

## РАДИОТЕХНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 004.056

### ТАЙМЕРНЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КАК ИНСТРУМЕНТ КОДОВОГО УПЛОТНЕНИЯ КАНАЛОВ

*Захарченко Н.В., Швець О.В., Седов К.С., Данильчук А.Г.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[ovshvets@ukr.net](mailto:ovshvets@ukr.net)*

### ТАЙМЕРНІ СИГНАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ КОДОВОГО УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛІВ

*Захарченко М.В., Швець О.В., Седов К.С., Данильчук О.Г.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[ovshvets@ukr.net](mailto:ovshvets@ukr.net)*

### TIMED SIGNAL CONSTRUCTIONS AS A TOOL FOR CODE CHANNEL MULTIPLEXING

*Zaharchenko N.V., Shvets O.V., Sedov K.S., Danylchuk A.H.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[ovshvets@ukr.net](mailto:ovshvets@ukr.net)*

**Аннотация.** Оценивается целесообразность передачи в одном кодовом слове информации от двух и более источников, предложен алгоритм увеличения информационной емкости найквистового элемента в двоичном канале без увеличения длительности кодового слова. Многократное использование каналов связи заключается в том, что по нему осуществляется независимая передача информации от нескольких источников. При этом, для каждой пары корреспондентов (источника и получателя) предоставляется индивидуальный канал, в результате чего система в целом становится многоканальной. В системах связи получили распространение многоканальные системы с разделением каналов по физическим признакам используемых сигналов. По этому признаку различают системы с амплитудным методом уплотнения (АРК), частотным (ЧРК), фазовым (ФРК), временным (ВРК). При этом, часто используемый параметр сигнала (амплитуда, частота или фаза) применяется в относительном режиме модуляции. Следует заметить, что указанные выше методы модуляции и разделения каналов недостаточно эффективно используют полосу частот и время передачи. В данной статье рассматривается двукратное (или Z-кратное) уплотнение интервала реализации кодовых конструкций, каждое из которых содержит информацию о двух (или Z) символах передаваемого текста. Проведено сравнение затрат времени на синтез укрупненных сигнальных кодовых слов, обеспечивающих передачу информации о Z - символах при позиционном кодировании и использование укрупненных кодовых конструкций, генерируемых на базе таймерных сигналов. Проведенные оценки подтверждают, что таймерные сигналы снижают затраты времени более чем в два раза по сравнению с позиционным кодированием. Такая эффективность таймерного кодирования обеспечивается различными значениями минимального энергетического расстояния между кодовыми словами при позиционном и таймерном кодировании: в первом случае это расстояние определяется энергией найквистового элемента, во втором – энергией базового элемента  $\Delta$ , который в 5...7 раз по длительности меньше найквистового элемента и определяется полосой пропускания канала.

**Ключевые слова:** информация, энтропия, найквистовый элемент.

**Анотація.** Оцінюється доцільність передачі в одному кодовому слові інформації від двох і більше джерел, запропонований алгоритм збільшення інформаційної ємності найквистового елемента

*Захарченко Н.В., Швець О.В., Седов К.С., Данильчук А.Г.*

в двійковому каналі без збільшення тривалості кодового слова. Багаторазове використання каналів зв'язку полягає в тому, що при ньому здійснюється незалежна передача інформації від декількох джерел. При цьому, для кожної пари кореспондентів (джерела й отримувача) надається індивідуальний канал, в результаті чого система в цілому стає багатоканальною. У системах зв'язку набули поширення багатоканальні системи з поділом каналів за фізичними ознаками використовуваних сигналів. За цією ознакою розрізняють системи з амплітудним методом ущільнення (АРК), частотним методом ущільнення (ЧРК), фазовим методом ущільнення (ФРК) та часовим методом ущільнення каналів (ЧсРК). При цьому, часто використовуваний параметр сигналу (амплітуда, частота або фаза) застосовується у відносному режимі модуляції. Слід зауважити, що зазначені вище методи модуляції і поділу каналів недостатньо ефективно використовують смугу частоти і час передачі. У даній статті розглядається двократне (або Z-кратне) ущільнення інтервалу реалізації кодових конструкцій, кожне кодове слово містить інформацію про двох (або Z) символів передаваного тексту. Проведено порівняння затрат часу на синтез укрупнених сигнальних кодових слів, що забезпечують передачу інформації про Z-символи при позиційному кодуванні і використання укрупнених кодових конструкцій, що генеруються на базі таймерних сигналів. Проведені оцінки підтверджують, що таймерні сигнали знижують витрати часу більш ніж в два рази порівняно з позиційним кодуванням. Така ефективність таймерного кодування забезпечується різними значеннями мінімальної енергетичної відстані між кодовими словами при позиційному і таймерному кодуванні: в першому випадку це відстань визначається енергією найквістового елемента, у другому – енергією базового елемента  $\Delta$ , який в 5...7 разів за тривалістю менше найквістового елемента і визначається пропускну здатністю каналу.

