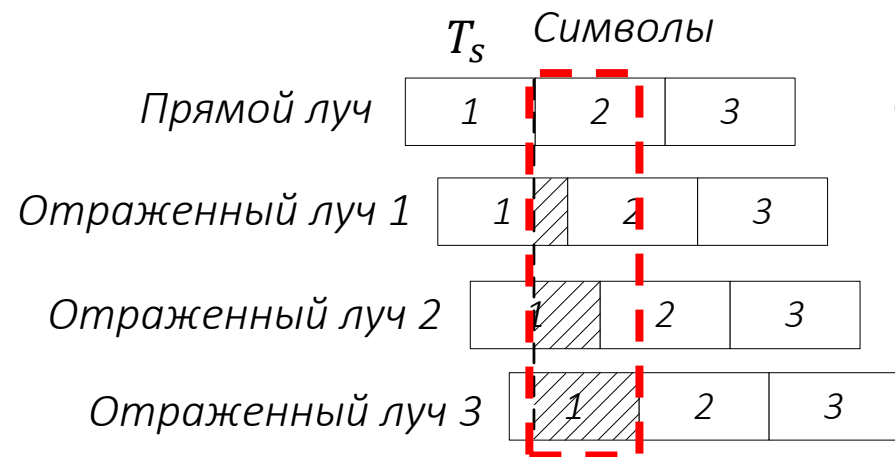
*Приемник восстанавливает сигнал, который был отправлен передатчиком.*

- синхронизация
- усиление и фильтрация
- демодуляция
- демультиплексирование
- декодирование и коррекция ошибок
- дешифрование
- Восстановление
- форматирование

# Проблема мобильных систем связи

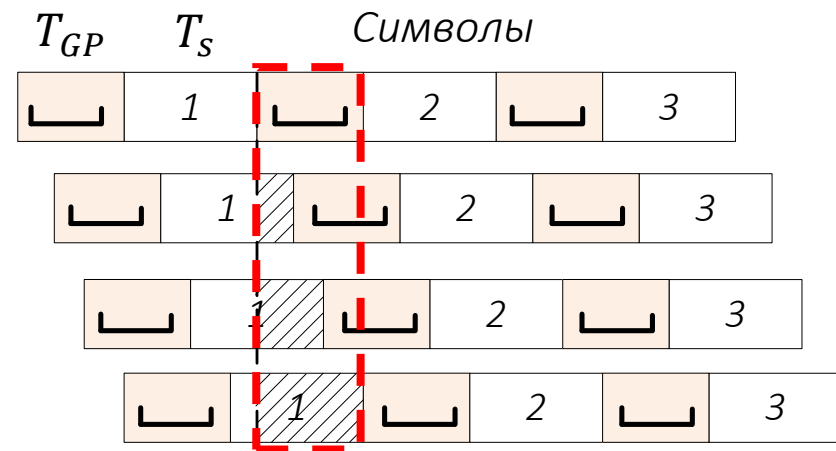


# Борьба с межсимвольной интерференцией



Наложение *информационной части 1-го* символа на *информационную часть 2-го* символа

Добавление защитного интервала длительностью  $T_{GP}$

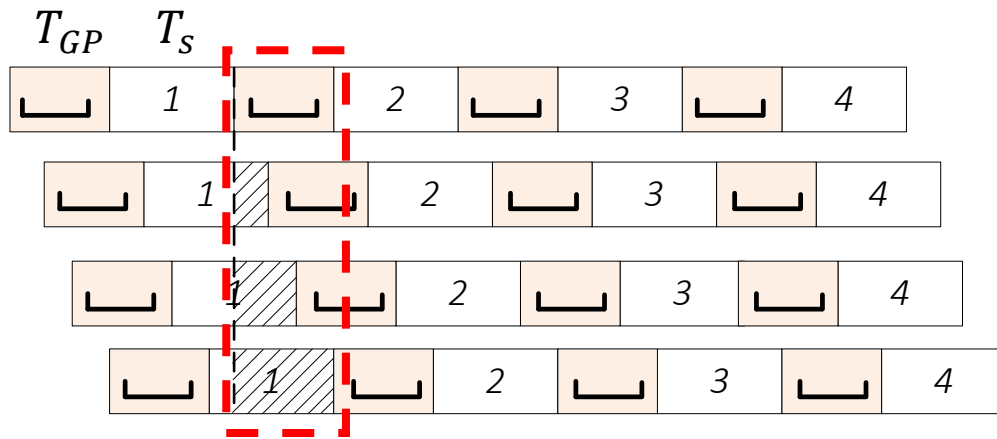


Наложение *информационной части 1-го* символа на *защитный интервал 2-го* символа

