

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОТОКА
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА РЕСУРСЫ
КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

М.М. Матюшин, А.В. Куимов

Докт. техн. наук М.М. Матюшин; А.В. Куимов
(АО «ЦНИИмаш»)

В работе приведена математическая постановка задачи разработки плана формирования рационального потока телеметрических сообщений в каналах передачи информации. Определены область исходных данных, искомые варьируемые параметры, показатели и критерии качества потока телеметрических сообщений, ограничения на область допустимых решений. Предложена методика решения поставленной задачи с использованием математического аппарата последовательной оптимизации. Проведена апробация разработанной методики с использованием исходных данных и материалов регистрации телеметрической информации при запусках с космодрома Байконур «условно-легких» космических аппаратов ракетой-носителем «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М».

Ключевые слова: методика, информационная производительность, энтропия, избыточность, телеметрические сообщения, рациональный.

**Forming the Rational Telemetry Message Traffic of Rocket
and Space Engineering under the Restrictions on the Resources
of Data-Transmission Channels. M.M. Matyushin, A.V. Kuimov**

The paper presents the formulation of the mathematical problem for developing the rational telemetry message traffic via data-transmission channels. The source data region, required varying parameters, indicators and criteria of quality for the telemetry message traffic, and restrictions on the permissible solutions region were determined. The methodology for solving the set problem using the mathematical apparatus of sequential optimization is proposed. The developed methodology was tested using the source data and telemetric information recorded during launches of “conditionally light” spacecraft by the “Proton-M” launcher vehicle with the “Briz-M” upper stage from the Baikonur cosmodrome.

Keywords: methodology, information performance, entropy, redundancy, telemetry messages, rational.

Одним из ключевых аспектов планирования и организации информационно-телеметрического обеспечения летных испытаний (ЛИ) и эксплуатации (ЛЭ) изделий ракетно-космической техники (РКТ) является разрешение противоречия между большим объемом телеметрических данных, формируемых

бортовыми радиотелеметрическими средствами (БРТС) ракет космического назначения (РКН), пилотируемых и автоматических космических аппаратов (КА), с одной стороны, и с другой – ограниченным ресурсом существующих средств передачи информации от наземных измерительных пунктов (НИП) в центр контроля полета (ЦКП) РКН и центры управления полетами (ЦУП) КА. Актуальность потребности устранения данного противоречия обусловлена существующей устойчивой тенденцией оснащения современных модернизируемых и разрабатываемых перспективных ракет-носителей (РН), разгонных блоков (РБ), транспортных пилотируемых (ТПК) и грузовых (ТГК) кораблей, автоматических КА высокоинформативными БРТС. Яркими примерами таких изделий РКТ являются: современные РН семейства «Союз-2», оснащаемые высокоинформативными БРТС «РТСЦ-М» и «Астра», ТГК «Прогресс МС» и ТПК «Союз МС», оснащаемые среднеинформативной БРТС «МБИТС-ТК» и высокоинформативной «Астра», перспективные РН семейства «Ангара», оснащаемые высокоинформативными БРТС «Орбита-ТМ», перспективный пилотируемый транспортный корабль (ТПК), оснащаемый высокоинформативной единой командно-телеметрической системой (ЕКТС).

Установленные на данных изделиях РКТ БРТС формируют потоки телеметрической информации (ТМИ), передача которых от средств НИП в ЦКП и ЦУП в реальном масштабе времени (РМВ) полета уже не обеспечивается штатными и дополнительно привлекаемыми средствами передачи данных. Существующее ограничение привело к использованию следующего подхода к организации информационного обмена – в РМВ полета осуществляется сбор неизменного за время сеанса связи состава сообщений наиболее важных (с субъективной точки зрения получателя ТМИ) телеметрируемых параметров, ограниченного исходя из пропускной способности каналов передачи информации, сбор полного объема телеметрических данных осуществляется в «отложенном» режиме.

Практическая реализация данного подхода явилась компромиссом между возможностями системы сбора телеметрической информации и потребностями специалистов по оценке функционирования изделий РКТ, не обеспечивая полный охват контролем функционирования систем, узлов и агрегатов РКТ в РМВ. Это обуславливает актуальность исследования, направленного на разработку методического аппарата, позволяющего установить соответствие изменяющихся на различных этапах полета изделий РКТ потребностей в ТМИ возможностям средств передачи данных. Одной из частных задач рационального планирования и организации функционирования системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) ЛИ и ЛЭ изделий РКТ является разработка плана формирования рационального потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ.

