

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

И.М. Сидякин, М.А. Эльшафен

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: ivan.sidyakin@bmstu.ru; elshafey.m@gmail.com

*Алгоритм кадровой синхронизации занимает важное место в процессе восстановления телеметрической информации, переданной по каналу связи с шумами, и существенно влияет на эффективность всей процедуры восстановления. Кадровая синхронизация важна в случае, если характер помех в канале связи и способы обработки передаваемой информации допускают пропуск достоверных и вставку ложных сообщений в поток данных телеизмерений, а также остановку и возобновление передачи в случайные моменты времени. Кадровая синхронизация обеспечивает возможность декоммутации параметров телеметрической информации в потоке. Приведены необходимое теоретическое описание модели системы кадровой синхронизации, методика выбора основных параметров синхронизатора и описание критериев выбора этих параметров. В экспериментах с реальными данными телеизмерений в формате IRIG-106 использована модель канала связи с шумами, допускающая инверсию, а также пропуск битов. Выполнено сравнение результатов экспериментов с теоретически полученными оценками параметров синхронизатора.*

**Ключевые слова:** телеметрическая информация, кадровая синхронизация, код синхронизации, порог синхронизатора, режимы “Поиск”, “Проверка”, “Захват”, формат IRIG-106, симметричный двоичный канал с пропуском битов.

## FRAME SYNCHRONIZATION OF DIGITAL TELEMTRY INFORMATION

I.M. Sidyakin, M.A. Elshafey

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: ivan.sidyakin@bmstu.ru; elshafey.m@gmail.com

*Frame synchronization algorithm plays an important role in the recovery process of telemetry data transmitted over a communication channel with noise, and significantly affects the entire process efficiency. In particular, frame synchronization is important in the case that the nature of noise in the communication channel and methods of processing transferable information allow both deletion of reliable and insertion of false messages in the telemetry data stream, as well as halt and resuming the transfer process at random times. Generally, frame synchronization process provides a decommutation ability of the telemetry data parameters in the stream. Necessary theoretical description of the system model of frame synchronization is given, as well as a method technique of the synchronizer basic settings, and defining the selection criteria for these parameters. Communication channel with noise is used in the experiments with real data telemetry format IRIG-106 model, allowing inversion as well as pass of bits. Technique of the basic settings selection of the synchronizer and description of the selection criteria for these parameters are presented. A communication channel model with noise that allows bit inversions and also bit deletions is used in experiments with real telemetry data in IRIG-106 format. Comparisons of obtained experimental results with theoretical estimates of the synchronizer parameters are carried out.*

**Keywords:** Telemetry information, frame synchronization, synchronization code, synchronization threshold, Search mode, Verify mode, Lock mode, standard IRIG-106, a binary symmetric channel with bit deletions.

Синхронизация данных заключается в обнаружении группы символов, периодически повторяющихся в потоке цифровой телеметрической информации (ТМИ). Синхронизатор можно представить как конечный автомат с тремя режимами [1–4]:

- “Поиск” — состояние, в котором синхронизатор просматривает весь входной поток данных с целью обнаружить код синхронизации;
- “Проверка” — состояние, в котором синхронизатор подтверждает первоначальное обнаружение кода синхронизации с помощью заданного числа успешных проверочных обнаружений кода синхронизации;
- “Захват” — рабочее состояние синхронизатора, при котором код синхронизации определен с высокой степенью достоверности на основе начального обнаружения и достаточного числа проверок.

Представленный в известных публикациях теоретический расчет параметров системы кадровой синхронизации [1–7] основан на том, что информационная составляющая кадров заполнена случайными значениями, распределенными по нормальному закону. Кадры в потоке разделяются битовыми последовательностями кодов синхронизации. Передача потока ТМИ по каналу связи с шумами вызывает искажение информационной составляющей кадров, а также кодов синхронизации. В общем случае это приводит к появлению ложных и потере настоящих кодов синхронизации в потоке. Вероятность появления ложных кодов синхронизации зависит от структуры и содержимого информационной части кадров и может отличаться от рассчитанной теоретически. В настоящей работе приведены результаты исследования системы восстановления кадровой синхронизации потока ТМИ в формате IRIG-106, заполненного информацией с датчиков. Параметры системы синхронизации выбираются на основе экспериментальных данных и сравниваются с теоретически полученными значениями.

При всех режимах работы обнаружение кода синхронизации обычно проводится с помощью корреляционного процесса, при котором входное сообщение непрерывно сравнивается с известным алгоритму корреляции кодом синхронизации. При относительно высокой корреляции между кодом синхронизации и символами сообщения код считается обнаруженным.

Задача обнаружения кода синхронизации заключается в определении местоположения кода синхронизации в каждом кадре ТМИ (рис. 1) в принятом бинарном потоке:

$$\mu_{s,l} = \operatorname{argmax}_{\mu_l \in [(l-1)N_f + 1; lN_f]} L(\mu), \quad (1)$$