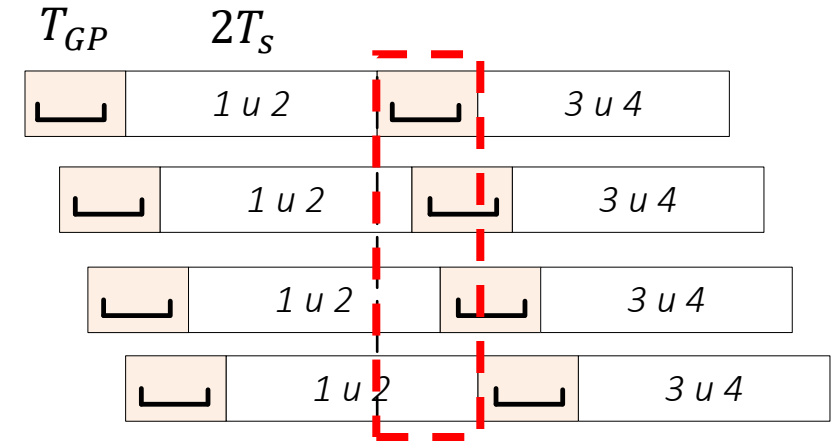
- Длительность символа модуляции  $T_s = 1/B$ , где  $B$  – полоса сигнала.
- Длительность защитного интервала:  $T_{GP} \geq \tau_{\max}$ , где  $\tau_{\max}$  – максимальная задержка отраженного луча относительно прямого луча.
- Эффективность использования ресурса:  $\frac{T_s}{T_s + T_{GP}} \cdot 100\%$  уменьшается с увеличением  $B$  Проблема!

- *Добавление временных защитных интервалов существенно снижает эффективность использования ресурса связи.*
- *Увеличивая скорость передачи, требуется увеличить полосу сигнала. Это приводит к уменьшению временной длительности символа  $T_s$ .*
- *Когда информационные символы модуляции становятся слишком короткими, то длительность защитного интервала каждого символа  $T_{GP}$  может быть больше, чем длительность самого информационного символа  $T_s$ .*
- *Особенно актуально для мобильных систем связи, а это наибольшая часть массового сегмента.*

# Борьба с межсимвольной интерференцией (ч.2)



Удлинение символов при  
сохранении полосы



Пусть максимальная разность хода лучей  $\Delta L = 1$  км, а полоса сигнала  $B = 2 \cdot 10^6$  Гц.

Тогда  $\tau_{\max} = \frac{\Delta L}{c} = \frac{10^3}{3 \cdot 10^8} = 3,3 \cdot 10^{-6}$  с, а  $T_S = \frac{1}{2 \cdot 10^6} = 0,5 \cdot 10^{-6}$  с.

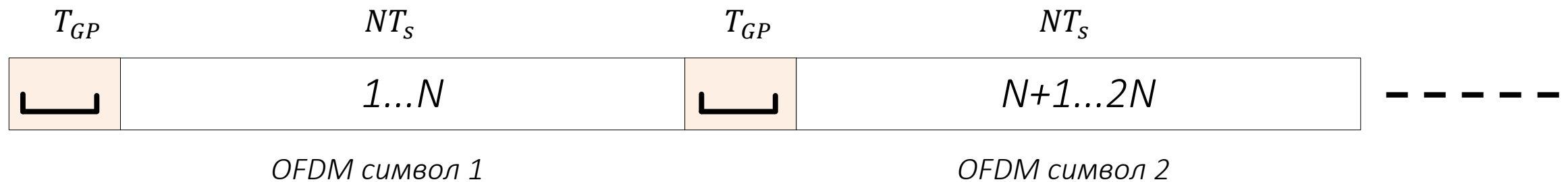
- Эффективность использования ресурса

$$\frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{3,3 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 13\% \quad 1 \text{ символ}$$

$$\frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{3,3 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 23\% \quad 2 \text{ символа}$$