Постановка задачи

Математическая постановка задачи разработки плана формирования рационального потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ выглядит следующим образом:

Известны:

1) информационные параметры бортовой информационно-телеметрической системы (БИТС):

- времена действия программы измерений БИТС ($\mathbf{t}^{\text{prBIITS}}$);
- состав телеметрируемых параметров ($\mathbf{r}^{\text{BIITS}}(t)$);
- частоты опроса телеметрируемых параметров ($\mathbf{f}^{\text{BIITS}}(t)$);
- признаки вида измерений телеметрируемых функциональных параметров ($\boldsymbol{\psi}^{\text{RFP}}$) – прямые или косвенные;
- признаки типа источника телеметрического сообщения ($\boldsymbol{\theta}^{\text{RBIITS}}$) – сообщения измерительной аппаратуры или цифровых абонентских устройств (бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ), навигационной аппаратуры потребителя (НАП));
- признаки режима передачи телеметрического сообщения ($\boldsymbol{\eta}^{\text{RBIITS}}$) – непосредственная передача или через линию задержки (воспроизведение);
- смещение времени выдачи сообщений телеметрируемых параметров через линию задержки (τ^{LZ});
- аппаратные погрешности измерений функциональных параметров ($\boldsymbol{\delta}^{\text{R}}$);

2) характеристики телеметрируемых параметров:

- состав функциональных параметров (\mathbf{r}^{FP});
- расчетные времена участков характерных изменений функциональных параметров (\mathbf{t}^{RFP});
- расчетные диапазоны изменения функциональных параметров ($\Delta^{\text{RFP}}(t)$);
- расчетные длительности переходных процессов функциональных параметров ($\boldsymbol{\tau}^{\text{RFP}}(t)$);
- состав сигнальных параметров (\mathbf{r}^{SP});
- расчетные диапазоны срабатывания сигнальных параметров (\mathbf{t}^{RSP});

3) параметры получателя информации:

- требуемый минимальный состав телеметрируемых параметров, необходимых для оценивания бортовых систем РКТ ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$);

4) параметры форматов сообщений в каналах передачи ТМИ:

- количество разрядов сообщения телеметрируемых параметров (μ^{SLS});

5) параметры плана задействования каналов передачи ТМИ, полученные с использованием методики рационального распределения ресурсов каналов передачи ТМИ между НИП [6]:

- времена коммутации НИП в телеметрические линии связи (\mathbf{t}^{kLS});
- пропускная способность каналов передачи ТМИ с НИП ($\mathbf{v}^{\text{LS}}(t)$);

6) параметры возмущающих воздействий:

– времена прогнозируемых искажений ТМИ, обусловленных условиями излучения радиосигнала при проведении динамических операций РКТ в полете (\mathbf{g}^{RKN}).

Требуется определить рациональные значения варьируемых параметров:

– времена действия программ выдачи телеметрических сообщений в каналы передачи ТМИ (t^{prPPS});

– состав сообщений телеметрируемых параметров, выдаваемых в каналы передачи ТМИ ($\mathbf{s}^{\text{LS}}(t)$);

– коэффициенты прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$).

Данные параметры должны обеспечивать выполнение критериев показателей качества потока телеметрических сообщений:

– максимальной полноты охвата контролем телеметрируемых параметров РКТ

$$s^{\text{LS}}(t) \geq s^{\text{tr}}(t), s^{\text{LS}}(t) \rightarrow r^{\text{BITS}}(t), \quad (1)$$

– минимизации коэффициента потери информации для участков высокой динамики

$$K_H^{\text{LS}} \rightarrow \min_{\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)}, \quad (2)$$

– не ухудшение значений апостериорной энтропии телеметрируемых параметров на участках с низкой динамикой телеметрируемых параметров относительно участков с высокой динамикой

$$h_{\text{aps}}^{\text{sND}} \leq h_{\text{aps}}^{\text{sVD}}, \quad (3)$$

при ограничениях на информационную производительность СИТО

$$v^{\text{S}}(t) \leq \min_{m \in M^{\text{KLS}}(t)} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{\text{LS}}, \text{ для всех } t^{\text{prPPS}} \cap t^{\text{prLS}} \neq \emptyset, \quad (4)$$

где $h_{\text{aps}}^{\text{sND}}$ – апостериорная энтропия сообщений телеметрируемого параметра на участке функционирования с низкой динамикой изменения, $h_{\text{aps}}^{\text{sVD}}$ – апостериорная энтропия сообщений телеметрируемого параметра на участке функционирования с высокой динамикой изменения, $v^{\text{S}}(t)$ – плотность потока телеметрических сообщений, $M^{\text{KLS}}(t)$ – количество НИП, коммутированных в телеметрические линии связи, L – количество телеметрических линий связи, $v_{m,l}^{\text{LS}}$ – пропускная способность канала передачи ТМИ в ЦКП (ЦУП) с m -го НИП в l -й телеметрической линии связи.

Расчеты показателей количества информации осуществляются с использованием методики определения количества информации в потоке телеметрических сообщений [5].

Методика формирования рационального потока телеметрических сообщений

Для решения поставленной задачи разработана методика формирования рационального потока телеметрических сообщений.

В методике принят ряд положений [1, 2, 5, 10], основанных на особенностях процессов функционирования информационно-измерительных систем:

1. Для потребителя ТМИ при осуществлении контроля функционирования РКТ и диагностики состояния бортовых систем более важным является не количество информации, полученной в ходе информационно-телеметрического обеспечения (ИТО), а апостериорная энтропия телеметрируемых параметров.

2. Ценность имеют только те телеметрические сообщения, из которых может быть извлечена информация при конкретных условиях выполнения задач ИТО.

3. Недостаток информации по одним телеметрируемым параметрам не компенсируется избытком по другим.

4. Преобразования потока данных в элементах СИТО сопровождаются неизбежной потерей информации, что приводит к увеличению апостериорной энтропии телеметрируемых параметров на выходе СИТО.

