

Обработка структурно-неоднородной телеметрической информации семейства ракет-носителей «СОЮЗ-2» на активном участке полета

Processing structurally heterogeneous telemetric data received from the SOYUZ-2 series carrier rockets at powered flight phase

Охтилев / Okhtilev M.

Михаил Юрьевич

(oxt@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ЗАО СКБ «Орион»,

заместитель генерального конструктора.

г. Санкт-Петербург

Абалаков / Abalakov A.

Алексей Николаевич

(abalakov.an@samspace.ru)

АО «РКЦ Прогресс»,

заместитель начальника отдела.

г. Самара

Каргин / Kargin V.

Виктор Александрович

(vic_kargin@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ЗАО СКБ «Орион»,

главный специалист.

г. Санкт-Петербург

Николаев / Nikolaev D.

Дмитрий Андреевич

(nikolaev@skborion.ru)

кандидат технических наук.

ЗАО СКБ «Орион»,

инженер-программист.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: автоматизированный анализ – automated analysis; структурная неоднородность – structure heterogeneity; выбросы случайных процессов – emissions of random processes; превышение уровня – level increase; аномальные результаты измерений – abnormal measurement data; загрязнение телеметрической информации – contamination of telemetric data.

В статье рассматривается модель и алгоритм оперативной обработки структурно-неоднородной телеметрической информации, полученной в ходе летных испытаний и штатной эксплуатации семейства ракет-носителей «Союз-2». Результаты вероятностного исследования телеметрической информации позволяют обосновать модель телеметрируемых параметров в виде смеси гауссовых распределений. Для адаптации характеристик модели к поступающей в реальном времени телеметрической информации во временной области используется аппроксимация результирующей плотности вероятности рядом Эджворта. Для адаптации характеристик в частотной области предложена классификация телеметрируемых процессов по форме спектра. В качестве информативных признаков телеметрируемых параметров используются характеристики «превышения уровня», что позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма.

The article covers the model and algorithm of the real-time processing of structurally heterogeneous telemetric data received during flight tests and normal operation of the Soyuz-2 series carrier rockets. The results of probabilistic study of telemetric data allow to give the grounds for the model of parameters measured by telemetry and represented in the form of a mixture of Gaussian distributions. To adapt the characteristics of the model to received real-time telemetric data in the time domain, the approximation of the resultant probability density by means of Edgeworth series is unitized. To adapt the characteristics in the frequency domain, the authors propose the classification of processes measured by telemetry in the form of spectrum. The characteristics such as "level increase" are used as informative attributes. This allows to reduce the computational complexity of the algorithm.

Развитие космической отрасли является важной задачей, напрямую обеспечивающей как уровень обороноспособности государства, так и эффективность его экономики. В связи с этим в настоящее время наблюдается рост объема и сложности решаемых ею задач, что приводит к увеличению объема телеметрической информации, необходимой оператору для принятия решения о техническом состоянии объекта космических средств и прогнозирования тенденций его изменения.

Для повышения оперативности и достоверности принимаемых решений в настоящее время разрабатываются, проходят испытания и вводятся в штатную эксплуатацию специализированные аппаратно-программные комплексы [1, 2]. Так, летом этого (2017) года на космодроме 1 ГИК МО РФ «Плесецк» были успешно завершены комплексные испытания Автоматизированной Системы Управления Подготовкой и Пуском (АСУ ПП) ракет-носителей семей-

ства «Союз-2», разработанной СКБ «Орион», генеральный заказчик РКЦ «Прогресс».

Одним из элементов этой системы является аппаратно-программный комплекс обработки и анализа телеметрической информации (АПК ОиА ТМИ), предназначенный для получения и отображения обобщенных результатов о процессах, протекающих на борту, и визуализации технического состояния ракеты-носителя на активном участке полета.

Решение поставленных задач в реальном времени предъявляет высокие требования к достоверности исходной телеметрической информации, что связано с дефицитом времени и многопоточностью схем автоматизированного анализа.