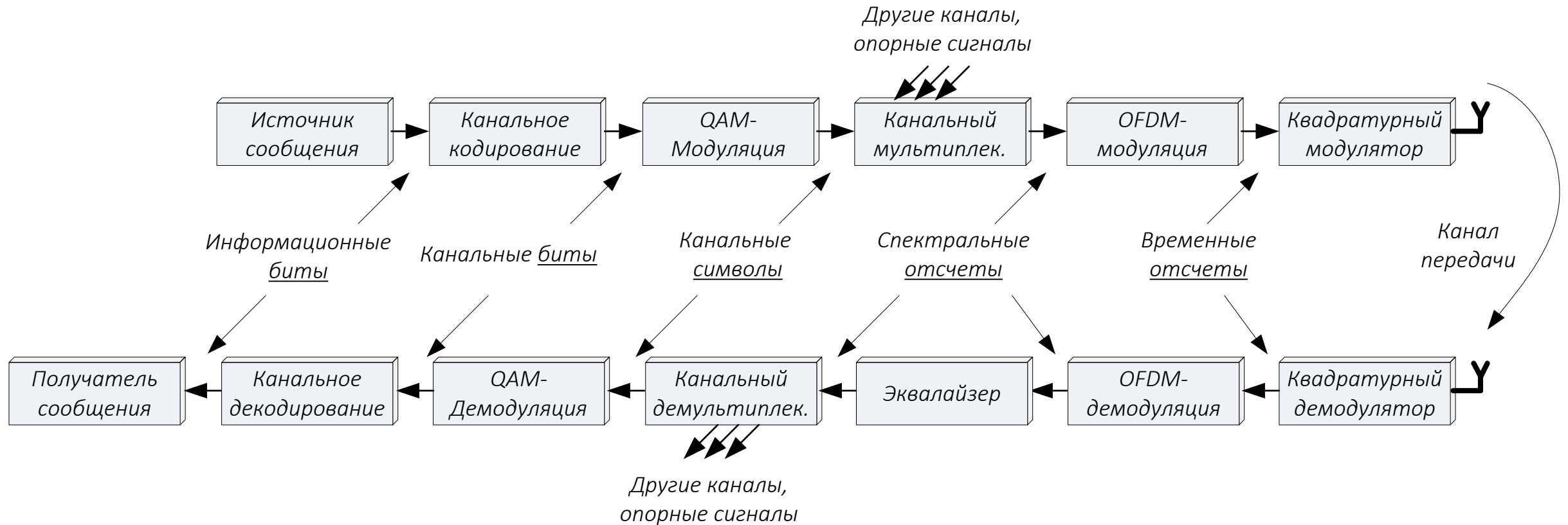
# Технология OFDM

- Ортогональное частотное мультиплексирование данных (OFDM) является многопозиционной модуляцией, при которой в один символ модуляции отображается вектор сообщения содержащий от нескольких десятков до нескольких тысяч бит.
- Символ модуляции при таком отображении носит название символ OFDM.



- Позволяет значительно увеличить эффективность использования ресурса связи в многолучевом канале распространения.

# Структурная схема системы связи OFDM



- Ортогональное частотное мультиплексирование данных (OFDM) является многопозиционной модуляцией, при которой в один символ модуляции отображается вектор сообщения содержащий от нескольких десятков до нескольких тысяч бит.
- Символ модуляции при таком отображении носит название символ OFDM.
- Позволяет значительно увеличить эффективность использования ресурса связи в многолучевом канале распространения.

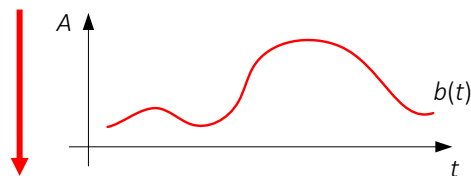


# Источник сообщения

0101010101001  
1001010101010  
1010101010101

Источник сообщения

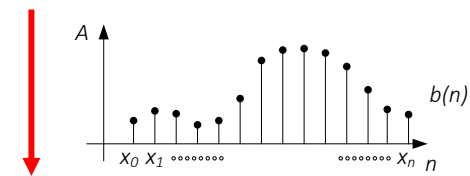
Аналоговый



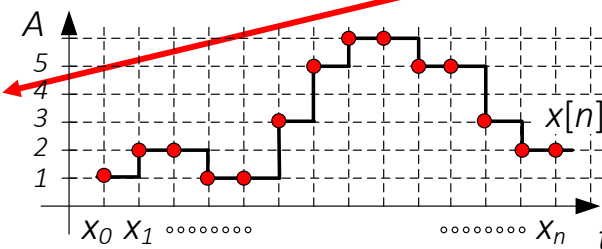
Форматирование  
(аналогово-цифровое  
преобразование)

0101010101  
 $b(n)$

Дискретный

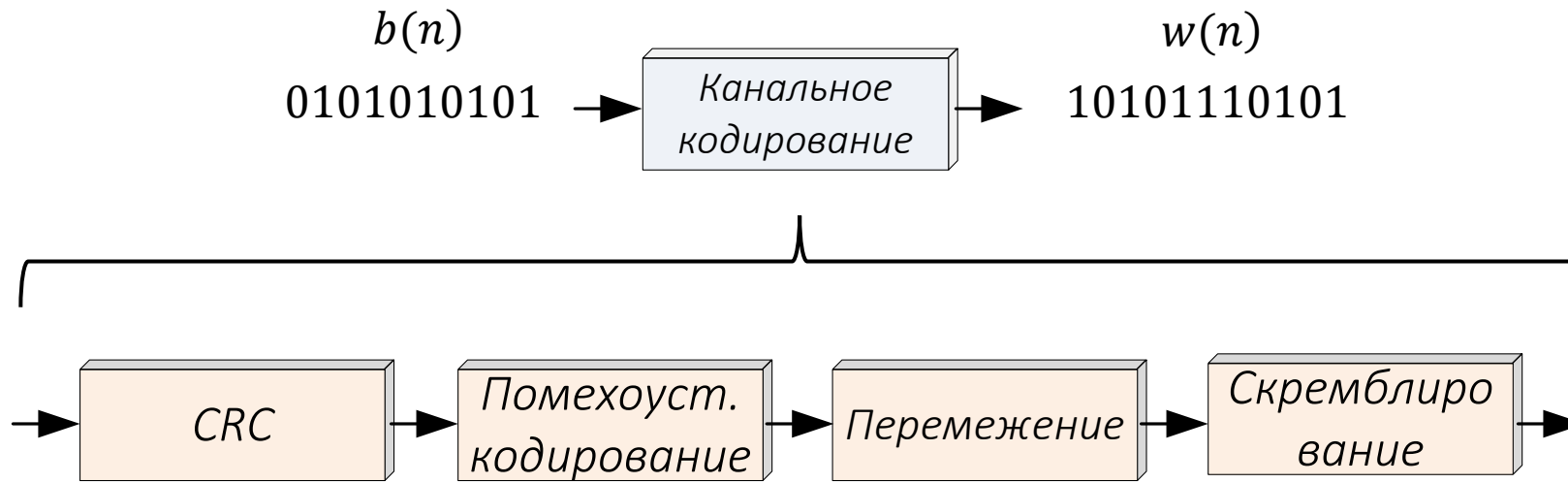


Форматирование  
(Знаковое кодирование)