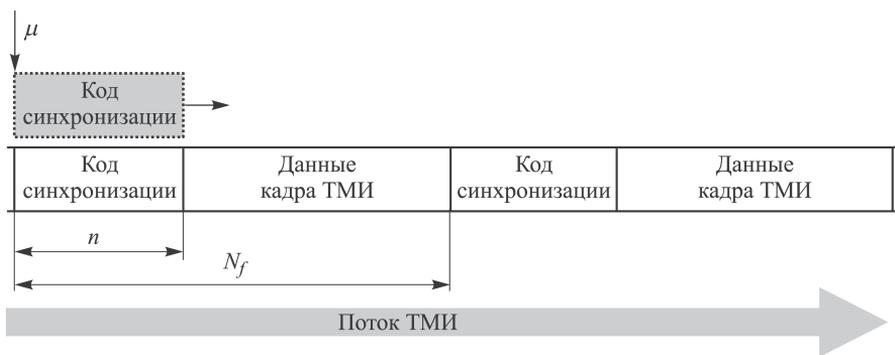


Рис. 1. Структура синхронизируемого кадра ТМИ

где  $\mu$  — местоположение обнаруженного кода синхронизации в бинарном потоке  $d = \{d_1, d_2, d_3, \dots\}$ ;  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  — используемый  $n$ -разрядный код синхронизации;  $l$  — порядковый номер обнаруженного кадра в потоке  $d$ ;  $N_f$  — длина кадра ТМИ;  $L(\mu)$  — корреляционный процесс, приведенный в [5–7], который определяется формулой

$$L(\mu) = \sum_{k=1}^n s_k d_{k+\mu}. \quad (2)$$

Значение коэффициента корреляции в каждом состоянии синхронизатора непрерывно сравнивается с заданным порогом  $\varepsilon$  для каждого состояния. Пока это значение не превышает значение порога, синхронизатор остается в текущем состоянии, но когда порог превышен, синхронизатор переходит в предыдущее.

На рис. 2 показаны переходы между состояниями синхронизатора: “Поиск”, “Проверка” и “Захват”, где  $\varepsilon_s$  — порог синхронизатора в режиме “Поиск”,  $\varepsilon_v$  — в режиме “Проверка” и  $\varepsilon_l$  — в режиме “Захват”, а  $C$  представляет собой коэффициент корреляции, который равен вычисленному по формуле (2) значению  $L(\mu)$ . В каждом состоянии, если значение коэффициента корреляции  $C$  меньше или равно значению порога текущего состояния, код синхронизации считается обнаруженным, и наоборот.

В начале работы синхронизатор находится в состоянии “Поиск”. Если синхронизатор обнаруживает код синхронизации ( $C \leq \varepsilon_s$ ), то

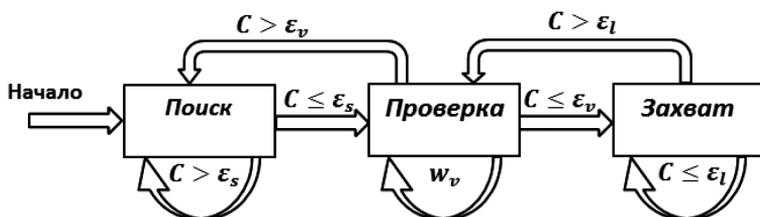
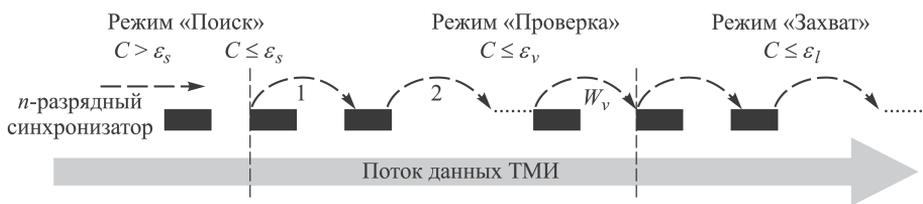


Рис. 2. Переход между состояниями синхронизатора кадров потока ТМИ



**Рис. 3.** Перемещение синхронизатора в потоке данных телеизмерений при различных режимах работы

синхронизатор переходит в состояние “Проверка”. Если в состоянии “Проверка” число последовательно обнаруженных кодов синхронизации ( $C \leq \varepsilon_v$ ) достигает заданного значения  $w_v$ , система синхронизации переходит в состояние “Захват”, иначе, система возвращается в режим “Поиск”. В режиме “Захват” обеспечивается кадровая синхронизация. Когда код синхронизации превышает порог  $\varepsilon_l$ , синхронизатор возвращается в режим “Проверка”. В режиме “Поиск” синхронизатор считывает биты до обнаружения кода синхронизации в потоке, а затем в режимах “Проверка” и “Захват” перемещается в потоке на длину шага. Длина шага равна длине кадра ТМИ, как показано на рис. 3.

Цель настоящей работы заключается в разработке методики расчета и выбора параметров кадрового синхронизатора, включая пороговые значения  $\varepsilon_s$  для состояния “Поиск”,  $\varepsilon_v$  — для состояния “Проверка” и  $\varepsilon_l$  — для состояния “Захват”, а также среднего времени ожидания синхронизатора  $w_v$  в режиме “Проверка”, где значение  $w_v$  представлено средним числом кадров. Параметры системы синхронизации выбираются для телеметрического кадра длиной  $N_f$  бит, сформированного системой коммутации на объекте телеизмерений, с заданным кодом синхронизации, длиной  $n$  бит.

В настоящей статье приведен алгоритм синхронизации кадров и уравнения, описывающий рабочие состояния синхронизатора [1, 2], применительно к задаче синхронизации кадров в потоке ТМИ.

Качество работы системы кадровой синхронизации в состояниях “Поиск” и “Проверка” определяется вероятностью правильного обнаружения кода синхронизации и средним временем, которое затрачивается на эту операцию, а в состоянии “Захват” качество работы определяется средним временем обнаружения ложной синхронизации после перехода в режим “Захват”.

Выбор низких значений порогов перехода между состояниями увеличивает вероятность правильного обнаружения кода синхронизации. Однако при этом увеличивается время восстановления синхронизации. Методика выбора параметров синхронизации основана на анализе соотношения этих двух показателей.

