

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»**

Факультет инфокоммуникационных сетей и систем

Кафедра теоретических основ связи и радиотехники

Расчёт основных характеристик цифровой системы связи с  
использованием квадратурной модуляции

Учебная дисциплина «Теория электрической связи»

Курсовая работа

Студент группы ИКТО-91 Копыл А. В.  
зачетная книжка № 1905141

Руководитель \_\_\_\_\_

Санкт-Петербург 2021

Цель курсовой работы – изучить и разработать систему цифровой связи, оптимальную в отношении флуктуационной помехи и исключающую появления межсимвольной помехи.

## 1 Структурная схема системы цифровой связи

Система связи предназначена для передачи аналоговых сообщений по цифровому каналу связи.

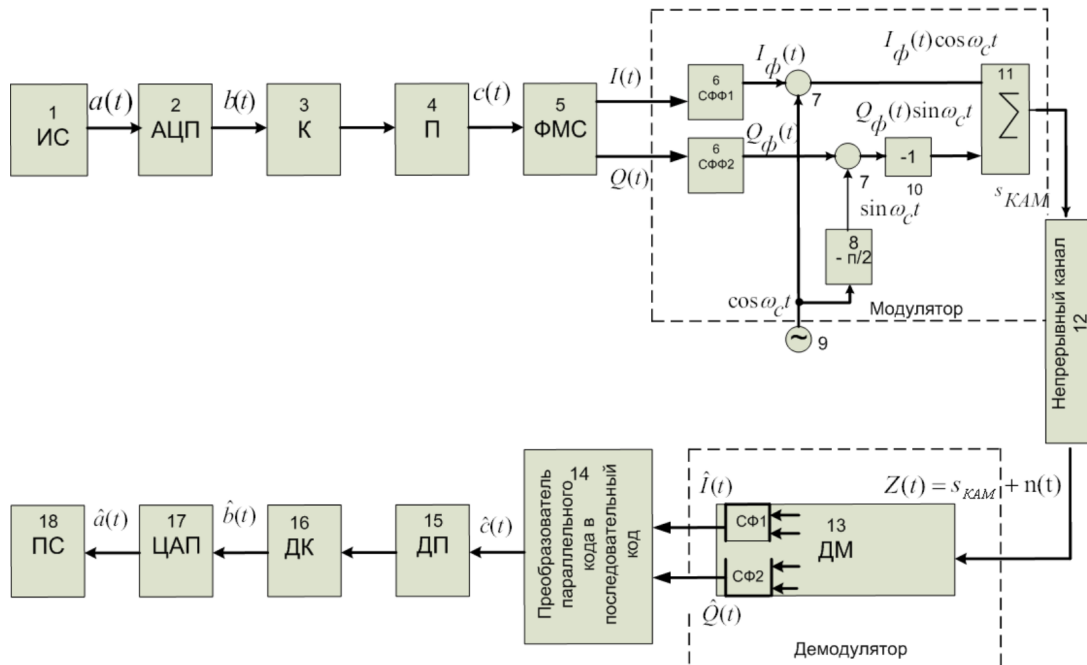


Рис. 1: Структурная схема цифровой системы связи

В систему входят следующие функциональные узлы с последующими назначениями:

1. Источник сообщений – создает реализации  $a(t)$  случайного процесса  $A(t)$ .
2. Аналого-цифровой преобразователь – преобразует аналоговый сигнал от источника сообщения в последовательность двоичных отсчетов  $b(t)$ .

