

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 629.764 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.4.51.58

Методика определения количества информации о состоянии ракеты космического назначения в потоке телеметрических сообщений

А. В. Куимов, 82m_proton@mail.ru

Главный испытательный космический центр им. Г. С. Титова,
г. Краснознаменск, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены вопросы оценивания качества системы информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения на основе показателей количества информации о состоянии ракеты космического назначения в потоке телеметрических сообщений, определен их состав, введен новый частный показатель, характеризующий качество процессов устранения информационной избыточности в элементах системы информационно-телеметрического обеспечения. Сформирована область исходных данных, необходимых для определения значений показателей количества информации.

На основе математического аппарата дискретной энтропии случайных событий и процессов и концепции «интервальных» гипотез средств измерений и контроля определены функциональные зависимости показателей количества информации от параметров состояния и варьируемых параметров системы информационно-телеметрического обеспечения как для отдельных телеметрических сообщений сигнальных, медленно и быстро меняющихся функциональных телеметрируемых параметров, так и для группового потока телеметрических сообщений ракет космического назначения с учетом возмущающих воздействий.

Ключевые слова: энтропия, количество информации, коэффициент информативности, коэффициент потери информации, параметр, показатель

Technique to Determine Information Amount on the Space Rocket State in the Telemetric Messages Flow

A. V. Kuimov, 82m_proton@mail.ru

Titov Space Control Centre, Krasnoznamensk, Moscow region, Russian Federation

Abstract. The paper studies the estimation issues of the quality of the information-telemetry system for launching space rockets based on the information amount indicators of the space rocket state in the telemetry flow and determines their composition. A new private information indicator characterizing the quality of the processes of eliminating information redundancy in the elements of the information-telemetry system is introduced. The area of initial data necessary for determining the values of indicators of the amount of information is formed.

Based on the mathematical apparatus of discrete entropy of random events and processes and the concept of “interval” hypotheses of measurement and control instruments, functional dependences of the information amount indicators on the state parameters and variable parameters of the information-telemetry system both for individual telemetering messages of signaling, slowly and rapidly changing functional telemetric parameters and a group flow of telemetric messages of space rockets taking into account disturbing influences are determined.

Keywords: entropy, information amount, information coefficient, information loss coefficient, parameter, indicator

Введение

Система информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) играет ведущую роль в процессе испытаний и применения ракет космического назначения (РКН) и является основным источником информации о работе бортовых систем и агрегатов. Высокая сложность современных и перспективных РКН приводит к необходимости контроля большого числа параметров, характеризующих состояние и режимы работы отдельных агрегатов и РКН в целом, вследствие чего к современным СИТО запусков РКН предъявляются все более возрастающие требования.

При проведении исследований, связанных с обоснованием и выбором рациональных характеристик и параметров СИТО, их изменением во времени на различных этапах функционирования, оценка качества функционирования системы и ее элементов проводится на основе комплексного учета совокупности показателей, в наибольшей степени отвечающих цели системы.

Анализ работ, посвященных вопросам телеметрических измерений и диагностики сложных динамических технических систем [1–7], показывает, что в наибольшей степени целевому назначению СИТО запусков РКН соответствуют информационные показатели.

Методические основы определения количества информации о состоянии ракеты космического назначения в потоке телеметрических сообщений

Предложенная методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений предназначена для определения влияния параметров входов и варьируемых параметров на степень достижения цели функционирования СИТО запусков РКН.

В основу методики определения количества информации положен математический аппарат дискретной энтропии случайных событий и процессов и концепция «интервальных» гипотез средств

измерений и контроля [4, 8, 9]. В обосновании данного подхода лежит дискретная форма представления телеметрических сигналов как по величине, так и по времени, а также тот факт, что значения телеметрируемых параметров находятся в пределах установленных интервалов телеметрической шкалы.

