

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАЙМЕРНЫХ СИГНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ПЕРЕМЕННЫМ ЧИСЛОМ ПЕРЕХОДОВ**

**EFFICIENCY OF USAGE OF TIMER SIGNAL CONSTRUCTIONS
WITH VARIABLE TRANSITION NUMBER**

Аннотация. В статье исследуется вопрос увеличения пропускной способности бинарных каналов связи с помощью таймерных сигнальных конструкций с переменным числом значащих моментов модуляции. Определена функциональная зависимость между мощностью сигнальных конструкций и параметрами таймерных сигналов.

Summary. In the article the question of increase of binary channels throughput with the help of timer signal constructions with variable number of the meaning moments of modulation is considered. The functional dependence between capacity of signal constructions and parameters of timer signals is determined.

В связи с резким увеличением объемов информации более актуальной становится проблема качественной и быстрой ее передачи. Сегодня в Украине нет материальных ресурсов для замены всех каналов связи на современные, реализующие большие пропускные способности. Следовательно, необходимо более эффективно использовать существующие каналы.

Эффективное использование каналов связи подразумевает, в частности, увеличение пропускной способности каналов связи. Структура таймерных сигналов позволяет увеличить пропускную способность канала связи за счет обмена качества передачи на скорость [1, 2].

В [2, 3] рассмотрено использование сигнальных конструкции (СК) либо переменным количеством значащих моментов модуляции (ЗММ) ($i = \overline{1, m}$), либо с числом переходов, обеспечивающим максимальное количество реализаций. Использование таймерных сигналов с постоянным числом переходов позволяет упростить приемные устройства и выявить дробления с помощью подсчета числа переходов. Однако не рассмотрено использование двух подмножеств. Так как возникающие дробления сигнала приводят к изменению числа переходов на величину, кратную двум [4], то в качестве разрешенных пар подмножеств целесообразно использовать конструкции, в которых первое подмножество имеет оптимальное число переходов i_0 , а второе – $i_0 + 1$ или $i_0 - 1$. Целью данной статьи является рассмотрение эффективности использования таких множеств сигнальных конструкций.

1. Функциональная зависимость между мощностью кодового множества и параметрами сигнальных конструкций. В таймерных сигналах (ТС) информация о передаваемом символе содержится не в значениях параметра сигнала, в котором заложена информация, а в местах нахождения ЗММ на интервале формирования сигнальной конструкции [2]. Минимальное отличие мест нахождения ЗММ в таймерных конструкциях меньше длительности найквистового элемента (t_0) в s раз ($s = t_0/\Delta$, Δ – базовый элемент).

Количество реализаций ТС на временных интервалах (mt_0) при разных s для сигналов с переменным количеством ЗММ различно [3], причем при заданных s ($s = t_0/\Delta$) и i на интервале m единичных элементов мощность сигнального алфавита бинарных ТС определяется как

$$N_p = C_{ms-i(s-1)}^i, \tag{1}$$

где i – число информационных ЗММ в сигнале.

Мощность сигнального алфавита бинарных ТС растет нелинейно с увеличением s или m , и обычно задается табличным методом [3]. Не существует формулы, позволяющей рассчитывать количество реализаций для дробных значений m или s . Для приведения количества реализаций к линейному виду раскроем формулу (1)

$$\begin{aligned} N_p &= C_{ms-i(s-1)}^i = \frac{(ms - is + i)!}{i!(ms - is + i - i)!} = \\ &= \frac{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (ms - is) \cdot (ms - is + 1) \cdot \dots \cdot (ms - is + i)}{i! \cdot 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (ms - is)} = \\ &= \frac{1}{i!} \cdot \underbrace{(ms - is + 1) \cdot (ms - is + 2) \cdot \dots \cdot (ms - is + i)}_{i \text{ раз}}. \end{aligned} \tag{2}$$

Из (2) следует, что число реализаций определяется произведением i – сомножителей, каждый из которых отличается друг от друга на 1 среди чисел от 1 до i . Рассмотрим влияние последнего слагаемого в каждом сомножителе. Например, возьмем конструкцию с $i = 3, s = 5, m = 7$.

$$ms - is + 1 = 7 \cdot 5 - 3 \cdot 5 + 1 = 21;$$

$$ms - is + 2 = 7 \cdot 5 - 3 \cdot 5 + 2 = 22;$$

$$ms - is + 3 = 7 \cdot 5 - 3 \cdot 5 + 3 = 23.$$

Как видно из приведенного примера, сомножители незначительно отличаются от среднего. Так как мы рассчитываем количество реализаций при каком-то постоянном i , то, взяв корень i -й степени из N_p , и изменяя какой-либо параметр s или m , мы получим линейные зависимости $\sqrt[i]{N_p(s)}$ или $\sqrt[i]{N_p(m)}$, погрешность которых будет достаточно мала. На рис. 1 показаны такие зависимости для различных s и m при $i = 3$ и 4.

