



М.С. Светлов<sup>1</sup>, А.А. Львов<sup>2</sup>, Д.В. Кленов<sup>2</sup>, О.М. Балабан<sup>2</sup>

## НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА КОДА НА ОСНОВЕ КОДОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРИЗНАКА

(<sup>1</sup>Институт проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов);

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет  
имени Ю.А. Гагарина)

Рассмотрим обобщенный информационный канал (ИК) как совокупность устройств кодирования (КУ), декодирования (ДКУ) и канала связи (КС). Будем считать, что в КС действуют импульсные случайные помехи аддитивного характера большой интенсивности:  $i_{pn} = f_{pn}/f_c \geq 3$  ( $i_{pn}$  – интенсивность случайной помехи;  $f_{pn}$ ,  $f_c$  – частоты импульсной помехи и кода, соответственно). Одной из основных задач, решаемых при синтезе ИК, является обеспечение необходимого уровня помехоустойчивости. Некоторые практические примеры цифровых информационных систем с оценкой помехоустойчивости ИК, работающих в условиях действия помех большой интенсивности, рассмотрены в [1] и [2]. Количественно помехоустойчивость ИК характеризуется значениями вероятностей правильного ( $p_{cr}$ ), ложного ( $p_{fr}$ ) приёмов и защитного отказа ( $p_{pf}$ ). Традиционно задача повышения помехоустойчивости решается за счет минимизации значения вероятности ложного приема. В идеальном случае это ведет к увеличению значения вероятности правильного приема. Однако в ряде случаев рост значения вероятности защитного отказа также допустим. Обычным способом решения данной задачи является применение корректирующих кодов [3], [4]. В случае действия помех большой интенсивности корректирующая способность таких кодов оказывается не достаточной для обеспечения требуемых показателей по информационной надежности. Поэтому предлагается в дополнение к стандартному каскадному кодированию, используемому в ИК, на последней ступени кодирования применять код с использованием кодового сигнального признака (КСП). Далее для определённости будем считать, что в ИК используется двухступенчатое кодирование с применением на первой ступени некоторого первичного (в общем случае корректирующего) кода (ПК), а на второй ступени – вторичного кода (ВК) с КСП (рис. 1).

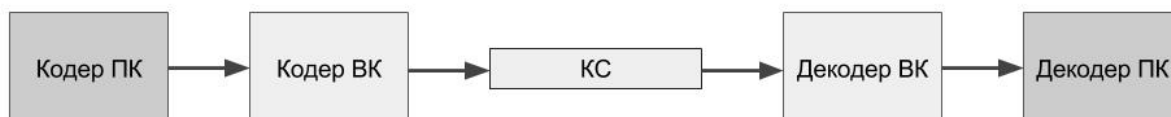


Рисунок 1: Структура ИК с использованием ПК и ВК

Как известно, сигнальный признак кода характеризует информационный параметр передаваемого по КС сигнала, определяет вид его модуляции и во многом – его свойства и особенности. В теории кодирования рассматривается шесть различных сигнальных признаков. Пять из них – амплитудный, времен-



ной, частотный, фазовый, полярный – являются первичными сигнальными признаками, а шестой – КСП считается вторичным (защитным) [5]. Принцип использования ВК с КСП состоит в том, что каждый символ ПК представляется в виде  $n$ -разрядного двоичного кодового слова ( $n$ -разрядной двоичной последовательности) с фиксированными межразрядными (межсимвольными) расстояниями (задержками). На физическом уровне (в КС) сигнал передатся как последовательность определенного количества рабочих импульсов, занимающих временные позиции, соответствующие по номерам единичным разрядным символам ВК и имеющих принципиально малые длительности  $\tau$ . При этом первый рабочий импульс формируется с некоторой фиксированной начальной задержкой  $\Delta t_0$  относительно поступления сигнала символа ПК на кодер ВК. Последующие рабочие импульсы формируются через интервалы времени, величины которых кратны некоторому значению времени задержки  $\Delta t$ . Как было показано в [5], для обеспечения высокого уровня помехоустойчивости значения величин задержек  $\Delta t_0$  и  $\Delta t$  должны быть строго постоянными и одинаковыми для кодера и декодера кода с КСП. При этом должно выполняться условие:  $\Delta t_0 \neq k\Delta t$ , где  $k \in \mathbb{N}$ . В общем случае, формирование  $j$ -го рабочего импульса происходит в момент времени