5. Телеметрируемые параметры независимы в части проведения измерений, формирования и передачи сообщений.

Структурная схема методики формирования рационального потока телеметрических сообщений представлена на рисунке 1.

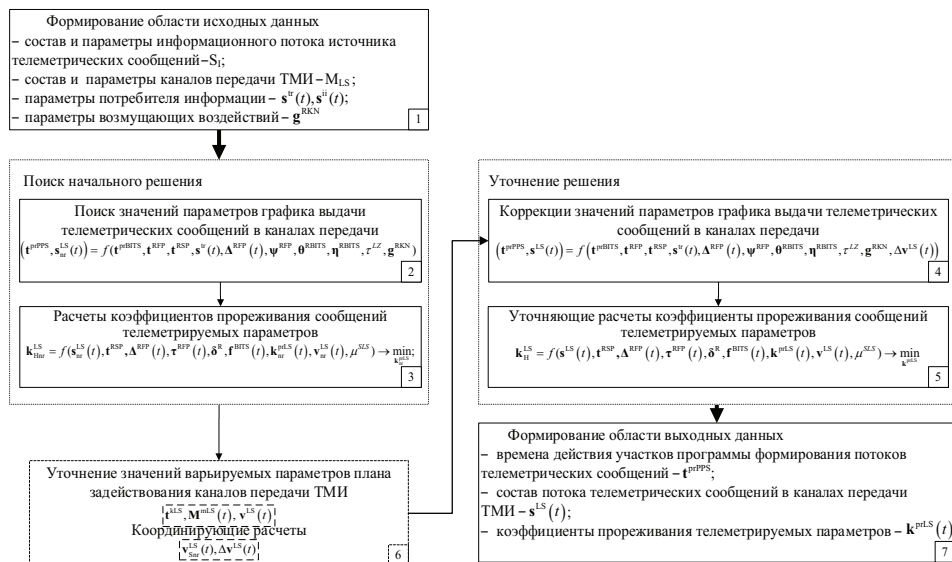


Рис. 1. Структурная схема методики формирования рационального потока телеметрических сообщений

Область исходных данных (блок № 1), необходимых для поиска рациональных значений параметров потока телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ, включает: состав и параметры информационного потока источника телеметрических сообщений (S_I), параметры потребителя информации ($s^{tr}(t)$), состав и параметры каналов передачи ТМИ (M_{LS}), а также параметры возмущающих воздействий (g^{RKN}).

С целью формирования области поиска по составу телеметрируемых параметров на участках функционирования СИТО проводится классификационный анализ телеметрических сообщений.

По признаку типа источника телеметрического сообщения (θ^{RBITS}) определяются сообщения, подлежащие передаче по телеметрическим линиям связи без «прореживания». К данной группе относятся сообщения бортовых цифровых устройств (БЦВМ и НАП), характеризующиеся адаптивностью выборок процессам на борту РКТ, высокой степенью сжатия и информативностью (содержат до 60 % телеметрируемых параметров РКТ), при сравнительно небольшом объеме данных в потоке ТМИ (не превышает 6 % для РКТ, оснащенных высокоинформативными БРТС, и не более 25 %, оснащенных среднеинформативными).

По признакам вида измерений телеметрируемых функциональных параметров (ψ^{RFP}) и текущего состояния физических процессов измеряемых величин определяется перечень телеметрических сообщений первичных преобразователей, из которых потребитель может извлечь информацию в реальном масштабе времени. К данной группе относятся сообщения сигнальных параметров и функциональных параметров прямых измерений незавершенных физических процессов на борту Р ($s^{ii}(t)$).

Для отражения динамики исходных данных при проведении ИТО ЛИ и ЛЭ РКТ строятся ленточные графики:

- функционирования БИТС (t^{prBITS} , $r^{BITS}(t)$, $f^{BITS}(t)$) с указанием интервалов неустойчивой передачи ТМИ (g^{RKN});
- характерных участков динамики телеметрируемых параметров (t^{RFP} , t^{RSP});
- потребностей в ТМИ ($s^{tr}(t)$, $s^{ii}(t)$).

В соответствие с принятым в методике подходом последовательной оптимизации [3, 7, 9], поиск рациональных значений варьируемых параметров потока телеметрических сообщений проводится в два этапа отдельно для параметров графика выдачи телеметрических сообщений, не имеющих четкого аналитического описания (t^{prPPS} , $s^{LS}(t)$), и коэффициента прореживания телеметрических сообщений, имеющего четкое аналитическое описание ($k^{prLS}(t)$). На первом этапе проводится поиск начального решения, на втором – его уточнение.

Процедуры поиска рациональных значений параметров графика выдачи телеметрических сообщений в каналы передачи ТМИ (блоки № 2 и № 4) направлены на выполнение критерия обеспечения максимальной полноты охвата контролем телеметрируемых параметров

$$\mathbf{s}^{LS}(t) \geq \mathbf{s}^{\text{tr}}(t), \mathbf{s}^{LS}(t) \rightarrow \mathbf{s}^{\text{ii}}(t). \quad (5)$$

Выходными результатами поисковых процедур являются:

- времена действия программ выдачи телеметрических сообщений в каналы передачи информации ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}$);
- состав сообщений телеметрируемых параметров, выдаваемых в каналы передачи информации ($\mathbf{s}^{LS}(t)$).

