

А.И. Лоскутов
А.С. Дуников
А.Б. Артюшкин
В.И. Кондратюк

A.I. Loskutov
A.S. Dunikov
A.B. Artyushkin
V.I. Kondratyuk

**ФОРМИРОВАНИЕ
ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ
СИНХРОНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ**

**FORMATION OF REQUIREMENTS
TO THE QUALITY OF
SYNCHRONIZATION IN DIGITAL
TRANSMISSION SYSTEMS
OF TELEMETRIC INFORMATION**

Представлены результаты оценки качества работы систем синхронизации в условиях изменения точностных характеристик определения границ следования бит. Сформулированы требования к качеству работы систем синхронизации при приеме группового телеметрического сигнала.

The results of evaluation of the quality of synchronization systems in a changing accuracy characteristics to determine the boundaries of the following bits are presented. The requirements to quality operation of the systems of synchronization when receiving a group telemetric signal are formulated.

Ключевые слова: телеметрия, потеря информации, система синхронизации, помехоустойчивость, додетекторная запись.

Keywords: telemetry, loss of information, synchronization, noise immunity, dodecaceria record.

Введение. В последние годы значительно вырос объем проводимых лётных испытаний перспективных изделий ракетно-космической техники (РКТ). С учетом увеличения количества пусков технически сложных изделий РКТ назрела необходимость модернизации используемых телеметрических средств. При этом к разрабатываемым бортовым информационно-телеметрическим системам и наземной приемно-регистрирующей аппаратуре (НПРА) измерительных комплексов космодромов (полигонов) предъявляются всё более жесткие требования к надежности передачи и приема телеметрической информации. Одной из основных систем, определяющих качество регистрации телемет-

рической информации НПРА, является система синхронизации. Для обеспечения высокого качества регистрируемой информации необходимо определить требования к качеству работы систем синхронизации НПРА, которые отвечали бы существующим актуальным направлениям развития бортовых и наземных радиотелеметрических средств (РТС).

Предложения по формализации требований к системе синхронизации наземных приемно-регистрирующих станций при приеме группового телеметрического сигнала. Постановка задачи

Под синхронизацией в телеметрии понимается установление временного соответствия между процессами в совместно функционирующих передающей и приемной частях РТС. В целях обеспечения надежной синхронизации в радиотелеметрической системе используют кадровые, каналные (словные) и символные синхросигналы. В настоящее время к системам синхронизации РТС предъявляются следующие требования [1]:

1) разделение каналов должно быть надеж-

¹ Доктор технических наук, начальник кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

² Кандидат технических наук, начальник лаборатории кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

³ Кандидат технических наук, доцент кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

⁴ Старший преподаватель кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского.

ным, то есть ошибка в определении принадлежности измерительных сигналов тому или иному датчику должна иметь малую вероятность;

2) определение границ канальных интервалов и символов должно быть достаточно точным, чтобы энергетические потери и взаимные помехи каналов из-за неточности синхронизации были малы;

3) время вхождения в синхронизацию и удержание синхронизации при перерывах в связи должны быть такими, чтобы потери информации были в допустимых пределах;

4) введение синхросигналов в групповой телеметрический сигнал не должно существенно сказываться на снижении скорости передачи информации или увеличении энергетического потенциала радиолинии.

Формулирование данных требований направлено, прежде всего, на обеспечение надежности регистрации телеметрической информации, передаваемой с борта изделия РКТ на этапе его выведения. Анализ фрагментов записи телеметрической информации наземных приемно-регистрирующих станций (НПРС) показал, что объем потерянных и искаженных результатов телеизмерений о состоянии бортовой аппаратуры составляет 15–20% от объема всей зарегистрированной телеметрической информации. Эти потери в большинстве случаев обусловлены срывом синхронизации радиотелеметрических средств [2]. Выявлено, что промежутки, на которых имела место потеря информации, зачастую соответствуют важным участкам циклограммы выведения изделия РКТ. Данное заключение подтверждается рис. 1, на котором изображен

фрагмент записи телеметрической информации, зарегистрированной при пуске ракетносителя «Рокот» 28 июля 2012 года. Анализ выполнен с помощью программы формирования единой записи телеметрической информации «MontISX», разработанной «ОКБ Спектр». Из рис. 1 видно, что участок потери информации с 690-й по 754-ю секунду соответствует режиму переключения работы бортовой аппаратуры.