**Ключові слова:** інформація, ентропія, найквістовий елемент.

**Abstract.** The feasibility of transmitting information from two or more sources in one code word is evaluated, an algorithm is proposed for increasing the information capacity of a Nyquist's element in a binary channel without increasing the length of a code word. Reuse of communication channels is that it is carried out an independent transfer of information from several sources. At the same time, for each pair of correspondents (source and receiver) an individual channel is provided, because of which the system as a whole becomes multi-channel. In communication systems, multichannel systems have become common with channel separation based on the physical characteristics of the signals used. On this basis, there are systems with an amplitude compaction method (ASC), frequency compaction method (FSC), phase compaction method (PSC), and time channel compaction method (TSC). At the same time, often used signal parameter (amplitude, frequency or phase) is applied in the relative modulation mode. It should be noted that the above methods of modulation and channel separation do not efficiently use the frequency band and transmission time. In this article, a two-fold (or Z-fold) multiplexing of the implementation interval of code constructions is considered: each codeword contains information about two (or Z) characters of the transmitted text. The paper compares the time spent on the synthesis of enlarged signal codewords that ensure the transmission of information on Z symbols in positional coding and the use of enlarged code constructions generated on the basis of timer signals. Estimates confirm that the time-based signals reduce the time costs by more than two times as compared with positional coding. Such efficiency of timer coding is provided by different values of the minimum energy distance between code words in positional and timer coding: in the first case, this distance is determined by the energy of the Nyquist's element, and in the second, by the energy of the base element  $\Delta$ , which is 5...7 times smaller, than the Nyquist's element and determined by the channel bandwidth.

**Key words:** information, entropy, Nyquist's element.

В современном мире одной из задач развития сферы телекоммуникаций является обеспечение качества обслуживания, которое состоит в повышении скорости передачи информации и её достоверного приёма. Решение данной задачи возможно при помощи применения таймерного кодирования в системе передачи информации. В этом направлении работали такие ученые, как Захарченко Н.В., Басов В.Е., Улеев А.П., Гайдар В.П. и другие, рассматривая в своих трудах методы повышения эффективности использования каналов связи, эффективность компенсации избыточности кода при использовании таймерных сигналов. Поэтому, **целью данной работы** является сравнение эффективности использования основного положительного свойства таймерных сигналов – мощности (количество реализаций) ансамблей – их намного больше по сравнению с позиционным кодированием на одном и том же интервале времени.

**Эффективность позиционного кодирования.** При позиционном кодировании подлежащие передаче символы номеруются в десятичной системе счисления. Максимальный номер десятичной системы ( $N_M(10)$ ) используется для определения элементности простого кода  $m(a)$ , при использовании основания системы  $a$ , соответствующей числу различных значений информационного параметра в данном канале [2] при двух различных параметрах  $a = 2$ , при трёх  $a = 3$  и т.д.

$$\left. \begin{aligned} m(a=2) &= \log_2 N_M(10) \\ m(a=3) &= \log_3 N_M(10) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Любой десятичный номер  $N(10)$ , подлежащего передаче символа или события, представляется в системе с выбранным основанием  $a$  [1]

$$N(10) = \alpha_n a^n + \dots + \alpha_2 a^2 + \alpha_1 a^1 + \alpha_0, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициенты уравнения (2)  $\alpha \in 0;1;2\dots a-1$ ; при  $a = 2$   $\alpha \in 0;1$ ; при  $a = 3$   $\alpha \in 0;1;2$  и т.д.

Например, число 26 будет представлено:

при  $a = 2$ ;  $\alpha \in 0;1$   $26 \rightarrow 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \rightarrow 11010$ ;

при  $a = 3$ ;  $\alpha \in 0;1;2$   $26 \rightarrow 2 \cdot 3^2 + 2 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 \rightarrow 2 \cdot 2 \cdot 2$ .