3. Кодер – включает в цифровой поток от АЦП дополнительные символы, предназначенные для повышения помехоустойчивости системы связи;
4. Формирователь модулирующих символов – служит для получения модулирующих сигналов  $I(t)$  и  $Q(t)$ , соответствующих заданному виду модуляции;
5. Сглаживающие формирующие фильтры (СФФ1, СФФ2);
6. Перемножители – для получения БМ сигналов: синфазного  $I(t) \cos \omega_C t$  и квадратурного  $Q(t) \sin \omega_C t$ .
7. Фазовращатель – для получения второго несущего колебания, ортогонального по отношению к первому;
8. Генератор гармонических колебаний – для получения несущего колебания;
9. Инвертор;
10. Сумматор – для объединения синфазного и квадратурного сигналов в единый сигнал с квадратурной модуляцией  $S_{КАМ}(t) = I(t) \cos \omega_C t + Q(t) \sin \omega_C t$ ;
11. Непрерывный канал – среда распространения сигнала  $S_{КАМ}(t)$ ;
12. Демодулятор – для анализа приходящего сигнала, искаженного помехами, и принятии решения о переданном сообщении;
13. Преобразователь параллельного кода в последовательный код – для преобразования сигнала с выхода демодулятора в последовательный формат кодовых комбинаций;
14. Декодер – для исправления части ошибок, возникших при приёме сообщения  $\hat{b}(t)$  вследствие влияния помех;
15. Цифро-аналоговый преобразователь – для восстановления аналоговой формы сигнала  $\hat{a}(t)$  из его цифрового представления;
16. Получатель сообщений.

## 2 Исходные данные

$$m = 41$$

Предельные уровни аналогового сигнала $a_{мин}$ , $a_{макс}$ (В)	$a_{макс} = 25,6$ В; $a_{мин} = -25,6$ В	Внести свои данные
Верхняя частота спектра аналогового сигнала $f_B$	$f_B = (1 + m \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4$	$f_B = 14100$
Заданный уровень квантования	$j = 500 - 3 \cdot m$	377
Спектральная плотность мощности флуктуационной помехи	41	$N_0 = 2,3 \cdot 10^{-7} B^2 / \Gamma_{\mathcal{U}}$
q – номер тактового интервала ошибки	$q = m \bmod 3 + 1$	$q = 3$
Вид модуляции	КАМ-16	

## 3 Расчет составляющих системы цифровой связи

### 3.1 Источник сообщений

Источник сообщения (ИС) вырабатывает реализации  $a(t)$  стационарного случайного процесса  $A(t)$ , типа квазирелеганового шума с параметрами  $a_{мин}$ ,  $a_{макс}$  и  $f_B$ . Мгновенные значения сообщения равновероятны в интервале от значения  $a_{мин}$  и до значения  $a_{макс}$ .

Требуется:

1. Написать аналитические выражения для плотности вероятности  $w(a)$  мгновенных значений сообщения, функции распределения  $F(a)$  и построить их графики (рис. 2).

$$w(a) = \frac{1}{a_{макс} - a_{мин}} = \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{25,6 + 25,6} = 0,02$$

$$F(a) = \int_{-\infty}^a w(a) da = \int_{a_{мин}}^a \frac{1}{\Delta} da = \begin{cases} 1, & a > a_{макс} \\ \frac{a - a_{мин}}{\Delta}, & a_{мин} \leq a \leq a_{макс} \\ 0, & a < a_{мин} \end{cases}$$

где  $\Delta = a_{\max} - a_{\min} = 51,2 B$ .

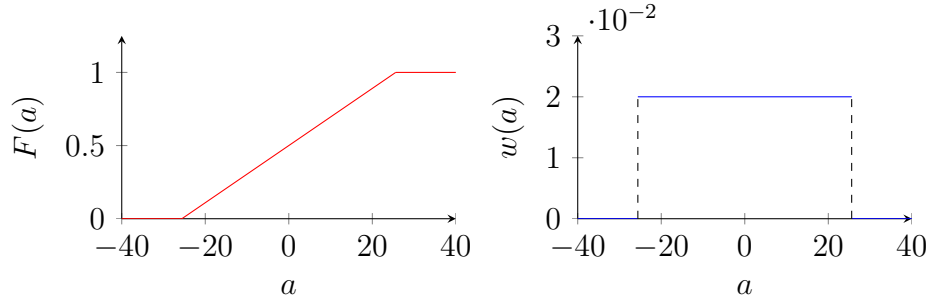


Рис. 2: Графики функции распределения и плотности вероятности

2. Рассчитать математическое ожидание  $\overline{A(t)}$  и дисперсию  $D\{A(t)\}$  сообщения  $A(t)$ .