В настоящее время в качестве показателей количества информации [4, 9–11] в потоке телеметрических сообщений рассматриваются:

- апостериорная энтропия телеметрируемых параметров РКН на выходе СИТО (H_{aps});
- количество информации, содержащейся в сообщениях телеметрируемых параметров РКН (I);
- коэффициент информативности телеметрических сообщений, определяемый отношением количества информации к объему данных на интервале контроля $J = I / (v_s^{\text{LS}} \cdot t_K)$,

где v_s^{LS} — плотность потока телеметрических сообщений, t_K — времена контроля телеметрируемых параметров.

В методике введен новый показатель количества информации, характеризующий качество процессов сокращения информационной избыточности потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ — коэффициент потери информации, определяемый как отношение апостериорных энтропий телеметрируемых параметров на выходе СИТО к выходу БИТС РКН $K_H^{\text{LS}} = H_{\text{aps}} / H_{\text{aps}}^{\text{BITS}}$, где $H_{\text{aps}}^{\text{BITS}}$ — апостериорная энтропия телеметрируемых параметров на выходе БИТС РКН.

Принятые в методике показатели рассчитываются как для потока сообщений отдельных телеметрируемых параметров, так и для всей совокупности данных потока телеметрических сообщений.

Основными исходными данными, которые используются в методике, являются параметры процесса формирования ТМИ РКН, параметры телеметрируемых параметров РКН, параметры потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, среди которых

параметры процесса формирования ТМИ РКН:

- состав телеметрируемых параметров РКН (r^{BITS});
- частоты опроса телеметрируемых параметров РКН (f^{BITS});

- аппаратные погрешности измерений функциональных параметров (δ^R);

параметры телеметрируемых параметров

РКН:

- расчетные диапазоны изменения функциональных параметров (Δ^{RFP});
- расчетные длительности переходных процессов функциональных параметров (τ^{RFP});
- расчетные диапазоны срабатывания сигнальных параметров (t^{RSP});

параметры потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ:

- состав телеметрических сообщений в потоке (s^{LS});
- коэффициенты прореживания телеметрируемых параметров (k^{prLS}).

Методика представляет собой иерархическую двухуровневую структуру расчетных процедур: на первом уровне проводятся расчеты значений показателей потоков сообщений отдельных телеметрируемых параметров, на втором уровне — расчеты значений показателей потока телеметрических сообщений в целом. Структурная схема методики представлена на рисунке.

Необходимо подчеркнуть, что количество информации в потоке сообщений зависит от степени детализации исследуемого процесса [5, 9, 12]. При этом выбор наименьшего различимого (элементарного) интервала определяется исходя из технических возможностей бортовых радиотелеметрических систем (БРТС) и условий проведения телеметрических измерений. В настоящей методике в качестве элементарных интервалов приняты: по шкале времени — длительность цикла опроса основного коммутатора БРТС и величина уровня квантования (цена младшего разряда) телеметрической шкалы по шкале значений телеметрируемых параметров РКН.

Функциональные зависимости показателей количества информации

В методике проводятся расчеты значений показателей количества информации как в потоках сообщений отдельных сигнальных, функциональных

медленно и быстро меняющихся телеметрируемых параметров, так и в общем потоке телеметрических сообщений РКН.

Сигнальные параметры содержат информацию о дискретных во времени событиях: исполнении команд, включения и выключения узлов аппаратуры и т. п. При этом передается лишь сам факт совершения события без его количественных характеристик, а потребителя интересуют время и направление срабатывания (замыкание или размыкание) сигнального параметра [1, 3, 10].

Энтропия сигнального параметра определяется распределением момента срабатывания параметра во времени, в основу вычисления ее положена формула

$$h^{SP} = \log_2(2k_s \cdot \sigma), \quad (1)$$

где k_s — энтропийный коэффициент;

σ — дисперсия распределения времени срабатывания.