- Использование генератора случайной (псевдослучайной) последовательности бит

# Канальное кодирование

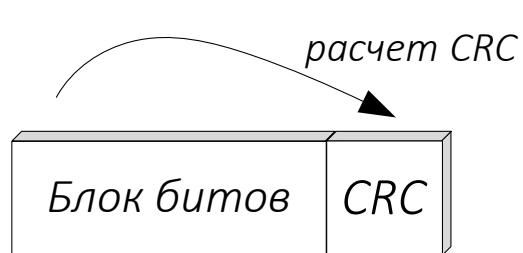


- Добавление контрольной суммы для проверки целостности данных в точке приема.

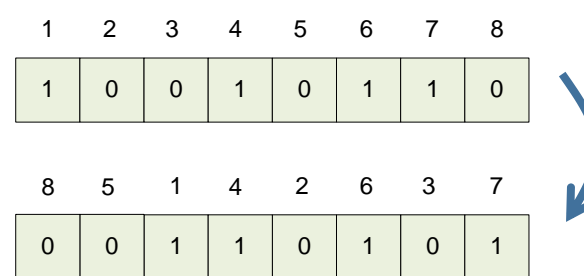
- Добавление избыточности для повышения помехоустойчивости

- Перемешивание бит в блоке для борьбы с групповыми ошибками в точке приема.

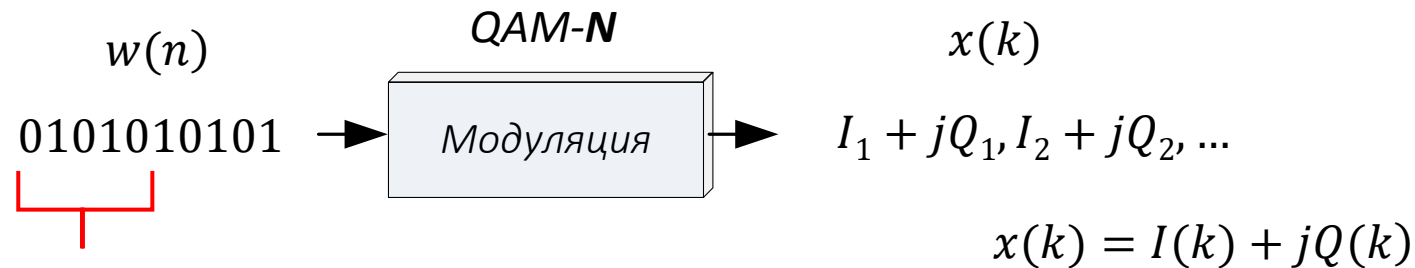
- Шифрование  
$$\tilde{b} = b \oplus c$$
  
 $c$  – псевдослучайная последовательность



0101010101 ...  
1010101010010101 ...  
*10001* – избыточные биты



# Цифровая модуляция (манипуляция)

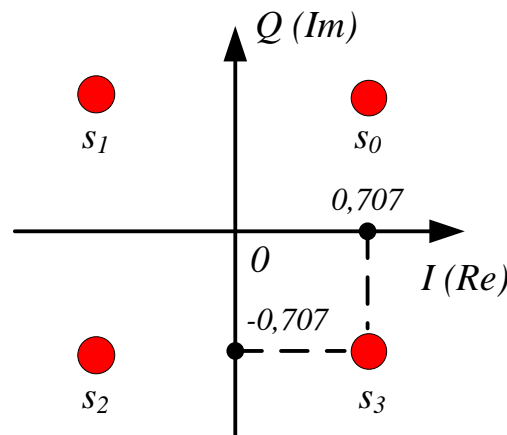


- Отображение **M** бит в квадратуры **I** и **Q**.
- Многопозиционная модуляция. Порядок  $N = 2^M$  (количество возможных состояний)

• На входе QAM-4 (QPSK) модулятора: 001101

• На выходе QAM-4 (QPSK) модулятора:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0,707 & Q_1 &= 0,707 \\ I_2 &= -0,707 & Q_2 &= -0,707 \\ I_3 &= 0,707 & Q_3 &= -0,707 \end{aligned}$$



Созвездие QAM-4 (QPSK)

| $b_0, b_1$ | $I, Q$         |
|------------|----------------|
| 00         | 0.707, 0.707   |
| 01         | 0.707, -0.707  |
| 10         | -0.707, 0.707  |
| 11         | -0.707, -0.707 |