$$\overline{A(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} a \cdot w(a) da = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a \frac{1}{a_{\max} - a_{\min}} da = \frac{a^2}{2\Delta} \Big|_{a_{\min}}^{a_{\max}} = \frac{a_{\max}^2 - a_{\min}^2}{2\Delta} = 0$$

$$\begin{aligned} D\{A(t)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} (a - \overline{A(t)})^2 w(a) da = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^2 w(a) da \\ &= \frac{a^3}{3\Delta} \Big|_{a_{\min}}^{a_{\max}} = \frac{a_{\min}^2 + a_{\max} a_{\min} + a_{\max}^2}{3} = 218,5 \end{aligned}$$

3. Написать аналитическое выражение для спектральной плотности мощности  $G_A(f)$  сообщения  $A(t)$  и построить график (рис. 3).

$$G_A(f) = \frac{D\{A(t)\}}{2f_B} = \frac{218,5}{2 \cdot 1,41 \cdot 10^4} = 7,7 \text{ мВ}^2/\Gamma\text{ц}$$

$$G_A(f) = \begin{cases} 7,7 \text{ мВ}^2/\Gamma\text{ц}, & |f| \leq f_B \\ 0, & |f| > f_B \end{cases}$$

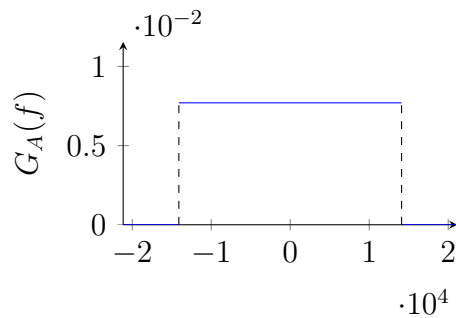


Рис. 3: График спектральной плотности мощности.

4. Найти аналитическое выражение для корреляционной функции  $B_A(\tau)$  сообщения  $A(t)$  и построить график (рис. 4). По форме графика  $B_A(\tau)$  определить, является ли сообщение  $A(t)$  эргодическим случайным процессом или не является таковым.

$$\begin{aligned}
 B_A(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G_A(f)}{2} e^{j2\pi f\tau} df = \int_{-f_B}^{f_B} \frac{G_A}{2} \cos 2\pi f\tau df \\
 &= \frac{G_A}{2} \frac{\sin 2\pi f\tau}{2\pi\tau} \Big|_{-f_B}^{f_B} = G_A \frac{\sin 2\pi f_B\tau}{2\pi\tau}
 \end{aligned}$$

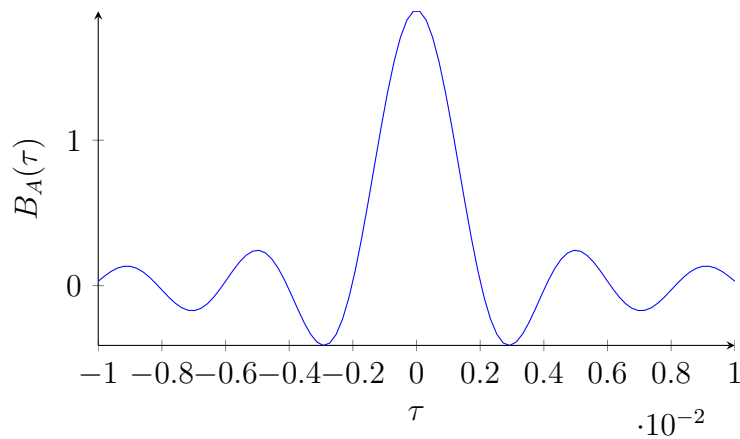


Рис. 4: График корреляционной функции  $B_A(\tau)$ .