Анализ результатов первичной обработки телеметрической информации, полученной в ходе летных испытаний и штатной эксплуатации семейства ракет-носителей «Союз-2» (рис. 1), выявил, что она обладает: сложной, изменяющейся во времени структурой, наличием одиночных аномальных результатов измерений, пропуском данных, избыточностью, разнообразием смыслового содержания и сложностью интерпретации [3].

Использование телеметрической информации с выявленными особенностями в качестве исходной для АПК ОиА ТМИ приводит к невозможности выдачи им оперативных и достоверных заключений о техническом состоянии ракеты-носителя. Поэтому исходную телеметрическую информацию необходимо соответствующим образом подготовить. При этом алгоритмы для ее обработки должны быть структурно и параметрически перестраиваемыми к ее изменяющимся во времени характеристикам и иметь возможность предварительной параметризации для учета особенностей телеметрической информации и опыта применения алгоритмов в прошлом.

Большинство современных алгоритмов и методов обработки телеметрической информации с неодно-

родностями с точки зрения оперативности и робастности получаемых ими результатов не могут быть применены в задачах оперативной обработки информации, поступающей от ракеты-носителя, что в целом связано с большим объемом проводимых вычислений, неустойчивостью к резкому изменению характеристик телеметрической информации, с ограничениями, накладываемыми на класс телеметрируемых процессов.

Анализ теоретических и практических результатов различных научных школ, решающих проблемы оперативной обработки телеметрической информации, выявил, что в реальном времени успешно могут быть применены выводы и методы теории выбросов случайных процессов, не требующие большого объема вычислений и устойчивые к резким изменениям телеметрической информации [4, 5].

С целью идентификации информационных признаков телеметрируемых процессов было проведено вероятностное исследование наиболее информативных групп функциональных и функционально-диапазонных параметров с частотами опроса 50, 100 и 200 Гц, полученных в ходе летных испытаний и штатной эксплуатации семейства ракет-носителей «Союз-2» в 2009–2016 годах. При этом считалось, что мультипликативная составляющая погрешности исключена на этапе предварительной обработки, а удаленные результаты измерений восстановлены методами сплайн-интерполяции.

Для обеспечения требуемой точности оценивания были использованы аналитические зависимости между длительностью анализа T_a , среднеквадратическим отклонением σ_ξ и интервалом корреляции телеметрируемого процесса [3]:

$$T_a = \frac{4k\tau_k\sigma_\xi^{2k}}{D[m_\xi^k]},$$

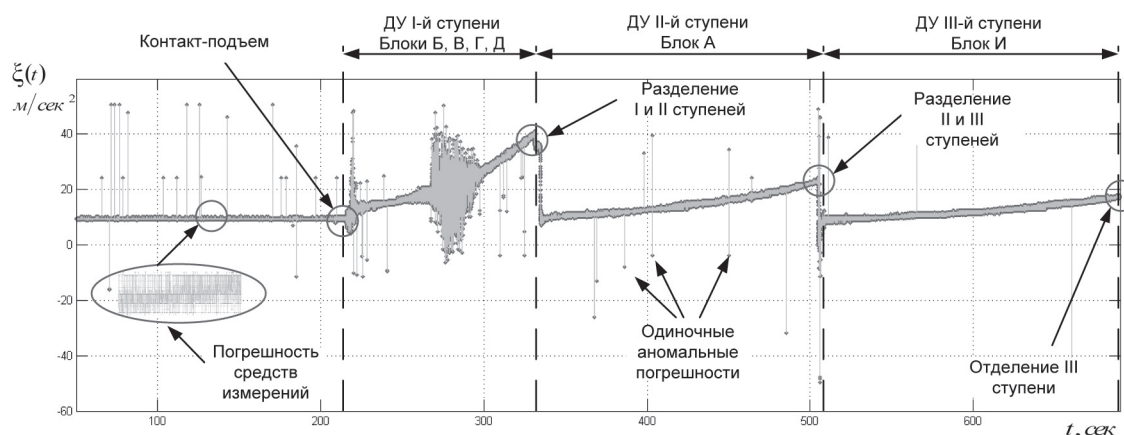


Рис. 1. Телеметрическая информация, поступающая с датчика АЛЕ048 ракеты-носителя «Союз-2»; частота опроса 200 Гц

где $k \in \{0,1,2,3,4\}$ – порядок оцениваемого момента; $D[m_k^k]$ – дисперсия k -го момента распределения. За верхнюю оценку интервала корреляции было принято $\tau_k = (F_0/4+1)$, F_0 – частота дискретизации.