Системы синхронизации ТМИ, описанные в таких работах, как [1–4], основаны на передаче телеметрического потока в качестве случайных данных по каналу связи с шумами, модель которого допускает

только случайные инверсии. В настоящей статье эксперименты проведены при передаче телеметрического потока, содержащего реальные данные телеизмерений, сформированные в формате IRIG-106 [8], по каналу связи с шумами, модель которого допускает не только случайные инверсии, но и случайные пропуски битов [9]. Такой вид ошибок существенно влияет на качество выполнения кадровой синхронизации в потоке ТМИ. Целесообразность использования стандарта IRIG-106 обоснована его широким применением в аэрокосмической промышленности.

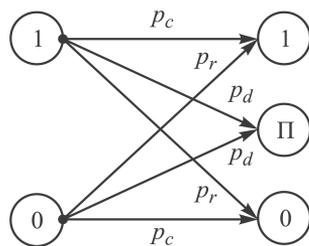
Вследствие того факта, что реальные данные телеизмерений, использованные в экспериментах, могут влиять на качество решения правильного обнаружения кода синхронизации в потоке, экспериментальные результаты могут быть отличными от результатов, полученных теоретически, но показано, что наилучшие результаты в экспериментах получены при одном и том же выборе параметров синхронизатора для наилучших результатов теоретически.

На рис. 4 приведена модель канала связи, допускающая случайную инверсию и пропуск битов:  $p_c$  — вероятность правильной передачи бита (0 или 1),  $p_r$  — вероятность инверсии бита при передаче ( $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 0$ ),  $p_d$  — вероятность пропуска текущего бита (выпадение бита 0 или 1).

Для обеспечения кадровой синхронизации выбирается один из 18 маркеров, перечисленных в стандарте IRIG-106. Выбранный маркер используется как код синхронизации и добавляется к каждому кадру [8]. Список маркеров представлен в табл. 1.

**Подготовка данных для проведения экспериментов.** В кадр телеметрической информации были включены оцифрованные отсчеты аналоговых датчиков, измеряющих типичные для телеметрической системы параметры: температуру, давление, данные позиционирования. Эти параметры были получены в лабораторных условиях, примеры исследуемых сигналов которых приведены на рис. 5, а. Для проведения экспериментов была разработана структура кадра, приведенная на рис. 5, б, и на ее основе сформирован тестовый двоичный поток телеметрической информации.

Кадр содержит 14 каналов, по каждому из которых передаются оцифрованные показания аналоговых датчиков. Кадр дополнительно содержит служебную информацию, обеспечивающую кадровую синхронизацию в потоке телеизмерений. Служебная информация кадра состоит из выбранного кода синхронизации (маркера) и времени регистрации представленного в формате IRIG-106 [8]. Поток кадров для



**Рис. 4. Модель симметричного двоичного канала с пропуском битов ( $p_c + p_r + p_d = 1$ )**

## Стандартные коды синхронизации ТМИ в формате IRIG-106

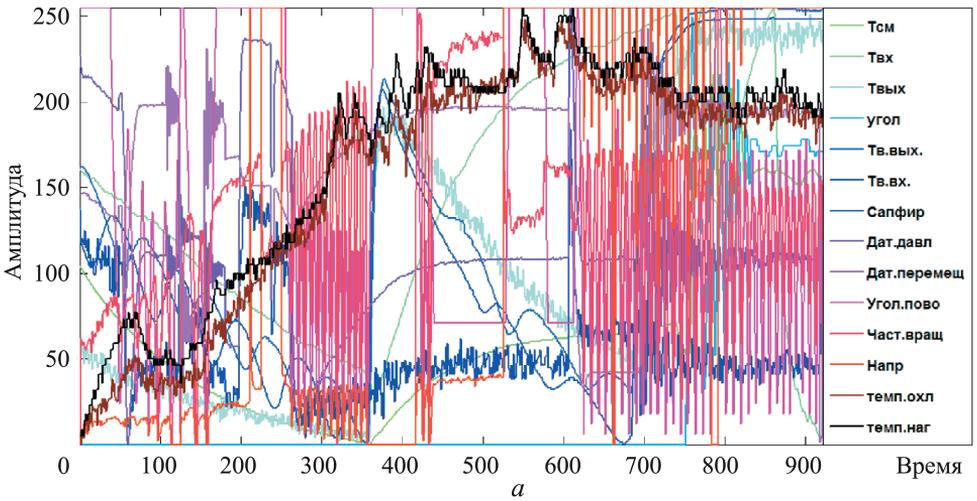
Длина кода	Формат кода
16	111 0101110010000
17	111 10011010100000
18	111 100110101000000
19	111 1100110010100000
20	111 01101111000100000
21	111 011101001011000000
22	111 1001101101010000000
23	111 10101110011010000000
24	111 110101111001100100000
25	111 1100101101110001000000
26	111 11010011010110011000000
27	111 110101101001100110000000
28	111 1010111100101100110000000
29	111 10101111001100110100000000
30	111 110101111001100110100000000
31	111 1111001101111101010000100000
32	111 11110011010110010100001000000
33	111 110111010011101001010010011000

использования в экспериментах был сформирован с помощью имитатора телеметрической информации [10].

Разрядность телеметрических слов кадра составляет 8 бит. В слове хранится один квантованный отсчет сигнала датчика в диапазоне  $0 \dots 255$ . Служебная информация состоит из маркера и 48 разрядов, используемых для хранения времени в стандарте IRIG-106. Общая длина приведенного кадра (см. рис. 5, б) составляет 176 бит.