Распределение момента срабатывания сигнального параметра характеризуется равномерным законом, для которого $k_s = 1,73$. Дисперсия распределения времени срабатывания определяется как отношение половины ожидаемого времени срабатывания к времени канального интервала БРТС. С учетом изложенного формула расчета энтропии (1) s -го сигнального параметра принимает вид

$$h_{apr}^{SPs} = \log_2 \left(1,73 \cdot \frac{t_s^{RSP}}{\tau_k} \right)$$

для априорной энтропии и

$$h_{aps}^{SPs} = \log_2 \left(1,73 \cdot \frac{1}{f_s \cdot \tau_k} \right)$$

для апостериорной, где τ_k — длительность цикла опроса основного коммутатора БРТС;

f_s — частота следования сообщений телеметрируемого параметра в потоке ТМИ, равная f_r^{BITS} для потока БИТС и $\frac{f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}}$ для потока в каналах передачи ТМИ.

Количество информации, получаемое в результате регистрации срабатывания сигнального параметра в потоках телеметрических сообщений, определяется по формуле

$$i^{SPs} = \log_2 \left(\frac{t_s^{RSP} \cdot f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \right).$$

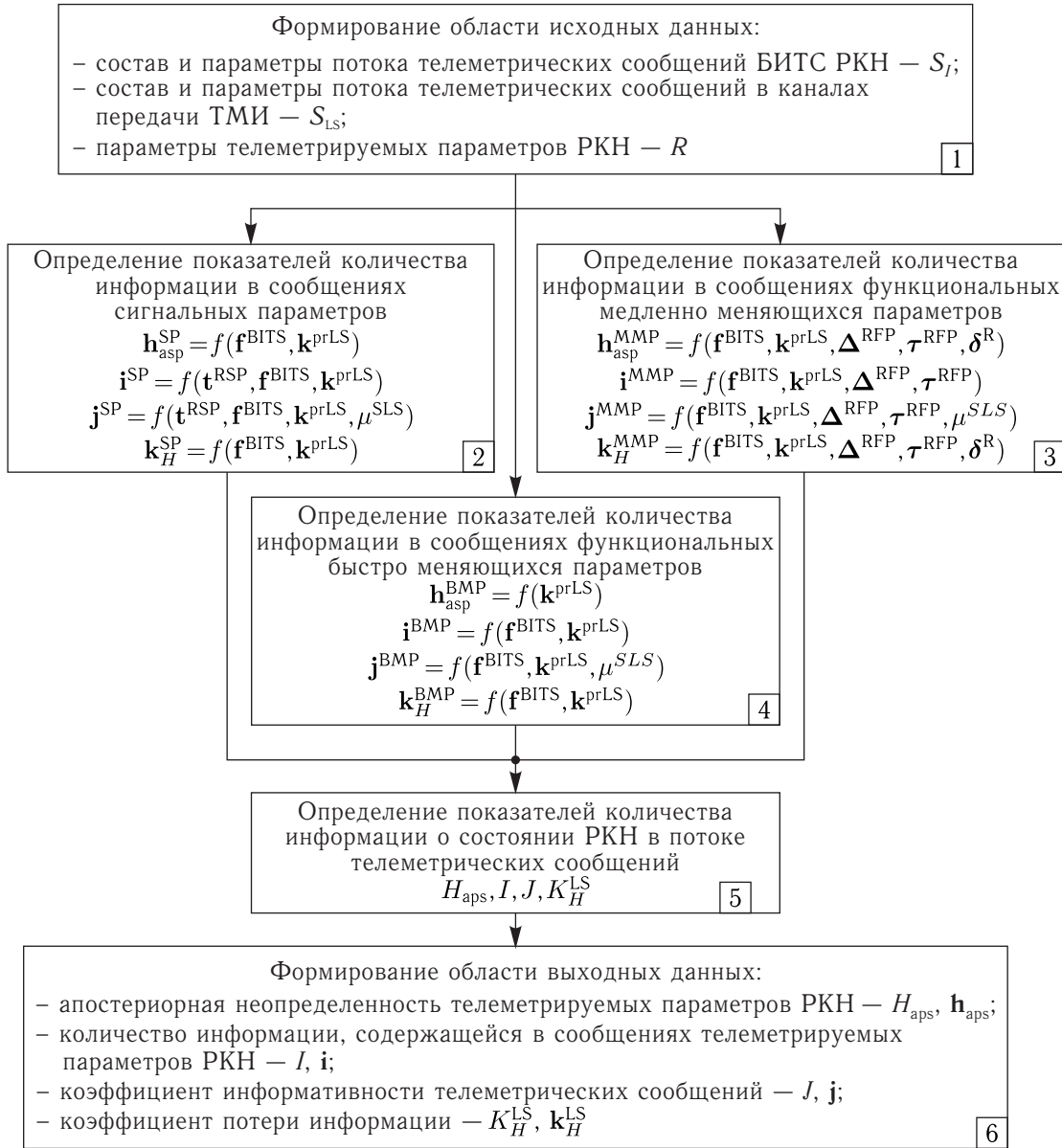


Рисунок. Структурная схема методики определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений

Коэффициент информативности телеметрических сообщений сигнального параметра в потоках телеметрических сообщений определяется по формуле

$$j^{SPs} = \frac{\log_2 \left(\frac{t_s^{RSP} \cdot f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \right)}{\frac{f_s^{BITS}}{k_s^{prLS}} \cdot \mu^{SLS} \cdot t_s^{RSP}}$$

где t_s^{RSP} — время выдачи в каналы передачи ТМИ сообщений сигнального параметра.

Коэффициент потери информации сообщений сигнального параметра при формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ определяется по формуле

$$k_{H_s}^{SP} = 1 + \frac{\log_2(k_s^{prLS})}{\log_2 \left(1.73 \cdot \frac{1}{f_s^{BITS} \cdot \tau_k} \right)}$$

Медленно меняющиеся параметры (частота вопроса до 500 Гц) содержат информацию о дис-