Расчеты, проведенные для различных параметров, показали, что длительность анализа должна составлять 12–17 интервалов корреляции, что соответствует примерно 3–4 сек.

Результаты исследования телеметрируемых процессов на уровне моментов одномерных распределений показали, что на участках с устоявшейся работой бортовых систем и агрегатов ракеты-носителя длительностью 100–150 сек. изменения среднеквадратического отклонения σ_ξ , коэффициентов асимметрии γ_1 и эксцесса γ_2 невелики. Поэтому на этих участках телеметрируемые параметры могут быть представлены реализацией стационарного в широком смысле случайного процесса.

Проведенная классификация оценок плотности вероятности $p(\xi)$ по коэффициентам формы (контрэксцесс) $\chi = 1/\sqrt{\gamma_2 + 3}$ и энтропии

$$K_s = \frac{1}{2\sigma_\xi} \exp\left(-\int_{-\infty}^{\infty} p(\xi) \ln(p(\xi)) d\xi\right)$$

(рис. 2) позволила отнести их к семейству экспоненциальных распределений, близкому к гауссову [6, 7, 8]. Таким образом, телеметрируемые процессы могут

быть отнесены к классу процессов, значения которых и значения их производных в совпадающие моменты времени статистически независимы [4].

$$p(\xi) = (1-\alpha)p_u(\xi) + \alpha p_a(\xi) = \frac{1-\alpha}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_u^2}\right) + \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_a^2}\right), \quad (1)$$

где σ_u^2 – дисперсия информационной компоненты, σ_a^2 – дисперсия аномальной компоненты, при этом $\sigma_u^2 \ll \sigma_a^2$.

Весовой коэффициент α играет роль вероятности появления аномальной компоненты и характеризует уровень загрязнения телеметрической информации.

Для адаптации модели (1) во временной области к характеристикам поступающей телеметрической информации взаимосвязь вероятностных характеристик с характеристиками типа «превышения уровня» [4, 12, 13]:

$$p(H) = \frac{2\pi n^+(H,1)}{\sigma_\xi \sqrt{-r''(0)}},$$

где $n^+(H, T_a)$ – число положительных пересечений уровня H , $r''(0)$ – вторая производная корреляционной

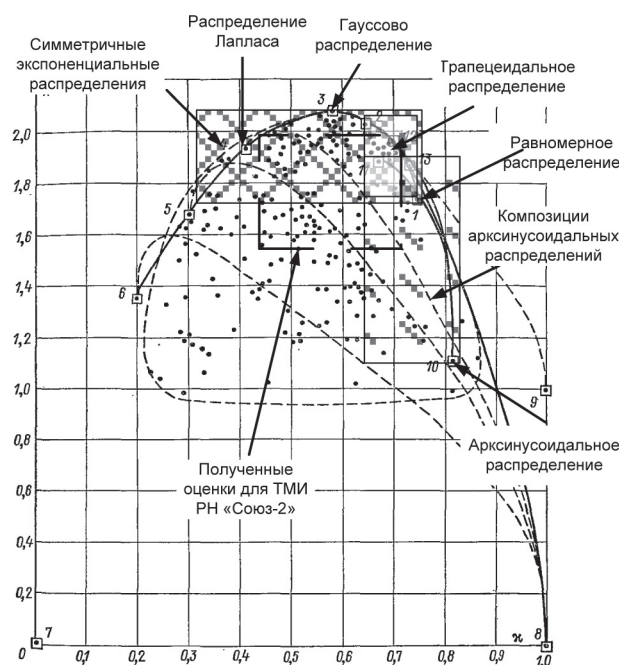


Рис. 2. Результаты классификации плотности вероятности телеметрируемых процессов по коэффициентам формы (контрэксцесса) χ и энтропии K_s