### 3.2 Аналого-цифровой преобразователь

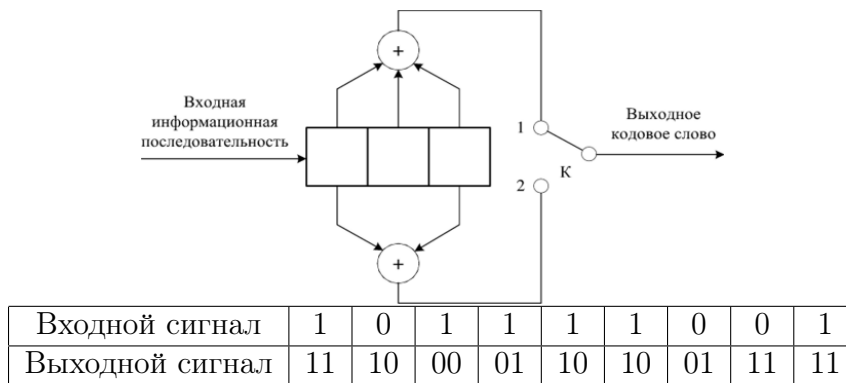
$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_B} = \frac{1}{2 \cdot 14100} = 3,546 \cdot 10^{-5} \text{ c}$$

$$f_d = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_B = \frac{1}{3,546 \cdot 10^{-5}} = 28200$$

$$377_{10} = 101111001_2$$

$$k = 9; L = 2^9 = 512$$

### 3.3 Кодер



#### 3.3.1 Решетка кодера

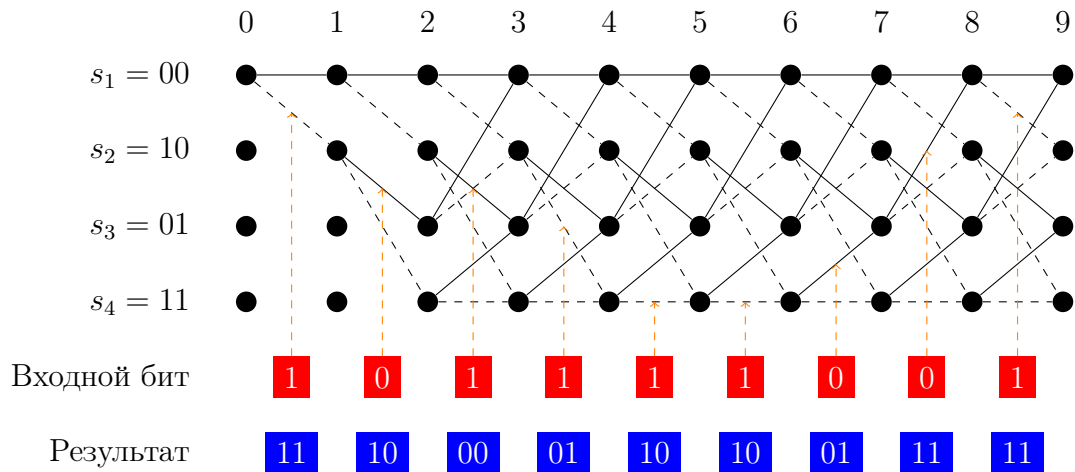


Рис. 5: Решетка кодера

Длительность двоичного символа  $T_B$  на выходе кодера:

$$T_B = \frac{\Delta t}{2k} = \frac{3,546 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 9} = 1,97 \cdot 10^{-6} \text{ c}$$