кретных выборках измеряемых величин, по которым потребитель восстанавливает непрерывные физические процессы. Каждое сообщение содержит два компонента: время измерения и измеренное значение параметра. На практике, вследствие несовершенства средств измерений, значения телеметрируемых параметров в сообщениях отличаются от истинных и представляют собой сумму двух независимых сигналов: собственно измеряемой величины и шумового сигнала средств измерений, который характеризуется погрешностью первичных преобразователей.

Энтропия медленно меняющегося параметра определяется распределением двух процессов и на основе свойства аддитивности энтропий вычисляется по формуле

$$h^P = \log_2(2k_{\text{эп}} \cdot \sigma_{\text{п}}) + \log_2(2k_{\text{э}\delta} \cdot \delta^R), \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ — диапазон возможных значений телеметрируемого параметра;

$k_{\text{эп}}, k_{\text{э}\delta}$ — энтропийные коэффициенты измеряемой величины и погрешности измерений.

Распределение значений телеметрируемых медленно меняющихся параметров характеризуется равномерным законом распределения в диапазоне возможных значений, для которого $k_{\text{эп}} = 1,73$. Суммарная погрешность средств измерений включает большое количество составляющих, вследствие чего характеризуется нормальным законом распределения, для которого $k_{\text{э}\delta} \approx 2,07$.

При вычислениях информационных показателей последовательных отсчетов телеметрируемого параметра учитывается возможность предсказания значения последующего отсчета с погрешностью воспроизводящей функции промежуточных значений непрерывного процесса по дискретным выборкам. В настоящее время [1, 2] наибольшее распространение получил метод восстановления интерполяционным полиномом Лагранжа низкой степени, для которого погрешность восстановления определяется остаточным членом и зависит от степени воспроизводящего полинома.

При расчетах априорной энтропии принимается нулевая степень воспроизводящего полинома (ступенчатая интерполяция по одному предшествующему отсчету), погрешность достигает наибольшего значения в конце интервала предсказания.