При этом временной промежуток потери информации обусловлен длительностью вхождения в синхронизм наземной приемно-регистрирующей аппаратуры, зависящей от количества кадров группового телеметрического сигнала, требуемых на установление синхронизации.

Следовательно, снижение объема потерь и уровня искажений телеметрической информации возможно за счет применения научно обоснованных подходов при проектировании систем синхронизации наземных приемно-регистрирующих станций телеметрической информации, основанных на четкой формализации требований к системам синхронизации радиотелеметрических средств.

Корректная формализация требований к системам синхронизации радиотелеметрических средств и их максимальный учет на этапе проектирования наземных приемно-регистрирующих станций призваны повысить надежность регистрации результатов телеизмерений.

Для цифровых способов передачи информации определяющее воздействие на качество вхождения в синхронизм наземной приемно-регистрирующей станции при приеме группово-

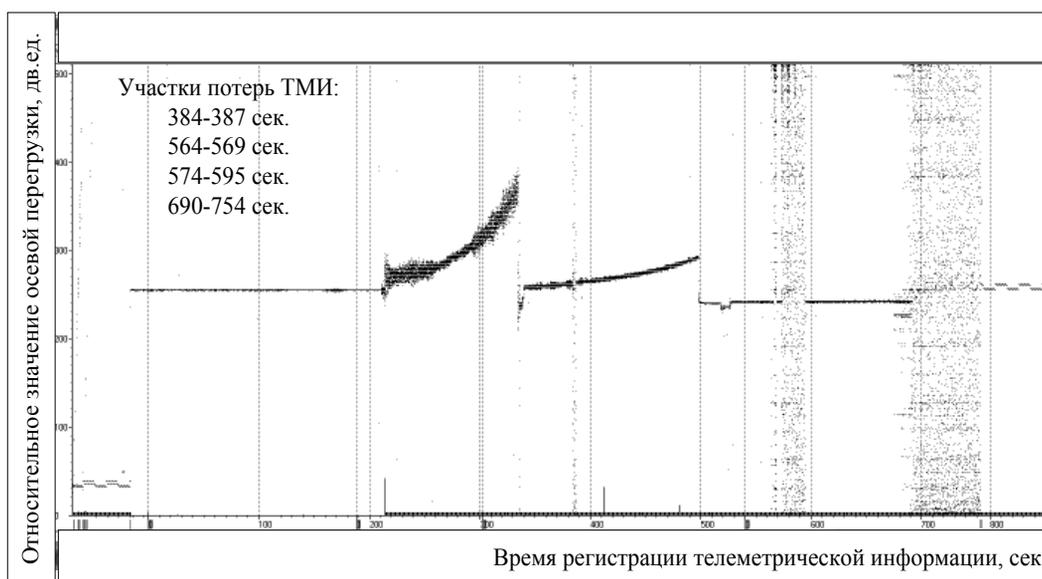


Рис. 1. Результаты регистрации телеметрической информации

го телеметрического сигнала оказывают системы символьной и кадровой синхронизации.

Следует отметить, что основные потери данных обусловлены срывом работы системы кадровой синхронизации из-за значительного ухудшения условий распространения сигнала.

Качество работы системы кадровой синхронизации можно оценить вероятностью ее правильной работы $P_{\text{пр.р.}}$, которая описывается выражением

$$P_{\text{пр.р.}} = 1 - P_{\text{ош.р.}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ош.р.}}$ – вероятность ошибочной работы системы кадровой синхронизации.