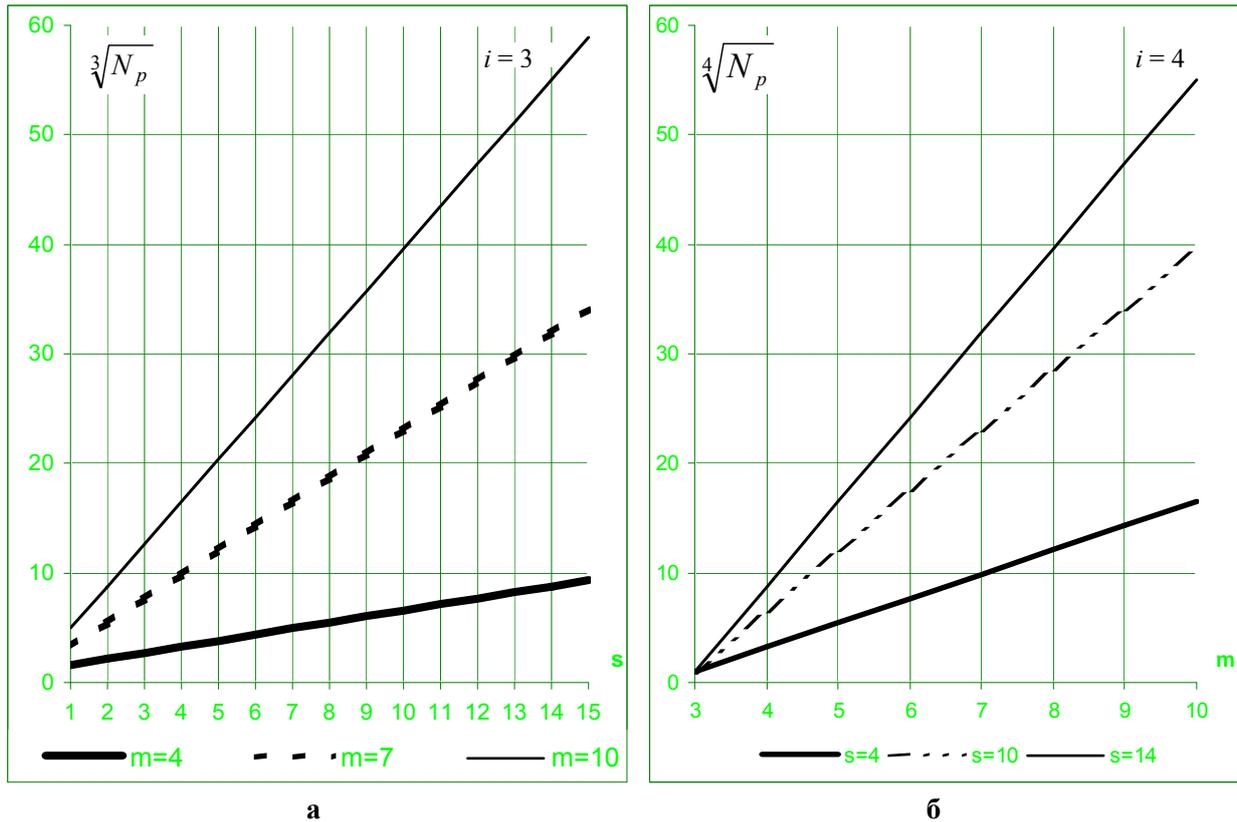


Рисунок 1 – Зависимости количества реализаций таймерных конструкций:

а) $\sqrt[3]{N_p(s)}$; б) $\sqrt[4]{N_p(m)}$.

Найдем коэффициенты линейных зависимостей, приведя их к виду $y = (kx + b)^i$. Так как, согласно (2), число реализаций определяется параметрами m, s и i , то для каждого набора этих величин будут свои коэффициенты линейных уравнений. Для примера в табл. 1 приведены аналитические уравнения таких зависимостей для $i = 3, 4$ и $m = 4, 10$. Там же указана погрешность вычислений с помощью приведенных соотношений по сравнению с вычислениями по формуле (1).