Полученные в результате поиска значения используются при проведении расчетов коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$).

Поиск рациональных значений параметров графика выдачи телеметрических сообщений осуществляется графическим методом.

На первом этапе (блок № 2) проводится поиск начального решения значений параметров. Поисковые процедуры проводятся в следующей последовательности:

1. На основе графиков функционирования БИТС ($\mathbf{t}^{\text{prBITS}}$), минимального состава контролируемых параметров РКТ ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$) и динамики телеметрируемых параметров ($\mathbf{t}^{\text{RFP}}, \mathbf{t}^{\text{RSP}}$) строится график выдачи сообщений телеметрируемых параметров РКТ режима непосредственной передачи ($\mathbf{s}_{\text{nr}}^{LS}(t) = \mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$).

2. Проводится анализ интервалов искажений ТМИ (\mathbf{g}^{RKN}) и состава потока сообщений через линию задержки (ЛЗ) статического кольцевого запоминающего устройства (СКЗУ) и (или) бортового запоминающего устройства (БЗУ) ($\mathbf{n}^{\text{RBITS}}$) с целью определения интервалов и состава сообщений дублирующей выдачи минимального состава контролируемых параметров РКТ ($\mathbf{s}^{\text{trLZ}}(t)$). На их основе строится график дублирующей выдачи сообщений телеметрируемых параметров РКТ режима ЛЗ СКЗУ и (или) воспроизведения из БЗУ.

3. График выдачи сообщений телеметрируемых параметров начального решения ($\mathbf{t}^{\text{prPPS}}, \mathbf{s}_{\text{nr}}^{LS}(t)$) строится объединением сформированных графиков выдачи телеметрических сообщений с учетом сдвига времени линии задержки (τ^{LZ}).

Поиск рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{k}^{\text{prLS}}(t)$) проводится для каждой программы плана формирования потока телеметрических сообщений (блоки № 3 и № 5) с использованием показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений: $\mathbf{h}_{\text{aps}}(t), \mathbf{k}_{\text{H}}^{LS}(t)$, что в отличие от существующих подходов позволяет сформировать нормированное метрическое пространство поиска значений параметров потока телеметрических сообщений разнородных телеметрируемых параметров РКТ.

При проведении расчетов телеметрические сообщения делятся на две группы:

- параметры, подлежащие обязательному сбору ($\mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$);
- дополнительные параметры ($\mathbf{s}^{\text{dp}}(t) = \mathbf{s}^{\text{ii}}(t) - \mathbf{s}^{\text{tr}}(t)$).

При этом в методике принимается допущение, что телеметрируемые параметры одной группы равнозначны для получателя.

Использование для проведения поисковых расчетов нового показателя количества информации – коэффициента потери информации (\mathbf{k}_H^{LS}) – при его относительной размерности и с учетом принятого допущения равнозначности позволяет свести частную многомерную оптимизационную задачу поиска рациональных значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений (\mathbf{k}^{prLS}) к одномерной.

На первом этапе проводится поиск начального решения (блок № 3). Поисковые расчеты проводятся в следующей последовательности:

1. Расчеты значений коэффициентов прореживания на участках плана формирования потока сообщения непосредственной передачи с высокой динамикой телеметрируемых параметров.

2. Расчеты значений коэффициентов прореживания на участках плана формирования потока сообщения непосредственной передачи с низкой динамикой телеметрируемых параметров и на участках совмещенной выдачи сообщений режимов непосредственной передачи и передачи через ЛЗ СКЗУ и (или) выдачи БЗУ.

Для участков с высокой динамикой телеметрируемых параметров поиск осуществляется по критерию минимизации коэффициента потери информации

$$\mathbf{k}_H^{LS} \rightarrow \min_{\mathbf{k}^{prLS}}, \quad (6)$$

при ограничениях на плотность информационного потока по пропускной способности каналов передачи ТМИ начального решения и по области допустимых значений коэффициента прореживания, образующих нижнюю границу области допустимых решений

$$v_{Snr}^{LS}(t) \leq \min_{\substack{m \in \\ nr}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LSnr}(t) - v_{CM}^{LS}(t), \quad \text{для всех } t \in t_q^{prPPS}, \quad (7)$$

$$k_s^{prLS} \geq 1, s \in S_{nr}$$

где $v_{CM}^{LS}(t)$ – плотность информационного потока сообщений цифровых устройств.

Возрастающий характер целевой функции $\mathbf{k}_H^{LS} = f(\mathbf{k}^{prLS})$ при убывающем характере функции ограничений $v_{Snr}^{LS} = f(\mathbf{k}^{prLS})$ обосновывает преимущества проведения прямого итерационного поиска методом направленного спуска, при этом решение подзадачи лежит на нижней границе области допустимых решений [4, 8, 11].