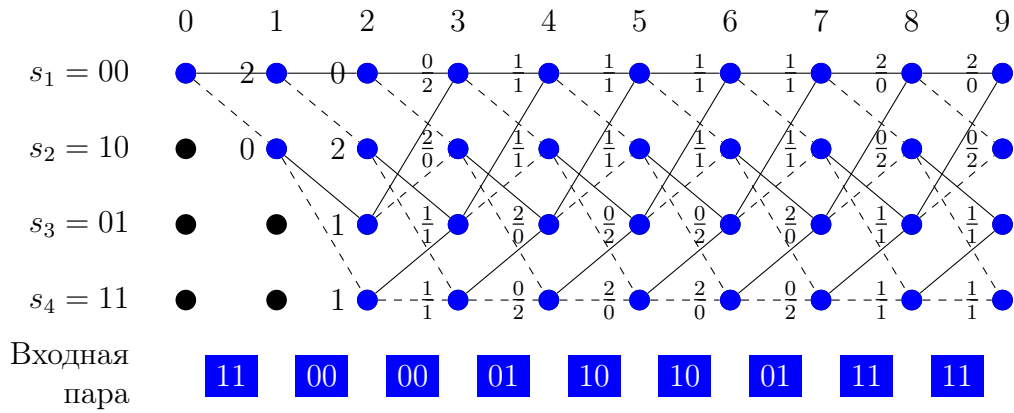


Рис. 6: Решетка декодера

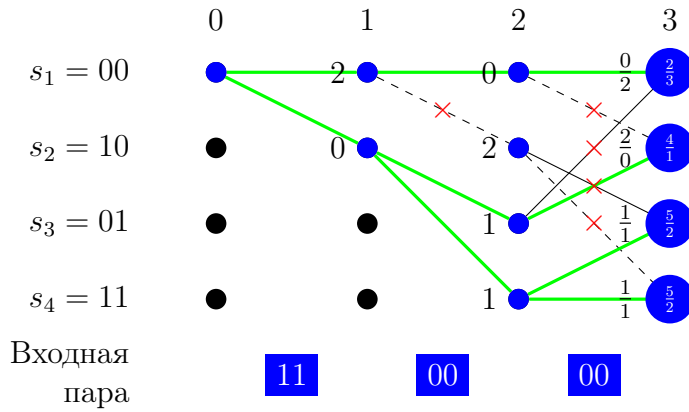


Рис. 7: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 3$ .

### 3.4 Декодер

По каналу передавался код  $\bar{u} = 111000011010011111$ . Ошибка произошла на тактовом интервале  $q = 3$ . Таким образом, на вход декодера поступает последовательность  $\bar{Z} = 110000011010011111$ . Крестиком обозначен ошибочно принятый символ.

#### 3.4.1 Диаграмма декодера



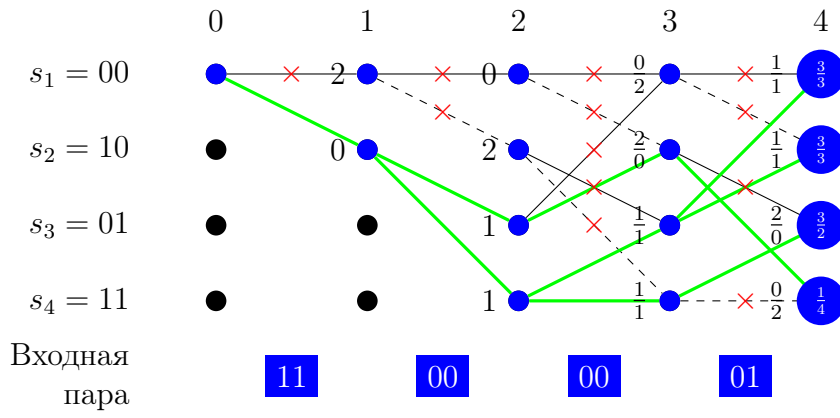


Рис. 8: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 4$ .

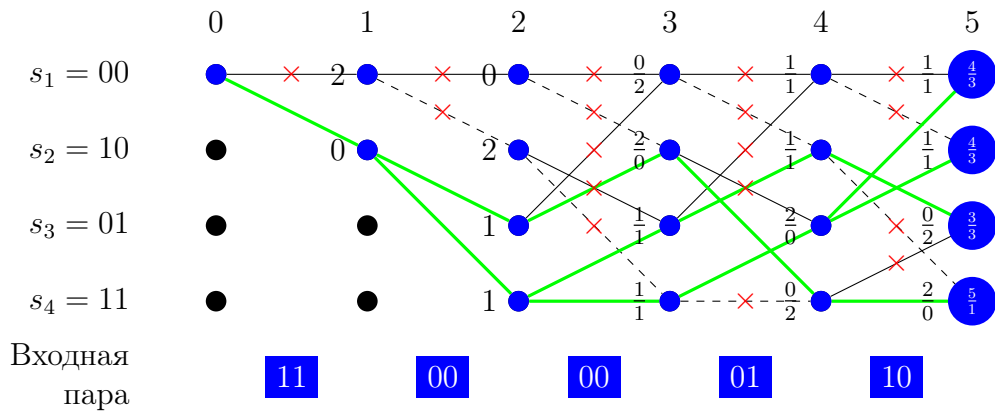


Рис. 9: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 5$ .