Выражение (2) для априорной энтропии единичного сообщения медленно меняющегося параметра принимает вид

$$h_{\text{апр}}^{MMPsi} = \log_2 \left(3,46 \cdot \left[|\phi_s^{\text{RFP}}(t_{i-1})| \cdot \frac{k_s^{\text{prLS}}}{f_s^{\text{BITS}}} \right] \right) + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^R),$$

где t_{i-1} — время предыдущего отсчета;

$|\phi_s^{\text{RFP}}(t_{i-1})|$ — модуль значения первой производной функции, описывающий идеальный процесс медленно меняющегося параметра на время предыдущего отсчета.

При расчетах апостериорной энтропии принимается первая степень воспроизводящего полинома (линейная интерполяция по текущему и предшествующему отсчетам), погрешность достигает наибольшего значения в середине межопросного интервала. Выражение (2) для апостериорной энтропии единичного сообщения медленно меняющегося параметра принимает вид

$$h_{\text{апс}}^{MMPsi} = \log_2 \left(3,46 \cdot \left[\frac{|\phi_s^{\text{RFP}}(t_{i-1})|}{8} \cdot \frac{k_s^{\text{prLS}^2}}{f_s^{\text{BITS}^2}} \right] \right) + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^R),$$

где $|\phi_s^{\text{RFP}}(t_{i-1})|$ — модуль значения второй производной функции, описывающий идеальный процесс медленно меняющегося параметра на время предыдущего отсчета.

Апостериорная энтропия последовательности сообщений медленно меняющегося параметра на интервале оценивания принимает значение энтропии сообщения с максимальной неопределенностью. Для определения верхних значений производных в методике используется неравенство Бернштейна [1, 2, 10]:

$$|\phi_S^{(n)\text{RFP}}| \leq \omega_S^n \cdot |\Delta_S|,$$

где $\omega_S = \frac{\pi}{\tau_S^{\text{RFP}}}$ — круговая частота процесса на характерном участке изменения телеметрируемого параметра.

При использовании методики в оптимизационных расчетах производные рассчитываются исходя

из значений диапазонов изменения (Δ^{RFP}) и длительностей переходных процессов (τ^{RFP}) функциональных параметров, заданных в технической документации, а при использовании в оценочных расчетах — исходя из их фактических значений в материалах регистрации ТМИ, полученных в ходе эксперимента.

Количество информации, содержащееся в единичном сообщении медленно меняющегося параметра, определяется по формуле

$$i^{\text{MMPsi}} = \log_2 \left(\frac{\left[|\phi_s^{\text{RFP}}(t_{i-1})| \cdot \frac{k_s^{\text{prLS}}}{f_s^{\text{BITS}}} \right]}{\left[\frac{|\phi_s^{\text{RFP}}(t_{i-1})|}{8} \cdot \frac{k_s^{\text{prLS}^2}}{f_s^{\text{BITS}^2}} \right]} \right).$$

Количество информации, содержащейся в последовательности сообщений медленно меняющихся параметров, является суммой количества информации, содержащейся в единичных сообщениях.

Коэффициент информативности телеметрических сообщений медленно меняющегося параметра в потоке телеметрических сообщений определяется по формуле

$$j^{\text{Ps}} = \frac{\sum_i I^{\text{Psi}}}{\frac{f_s^{\text{BITS}}}{k_s^{\text{prLS}} \cdot \mu^{\text{SLS}} \cdot t_{\text{oc}}}},$$

где t_{oc} — время оценки сообщений параметра.