Результаты классификации и имитационного моделирования различных смесей распределений позволили обосновать модель (1) временной структуры телеметрируемых процессов со структурной неоднородностью [9] в виде смеси информационной $p_u(\xi)$ и аномальной $p_a(\xi)$ компонент, имеющих гауссово распределение [10, 11]:

функции, и аппроксимации полученных оценок плотности вероятности рядом Эджворта [14, 15]:

$$p(\xi) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2}\right) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} h_3\left(\frac{\xi}{\sigma_\xi}\right) + \frac{\gamma_2}{4!} h_4\left(\frac{\xi}{\sigma_\xi}\right)\right], \quad (2)$$

где $h_3(x)=x^3-3x$ и $h_4(x)=x^4-6x^2+3$ позволяет производить оценивание коэффициентов асимметрии, эксцесса и величину второй производной корреляционной функции телеметрируемого параметра путем простого подсчета числа положительных пересечений на трех уровнях.

С целью упрощения получаемых аналитических выражений значения были выбраны следующим образом:

$$\begin{aligned} h_3(H/\sigma_\xi) &= 0 & H &= 0 \\ h_4(H/\sigma_\xi) &= 0 & H &= 0.74\sigma_\xi \\ \frac{1}{3!} h_3(H/\sigma_\xi) + \frac{1}{4!} h_4(H/\sigma_\xi) &= 0 & H &= 0.23\sigma_\xi, \end{aligned}$$

тогда значения коэффициентов асимметрии, эксцесса и второй производной корреляционной функции могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= -0.31(2\pi n^+(0.74\sigma_\xi, T_a)R - 1) \quad \gamma_2 = \\ &= 8(2\pi n^+(0, T_a)R - 1) \\ \sqrt{-r''(0)} &= 0.5\pi(0.91n^+(0, T_a) + \\ &+ 0.19n^+(0.74, T_a) - 0.95n^+(0.23, T_a)). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, оценивание моментных и спектрально-корреляционных характеристик с использованием характеристик «превышения уровня» тесно связано между собой и позволяет решать задачу совместного оценивания характеристик телеметрируемых процессов как во временной, так и в частотной областях.

Для адаптации модели (1) к характеристикам поступающей телеметрической информации в частотной области был проведен анализ форм спектров телеметрируемых процессов, показавший, что наиболее близкими к ним являются: спектры Гаусса, равномерный и близкий к спектру Лоренца (табл. 1). Эти модели спектров являются хорошо изученными и позволяют просто получать их обобщенные спектрально-корреляционные характеристики [4, 16, 17].

Оперативная классификация телеметрируемых параметров по форме спектра осуществлялась с использованием метрики v^2 :

$$v^2 = 1 - (n^+(0, T_a)/n_{\max}(T_a))^2.$$

Метрика v^2 определяется корреляционной зависимостью между значениями телеметрируемого параметра и его производной в совпадающие моменты времени и позволяет путем простого подсчета числа положительных пересечений «нулевого уровня» $n^+(H, T_a)$ и числа локальных максимумов $n_{\max}(T_a)$ телеметрируемого параметра за время анализа T_a получать оценки спектрально-корреляционных характеристик (Таблица 1). Кроме того, значения v^2 для детектируемых форм спектра перекрывают весь диапазон ее изменений от узкополосного гармонического процесса $v^2=0$ до широкополосного $v^2=1$ [14].

Для обеспечения проведения автоматизированного анализа технического состояния на активном участке полета ракеты-носителя «Союз-2» программно-аппаратным комплексом АПК ОиА ТМИ в реальном времени был разработан алгоритм оперативной структурно-параметрической обработки телеметрической информации. Использование разработанного алгоритма позволило уменьшить структурную неоднородность телеметрической информации, за счет обнаружения и исключения одиночных аномальных результатов измерений.