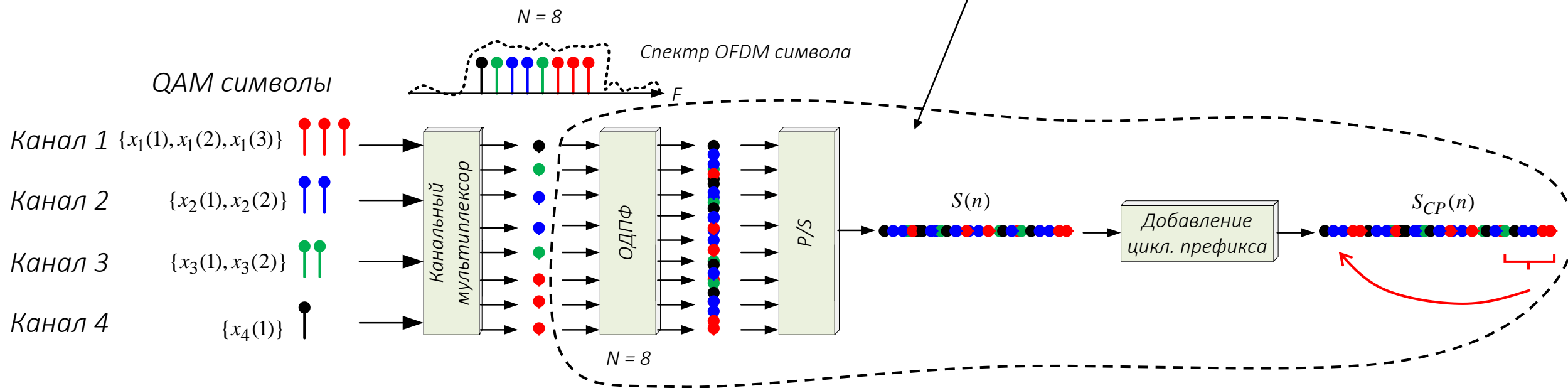
$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_I \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_Q$

Таблица отображения

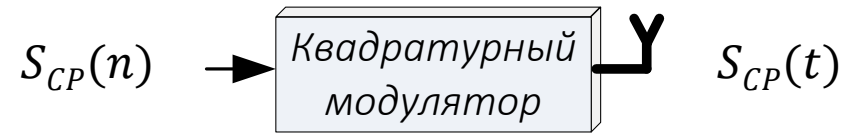
# Канальное мультиплексирование и OFDM модуляция



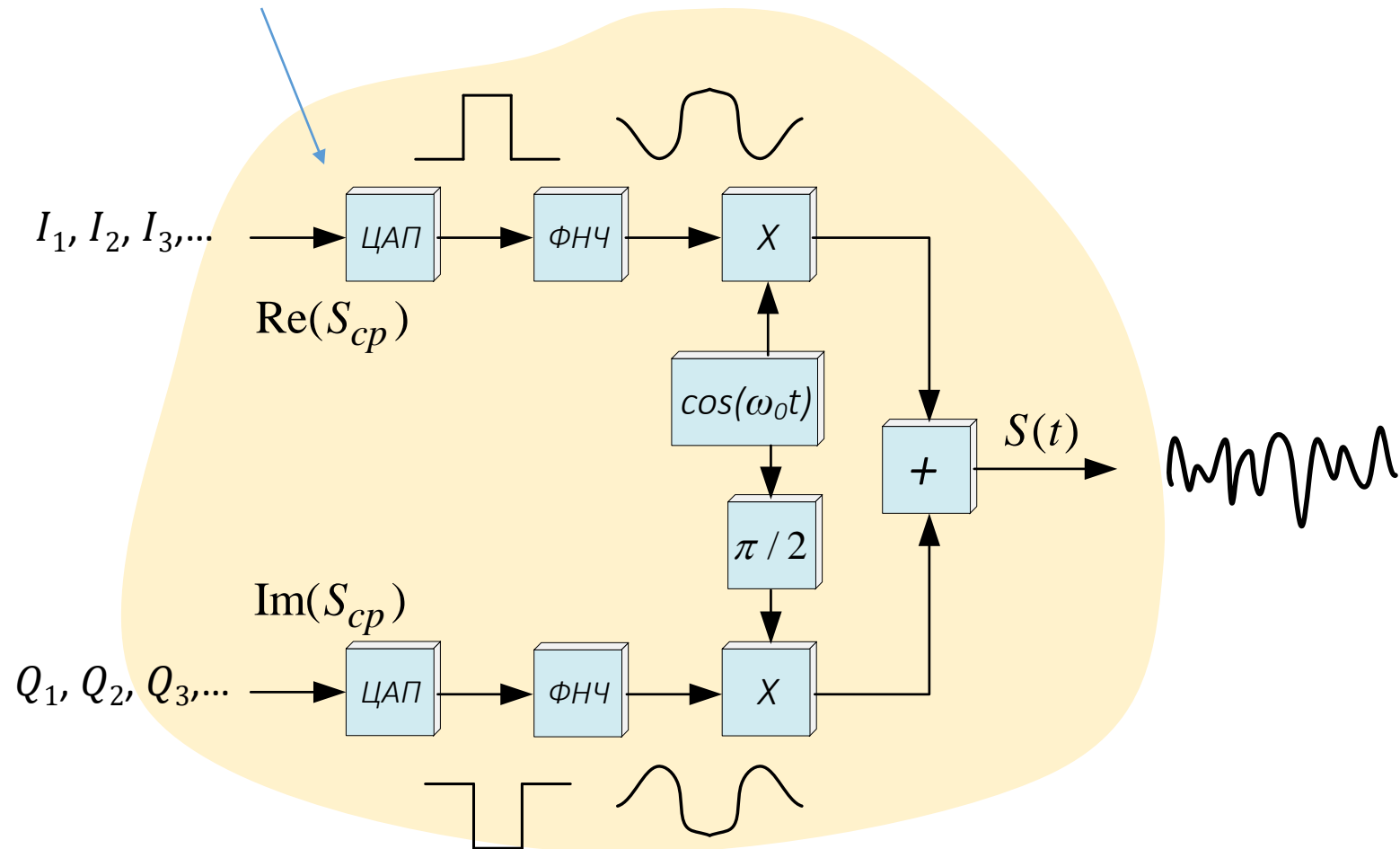
- Размещение символов нескольких каналов в спектре OFDM-символа. Уплотнение в частотно-временном домене.