При этом, вероятность ошибки работы системы кадровой синхронизации рассчитывается в соответствии с выражением [1]

$$P_{\text{ош.р.}} = P_{\text{пр.с.}} + P_{\text{л.с.}} - P_{\text{пр.с.}} P_{\text{л.с.}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пр.с.}}$ – вероятность пропуска синхронизации; $P_{\text{л.с.}}$ – вероятность ложной синхронизации.

Вероятность пропуска синхронизации оценивается по формуле

$$P_{\text{пр.с.}} = 1 - (1 - P_b)^n, \quad (3)$$

где P_b – суммарная вероятность битовой ошибки;

n – количество символов в маркере кадра.

Вероятность ложной синхронизации оценивается согласно выражению

$$P_{\text{л.с.}} = 2^{-n} \left(\frac{n - (1 - P_b)^n}{n} \right). \quad (4)$$

Время вхождения в синхронизм радиотелеметрической системы, после которого начинается устойчивый прием телеметрической информации, определяется количеством кадров, необходимых для анализа в системе кадровой синхронизации. Вероятность правильной работы системы кадровой синхронизации определяется выражением

$$P_{\text{пр.р.}} = 1 - (P_{\text{ош.р.}})^{N_{\text{кадр.синх.}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{кадр.синх.}}$ – количество кадров на интервале анализа.

Оценивание количества кадров, требуемых на вхождение в синхронизм, производится в соответствии с выражением, полученным из выражения (5) при подстановке в него выражений (1–4):

$$N_{\text{кадр.синх.}} = \frac{1}{-\frac{1}{d} \lg \left((1 - P_b)^n + 2^{-n} \frac{n - (1 - P_b)^n}{n} - \left((1 - P_b)^n \times 2^{-n} \frac{n - (1 - P_b)^n}{n} \right) \right)}, \quad (6)$$

где d – коэффициент, характеризующий требо-

вания к вероятности правильного обнаружения маркера кадра. При этом d определяется как степень числа при определении вероятности ложного обнаружения (к примеру, $F_{\text{л.о.}} = 10^{-3}$, $d = 3$).

Одним из основных требований к качеству работы систем синхронизации радиотелеметрических средств при приеме группового телеметрического сигнала является минимизация количества анализируемых кадров, требуемых на вхождение в синхронизм. При этом данные требования в формализованном виде записываются следующим образом:

$$F : N_{\text{кадр.синх.}}(d, n, P_b) \rightarrow \min. \quad (7)$$

В данном случае значение вероятности битовой ошибки зависит от качества работы системы символьной синхронизации и оценивается в данном случае суммарной вероятностью битовой ошибки в условиях неизвестной временной задержки принимаемого сигнала, которая описывается следующим выражением [3]:

$$P_b = \int_{\tau_{\text{min}}}^{\tau_{\text{max}}} P(\tau) p(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где τ – значение временной задержки принимаемого сигнала;

$P(\tau)$ – вероятность битовой ошибки при случайном изменении значения временной задержки;

$p(\tau)$ – плотность вероятности распределения случайной величины τ .

В работе [3] определены выражения для оценки суммарной вероятности битовой ошибки при рассмотрении основных видов модуляции, применяемых в цифровых радиотелеметрических системах, в частности для модуляций FSK и PSK

$$P_{\text{FSK}}(\gamma_\tau) = \frac{2}{\sqrt{2\pi\gamma_\tau}(2\Phi(\gamma_\tau) - 1)} \times \quad (9)$$

$$\times \int_0^1 \left(Q(\sqrt{q_1}\tau; \sqrt{q_1}(1-\tau)) - \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}q_1(\tau^2 + (1-\tau)^2)} I_0(q_1\tau(1-\tau)) \right) e^{-\frac{\tau^2}{2\gamma_\tau}} d\tau,$$