Таблица 1

Характеристики типа «превышения уровня» и спектрально-корреляционные характеристики телеметрируемых параметров с различными формами спектра

№	v^2	X	$S(f)$	$r(\tau)$	Δf_s	$n^+(0,1)$	$n_{\max}(1)$
1	0.86	0.49	$\frac{16k^5}{3(k^2 + (2\pi f)^2)^3}$	$\left(1 + k \tau + \frac{1}{3}(k\tau)^2\right) \times \exp(-k \tau)$	$\frac{3.54n^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}$	$0.09\kappa\left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)$	$0.28\kappa\left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)$
2	0.59	0.39	$\sqrt{\frac{\pi}{\kappa}} \exp\left(-\frac{(2\pi f)^2}{4\kappa}\right)$	$\exp(-\kappa\tau^2)$	$\frac{2.51n^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}$	$0.23\sqrt{\kappa}\left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)$	$0.39\sqrt{\kappa}\left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)$
3	0.39	0.29	$\begin{cases} 2\pi/k, & f \leq k/2 \\ 0, & f > k/2 \end{cases}$	$\frac{\sin(k\tau/2)}{k\tau/2}$	$\frac{1.75n^+(0,1)}{(1 + \gamma_2/8)}$	$0.05\Delta f\left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)$	$0.25\Delta f\left(1 + \frac{\gamma_2}{8}\right)$

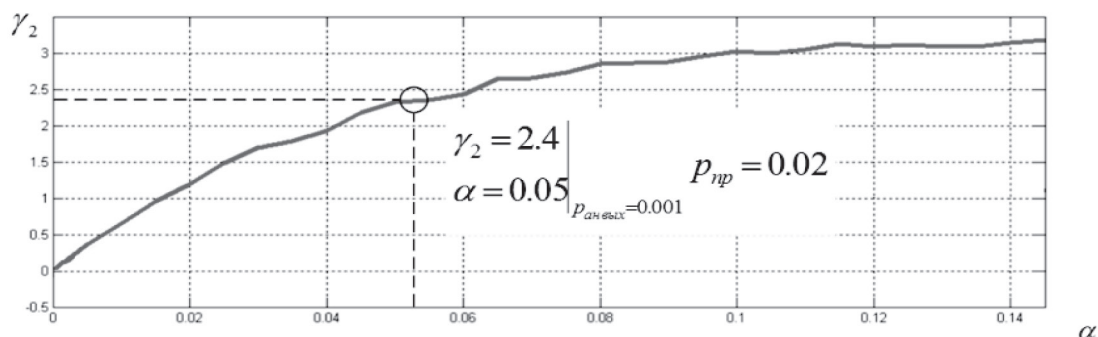


Рис. 3. Оценивание уровня загрязнения телеметрической информации

Обнаружение аномальных результатов измерений заключается в проверке гипотезы о том, принадлежит ли проверяемый результат генеральной совокупности, либо нет. Решение об обнаружении аномального результата осуществляется по результату сравнения четвертой конечной разности проверяемого отсчета $\xi(t_i)$ [3, 18]:

$$\Delta^4 \xi(t_i) = \sum_{j=0}^4 (-1)^j \frac{24}{j!(4-j)!} \xi\left(t_i - \frac{j}{F_0}\right),$$

с формируемым в реальном времени значением порога $H_{\text{нор}}$:

$$|\Delta^4 \xi(t_i)| > |\Delta \xi(t) H_{\text{нор}}|.$$

Поскольку вероятность появления аномального результата измерений неизвестна, то для определения величины порога $H_{\text{нор}}$ был использован критерий Неймана-Пирсона при гауссовом законе распределения амплитуд аномальной и информационной компонент телеметрируемого параметра (1). Точные аналитические выражения для получения величины порога требуют большого объема вычислений и сложны для применения в алгоритмах реального времени, поэтому была использована аппроксимация [18]:

$$H_{\text{нор}} = \sqrt{-1.5 \Gamma\left(\frac{F_0}{f_0}\right) \ln\left(\frac{\sqrt{2\pi}}{3} p_{\text{пр}}\right)}, \quad (4)$$