**Анализ работы синхронизатора в режиме “Поиск”.** В режиме “Поиск” код синхронизации считается обнаруженным, если при сравнении  $n$  последовательных символов сообщения и известного кода синхронизации число несовпадений не превышает пороговое значение  $\varepsilon_s$ . Вероятность правильного обнаружения кода синхронизации в режиме “Поиск” при допустимом пороге  $\varepsilon_s$  в присутствии шумов  $p_r \neq 0$  можно записать как

$$p_{cs} = \sum_{i=0}^{\varepsilon_s} \binom{n}{i} (1 - p_r)^{n-i} p_r^i, \quad (3)$$



**Структура Кадра ТМН**

SYNC_F	С.Д.1	С.Д.2	С.Д.3	С.Д.4	С.Д.5	С.Д.6	С.Д.7	С.Д.8	С.Д.9	С.Д.10	С.Д.11	С.Д.12	С.Д.13	С.Д.14
SYNC16	Д.1	Д.2	Д.3	Д.4	Д.5	Д.6	Д.7	Д.8	Д.9	Д.10	Д.11	Д.12	Д.13	Д.14

б

**Рис. 5. Параметры телеизмерений (а) и структура телеметрического кадра (б):** С.Д. — Слово Данных, Д1:Д14 — отсчеты сигналов, показанных на рис. (а)

где  $n$  — длина кода синхронизации;  $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ ;

$$p_{fs} = \frac{\sum_{i=0}^{\varepsilon_s} \binom{n}{i}}{2^n} \quad (4)$$

— вероятность появления ложного кода синхронизации среди символов сообщения в режиме “Поиск” при допустимом числе ошибок  $\varepsilon_s$ .

На рис. 6 кривые пересекаются при некоторых значениях  $n$  и  $\varepsilon_s$ . Таким образом, выбор  $n$  и  $\varepsilon_s$  влияет на значения  $p_{cs}$  и  $p_{fs}$ . Вероятность ложной синхронизации при ложном обнаружении  $n$ -разрядной последовательности кода синхронизации в области данных кадра, длина которой  $b$  бит, вычисляется по формуле

$$F = 1 - (1 - p_{fs})^b, \quad (5)$$

где

$$b = N_f - (n) - (n - 1), \quad (6)$$

$N_f$  — общая длина кадра,  $n$  — длина кода синхронизации (рис. 7).

Вероятность принятия правильного решения в режиме “Поиск” можно записать так:

$$T = \frac{p_{cs}(1 - F)}{F + p_{cs}(1 - F)}; \quad (7)$$

вероятность принятия ошибочного решения в режиме “Поиск” имеет

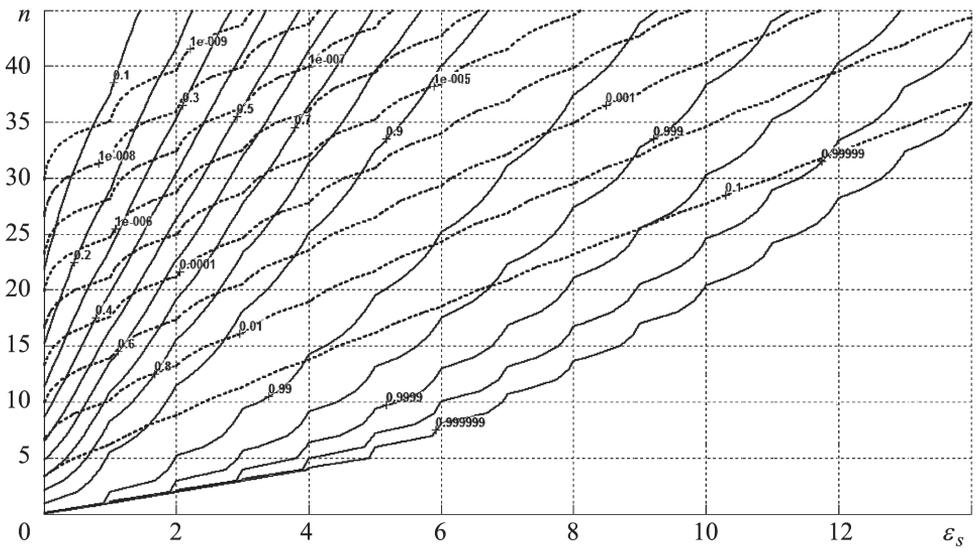


Рис. 6. Значения  $p_{cs}$  и  $p_{fs}$  при  $p_r = 0,1$  и при различных значениях  $n$  и  $\varepsilon_s$

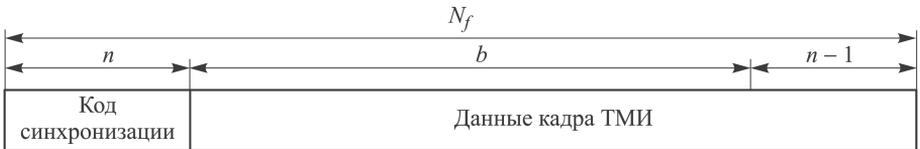


Рис. 7. Структура кадра ТМИ

вид

$$W = \frac{F}{F + p_{cs}(1 - F)}, \quad (8)$$

где

$$W + T = 1. \quad (9)$$

Среднее число кадров, необходимое для принятия правильного решения в режиме “Поиск”,

$$w_s = \frac{1}{p_{cs}(1 - F)}, \quad (10)$$

где значение  $w_s$  должно быть как можно меньше.

В табл. 2 приведены значения  $w_s$  при  $p_r = 0,1$ ,  $n = 16$ ,  $b = 145$  и для разных значений  $\varepsilon_s$ .