$$T_j = \Delta t_0 + (j-1)\Delta t, \quad 1 \leq j \leq n \quad (1)$$

после поступления импульса ПК на КУ ВК. Формирование всех импульсов завершается за время  $T_A = \Delta t_0 + (n-1)\Delta t$ . Для корректной работы кодера должно выполняться неравенство  $T_A \leq T_P$ , где  $T_P$  – время передачи одного символа ПК.

Процедуры и алгоритмы кодирования и декодирования для кода с КСП хорошо известны. В частности, их подробное исследование приведено авторами в [1], а в [6] получены аналитические формулы. Одним из центральных элементов кода с КСП является набор кодовых слов, удовлетворяющих определенным требованиям. В предыдущих работах кодовые слова детально не изучались. В данной работе их свойства рассмотрены более подробно.

Будем считать, что в общем случае алфавит ПК является  $K$ -ичным, т.е. его символы могут быть пронумерованы от 1 до  $K$ , а их значения лежат в диапазоне  $[0, K-1]$ . Далее под фразой "символ  $i$ " будем иметь в виду символ с номером  $i$  и значением  $i-1$ . Поставим в соответствие каждому символу  $i$  ПК некоторое двоичное кодовое слово  $A_i$ . Таким образом, получим набор из  $K$  кодовых слов ВК:  $A = \{A_i\}_{i \in [1, K]}$ . Рассмотрим некоторые свойства этого набора.

1. Слово  $A_i$  имеет длину  $n$ , где  $n \geq 5$ .
2. Слово  $A_i$  содержит ровно  $m_1$  единичных разрядов, при этом  $3 \leq m_1 \leq n-2$ , что, в свою очередь, означает, что позиции единичных символов в слове могут быть занумерованы и обозначены через  $\mu_{iu}$ , где  $1 \leq u \leq m_1$ ,  $1 \leq \mu_{iu} \leq n$ .
3. Слово  $A_i$  начинается и заканчивается единицей, иными словами,  $\mu_{i1} = 1, \mu_{im_1} = n$ . Данное свойство необходимо для обеспечения режима самосинхронизации [7].



Как правило, для повышения помехоустойчивости кода с КСП к набору  $A$  предъявляются дополнительные требования. Одним из таких требований может быть интервальное условие для набора кодовых слов. Для точной формулировки этого условия введем несколько определений.

**Определение 1.** Будем говорить, что каждое кодовое слово  $A_i \in A$  порождает набор попарных разностей позиций  $S_i = (\mu_{iv} - \mu_{iu})_{1 \leq u < v \leq m_1}$ . В общем случае некоторые элементы в этом наборе могут повторяться.

**Определение 2.** Назовем набор кодовых слов  $A$  отвечающим интервальному условию, если верны два утверждения:

- Для каждого слова  $A_i$  его порожденный набор попарных разностей  $S_i$  не содержит повторяющихся элементов;
- $S_i \cap S_j = (n-1)$  при  $i \neq j$ .

Первое утверждение говорит о том, что в кодовом слове  $A_i$  отсутствуют одинаковые попарные разности позиций единиц. Второе утверждение устанавливает такое же ограничение на весь набор  $A$ , допуская лишь повторение разности позиций, созданной парой единиц  $(\mu_{i1}, \mu_{im_1})$  каждого слова  $A_i$ .

**Следствие 1.** В наборе кодовых слов  $A$  все позиции единиц, кроме 1 и  $n$ , различны. Действительно, пусть есть две совпадающие позиции  $\mu_{iu} = \mu_{jv} = \mu$ ,  $i \neq j$ . В этом случае  $S_i \cap S_j = (\mu-1, n-\mu, n-1)$ , что противоречит условию.