За начальную точку поиска принимается минимальное значение верхней границы области поиска значений коэффициентов потери информации телеметрических сообщений $k_{H0}^{LS} = \min_{s_{nr}^{LS}} \left(\frac{h_{apr}^s}{h_{aps}^{BITSs}} \right)$ при нижней границе поиска

$k_{Hs}^{LS} = 1$. Поиск проводится в направлении нижней границы поиска с переменным по «Правилу золотого сечения» шагом спуска, обеспечивающим хорошую скорость и сходимость поисковых итераций. При этом на каждом шаге принимается ближайшее верхнее целое значение коэффициентов прореживания $\lceil k_{sk}^{npLSnr} \rceil$. Поиск останавливается при достижении сверху нижней границы области допустимых решений.

Для участков с низкой динамикой телеметрируемых параметров и участков совмещенной выдачи расчеты значений коэффициентов прореживания проводятся по критерию не ухудшения апостериорной энтропии телеметрируемых параметров на участках с низкой динамикой телеметрируемых параметров относительно участков с высокой динамикой ($h_{aps}^{sND} \leq h_{aps}^{sVD}$)

$$k_s^{npLSnr} = \lfloor f(h_{aps}^{sVD}) \rfloor, \quad (8)$$

с проверкой на соответствие ограничениям (4). Если решение выходит за область допустимых решений, то поисковые расчеты проводятся по алгоритму участков с высокой динамикой.

На втором этапе по результатам координирующих расчетов проводится уточнение значений варьируемых параметров.

По результатам начального решения по определению значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрируемых параметров проводится уточнение графика выдачи сообщений телеметрируемых параметров (блок № 4) начального решения на предмет увеличения состава сообщений телеметрируемых параметров в каналах передачи ТМИ ($\mathbf{s}^{LS}(t) \rightarrow \mathbf{s}^{ii}(t)$).

Условием расширения состава сообщений до $\mathbf{s}^{ii}(t)$ на q -й программе плана формирования потока телеметрических сообщений является наличие неиспользуемого ресурса пропускной способности в каналах передачи ТМИ

$$\Delta v^{LS} = \min_{m \in M^{kLS}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LS}(t) - v_{Snr}^{LS}(t), \text{ при } t \in t_q^{prPPS}. \quad (9)$$

По результатам координирующих расчетов и уточнения значений параметров графика выдачи телеметрических сообщений проводятся уточняющие расчеты значений коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи информации (блок № 5). При этом поисковые расчеты на участках плана формирования потока телеметрических сообщений дополняются расчетами коэффициентов прореживания дополнительных параметров ($\mathbf{s}^{dp}(t)$) по алгоритму участков с высокой динамикой, при ограничениях вида

$$v_{SDP}^{LS}(t) \leq \min_{m \in M^{kLS}} \sum_{l \in L} v_{m,l}^{LS}(t) - v_{Str}^{LS}(t) - v_{Stz}^{LS}(t) - v_{CM}^{LS}(t), \quad (10)$$

$$k_{SDP}^{prLS} \geq 1, S_{DP} \in S_{DP}$$

для всех $t \in t_q^{prPPS}$.

После этого проводятся расчеты коэффициентов потери информации для суммарных потоков соответствующих групп сообщений телеметрируемых параметров: $\mathbf{s}_{\text{NP+LZ}}^{\text{tr}}(t)$, $\mathbf{s}^{\text{dp}}(t)$ – если $K_H^{LSdp} \leq K_H^{LSir}$, а для всей совокупности сообщений телеметрируемых параметров на участке плана проводятся повторные поисковые расчеты по алгоритму участков с высокой динамикой.

В отличие от используемого в настоящее время подхода к формированию потока телеметрических сообщений используемый в методике двухэтапный алгоритм позволяет варьировать состав потока телеметрических сообщений в соответствии с потребностями получателя информации и наличием свободного ресурса пропускной способности каналов передачи ТМИ, а также использовать телеметрические сообщения, выдаваемые через ЛЗ СКЗУ и (или) из БЗУ, для снижения энтропии телеметрических сообщений на участках искажений ТМИ при проведении динамических операций РКТ.

Полученные в результате поиска значения варьируемых параметров потока телеметрических сообщений используются для разработки рационального плана формирования потока телеметрических сообщений при проведении ИТО ЛИ и ЛЭ РКТ в реальном масштабе времени.

Апробация методики формирования рационального потока телеметрических сообщений

В процессе практических исследований сформирована область расчетных данных, составляющих рациональный план формирования потока телеметрических сообщений для передачи по телеметрическим линиям связи при обеспечении запуска РКН. Поисковые процедуры и расчеты выполнены на основе исходных данных первого сеанса ИТО пуска и полета с космодрома Байконур РКН в составе РН «Протон-М» – РБ «Бриз-М» (рис. 2).

Разработанный план формирования потока телеметрических сообщений обеспечивает полный охват контролем телеметрируемых параметров РКН и компенсация потерь ТМИ на интервалах прогнозируемых искажений телеметрическими сообщениями, выдаваемыми через СКЗУ.

Оценка работоспособности разработанной методики, с учетом сложности объекта исследования, осуществлялась с использованием опытно-теоретического подхода. В соответствии с принятыми концепциями методика оценки работоспособности включает в себя эксперимент, проведенный в полунатурных условиях с использованием материалов регистрации ТМИ двадцати шести реальных пусков РН «Протон», а также имитационное моделирование возникновения и развития нештатных (аварийных) ситуаций на борту РН.