Из последних двух представлений числа 26 можно сделать выводы:

1) при увеличении основания  $a$  уменьшается количество цифр, представляющих одно и то же десятичное число;

2) с увеличением " $a$ " информационный параметр канала должен иметь большее число нормируемых различительных значений.

С целью создания условий организации циклового фазирования и синхронизации системы связи, кодовые конструкции для всех передаваемых символов обычно формируются одинаковой длительности (элементности  $m$ ). Для этого, в каждом номере передаваемых символов в системе с основанием  $a$  (2 или 3), правее последней цифры 2 или 1 добавляются нули.

Отдельные цифры двоичных или троичных номеров кодируемых символов передаются в канал связи отрезками сигналов с длительностями, обеспечивающими окончание переходных процессов на выходе канала при передаче любой цифры. Минимальная длительность одного отрезка равна так называемому интервалу Найквиста [2]:

$$t_0 = \frac{1}{\Delta F}. \quad (3)$$

где  $\Delta F$  – полоса пропускания канала.

Кодовое множество, полученное таким методом, называется простым кодом. Такой код характеризуется минимальным кодовым расстоянием  $d_0 = 1$  [2].

Для обнаружения или обнаружения и исправления появляющихся в канале ошибок к информационным  $m$  элементам формируются  $k$ -проверочных или избыточных элементов. Каждый избыточный элемент представляет сумму по mod2 определенных информационных элементов. Таким образом, кодовое слово состоит из  $n$  элементов:

$$n = m + k. \quad (4)$$

Следует заметить, что на значение числа  $k$  существенно влияет искомое кодовое расстояние  $d_0$  и число информационных элементов.

Число избыточных элементов  $k$  определяется из условия Варшавова-Гильберта [3]:

$$2^k \geq \sum_{i=0}^{d_0-2} C_{n-1}^i. \quad (5)$$

Если при заданных параметрах кода соблюдено условие (5), то такой код обеспечивает  $k$  проверок на четность, что позволяет обнаруживать и исправлять соответствующие ошибки. В табл. 1 показано число избыточных элементов при  $m \in 1...12$  для 3-х значений  $d_0 \in 3; 4; 6$ .

Таблица 1 – Количество избыточных элементов

$d_0 \backslash m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5
4	3	5	5	6	6	7	7	7	7	8	8	8
6	5	9	10	11	11	12	12	13	13	14	14	14

Из табл. 1 следует, что число избыточных элементов существенно зависит от  $d_0$ , и при  $d_0 \geq 6$  и  $m \in 1...15$  число информационных элементов  $k > m$ . При таком соотношении информационных и проверочных элементов эффективность кода [1] равна:

$$\gamma = \frac{m}{m+k} = \frac{m}{n} \leq 0,5,$$

что говорит о его низкой эффективности.

Оценим коэффициент  $\gamma$  для блочных кодов семейства Слепяна, имеющих  $n \leq 11$  (табл. 2).

Таблица 2 – Коэффициент  $\gamma$  для блочных кодов семейства Слепяна

$n$	5	6	7	8	9	10	10	11	11
$m$	2	3	4	4	5	5	6	5	6
$k$	3	3	3	4	4	5	4	6	5
$\gamma = m:n$	0,4	0,5	0,57	0,5	0,55	0,5	0,6	0,45	0,54

Из табл. 2 следует, что при длине кода  $n \leq 11$  коэффициент эффективности не превышает величины  $\gamma = 0,6$ . С другой стороны, необходимо помнить, что при позиционном кодировании – большие затраты времени на передачу двоичного номера кодового слова. Например, при десятичном номере  $N(10) = 1005$ , который в двоичном виде соответствует числу:

$$1005 \rightarrow 1 \cdot 2^9 + 1 \cdot 2^8 + 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 1111101001.$$

Следовательно, необходимо потратить 10 элементов Найквиста, что довольно много при современном темпе изменения событий; в последнем примере учтены только информационные элементы.

Анализируя блочное позиционное кодирование, следует отметить:

1) в избыточных позиционных кодах при исправлении ошибок кратности больше двух требуется большее число элементов по сравнению с позиционными.