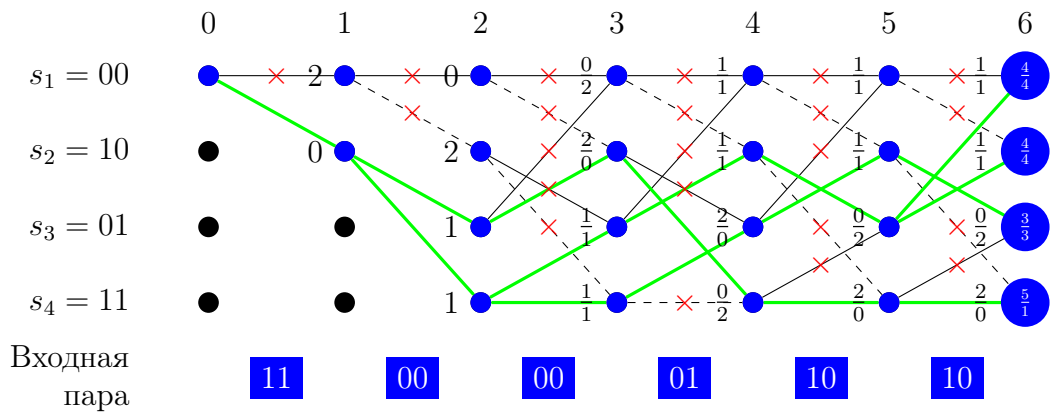


Рис. 10: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 6$ .

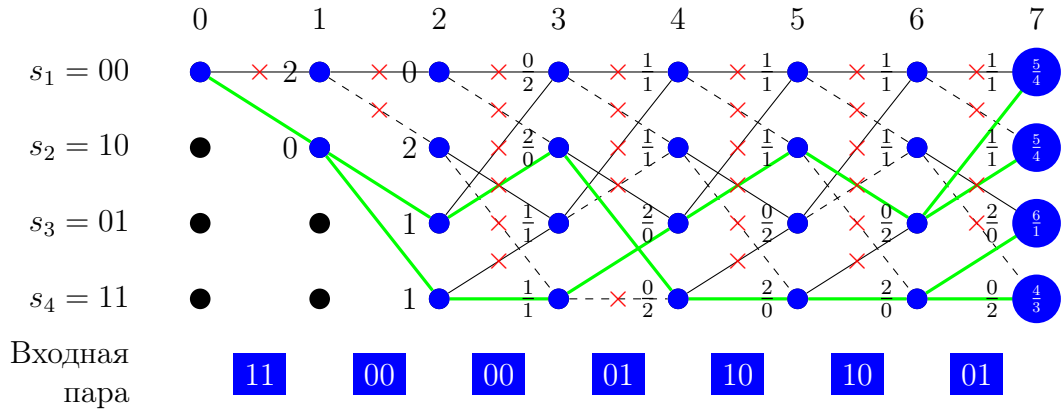


Рис. 11: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 7$ .

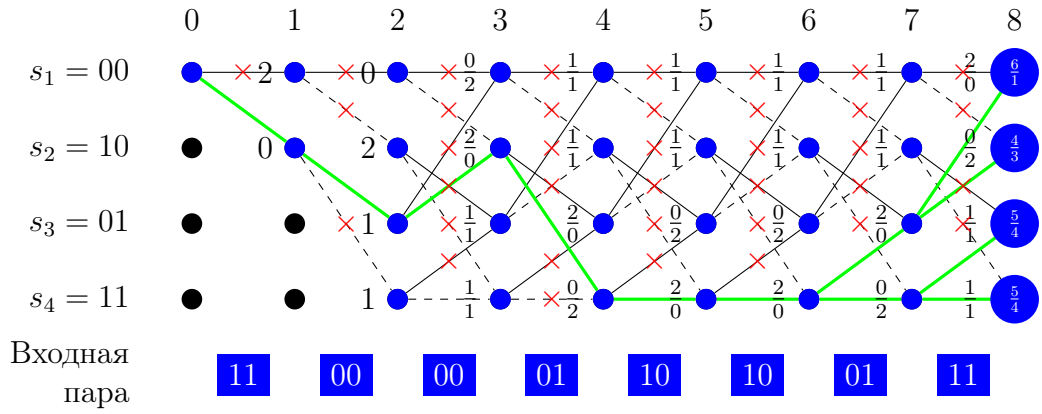


Рис. 12: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 8$ .