Работоспособность разработанной методики и достоверность полученных результатов подтверждены вычислительным экспериментом. Расхождения средних выборочных расчетно-экспериментальных данных относительно расчетных не превысили по показателям:

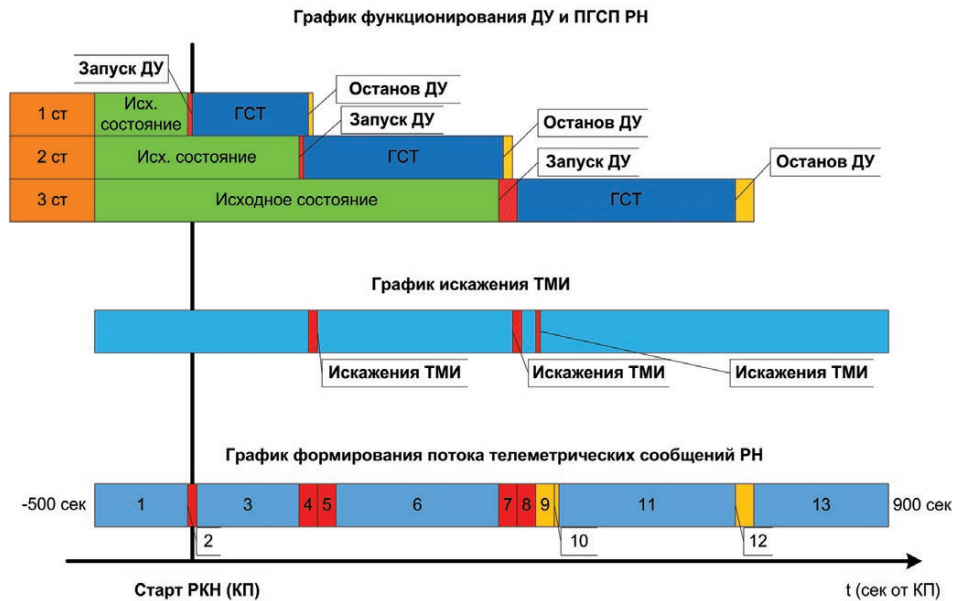


Рис. 2. План формирования потока телеметрических сообщений для передачи по телеметрическим линиям связи на первом сеансе ИТО запуска РКН «Протон-М» с РБ «Бриз-М»

- апостериорная энтропия потока сообщений телеметрируемых параметров на выходе СИТО – 6,09 %;
- информативность потока сообщений телеметрируемых параметров на выходе СИТО – 5,1 %;
- коэффициент потери информации – 4,8 %.

Максимальные значения диапазонов доверительных интервалов ($\pm 3\sigma$) расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации (в процентах от их выборочных средних значений) составили:

- апостериорной энтропии потока сообщений телеметрируемых параметров на выходе СИТО – 0,59 %;
- информативности потока сообщений телеметрируемых параметров на выходе СИТО – 0,73 %;
- коэффициента потери информации – 0,86 %.

На рисунке 3 представлены гистограммы распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации в потоках телеметрических сообщений, формируемых по материалам исследуемых запусков и аппроксимирующие их графики плотности вероятности распределения (апостериорная энтропия телеметрируемых параметров потока телеметрических сообщений (а), коэффициент информативности потока телеметрических сообщений (б), коэффициент потери информации в потоке телеметрических сообщений (в)).

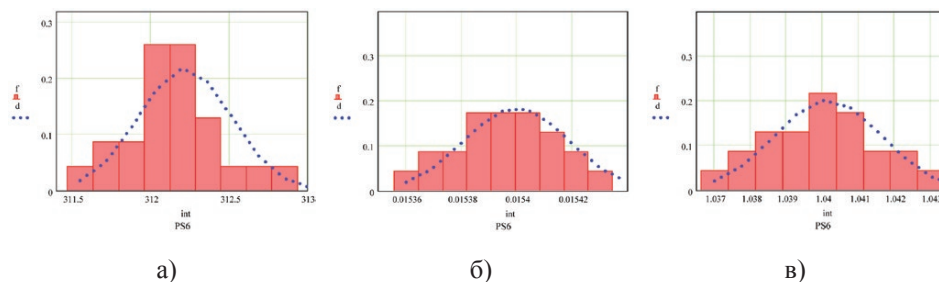


Рис. 3. Плотность распределения расчетно-экспериментальных значений показателей количества информации на участке главной ступени тяги ДУ 2-й ступени

Оценка полученных результатов по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН подтвердила преимущества программного подхода для формирования адаптивных процедур сбора ТМИ в СИТО – реализация полученного варианта плана формирования потока телеметрических сообщений позволяет повысить качество функционирования СИТО по показателям:

- апостериорная энтропия потока сообщений телеметрируемых параметров на выходе СИТО снижена от 17,9 % до 25,9 %;
- информативность потока сообщений телеметрируемых параметров на выходе СИТО повышена от 16,5 % до 24,2 %.

На рисунке 4 приведены значения показателей «апостериорная энтропия потока телеметрических сообщений» (а) и «информативность потока телеметрических сообщений» (б) при программном (красные гистограммы) и используемом в настоящее время неадаптивном (фиолетовые гистограммы) формировании потока телеметрических сообщений на этапах подготовки к пуску, пуска и полета РКН.