$$P_{\text{PSK}}(\gamma_\tau) = \frac{2}{\sqrt{2\pi\gamma_\tau}(2\Phi(\gamma_\tau) - 1)} \times \quad (10)$$

$$\times \int_0^1 \left(Q(\sqrt{2q_1}\tau; \sqrt{2q_1}(1-\tau)) - \frac{1}{2} e^{-q_1(\tau^2 + (1-\tau)^2)} I_0(2q_1\tau(1-\tau)) \right) e^{-\frac{\tau^2}{2\gamma_\tau}} d\tau,$$

где γ_τ – приведенная среднеквадратическая погрешность синхронизации;

Q – функция Маркума;

I_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

При этом значение приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации определяется при аппаратной реализации системы символьной синхронизации.

Таким образом, при разработке и создании наземных приемно-региструющей станций телеметрической информации математический аппарат формализации требований к системе синхронизации описывается следующим выражением:

$$F : N_{\text{кадр. синх.}}(d, n, \gamma_{\tau}) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Представленный выше математический аппарат формирования требований к системе кадровой синхронизации справедлив для случая приема группового телеметрического сигнала со структурой РТС-9Ц.

В работе [4] описаны основные типы сим-

вольных синхронизаторов, применяемых в цифровых системах приема информации. К данным типам относятся: оптимальный синхронизатор, квазиоптимальный синхронизатор, синфазно-среднефазный синхронизатор, синхронизатор с опережающим и запаздывающим стробированием. Каждый из данных синхронизаторов характеризуется различными значениями приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации. В таблице 1 приведены выражения оценки приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации для различных типов символьных синхронизаторов.

Таблица 1

Выражения оценки погрешности синхронизации

Тип синхронизатора	Оптимальный синхронизатор	Квазиоптимальный синхронизатор	Синфазно-среднефазный синхронизатор	Синхронизатор с опережающим и запаздывающим стробированием
Выражение для оценки погрешности	$\gamma_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau}}{\tau_n} \approx \frac{0,25}{\sqrt{Kq}}$	$\gamma_{\tau} \approx \frac{0,411}{\sqrt{KE_b / N_0}}$	$\gamma_{\tau} \approx \sqrt{\frac{N_0}{4E_b}} \Delta f_s$	$\gamma_{\tau} \approx \sqrt{\frac{N_0}{8E_b}} \Delta f_s$

Здесь: σ_{τ} – среднеквадратическое отклонение погрешности определения границ бит;

τ_n – длительность бита;

K – интервал анализа;

q – отношение сигнал/шум;

E_b – энергия сигнала на бит;

N_0 – спектральная плотность мощности белого шума;

Δf_s – эквивалентная полоса следящей системы символьной синхронизации.

Описание процесса моделирования. На рис. 2 представлен график зависимости значений приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации от значения отношения сигнал/шум для различных типов символьных синхронизаторов, при условии усреднения по десяти интервалам приема бит группового телеметрического сигнала. На рис. 2 кривая 1 соответствует значениям приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации синфазно-среднефазного символьного синхронизатора; 2 – квазиоптимального символьного синхронизатора, соответствующего устройству синхронизации наземных приемно-региструющей станций телеметрической информации; 3 – символьного синхронизатора с опережающим и запаздывающим стробированием; 4 – оптимального символьного синхронизатора.