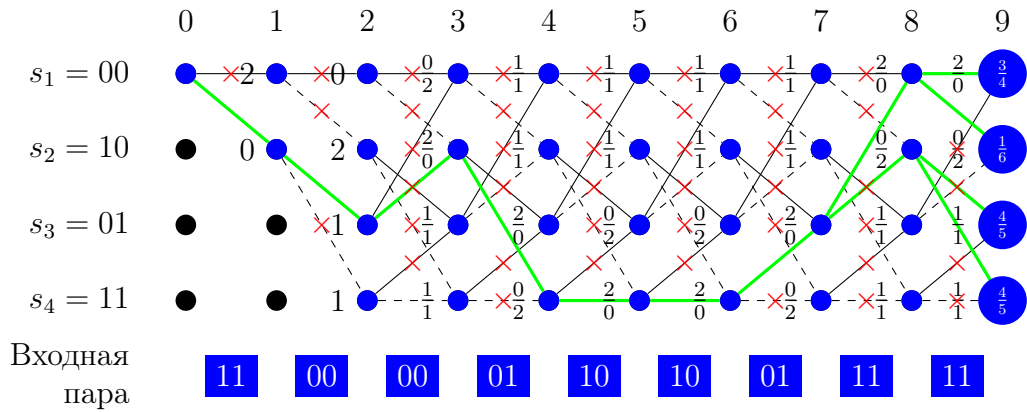


Рис. 13: Сегмент решетки декодера от  $t = 0$ , до  $t = 9$ .

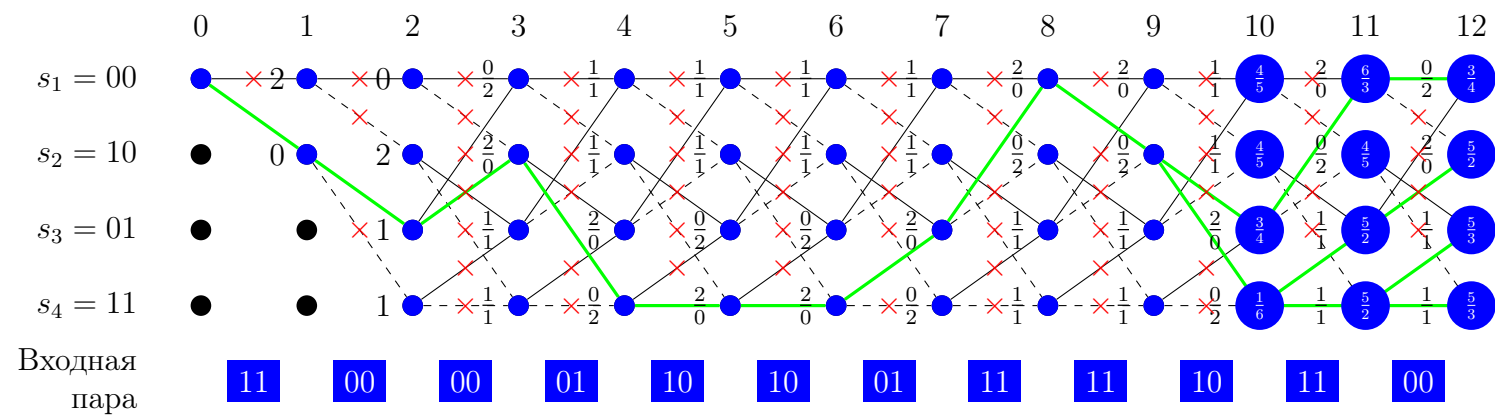


Рис. 14: Полная решетка декодера.

Наложив полученный путь на решетку кодера, узнаем декодированное слово.  $\overline{m}_{получ} = 101111001$