# Квадратурная модуляция

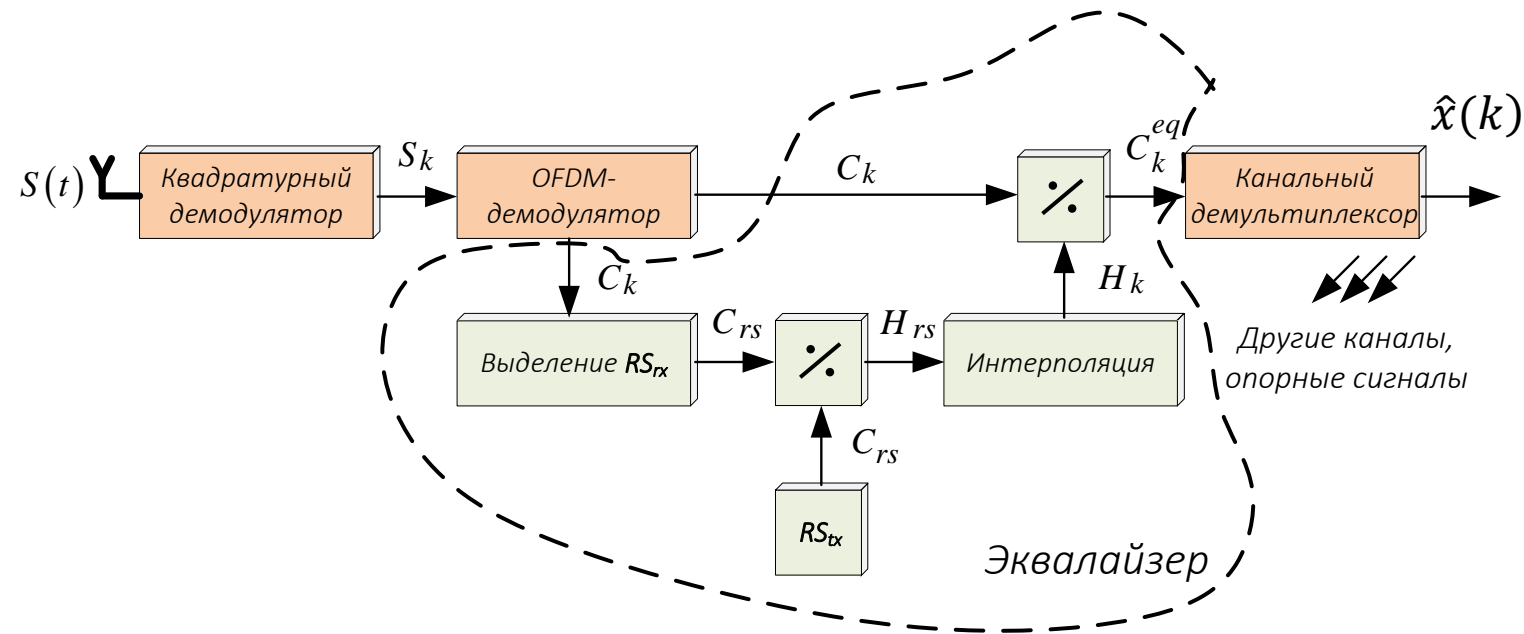


- Цифро-аналоговое преобразование
- Формирующий фильтр
- Квадратурная модуляция
- Перенос на ВЧ