Из приведенных данных следует, что для  $\varepsilon_s = 0$  значение  $T$  максимально, но  $w_s$  также имеет большое значение. Следовательно, требуется выбрать множество  $ST$ , состоящее из нескольких близких к максимуму значений  $T$ , в данном случае  $ST = \{0,988; 0,930\}$  при  $\varepsilon_s = \{0, 1\}$ , а затем выбрать значение  $\varepsilon_s$ , для которого  $w_s$  минимально. В приведенном примере выбирается  $\varepsilon_s = 1$ , для которого  $T = 0,930$  и  $w_s = 2,017$ .

Значения  $w_s$  в режиме “Поиск” для  $p_r = 0,1$ 

$p_r$	$n$	$\varepsilon_s$	$b$	$p_{cs}$	$p_{fs}$	$F$	$T$	$W$	$w_s$
0,1	16	0	145	0,185	$1,53 \cdot 10^{-5}$	0,002	0,988	0,011	5,408
0,1	16	1	145	0,514	0,0002	0,036	0,930	0,069	2,017
0,1	16	2	145	0,789	0,002	0,261	0,690	0,309	1,716
0,1	16	3	145	0,931	0,010	0,787	0,200	0,799	5,059
0,1	16	4	145	0,982	0,038	0,996	0,003	0,996	297,625
0,1	16	5	145	0,996	0,105	1	$1,02 \cdot 10^{-7}$	1	9796884
0,1	16	6	145	0,999	0,227	1	$1,11 \cdot 10^{-16}$	1	$9,01 \cdot 10^{15}$

Критерий для выбора параметра  $\varepsilon_s$  в режиме “Поиск”:

$$\varepsilon_s = \arg \max_{\varepsilon_s} \{T(\varepsilon_s) = \max(T), w_s(\varepsilon_s) = \min(w_s)\}. \quad (11)$$

В табл. 3 дополнительно для иллюстрации зависимостей параметров приведены значения  $w_s$  при  $p_r = 10^{-2}$  и  $p_r = 10^{-3}$ .

Таблица 3

Значения  $w_s$  в режиме “Поиск” при  $p_r = 10^{-2}$  и  $p_r = 10^{-3}$ 

$n$	$\varepsilon_s$	$b$	$p_{cs}$	$p_{fs}$	$F$	$T$	$W$	$w_s$
$p_r = 10^{-2}$								
16	0	145	0,851	$1,53 \cdot 10^{-5}$	0,002	0,997	0,002	1,177
16	1	145	0,989	0,0002	0,036	0,962	0,037	1,049
16	2	145	0,999	0,002	0,261	0,738	0,261	1,355
16	3	145	0,999	0,010	0,787	0,212	0,787	4,713
16	4	145	1	0,0384	0,996	0,003	0,996	292,564
16	5	145	1	0,105	1	$1,02 \cdot 10^{-7}$	1	9764587
16	6	145	1	0,227	1	$1,11 \cdot 10^{-16}$	1	$9,01 \cdot 10^{15}$
$p_r = 10^{-3}$								
16	0	145	0,9849	$1,53 \cdot 10^{-5}$	0,002	0,997	0,002	1,018
16	1	145	0,999	0,0002	0,036	0,963	0,036	1,038
16	2	145	0,999	0,002	0,261	0,738	0,261	1,354
16	3	145	1	0,010	0,787	0,212	0,787	4,713
16	4	145	1	0,038	0,996	0,003	0,996	292,564
16	5	145	1	0,105	1	$1,02 \cdot 10^{-7}$	1	9764587
16	6	145	1	0,227	1	$1,11 \cdot 10^{-16}$	1	$9,01 \cdot 10^{15}$

Результаты экспериментов с телеметрическими данными в формате IRIG-106 приведены в табл. 4. Эксперименты выполнены для  $p_r = 0,1$  и разных значений вероятности пропуска бита  $p_d = \{0, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}\}$ . Использовался код синхронизации стандарта IRIG-106 с длиной 16 разрядов.

Значение  $w_s$  в состоянии “Поиск”

$p_r = 0,1$	$\varepsilon_s$	Теоретические значения $w_s$	Экспериментально полученные значения $w_s$			
		$p_d = 0$	$p_d = 0$	$p_d = 10^{-4}$	$p_d = 10^{-3}$	$p_d = 10^{-2}$
	0	5.408549	5.15	5.4	4.4	5
	1	2,017249	1,69	2,12	1,76	1,84

Отметим, что параметры синхронизатора, рассчитанные по экспериментальным данным, совпадают с определенными теоретически.

Для рассматриваемого случая в режиме “Поиск” рекомендуется выбрать  $\varepsilon_s = 1$ .

**Анализ работы синхронизатора в режиме “Проверка”.** После обнаружения кода синхронизации в режиме “Поиск”, синхронизатор переходит в режим “Проверка”. Если в режиме “Проверка” число последовательных обнаруженных маркеров достигает заранее заданного значения  $w_v$ , то система переходит в режим “Захват”.

Пусть

$$R = \frac{\text{вероятность выхода из режима “Поиск” и “Проверка” с ложным решением синхронизации после } w_v \text{ кадров}}{\text{вероятность выхода из режима “Поиск” и “Проверка” с правильным решением синхронизации после } w_v \text{ кадров}}$$

$$R = \frac{W}{T} \left( \frac{p_{fv}}{p_{cv}} \right)^{w_v}, \quad (12)$$

где  $p_{cv}$  — вероятность правильного обнаружения кода синхронизации в режиме “Проверка” при значении порога  $\varepsilon_v$ , а  $p_{fv}$  — вероятность появления ложного обнаружения кода синхронизации в символах сообщения в режиме “Проверка” при  $\varepsilon_v$ . Значение  $R$  должно быть как можно меньше.