**Следствие 2.** Если набор кодовых слов  $A$  удовлетворяет интервальному условию, то в этом наборе достигается максимальное кодовое расстояние между словами. Действительно, т.к. все позиции единиц, кроме 1 и  $n$ , различны, то существует ровно  $m_1 - 2$  позиций единиц, присутствующих только в одном кодовом слове. Следовательно, для набора  $A$  кодовое расстояние  $d_{min} = 2(m_1 - 2)$ . С другой стороны, в [3] и [8] было показано, что  $2(m_1 - 2) = (d_{min})_{max}$ , что в совокупности дает итоговое утверждение.

Таким образом, дополнительно потребовав выполнения интервального условия для набора кодовых слов  $A$ , можно улучшить корректирующую способность кода с КСП при заданных значениях  $n$  и  $m_1$ .

При этом, что крайне важно для повышения пропускной способности КС, кодовые слова, синтезируемые на базе интервального принципа, обладают минимальной длиной.

### Литература

1. Львов А.А. Повышение информационной надежности цифровых систем с QAM/COFDM модуляцией / А. А. Львов, М. С. Светлов, П. В. Мартынов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: "Математика. Механика. Информатика." - 2014. - Т. 14. - № 4. - Ч. 1. - С. 473-482.

2. Светлов М.С. Принципы обеспечения повышенной надежности дистанционного тестового контроля / М. С. Светлов, А. А. Львов, Д. В. Кленов // Материалы 13 международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". - Саратов, 2016. - С. 403 - 408.



3. Peterson W.W. Error-correcting codes / W. W. Peterson, E. J. Weldon. - Cambridge, Massachusetts and London, England: The MIT Press Publ., 1972. - 593 с.

4. Golomb S.W. Digital Communications with Space Applications / S. W. Golomb. - New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall Publ., 1964. - 272 с.

5. Юргенсон Р. И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации / Р. И. Юргенсон. - Л.: Энергия, 1971. - 250 с.

6. Svetlov M. S. Algorithms of Coding and Decoding for Code with Code Signal Feature / M. S. Svetlov, A. A. L'vov, D. V. Klenov, O. N. Dolinina // Proceedings of 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. - St. Petersburg, 2017.

7. Львов А. А. Самосинхронизация в информационных каналах с помехами большой интенсивности / А. А. Львов, М. С. Светлов, П. В. Мартынов // Радиотехника. - 2015. - №7. - С. 18-21.

8. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // Bell System Technical Journal. — 1948. — Vol. 27. — P. 379—423.

M.S. Svetlov<sup>1</sup>, A.A. L'vov<sup>2</sup>, D.V. Klenov<sup>2</sup>, A.H. Askarova<sup>2</sup>, M.K. Svetlova<sup>2</sup>

## INTER-SYMBOL INTERFERENCES PROTECTION IN SINGLE FREQUENCY NETWORKS

(<sup>1</sup>Institute of Precision Mechanics and Control of RAS (Saratov);

<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov)

In digital communication systems widely use an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation of signal. In OFDM signal the amplitude and phase of the subcarrier must remain constant over the period of the symbol in order for the subcarriers to maintain orthogonality. If they are not constant it means that the spectral shape of the subcarriers will not have the correct *sinc* shape, and thus the nulls will not be at the correct frequencies, resulting in Inter-Carrier Interference (ICI). At the symbol boundary the amplitude and phase change suddenly to the new value required for the next data symbol. In multipath environments inter-symbol interference (ISI) causes spreading of the energy between the symbols, resulting in transient changes in the amplitude and phase of the subcarrier at the start of the symbol. Therefore, one of the most important tasks is the task of countering the negative effects caused by inter-symbol interferences due to multiple reflections of the signal in the radio channel.

The length of these transient effects corresponds to the delay spread of the radio channel. The transient signal is a result of each multipath component arriving at slightly different times, changing the received subcarrier vector. Figure 1 shows this effect [1]. Adding a guard period allows time for the transient part of the signal to decay, so that the fast Fourier transform (FFT) is taken from a steady state portion of the symbol. This eliminates the effect of ISI provided that the guard period is longer