Коэффициент потери информации сообщений медленно меняющегося параметра при формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ определяется по формуле

$$k_{H_s}^{\text{MMP}} = \log_2 \left(3,46 \cdot \left[\frac{\max |\phi_s^{\text{RFP}}(t)|}{8} \cdot \frac{k_s^{\text{prLS}^2}}{f_s^{\text{BITS}^2}} \right] \right) + \\ + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^{\text{R}}) / \log_2 \left(3,46 \cdot \left[\frac{\max |\phi_s^{\text{RFP}}(t)|}{8 f_s^{\text{BITS}^2}} \right] \right) + \\ + \log_2(4,14 \cdot \delta_s^{\text{R}}).$$

Быстро меняющиеся функциональные параметры (частота опроса более 500 Гц) представляют собой сумму сигналов множества гармонических процессов и содержат информацию о вибрациях в узлах и агрегатах РКН, акустических нагрузениях элементов конструкции. Потребителя интересуют не значения параметров, а их спектральные

характеристики, получаемые в результате разложения параметров в ряд Фурье [2,4,10]. Для конечного интервала наблюдения верхняя граница спектра восстановленного сигнала определяется по теореме Котельникова:

$$f_m = 0,5f_o,$$

где f_m — верхняя граница энергетического спектра быстро меняющегося параметра;

f_o — частота опроса быстро меняющегося параметра.

Распределение спектральной плотности мощности быстро меняющихся параметров характеризуется равномерным законом распределения в диапазоне возможных значений, для которого $k_s = 1,73$. Для быстро меняющегося параметра априорная энтропия определяется по формуле

$$h_{\text{apr}}^{\text{BMPs}} = \log_2(1,73 \cdot f_s^{\text{BITS}}) + \log_2\left(1,73 \cdot \frac{t_{\text{oc}}}{\tau_k}\right).$$

Апостериорная энтропия быстро меняющегося параметра включает две составляющие: энтропию сужения полосы оцениваемого спектра вследствие прореживания отсчетов и энтропию детализации разложения в спектр:

$$h_{\text{aps}}^{\text{BMPs}} = \\ = \log_2(1,73 \cdot f_s^h) + \log_2\left(1,73 \cdot \frac{t_s^h}{\tau_k}\right) + \log_2(k_s^{\text{prLS}}),$$

где f_s^h , t_s^h — шаг детализации спектрального разложения по частоте и времени.

Количество информации, содержащееся в сообщениях быстро меняющегося параметра на интервале оценки, определяется по формуле

$$i^{\text{BMPs}} = \\ = \log_2\left(1,73 \cdot \frac{f_s^{\text{BITS}}}{f_s^h}\right) + \log_2\left(1,73 \cdot \frac{t_{\text{oc}}}{t_s^h}\right) - \log_2(k_s^{\text{prLS}}).$$

Коэффициент информативности телеметрических сообщений быстро меняющегося параметра в потоке телеметрических сообщений определяется по формуле

$$j^{\text{BMPs}} = \frac{i^{\text{BMPs}}}{\frac{f_s^{\text{BITS}}}{k_s^{\text{prLS}} \cdot \mu^{\text{SLS}} \cdot t_{\text{oc}}}}.$$

Коэффициент потери информации сообщений быстро меняющегося параметра при формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ определяется по формуле

$$k_{H_s}^{BMP} = 1 + \frac{\log_2(k_s^{prLS})}{\log_2\left(2,9929 \cdot \frac{f_s^{BITS} \cdot t_{oc}}{f_s^h \cdot t_s^h}\right)}.$$

Расчеты показателей количества информации, характеризующих всю совокупность данных потока телеметрических сообщений, основываются на свойстве аддитивности энтропии независимых процессов. В качестве входных данных используются результаты расчетов по определению значений показателей количества информации потоков сообщений отдельных телеметрируемых параметров.

Апостериорная энтропия потока телеметрических сообщений и количество информации, содержащейся в потоке телеметрических сообщений, определяются как суммы соответствующих показателей отдельных потоков сообщений телеметрируемых параметров:

$$H_{aps} = \sum_{s \in s^{SP}} h_{aps}^{SPs} + \sum_{s \in s^{MMP}} h_{aps}^{MMPs} + \sum_{s \in s^{BMP}} h_{aps}^{BMPs};$$

$$I = \sum_{s \in s^{SP}} i^{SPs} + \sum_{s \in s^{MMP}} i^{MMPs} + \sum_{s \in s^{BMP}} i^{BMPs}.$$

Для телеметрируемых параметров РКН, не включенных в поток телеметрических сообщений, апостериорная энтропия сохраняет значение априорной ($h_{aps}^s = h_{apr}^s$), а количество информации равняется нулю ($i^s = 0$).