В табл. 5 приведены значения  $R$  при выбранном значении  $\varepsilon_s$  и для различных  $\varepsilon_v$  и  $w_v$ .

В табл. 5, например, при требуемом значении  $R_T$  для системы синхронизации выбираются пары  $(\varepsilon_v, w_v)$ , значение  $R$  которых не превышает заданное  $R_T$  ( $R \leq R_T$ ).

В этом примере при допустимом заданном значении вероятности  $R_T = 10^{-6}$  выбираются  $R = \{5,22 \cdot 10^{-7}; 1,108 \cdot 10^{-7}; 1,735 \cdot 10^{-7}; 9,689 \times 10^{-7}\}$  при значениях пар  $(\varepsilon_v, w_v) = \{(2,2), (3,3), (4,4), (5,5)\}$  соответственно.

Вероятность выхода из состояний “Поиск” и “Проверка” в случае правильного обнаружения кода синхронизации имеет вид:

$$p_{tc} = \left( p_{cs} (1 - F) \frac{(1 - q^{w_s})}{(1 - q)} \right) (p_{cv})^{w_v}, \quad (13)$$

Значения  $R$  в режиме “Проверка”

Значения $R$ при $p_r = 0,1$ , $n = 16$ , $b = 145$ и $\varepsilon_s = 1$					
$\varepsilon_v$	$w_v = 1$	$w_v = 2$	$w_v = 3$	$w_v = 4$	$w_v = 5$
0	$6,13 \cdot 10^{-6}$	$5,05 \cdot 10^{-10}$	$4,158 \cdot 10^{-14}$	$3,424 \cdot 10^{-18}$	$2,819 \cdot 10^{-22}$
1	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$1,89 \cdot 10^{-8}$	$9,532 \cdot 10^{-12}$	$4,803 \cdot 10^{-15}$	$2,420 \cdot 10^{-18}$
2	0,000197	$5,22 \cdot 10^{-7}$	$1,383 \cdot 10^{-9}$	$3,665 \cdot 10^{-12}$	$9,708 \cdot 10^{-15}$
3	0,00085	$9,71 \cdot 10^{-6}$	$1,108 \cdot 10^{-7}$	$1,265 \cdot 10^{-9}$	$1,444 \cdot 10^{-11}$
4	0,00291	0,000114	$4,441 \cdot 10^{-6}$	$1,735 \cdot 10^{-7}$	$6,780 \cdot 10^{-9}$
5	0,00785	0,000827	$8,721 \cdot 10^{-5}$	$9,192 \cdot 10^{-6}$	$9,689 \cdot 10^{-7}$
6	0,016933	0,00385	0,000875	0,000199	$4,524 \cdot 10^{-5}$

где

$$q = (1 - p_{cs})(1 - F). \quad (14)$$

В табл. 6 приведены значения  $p_{tc}$  при выбранном значении  $\varepsilon_s$  и для различных  $\varepsilon_v$  и  $w_v$ .

Значения  $p_{tc}$ , соответствующие выбранным значениям  $R$ , следующие:  $p_{tc} = \{0,454; 0,602; 0,681; 0,718\}$ . Отметим, что увеличение значения пары  $(\varepsilon_v, w_v)$  от (2,2) до (3,3) приводит к увеличению  $p_{tc}$  (на  $0,602 - 0,454$ ) на  $0,148$ , но от значения (3,3) до (4,4) — к увеличению только на  $0,079$ , от значения (4,4) до (5,5) — к увеличению на  $0,038$  и т.п. На основе этого выбираем  $(\varepsilon_v, w_v) = (3,3)$ .

Таблица 6

Значения  $p_{tc}$  в режиме “Проверка”

Значения $p_{tc}$ при $p_r = 0,1$ , $n = 16$ , $b = 145$ и $\varepsilon_s = 1$					
$\varepsilon_v$	$w_v = 1$	$w_v = 2$	$w_v = 3$	$w_v = 4$	$w_v = 5$
0	0,135	0,025	0,004	0,0008	0,0001
1	0,375	0,193	0,099	0,051	0,026
2	0,576	0,454	0,358	0,283	0,223
3	0,680	0,633	0,602	0,549	0,512
4	0,717	0,705	0,693	0,681	0,670
5	0,727	0,725	0,722	0,720	0,718
6	0,729	0,729	0,728	0,728	0,728

Следовательно, выбор параметров  $(\varepsilon_v, w_v)$  режима “Проверка” состоит из двух шагов. Сначала задается допустимое требуемое значение  $R_T$  и выбираются два множества  $m_1, m_2$  по следующим условиям:

$$m_1 = \{ (\varepsilon_v, w_v) : R(\varepsilon_v, w_v) \leq R_T \}; \quad (15)$$

$$m_2 = \{p_{tc} \{m_1\}\} = \{p_{tc1}(m_1 \{1\}), p_{tc2}(m_1 \{2\}), \dots, p_{tcl}(m_1 \{l\})\}, \quad (16)$$

где  $l$  — число элементов  $m_1$ .

Затем, параметры  $(\varepsilon_v, w_v)$  режима “Проверка” вычисляются по формуле

$$(\varepsilon_v, w_v) = \arg \max_p \{d_p : p_{tc}(\varepsilon_v, w_v) \in m_2, \varepsilon_v > \varepsilon_s\}, \quad (17)$$

где  $d_p = p_{tci} - p_{tci-1}$ ,  $i = 2, \dots, l$ .

Результаты экспериментов с данными телеизмерений приведены в табл. 7. Эксперименты выполнены при  $p_r = 0,1$ , выбранном значении  $\varepsilon_s$  и для разных значений вероятности пропуска бита  $p_d = \{0, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}\}$  и для различных значений  $\varepsilon_v$  и  $w_v$ .