На рис. 3 представлен график зависимости значений приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации от значения отно-

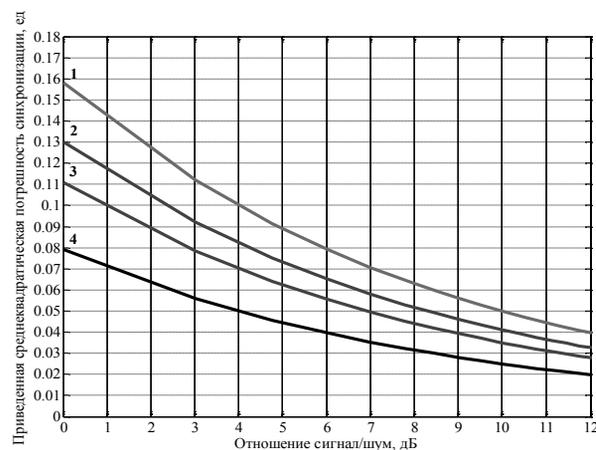


Рис. 2. Результаты оценки приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации для различных синхронизаторов

шения сигнал/шум для квазиоптимального символьного синхронизатора при различном значении интервала усреднения.

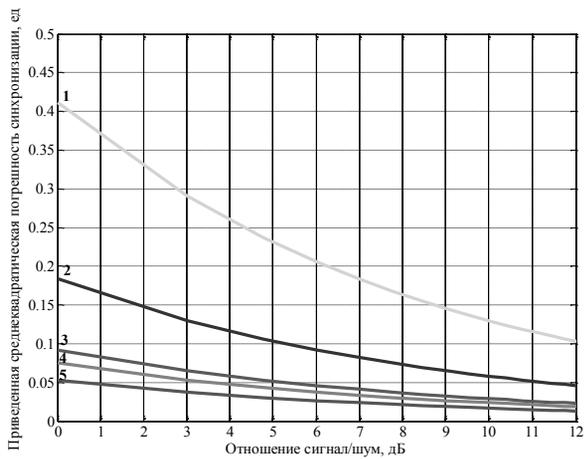


Рис. 3. Результаты оценки приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации при различном объеме анализируемых бит: 1) – 1 бит; 2) – 5 бит; 3) – 20 бит; 4) – 30 бит; 5) – 60 бит

На рисунках 4–6 представлены результаты оценки количества кадров анализа, необходимых для установления кадровой синхронизации при изменении параметров маркера кадра, требований к системе кадровой синхронизации и приведенной среднеквадратической погрешности синхронизации.

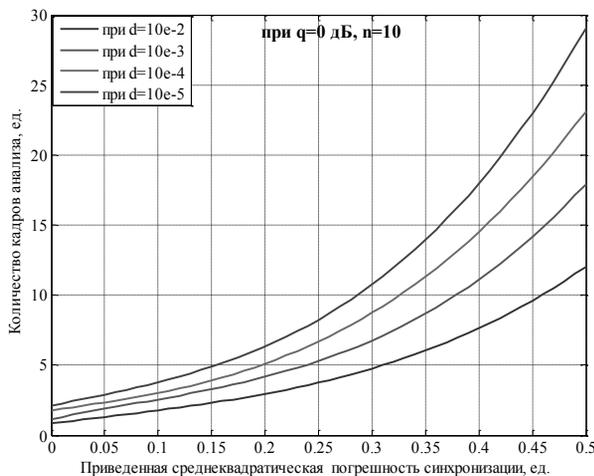


Рис. 4. Результаты оценки количества кадров анализа для работы системы кадровой синхронизации при изменении d , заданном $q = 0$ дБ и $n = 10$

Анализ результатов моделирования. Результаты моделирования показывают, что значительное влияние на время вхождения в синхронизм наземной приемно-регистрирующей станции телеметрической информации, определяемой по количеству кадров анализа $N_{\text{кадр.синх.}}$ оказывает приведенная среднеквадратическая погрешность синхронизации. Данная погрешность зависит от аппаратно-программной ре-