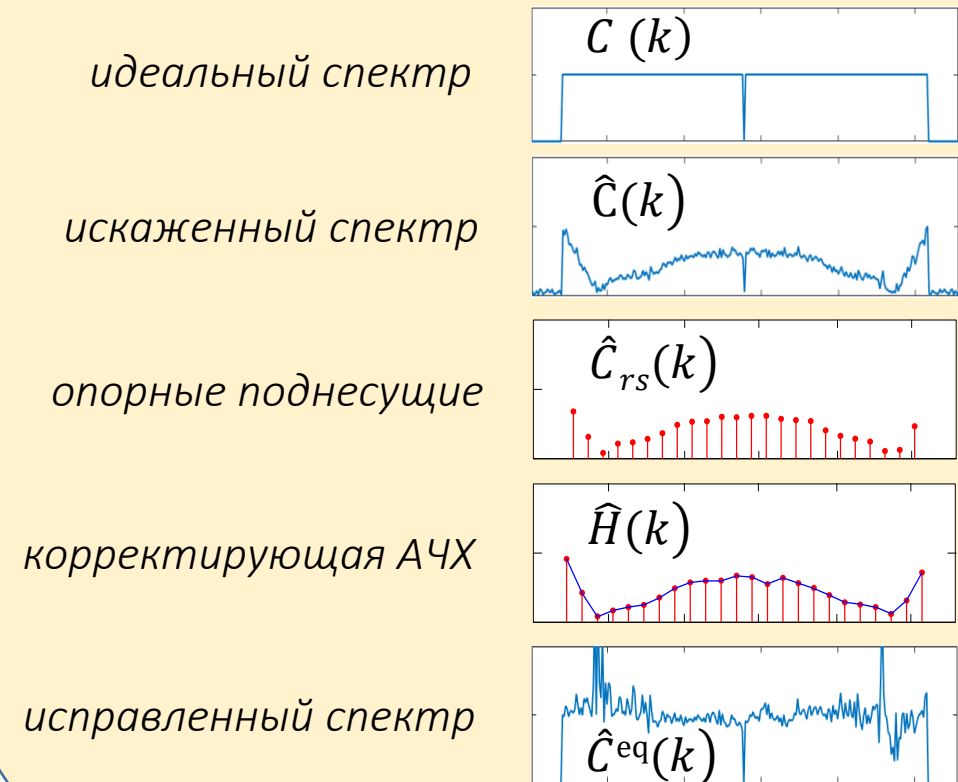


# Приемник OFDM сигнала с эквалайзером

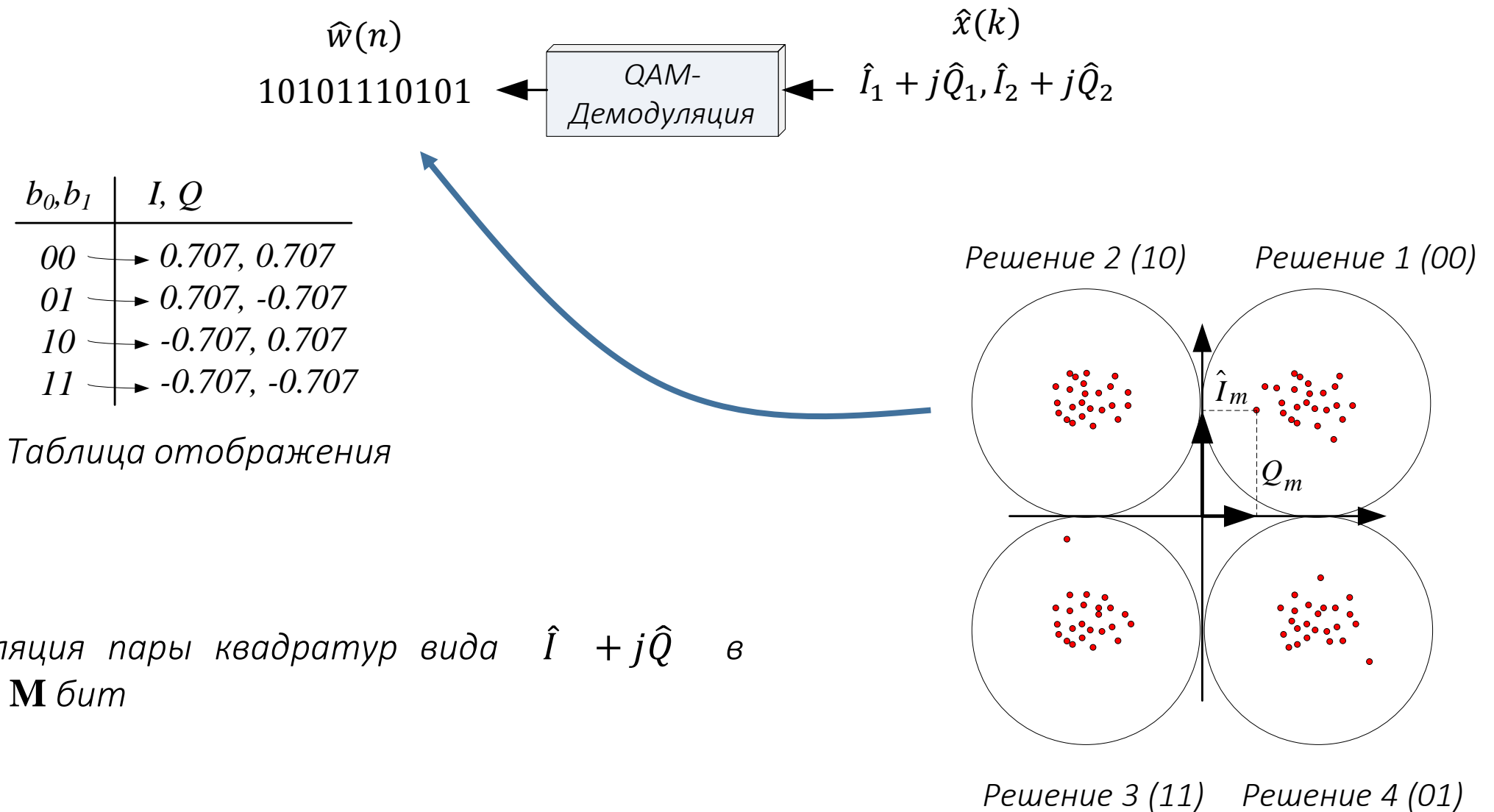
- Обратные операции (относительно передатчика)
- Эквалайзирование в OFDM – процедура выравнивания спектра принятого OFDM-символа для компенсации мультипликативных искажений, вызванных каналом передачи.