Таблица 7

**Параметры  $\varepsilon_v$  и  $w_v$  в состоянии “Проверка”**

Параметры	Теоретические значения $p_{tc}$	Экспериментальные значения $p_{tc}$			
	$p_d = 0$	$p_d = 0$	$p_d = 10^{-4}$	$p_d = 10^{-3}$	$p_d = 10^{-2}$
$\varepsilon_v = 2, w_v = 2$	0,454762	0,7972	0,7777	0,6613	0,1203
$\varepsilon_v = 3, w_v = 3$	0,60248714	0,9308	0,923	0,7916	0,124
$\varepsilon_v = 4, w_v = 4$	0,68165127	0,9876	0,967	0,8112	—
$\varepsilon_v = 5, w_v = 5$	0,718099482	0,9900	0,9752	0,838	—

Экспериментально полученные значения параметров синхронизатора  $(\varepsilon_v, w_v)$  также совпадают с теоретическими.

Для рассматриваемого случая, в режиме “Проверка” рекомендуется выбрать значения параметров  $\varepsilon_v = 3$  и  $w_v = 3$ .

**Анализ работы синхронизатора в режиме “Захват”.** В состоянии “Захват” синхронизатор контролирует только группу длиной  $n$  символов в позиции, где должен располагаться код синхронизации. Если число ошибок при проверке кода превышает порог  $\varepsilon_l$ , синхронизатор возвращается в состояние “Проверка”.

Оценка работы синхронизатора в режиме “Захват” выполняется по относительному значению потерь информации  $DL$ , вызванных сбоями синхронизации в присутствии шумов. Значение  $DL$  вычисляется по формуле

$$DL = \frac{L}{L + K} \%, \quad (18)$$

где

$$L = \left( \frac{1/(1 - q) + w_v}{p_{tc}} \right) + (JR) \quad (19)$$

— среднее время, требуемое для правильного обнаружения кода синхронизации;

$$J = \frac{1}{1 - p_{fl}} \quad (20)$$

— среднее число кодов синхронизации, необходимое для принятия решения об ошибочности обнаружения кода синхронизации при ложной синхронизации ( $p_{fl}$  — вероятность появления ложного кода синхронизации в режиме “Захват” при значении порога  $\varepsilon_l$ );  $q, R, w_v$  и  $p_{tc}$  вычисляются в режиме “Проверка”;

$$K = \frac{1}{1 - p_{cl}} \quad (21)$$

— среднее число кодов синхронизации, необходимое для принятия решения об отсутствии кода синхронизации ( $p_{cl}$  — вероятность правильного обнаружения кода синхронизации в состоянии “Захват” при значении порога  $\varepsilon_l$ ).

В табл. 8 приведены значения  $DL$  при выбранных значениях  $\varepsilon_s, \varepsilon_v, w_v$  и для различных  $\varepsilon_l$ .

Таблица 8

**Значения  $DL$ , %, в состоянии “Захват” синхронизации**

Значения $DL$ , %, при $p_r = 0,1, n = 16, b = 145, \varepsilon_s = 1, \varepsilon_v = 3$ и $w_v = 3$				
$\varepsilon_l$	$J$	$K$	$L$	$DL$ , %
0	1,000015	1,227	8,263	87,066
1	1,000259	2,060	8,263	80,039
2	1,002095	4,744	8,263	63,523
3	1,01075	14,618	8,263	36,113
4	1,03994	58,809	8,263	12,319
5	1,117389	303,328	8,263	2,651
6	1,294078	1982,025	8,263	0,415

В табл. 8 можно выбрать значение  $\varepsilon_l$ , при котором вычисленное значение  $DL \leq DL_T$ . Например, если требуемое значение  $DL_T = 1\%$ , то выбрать  $DL = 0,415$  и тогда значение порога  $\varepsilon_l = 6$  считается наилучшим.

Следовательно, критерий выбора параметра  $\varepsilon_l$  режима “Захват”

$$\varepsilon_l = \arg \max_{\varepsilon_l} \{DL : DL(\varepsilon_l) \leq DL_T\}, \quad (22)$$

где  $DL_T$  — требуемое минимальное значение потери информации.

Результаты экспериментов с данными телеизмерений (IRIG-106) показаны в табл. 9. Эксперименты проведены при  $p_r = 0,1$ , при выбранных значениях  $\varepsilon_s, \varepsilon_v, w_v$  и для разных значений вероятности пропуска бита  $p_d = \{0, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}\}$  и  $\varepsilon_l$ .

Таблица 9

Значения  $DL$ , %, в режиме “Захват”

$\varepsilon_l$		Значения $DL$ , %, при $p_r = 0, 1, n = 16, \varepsilon_s = 1, \varepsilon_v = 3$ и $w_v = 3$																		
		Теоретические значения						Экспериментальные значения												
		$p_d = 0$			$p_d = 10^{-4}$			$p_d = 10^{-3}$			$p_d = 10^{-2}$									
		$K$	$L$	$DL$	$K$	$L$	$DL$	$K$	$L$	$DL$	$K$	$L$	$DL$	$K$	$L$	$DL$	$K$	$L$	$DL$	
3		14,618	8,263	36,11	60,687	5,8	8,723	24,44	6,8	21,76	8,6	9,2	51,69	307,4	295	48,97				
4		58,80	8,263	12,319	357,75	5,8	1,595	28,8	6,8	19,1	8,84	9,2	51	307,48	295	48,96				
5		303,32	8,263	2,6519	643,5	5,8	0,893	29,04	6,8	18,97	8,92	9,2	50,77	307,48	295	48,96				
6		1982,02	8,263	0,415	881,602	5,8	0,653	29,24	6,8	18,86	9,04	9,2	50,44	307,68	295	48,95				

В рассматриваемом случае рекомендуется выбрать для режима синхронизации “Захват” значение параметра  $\varepsilon_l = 6$ .