Коэффициент информативности потока телеметрических сообщений определяется по формуле

$$J = \frac{I}{v_s^{LS} \cdot t_{oc}}.$$

Коэффициент потери информации при формировании потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ определяется по формуле

$$K_H^{LS} = \frac{H_{aps}}{H_{aps}^{BITS}}.$$

Выходные результаты расчетов используются при проведении процедур поиска рациональных значений варьируемых параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ

и при проведении оценки результатов параметрического синтеза адаптивной СИТО запусков РКН. При этом использование введенного показателя количества информации (k_H^{LS}) для многомерного поиска рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений (k^{prLS}) по критерию минимизации коэффициентов потери информации $k_H^{LS} \rightarrow \min_{k^{prLS}}$ позволяет проводить оптимизационные расчеты в единой относительной шкале.

При расчетах информационных показателей потоков сообщений телеметрируемых параметров учитываются только достоверные сообщения телеметрируемых параметров РКН. На практике воздействия возмущений на информационные потоки приводят к искажениям телеметрических сообщений, выражающихся в виде ложных срабатываний для сигнальных параметров и в аномальных значениях функциональных параметров.

В методике возмущающие воздействия учитываются через увеличение межопросного интервала отсчетов телеметрируемых параметров (снижение частоты следования достоверных сообщений) на интервалах искажений ТМИ вследствие отбраковки аномальных отсчетов.

Заключение

Разработанная методика определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений базируется на математическом аппарате дискретной энтропии случайных событий и процессов. Методика представляет собой двухуровневую структуру расчетных процедур: расчетные процедуры первого уровня предназначены для определения значений показателей количества информации в потоках сообщений отдельных телеметрируемых параметров; на втором уровне проводятся расчеты по определению значений показателей количества информации в общем потоке телеметрических сообщений.

Предложенная методика определения количества информации в потоке телеметрических сообщений может быть использована как при поиске рациональных значений варьируемых параметров разрабатываемых СИТО, так и при оценивании существующих.

Список литературы

1. *Фремке А.В.* Телеизмерения. М.: Высшая школа, 1968. 262 с.
2. *Белицкий В.И., Зверев В.И.* Телеметрия. Л.: МО СССР, 1984. 465 с.
3. *Кошевой А.А.* Телеметрические комплексы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 312 с.
4. *Цапенко М.П.* Измерительные информационные системы: Структура и алгоритмы, системотехническое проектирование: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 440 с.
5. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика. Л.: МО СССР, 1987. 522 с.
6. *Богомолов А.М., Твердохлебов В.А.* Диагностика сложных систем. Киев.: Наукова думка, 1974. 128 с.
7. Приборно-модульные универсальные автоматизированные системы: Справочник / В. А. Кузнецов, В. Н. Строителев, Е. Ю. Тимофеев и др. М.: Радио и связь, 1993. 304 с.
8. *Рубичев Н.А.* Измерительные информационные системы: Учеб. пособие. М.: Дрофа, 2010. 334 с.
9. *Рабинович В.И., Цапенко М.П.* Информационные характеристики средств измерения и контроля. М.: Энергия, 1968. 96 с.
10. Современная телеметрия в теории и на практике: Учеб. курс / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, И. В. Шитов и др. СПб.: Наука и техника, 2007. 672 с.
11. Информационные процессы в автоматизированных системах сбора и обработки информации / Под общ. ред. Ю. Г. Ростовцева. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1981. 223 с.
12. *Деев В.В., Чикуров В.А.* Формирование и передача телеметрической информации в современных системах: Учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. 89 с.