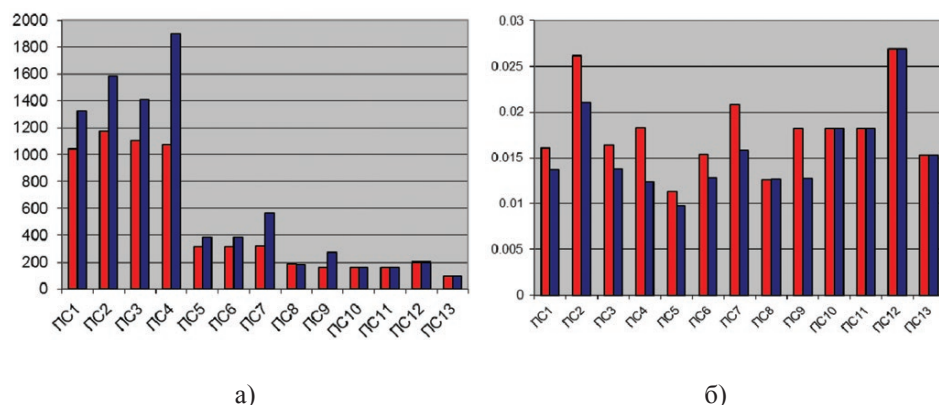


Рис. 4. Гистограммы показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений РКН

Кроме того, обеспечивается устойчивость функционирования СИТО к нерасчетным изменениям динамики телеметрируемых параметров РН, связанных с возникновением и развитием нештатных (аварийных) ситуаций на борту РКН – потери информации не превысили 12,3 %. Графики зависимости приращения апостериорной энтропии сообщений телеметрируемых параметров от нерасчетного увеличения динамики контролируемых процессов на борту РКН при значениях коэффициентов прореживания два (а), четыре (б) и шесть (в) приведены на рисунке 5.

На основе расчетных и расчетно-экспериментальных данных получены математические описания зависимости значений коэффициентов прореживания от динамики телеметрируемых параметров и параметров бортовых средств измерений (рис. 6) для участков высокой (а) и низкой (б) динамики телеметрируемых параметров РКТ.

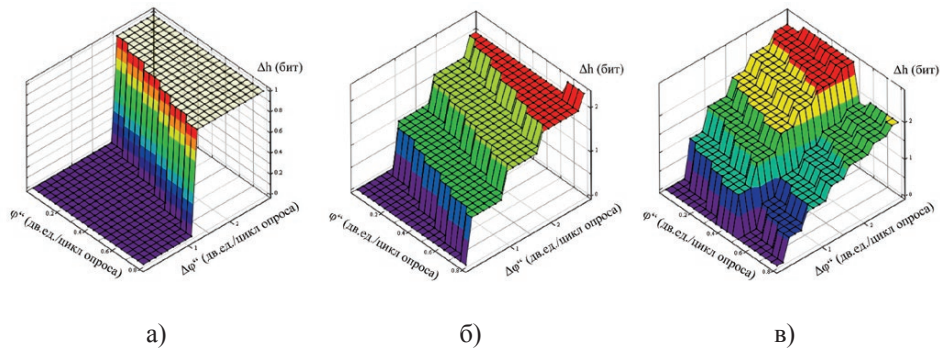


Рис. 5. Графики зависимостей приращения апостериорной энтропии от нерасчетного увеличения динамики контролируемых процессов на борту РКН

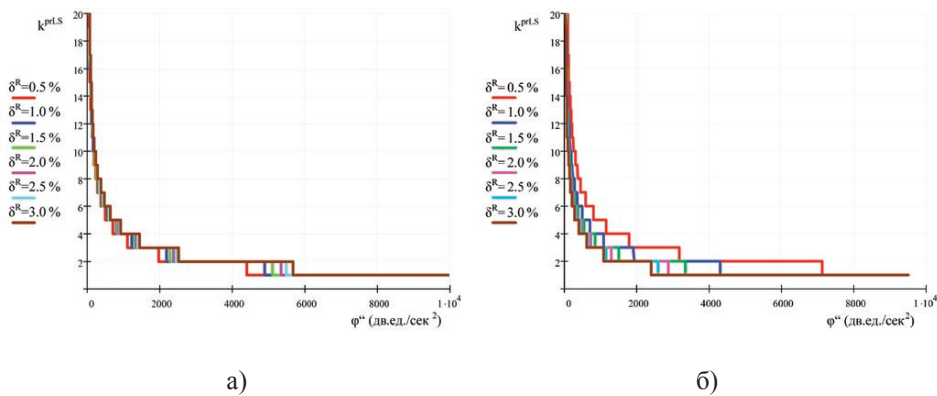


Рис. 6. График зависимости коэффициентов прореживания

Полученные математические описания послужили основой для выработки рекомендаций по созданию адаптивной СИТО ЛИ и ЛЭ перспективных РКТ, направленных на рациональное установление состава сообщений телеметрируемых параметров РКТ и коэффициентов их прореживания с учетом параметров БИТС РКТ и динамики изменения телеметрируемых параметров на характерных участках функционирования РКТ в полете.