где f_0 — центральная частота, $\Gamma(F_0/f_0)$ — соотношение, зависящее от формы спектра телеметрируемого параметра (Таб. 1):

$$\begin{aligned} v^2 \in [0; 0.48] \quad \Gamma(F_0/f_0) &= 0.45 F_0 / \pi f_0 \\ v^2 \in [0.48; 0.71] \quad \Gamma(F_0/f_0) &= 0.42 F_0^3 / \pi f_0^3 \\ v^2 \in [0.71; 1] \quad \Gamma(F_0/f_0) &= 1.27 F_0^8 / \pi f_0^8 \end{aligned}$$

Значение вероятности пропуска $p_{\text{пр}}$ аномального результата измерений зависит от уровня загрязнения телеметрической информации (рис. 3) $p_{\text{пр}} = p_{\text{ан}}(\alpha)$. Тогда, при задании вероятность появления аномального

результата на выходе алгоритма $p_{\text{ан}}$, значение вероятности пропуска может быть получено следующим образом: $p_{\text{пр}} = p_{\text{ан}}/\alpha(\gamma_2)$.

Достаточно распространенным алгоритмом получения оценки центральной частоты телеметрируемого параметра $\xi(t)$, принимаемого на фоне шума, является подсчет числа пересечений «нулевого» уровня $f_0 = n^+(0, T_a)/T_a$, на задаваемой длительности анализа T_a . Однако затягивание «хвостов» спектральной плотности $\Delta f \neq 0$ и концентрация значений $\xi(t)$ в окрестности математического ожидания приводит к смещению получаемой оценки (рис. 4).

Для учета величины смещения используется взаимосвязь между вероятностными характеристиками, характеристиками «превышения уровня» (3) и аппроксимацией результирующей плотности вероятности телеметрируемых параметров рядом Эджворта (2). Учитывая, что $r'''(0) = 4\pi^2(f_0^2 + (\aleph \Delta f)^2)$, тогда число положительных пересечений $n^+(0, T_a)$ принимает следующий вид [14]:

$$n^+(0, T_a) = \frac{T_a}{2\pi} \sqrt{2\pi(f_0^2 + (\aleph \Delta f)^2)} (1 + \gamma_2/8), \quad (5)$$

где $\aleph$ — коэффициент формы спектра, Δf — оценка эффективной ширины спектра (Таб. 1). Таким образом, решая уравнение (5) относительно f_0 , получаем оценку средней частоты с учетом форм плотности вероятности и формы спектра:

$$f_0 = \sqrt{\left(\frac{n^+(0, T_a)}{T_a(1 + \gamma_2/8)}\right)^2 - (\aleph \Delta f)^2},$$

Таким образом, структурная и параметрическая перестраиваемость алгоритма обеспечивается за счет оценивания в реальном времени моментных, спектрально-корреляционных характеристик и уровня загрязнения телеметрической информации.

Для учета особенностей телеметрической информации и опыта применения алгоритма в прошлом перед началом работы необходимо задать частоту дискретизации F_0 , диапазон изменений, $\Delta \xi$ телеметрируе-

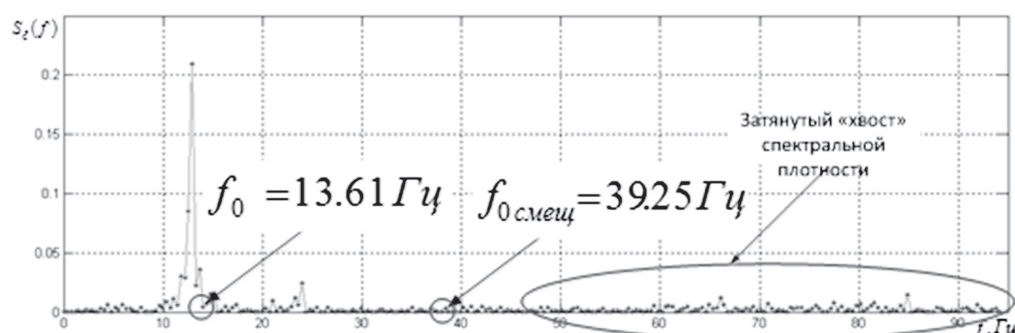


Рис. 4. Сдвиг оценки центральной частоты телеметрируемого параметра при использовании алгоритма типа «счетчик нулей»