Таблица 1 – Формулы для определения количества реализаций ТС

m	$i = 3$	Погрешность, %	$i = 4$	Погрешность, %
4	$N_p = (0,5533s + 1,0528)^3$	0,49	$N_p = 1$	0
5	$N_p = (1,1028s + 1,0689)^3$	0,29	$N_p = (0,4558s + 1,063)^4$	0,93
6	$N_p = (1,6526s + 1,0767)^3$	0,18	$N_p = (0,9066s + 1,0841)^4$	0,57
7	$N_p = (2,2026s + 1,0814)^3$	0,13	$N_p = (1,3578s + 1,0948)^4$	0,38
8	$N_p = (2,7528s + 1,0845)^3$	0,093	$N_p = (1,8092s + 1,1013)^4$	0,27
9	$N_p = (3,3029s + 1,0867)^3$	0,072	$N_p = (2,2607s + 1,1057)^4$	0,2
10	$N_p = (3,8531s + 1,0884)^3$	0,057	$N_p = (2,7123s + 1,1089)^4$	0,16

Полученные уравнения позволяют получить дробные значения m или s , что бывает необходимым при оценке эффективности различных методов кодирования и выборе оптимального.

2. Использование сигнальных конструкций с переменным числом информационных ЗММ. Если использовать сигнальные конструкции с $i = \text{const}$, оптимальное число ЗММ, позволяющих получить наибольшую мощность сигнального алфавита, равно $i_0 \approx m / 2$ [3]. Использование конструкций с числом переходов i_0 и $i_0 + 1$ или i_0 и $i_0 - 1$ приводит к увеличению мощности сигнального алфавита. При этом дробления в обоих подмножествах могут быть обнаружены подсчетом числа переходов, так как при воздействии дробления на конструкцию с $i = i_0$ ЗММ получим $i_0 + 2$ дробления, а на конструкцию с $i = i_0 + 1$ переходами – $i_0 + 3$ дробления. В табл. 2 приведено количество реализаций для таких конструкций при $s = 7$ и $m = 4, 5, 6, 7$.

Таблица 2 – Количество реализаций ТС при использовании конструкций с количеством переходов i и $i + 1$

m	i	N_p	$i + 1$	N_p	Σ
4	2	120	3	120	240
5	3	680	4	330	1010
6	3	2024	4	3060	5084
7	4	12650	5	11628	24278

Из табл. 2 видно, что использование сигнальных конструкций с различным числом переходов позволяет увеличить мощность используемого множества, что, в свою очередь, приводит к увеличению пропускной способности канала связи. Этот факт можно использовать двумя способами.

Рассмотрим алгоритм использования таймерных сигнальных конструкций для компенсации избыточности первичного разрядно-цифрового кода [3]. Для этого поступают следующим образом: вначале реализуют избыточный РЦК; после этого группы двоичных символов, представляющих собой части избыточного кодового слова, передаются с помощью таймерных сигналов. На приемной стороне полученные ТС декодируются в РЦК, и производится проверка на заданные соотношения. Для такого алгоритма передачи целесообразно использовать сигнальные конструкции с переменным числом ЗММ $i = 1, 2, \dots, m$. В табл. 3 приведено количество реализаций при использовании реализаций со всеми значениями i при $s = 7$ для различных m .

Таблица 3 – Количество реализаций ТС при использовании сигнальных конструкций с переменным числом ЗММ

m	Количество реализаций при i							Σ
	1	2	3	4	5	6	7	
4	28	120	120	1	-	-	-	269
5	35	253	680	330	1	-	-	1299
6	42	435	2024	3060	792	1	-	6354
7	49	666	4495	12650	11628	1716	1	31205

Из табл. 3 видно, что применение сигнальных конструкций с переменным значением i приводит к большему увеличению мощности сигнального алфавита, что, в свою очередь, позволяет увеличить скорость передачи по каналу связи.

В случае использования избыточных таймерных сигналов как самостоятельный код, необходимо обеспечить обнаруживающую способность кода. Для этого строят сигнальные конструкции, имеющие постоянное число ЗММ, которые расположены на местах, удовлетворяющих определенным соотношениям [4]:

$$A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n = 0 \pmod{A_0}, \quad (3)$$

где x_i – места нахождения ЗММ в пределах сигнальных конструкций; A_i – целые числа, определяющие свойства разрешенных сигнальных конструкций. Введение этого условия значительно сокращает количество разрешенных реализаций ТС.