Заключение

Таким образом, для формирования рационального потока телеметрических сообщений РКТ разработана методика, отличающаяся от существующих двухэтапным проведением поисковых процедур и расчетов с комплексным использованием существующих и новых показателей количества информации. В основу методики положены математические описания процессов снижения информационной избыточности в элементах СИТО. Применение двухэтапного поиска с использованием математического аппарата последовательной оптимизации позволяет адаптировать поток телеметрических сообщений к потребностям получателя информации, наличию свободного ресурса в каналах передачи ТМИ и искажениям ТМИ на участках проведения динамических операций РКТ. Использование комплекса показателей и критериев количества информации при проведении поисковых процедур позволяет сформировать нормированное метрическое пространство поиска рациональных значений параметров потока телеметрических сообщений разнородных телеметрируемых параметров, а применение при расчетах нового показателя – коэффициент потери информации позволяет свести многомерный поиск рациональных значений коэффициентов прореживания сообщений телеметрируемых параметров к одномерному.

Практические исследования подтвердили преимущества программного подхода к формированию адаптивных процедур сбора телеметрической информации. Апробация разработанной методики показала его работоспособность и достоверность полученных результатов. Разработанная методика может быть использована при создании СИТО запусков РН «Ангара-А5» с ПТК, а также управления ПТК на орбите искусственного спутника Земли и при полете к Луне, что позволит обеспечить доставку телеметрических сообщений РН, межорбитального буксира и ПТК в ЦУП в РМВ полета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Автоматизированная обработка телеметрической информации: учеб. / В.А. Чикуров, В.В. Шмелев, В.Г. Зиновьев и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 473 с.
- [2] Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов / С.М. Переверткин, А.В. Кантор, Н.Ф. Бородин, Т.С. Щербакова. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

- [3] Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
- [4] Евтушенко Ю.Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 432 с.
- [5] Куимов А.В. Методика определения количества информации о состоянии ракеты космического назначения в потоке телеметрических сообщений // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, т. 6. – М.: АО «Российские космические системы». – 2019. – № 4. – С. 51–58.
- [6] Краевая С.Ю., Куимов А.В. Планирование работы средств наземного измерительного комплекса при обеспечении пусков ракет космического назначения // Наукоемкие технологии. – 2019. – Т. 20. – № 7. – С. 60–70.
- [7] Методы оптимизации: учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
- [8] Михалевич В.С., Кукса А.И. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 208 с.
- [9] Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгдел К. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. – Кн. 1, пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
- [10] Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс / А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов и др. – СПб.: Наука и техника, 2007. – 672 с.
- [11] Сухарев А.Г., Тихомиров А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 368 с.
- [12] 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.

REFERENCES

- [1] Automated Processing of Telemetry Information: textbook / V.A. Chikurov, V.V. Shmelev, V.G. Zinoviev, et al. – St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy, 2014. – p. 473.
- [2] Onboard Telemetry Equipment for Spacecraft / S.M. Perevertkin, A.V. Kantor, N.F. Borodin, T.S. Shcherbakov. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. – p. 208.
- [3] Guill F., Murray W., Wright M. Practical optimization: translated from Engl. – Moscow: Mir Publ., 1985. – p. 509.
- [4] Yevtushenko Yu.G. Methods for Solving Extreme Problems and their Application in Optimization Systems. – Moscow: Nauka Publ., Chief editorial office of physical and mathematical literature, 1982. – p. 432.
- [5] Kuimov A.V. Method for Determining the Space Rocket Status Data in the Stream of Telemetry Messages // Rocket and Space Instrumentation and Information Systems, v. 6. – Moscow: JSC Russian Space Systems – 2019. – No 4. – pp. 51–58.
- [6] Kraevaya S.Yu., Kuimov A.V. Planning the operation of the ground measuring complex when providing launches of space rockets // “Naukoiomkie Tekhnologii” journal. – 2019. – V. 20. – No 7. – pp. 60–70.
- [7] Optimization methods: study textbook for universities / edited by V.S. Zarubin, A.P. Krischenko. – 2nd edition. – Moscow: Bauman MSTU Publ., 2003. – p. 440.

- [8] Mikhalevich V.S., Kuksa A.I. Sequential Optimization Methods in Discrete Network Problems of Optimal Resource Allocation. – Moscow: Nauka Publ., Chief editorial office of physical and mathematical literature, 1983. – p. 208.
- [9] Rekleitis G., Reyvindran A., Ragsdel K. Optimization in Technology: in 2 books. – Book 1, translated from Engl. – Moscow: Mir Publ., 1986. – p. 350.
- [10] Advanced Telemetry in Theory and Practice. Training course / A.V. Nazarov, G.I. Kozyrev, I.V. Shitov, et al. – St. Petersburg: “Nauka i Tekhnika” Publishing House, 2007. – p. 672.
- [11] Sukharev A.G., Tikhomirov A.V., Fedorov V.V. Optimization Techniques Course: study guide. – Moscow: Phizmatlit Publ., 2005. – p. 368.
- [12] Tsapenko M.P. Measuring Information Systems: Structure and Algorithms, Systems Engineering: study textbook for universities. – 2nd edition updated and revised. – Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. – p. 440.