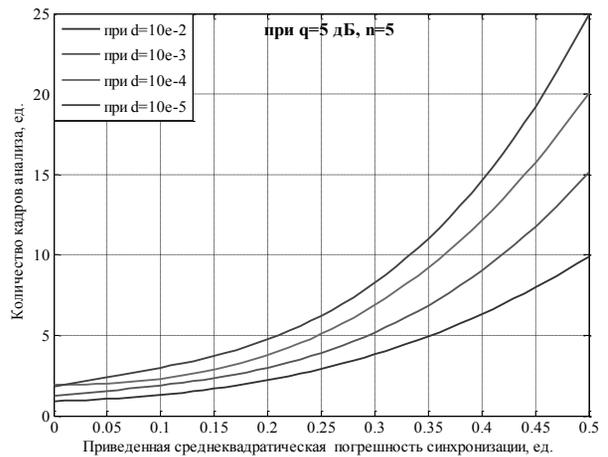


Рис. 5. Результаты оценки количества кадров анализа для работы системы кадровой синхронизации при изменении d , заданном $q = 5$ и $n = 5$

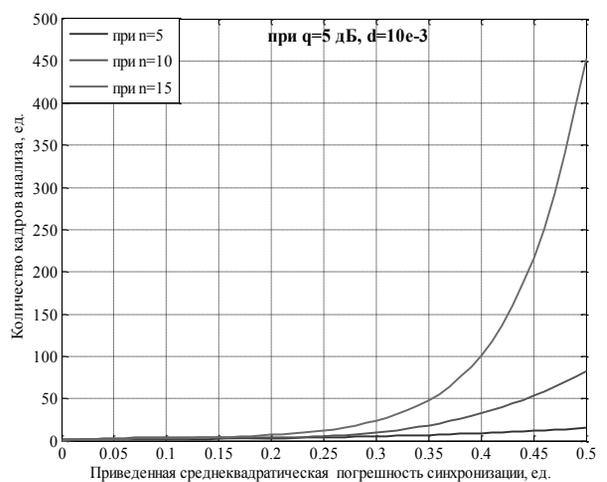


Рис. 6. Результаты оценки количества кадров анализа для работы системы кадровой синхронизации при изменении n и фиксированном d и q

лизации системы символьной синхронизации. Кроме того, вероятность ложного обнаружения необходимо задавать в интервалах 10^{-2} – 10^{-4} , а количество символов в маркере кадра n целесообразно выбирать исходя из кадровой структуры и обнаруживающей способности синхрокомбинации.

Таким образом, для повышения качества работы системы синхронизации радиотелеметрических средств, при проектировании перспективной наземной приемно-регистрирующей аппаратуры, необходима разработка аппаратно-программных средств, обеспечивающих значение приведенной погрешности символьной синхронизации на уровне, не превышающем значения, равного 0,05.

Литература

1. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Современная телеметрия в теории и на практике : учебный курс / А.В. Назаров. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 667 с.
2. Дуников А.С. Современное состояние и проблемы развития информационно-телеметрических средств / А.А. Бянкин, А.И. Лоскутов, А.С. Дуников // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб. : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Т. 1. – С. 221–223.
3. Горяинов В.Т. Требования к точности тактовой синхронизации в системах передачи двоичной информации / В.Т. Горяинов // Известия вузов СССР – Радиоэлектроника. – 1970. – № 7. – С. 787–798.
4. Фомин А.И. Синхронизация цифровых радиосистем передачи информации / А.И. Фомин. – М. : Сайенс-Пресс, 2008. – 80 с.
5. Новиков А.Н. Математическая модель обоснования вариантов реконфигурации распределенной автоматизированной контрольно-измерительной системы / А.Н. Новиков, А.А. Нечай, А.В. Малахов // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2016. – Выпуски 1–2. – С. 56–59.
6. Нечай А.А. Методика повышения надежности функционирования систем, организованных на перепрограммируемых элементах / А.А. Нечай, П.Е. Котиков // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2016. – Выпуски 1–2. – С. 87–89.
7. Уланов А.В. Повышение оперативности принятия решения в автоматизированных системах / А.В. Уланов, А.А. Нечай, П.Е. Котиков // Наука и современность. – 2014. – № 2. – С. 95.