2) при передаче в двоичном канале кодовых слов из ансамблей с максимальным номером  $N_m(10) > 1000$  требуется больше 10 двоичных цифр, каждая из которых равна длительности  $t_0 = \frac{1}{\Delta F}$ .

**Таймерное кодирование.** В отличие от позиционного кодирования, при котором информация о передаваемом символе в двоичном канале передается несколькими  $n$  элементами с длительностями равными или кратными найквистовому элементу  $t_0 = 1/\Delta F$ , при таймерном кодировании информация "заложена" в длительности нескольких  $i$  информационных отрезках  $\tau_{ci}$ , относящихся к одному кодовому слову и удовлетворяющих условию [3]:

$$\tau_{ci} = t_0 + Z\Delta. \tag{6}$$

Первое слагаемое (6) обеспечивает установление переходного процесса на выходе канала, а второе (ZΔ) содержит информацию о передаваемом символе.

Элемент Δ представляет минимальную разницу по длительности информационных отрезков  $\tau_{ei}$  (различительная способность длительностей  $\Delta = t_0 / S$ ;  $S \in 2 \dots S_0$  – целые). Такое формирование сигнальных конструкций обеспечивает резкое увеличение мощности синтезируемого ансамбля на интервале  $m$  элементов при заданных значениях  $i, S$  [3]

$$N_p = \frac{(mS - i(S-1))!}{i!(mS - iS)!} \quad (7)$$

Например, при  $i = 3$ ;  $m = 5$ ;  $S = 7$  число реализаций (согласно (7)) составит 680 кодовых слов, что в 21,25 раз больше, чем при позиционном кодировании ( $680:2^5 = 680:32 = 21,25$ ).

Рассмотрим целесообразность и возможность использовать число отрезков в кодовом слове  $i(6)$  для увеличения числа реализаций на интервале  $m = \text{const}$ .

Учтем, что численными информационными параметрами, как позиционных, так и таймерных кодов являются энтропия кодового множества ( $H$ ) и информационная емкость найквистового элемента  $I_H$  которые вычисляются [4]:

$$\left. \begin{aligned} H &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ P(x_i) &= \frac{1}{N_{P(x_i)}} < 1 \\ I_H &= \frac{H}{m} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В табл. 3 показано количество реализаций кодовых слов на интервалах  $m \in 4 \dots 10$ ;  $S \in 2 \dots 10$  при  $i = 3$ , вычисленных согласно выражению (7).

Таблица 3 – Количество реализаций ТСК при  $m \in 4 \dots 10$ ;  $S \in 2 \dots 10$  для  $i = 3$

$S \backslash m$	4	5	6	7	8	9	10
2	10	35	84	165	286	455	680
3	20	84	220	455	816	1330	2024
4	35	165	455	969	1771	2925	4495
5	56	286	816	1771	3276	5456	8436
6	84	455	1330	2925	5456	9139	14190
7	120	680	2024	4495	8436	14190	22100
8	165	969	2925	6545	12341	20825	32509
9	220	1330	4060	9139	17296	29260	45760
10	286	1771	5456	12341	23426	39711	62196

В табл. 4 показано число реализаций ТСК, вычисленных по формуле 7 при  $m \in 4 \dots 10$ ;  $S = 7$  и изменении количества отрезков в кодовых словах  $i$  реализованных на интервалах  $m$ .

Таблица 4 – Количество ТСК при  $S = 7$ ;  $m \in 4 \dots 10$ ;  $i \in 1 \dots 6$

$i$	$m$	4	5	6	7	8	9	10
	$N_{pn}=2^m$	16	32	64	128	256	512	1024
1		22	29	36	43	50	57	64
2		120	253	435	666	946	1275	1653

3	120	680	2024	4495	8436	14190	22100
4	1	330	3060	12650	35960	82251	163185
5	0	1	792	11628	65780	237336	658008
6	0	0	1	1716	38760	296010	1344904

Общими в табл. 3 и 4 являются строка 7 табл. 3 и строка 3 табл. 4.

Анализ этих двух методов увеличения количества реализаций таймерных сигналов показывает, что при использовании первого метода (табл. 3) можно существенно увеличить число реализаций  $N_p$  или за счет увеличения интервала реализаций  $m$ , или уменьшения зоны  $\Delta$  ( $\Delta = t_0 / S$ ). В обоих случаях это нецелесообразно, так как увеличивая длительность кодового слова мы уменьшаем эффективность использования канала, а при увеличении  $S$  уменьшается величина  $\Delta$ , что приводит к увеличению вероятности ошибочного приема кодового слова. Практика показывает, что для каналов городской телефонной сети [4] устойчивую работу можно обеспечить при  $S = 7$ .