**Выводы.** Рассмотрена теоретическая модель системы кадровой синхронизации цифрового потока данных телеизмерений. Система представлена как конечный автомат с тремя состояниями. Приведены основные параметры модели, определяющие условия перехода синхронизатора между состояниями, а также методика выбора таких параметров синхронизатора. Выполнены эксперименты с реальными данными телеизмерений в формате IRIG-106 и сравнительный анализ полученных результатов с теоретическими оценками параметров системы синхронизации, который показал, что при различии в количественных оценках промежуточных показателей предложенная методика выбора параметров синхронизатора приводит к одинаковому результату для теоретической модели потока ТМИ и для реальных данных телеизмерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вильярд М.В. Некоторые вопросы синхронизации в цифровых системах: Достижение в области телеметрии / пер. Л.С. Гельбштейна. М.: Мир, 1970. С. 58–73.
2. *Techniques for Synchronizing Pulse-Code-Modulated Telemetry*. Report the theoretical and experimental investigation of synchronization methods for PCM telemetry / California: Naval ordnance laboratory corona. 1963. 111 p.
3. Prasad G. and Vasantha N. Design and implementation of multi-channel framesynchronization in FPGA // International journal of electronics and communication engineering & technology (IJECET). 2013. Vol. 4. P. 189–199.
4. *Introduction to PCM Telemetry Systems*. 2nd Edition / Ed. Stephen Horan: CRC Press LLC. 2002. 446 p.
5. James L. Massey. Optimum frame synchronization // IEEE transactions on communications. 1972. Vol. 20. No. 2. P. 115–119.
6. Stiffler Jack J. Self-synchronizing binary telemetry codes: PhD Dissertation. California: Institute of technology, 1962. 156 p.
7. Chiani Marco, Martini Maria G.. Analysis of Optimum Frame Synchronization Based on Periodically Embedded Sync Words // IEEE transactions on communications. 2007. Vol. 55. No. 11. P. 2056–2060.
8. *Telemetry Standards*, IRIG Standard 106-13. New Mexico: Secretariat Range Commanders Council US Army White Sand Missile Range. 2013. Режим доступа: <http://www.irig106.org/docs/106-13/> (дата обращения 10.12.2013).
9. Эльшафеев М.А. Метод помехоустойчивого кодирования телеметрической информации, исправляющий пропуски и инверсии битов // Наука и образование: электронный научно-технический журнал. 2014. № 10. С. 328–346. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru> (дата обращения: 30.07.2014).
10. Эльшафеев М.А., Сидякин И.М. Имитация передачи данных телеизмерений в канале с шумами // Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал. 2014. № 1. С. 38–51.

## REFERENCES

- [1] Vil'yard M.V. Russ. ed.: Nekotorye voprosy sinkhronizatsii v tsifrovyykh sistemakh: Dostizhenie v oblasti telemetrii [Some issues of synchronization in digital systems (translated by L.S. Gelbershteyn): Achievement in the field of telemetry]. Moscow, Mir Publ., 1970, pp. 58–73.

- [2] Techniques for Synchronizing Pulse-Code-Modulated Telemetry. *Report the theoretical and experimental investigation of synchronization methods for PCM telemetry*. California: naval ordnance laboratory corona. 1963. 111 p.
- [3] Prasad G., Vasantha N. Design and implementation of multi-channel frame synchronization in FPGA. *International journal of electronics and communication engineering & technology (IJCET)*, 2013, vol. 4, pp. 189–199.
- [4] Introduction to PCM Telemetry Systems. 2nd Edition. Stephen Horan, ed. CRC Press LLC, 2002. 446 p.
- [5] Massey James L. Optimum frame synchronization. *IEEE transactions on communications*, 1972, vol. 20, no. 2 pp. 115–119.
- [6] Stiffler Jack J. Self-synchronizing binary telemetry codes: PhD Dissertation. California, Institute of technology, 1962, 156 p.
- [7] Chiani Marco, Martini Maria G. Analysis of Optimum Frame Synchronization Based on Periodically Embedded Sync Words. *IEEE transactions on communications*, 2007, vol. 55, no. 11, pp. 2056–2060.
- [8] Telemetry Standards, IRIG Standard 106-13. New Mexico, Secretariat Range Commanders Council US Army White Sand Missile Range, 2013. Available at: <http://www.irig106.org/docs/106-13/> (accessed 10.12.2013).
- [9] El'shafei M.A. Method of antinoise coding telemetry information correcting bit inversion and omissions. *Jelektr. Nauchno-Tehn. izd "Nauka i obrazovanie"* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education"], 2014, no. 10, pp. 328–346 (in Russ.).
- [10] El'shafei M.A., Sidiyakin I.M. Simulation of data telemetering in the noisy channel. *Jelektr. nauchno-tehn. izd. "Inzhenernyy vestnik"* [El. Sc.-Techn. Publ. Eng. bulletin], 2014, no. 1, pp. 38–51 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 2.11.2014

Сидякин Иван Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области систем регистрации телеметрической информации. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Sidiyakin I.M. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of systems of telemetry data recording. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Эльшафеи Мохамед Абдельмонеим Таха — аспирант кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области систем регистрации телеметрической информации. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Elshafey Mohamed Abdelmoneim Taha — post-graduate of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of systems of telemetry data processing. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.