Спектр OFDM сигнала

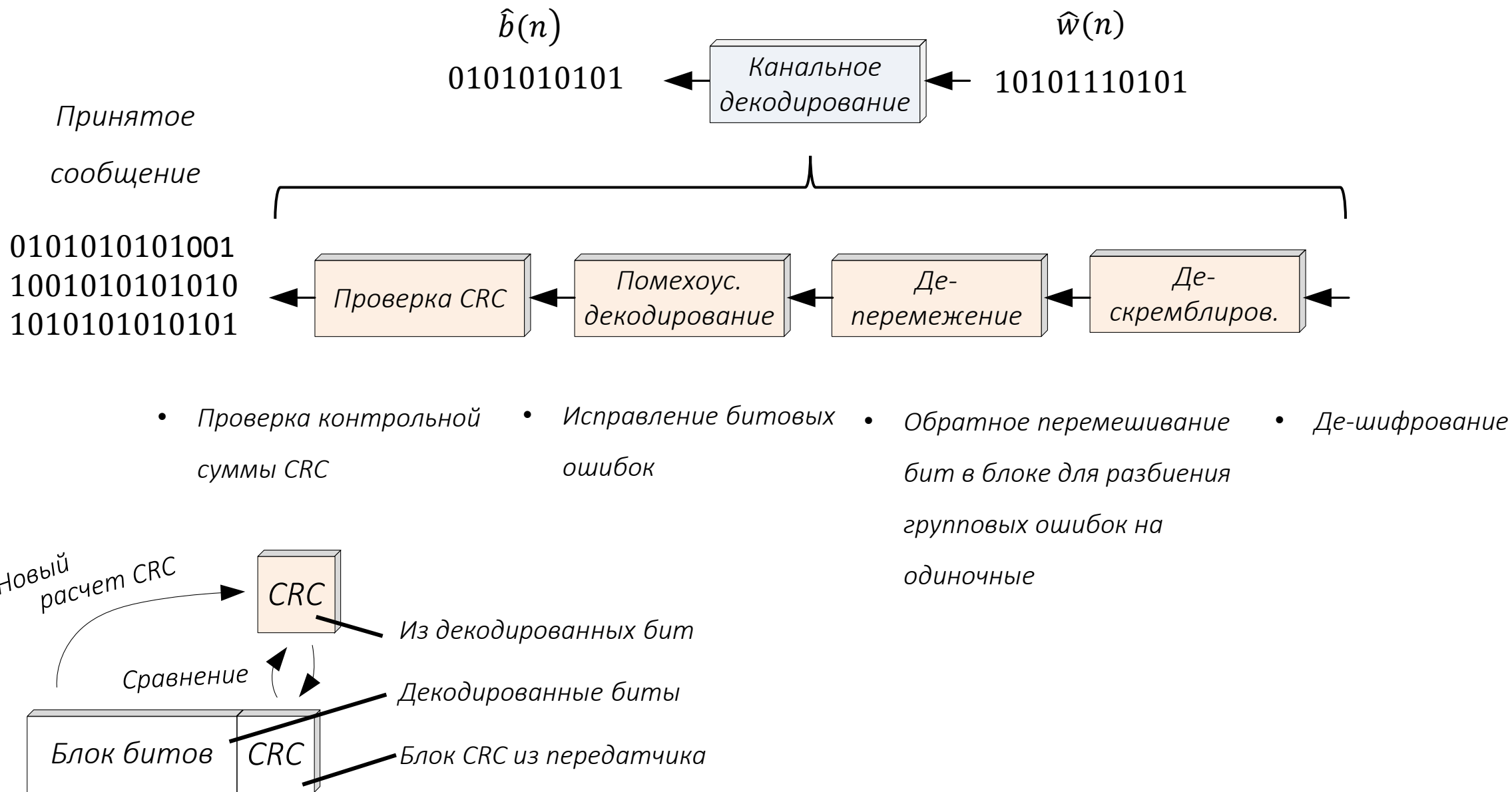


# QAM-демодуляция



- Демодуляция пары квадратур вида  $\hat{I} + j\hat{Q}$  в пачку из **M** бит

# Канальное декодирование





- Канальное кодирование – повышение помехоустойчивости информационного сообщения. Основные операции: добавление контрольной суммы CRC, помехоустойчивое кодирование, перемежение, скремблирование.
- QAM-модуляция (манипуляция) – отображение входных канальных бит в комплексные символы модуляции.
- Канальное мультиплексирование – объединение нескольких каналов в один групповой поток. Для OFDMA – расстановка символов модуляции из разных каналов по поднесущим одного OFDM-символа.
- OFDM-модуляция – формирование OFDM-символов по технологии OFDM, используя принципы ортогональности поднесущих. Используется для борьбы с межсимвольной интерференцией.
- Квадратурная модуляция – запись информации в квадратурную и синфазную огибающие сигнала, после чего они переносятся на синфазные и квадратурные несущие и складываются друг с другом, образуя квадратурный сигнал.
- Эквалайзирование – оценка АЧХ канала передачи и компенсация искажений, вызванных им.