Преимущество ансамблей реализаций, показанных в табл. 4, состоит в том, что при любом постоянном интервале реализаций  $m$  можно синтезировать ТСК с различным числом отрезков  $i$ , обеспечивая увеличение мощности ( $N_{p\Sigma}$ ) искомого ансамбля. Например, при необходимости передавать в одном кодовом слове информацию о двух любых символах русского текста, число пар символов составит  $(2^5 \times 2^5 = 32 \times 32) = 1024$ . Такое количество реализаций можно получить, суммируя множества, реализованные на интервале  $m = 5$  (так как при  $m = 4$  сумма реализаций меньше 1024)

$$N_{p\Sigma} = N_p(i = 3) + N_p(i = 4) + N_p(i = 2).$$

$$N_{p\Sigma} = 680 + 330 + 14 = 1024.$$

В данном примере 14 кодовых слов взято из числа реализации при  $i = 2$  (табл. 4).

За счет данного метода формирования ансамблей обеспечивается передача в каждом кодовом слове длиной  $T_{ck} = 5t_0$ , информации о двух символах передаваемого текста. Так как текст случайный, то будем считать, что все кодовые слова передаются с вероятностью  $P(x_i) = 1 / 1024$ .

В этом случае, согласно (8), энтропия каждого кодового слова составит [5]:

$$H = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log^2 P(x_i) = \log^2 P(x_i) \times [P(x_1) + P(x_2) + \dots + P(x_{1024})]. \quad (9)$$

Так как в квадратных скобках находится 1024 слагаемых величиной  $1 / 1024$ , то сумма равна 1. Следовательно, значение

$$H = -\log_2 \frac{1}{1024} = -\log_2 1 + \log_2 1024 = 10.$$

$$I_{\text{н}} = \frac{H}{m} = \frac{10}{5} = 2.$$

Таким образом, не увеличивая интервала реализации кодовых конструкций ( $m = 5$ ) в двоичном канале, за счет использования таймерных сигналов увеличивается в два раза скорость передачи информации по сравнению с позиционным кодированием.

Отсюда делаем вывод:

1. Использование позиционного кодирования приводит к увеличению времени передачи информации более чем в два раза, по сравнению с таймерными кодами.

2. Таймерные сигналы имеют минимальное энергетическое расстояние в кодовых словах, в 5...7 раз меньше, по сравнению с позиционным кодированием, что обеспечивает увеличение их количества на одном и том же расстоянии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / [Зюко А.Г., Фалько А.И., Банкет В.Л., Иващенко П.В.] ; под ред. А.Г. Зюко. М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
2. Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов / Игнатов В.А. – М.: Сов.радио, 1979. – 280 с.
3. Методы повышения эффективности использования каналов связи / [Захарченко Н.В., Гайдар В.П., Улеев А.П., Липчанский А.И.]. – К.: Техніка, 1998. – 248 с.
4. Захарченко Н.В. Эффективность компенсации избыточности кода при использовании таймерных сигналов / Н.В. Захарченко, В.Е. Басов // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – Вип. 31. – К., 2005. – С. 6-13.
5. Теоретические основы связи и управления / [Фельдбаум А.А. и др.]. – М.: ФМ, 1963. – 934 с.

REFERENCES:

1. Zyuko A.G., Falko A.Y., Banket V.L., Yvashhenko P.V. "Immunity and efficiency of information transmission systems", Radio and communication, 1985.- 304 p.
2. Ignatov V.A. "Information Theory and Signaling", Sov. radio 1979 . – 280 p.
3. Zakharchenko N.V., Gajdar V.P., Uleev A.P., Lypchanskyj A.Y. "Methods to improve the efficiency of use of communication channels", Tehnika, 1998. – 248 p.
4. Zakharchenko N.V., Basov V.E. "Efficiency of code redundancy compensation using timer signals" Proc. of the Design and information technologies №31 (2005): 6-13.
5. Feldbaum A.A. "Theoretical foundations of communication and control", FM, 1963. – 934 p.

DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-1-5-11