Из рассмотренных примеров сигнальных конструкций можно сделать вывод о том, что наложение каждого очередного условия отбора разрешенных кодовых слов уменьшает мощность используемого множества. При заданных значениях m и s число реализаций для двоичного канала

равно 2^{ms} . Наложение первого условия отбора таймерных сигналов $\tau_c \geq t_0$ позволяет получить $N_{p\Gamma\Sigma} = \sum_{i=1}^m C_{ms-i}^i$. Выбор сигнальных конструкций с постоянным (оптимальным) числом переходов i_0 обеспечивает мощность $N_{p i_0} = C_{ms-i_0}^{i_0}$. Выбор сигнальных конструкций, обнаруживающих или исправляющих ошибки, позволяет получить мощность множества $N_{p\Gamma\Sigma_{\text{усл}(3)}} \approx N_{p\Gamma\Sigma} / A_0$ или $N_{p i_0, \text{усл}(3)} \approx N_{p i_0} / A_0$ соответственно при использовании СК с переменным или постоянным числом переходов, где A_0 – функция кодового расстояния. В табл. 4 показано, как уменьшается количество реализаций для различных m и $s = 7$.

Таблица 4 – Уменьшение количества реализаций при введении дополнительных условий

m	2^{ms}	$N_{p\Gamma\Sigma}$	$\frac{N_{p\Gamma\Sigma}}{2^{ms}} \times 100\%$	$N_{p i_0}$	$\frac{N_{p i_0}}{N_{p\Gamma\Sigma}} \times 100\%$	$N_{p(i_0, i_0 \pm 1)}$	$\frac{N_{p(i_0, i_0 \pm 1)}}{N_{p\Gamma\Sigma}} \times 100\%$	$N_{p i_0, \text{усл}(3)}$	$\frac{N_{p i_0, \text{усл}(3)}}{N_{p\Gamma\Sigma}} \times 100\%$	$N_{p(i_0, i_0 \pm 1), \text{усл}(3)}$	$\frac{N_{p(i_0, i_0 \pm 1), \text{усл}(3)}}{N_{p\Gamma\Sigma}} \times 100\%$	2^m
4	2^{28}	269	$1 \cdot 10^{-4}$	120	44,6	240	89,2	18	6,69	36	13,4	16
5	2^{35}	1299	$3,8 \cdot 10^{-6}$	680	52,3	1010	77,7	98	7,54	148	11,4	32
6	2^{42}	6354	$1,4 \cdot 10^{-7}$	3060	48,2	5084	80,0	442	6,95	732	11,5	64
7	2^{49}	31205	$5,5 \cdot 10^{-9}$	12650	40,5	24278	77,8	1395	4,47	3209	10,28	128

Из табл. 4 видно, что при использовании сигнальных конструкций с оптимальным числом ЗММ $i = i_0$ количество реализаций сигнальных конструкций уменьшается приблизительно на 50% по сравнению с конструкциями, содержащими максимально возможное число переходов $i = 1, 2, \dots, m$. Если при тех же условиях ввести проверку по соотношению (3), то мощность сигнального алфавита уменьшится еще на $\approx 43\%$ и составит всего 7% от $N_{p\Gamma\Sigma}$. Однако, это число больше количества реализаций обычного разрядно-цифрового кода 2^m .

В заключение можно сделать вывод о том, что при использовании сигнальных конструкций с числом ЗММ i_0 и $i_0 \pm 1$, мощность сигнального алфавита увеличивается примерно на 30% по сравнению с $N_{p i_0}$.

Литература

1. Системы электросвязи / Н.В. Захарченко, В.К. Стеклов, С.Н. Складенко, А.Л. Мацелура и др. – Т. 2. – К.: Техніка, 1998. – 240 с.
2. Методи підвищення ефективності використання каналів зв'язку / В.М. Захарченко, В.П. Гайдар, О.П. Улєєв, О.І. Липчанський. – К.: Техніка, 1998. – 248 с.
3. Захарченко В.М. Синтез багатопозиційних часових кодів – К.: Техніка, 1999. – 284 с.
4. Шварцман В.О., Емельянов Г.А. Теория передачи дискретной информации: Учебник для вузов связи. – М.: Связь, 1979. – 424 с.