мого параметра, определяемые согласно программе телеизмерений, и начальные значения оцениваемых в ходе работы алгоритма характеристик: $f_{0\text{нач}}$ – значение центральной частоты ($f_{0\text{нач max}} = F_0/2$), тип формы спектра (табл. 1) и $\alpha_{\text{нач}}$ – уровень загрязнения телеметрической информации. Эти значения используются для формирования «грубого» порога обнаружения аномальных результатов измерений (4), используемого до набора выборки задаваемой длительности T_a .

Экспериментальная отработка разработанного алгоритма проводилась во время пусков семейства ракет «Союз-2» из Гвианского космического центра, и в ходе комплексных испытаний АСУ ПП на космодроме «Плесецк» и подтвердила, что:

- достоверность телеметрической информации обеспечивается за счет обнаружения и исключения одиночных аномальных результатов измерений с динамически изменяемым порогом и уменьшения уровня «загрязнения» телеметрической информации;
- оперативность по сравнению с аналогичными методами оценивания характеристик телеметрической информации (до двух раз), достигается за счет совместного оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик с использованием характеристик типа «превышения уровня»;
- робастность подтверждается работой комплексов визуализации технического состояния аппаратно-программных комплексов визуализации состояния ракеты-носителя на активном участке траектории.

Литература

1. Охтилев, М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
2. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств: монография / под ред. О.В. Майдановича – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2011. – 219 с.
3. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном времени / В.А. Каргин [и др.] // Информация и Космос. – 2009. – № 4. – С. 77–82.

4. Тихонов, В. И. Выбросы траекторий случайных процессов / В.И. Тихонов, В.И. Хименко. – М.: Наука, 1987. – 305 с.
5. Gajic, B. Robust speech recognition using Features based on zero crossings with peak amplitudes / B. Gajic, K. Paliwal // IEEE. – 2003. – Vol. I. – P. 64–67.
6. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Электроатомиздат, 1991. – 304 с.
7. Федоров, М. В. Метод идентификации форм распределений малых выборок / М.В. Федоров // Рос. хим. ж. (Ж. рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2002. – Т. 46, № 3. – С. 9–11.
8. Миленький, А. В. Классификация сигналов в условиях неопределенности / А.В. Миленький. – М: Сов. Радио, 1975 – 328 с.
9. Каргин, В. А. Подход к классификации неоднородностей телеметрической информации ракет-носителей / В.А. Каргин, Я.А. Скороходов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 94–103.
10. Модель измерительной информации в системах мониторинга космических средств / Д.Н. Бородюк [и др.] // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 1. – С. 39–43.
11. Проблемы речевых технологий. Вероятностная структура и обобщенная математическая модель речевых сигналов / В.И. Хименко [и др.] // Вестник молодых ученых. – 2005. – № 8. – С. 5–17.
12. Rice, S. Mathematical analysis of random noise / S. Rice // Bell Syst. Tech. J. – 1945. – Vol. 24. – P. 46–156.
13. Фомин, Я. А. Теория выбросов случайных процессов / Я.А. Фомин. – М.: Связь 1980. – 216 с.
14. Тихонов, В. И. Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения / В.И. Тихонов, В.И. Хименко // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 5. – С. 501–523.
15. Кендалл, М. Статистические выводы и связи : [пер. с англ.] / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М: Наука, 1973. – 466 с.
16. Кедем, Б. Спектральный анализ и различие сигналов по пересечениям нуля / Б. Кедем // ТИЭР – 1986. – Т. 74, № 11. – С. 6–23.
17. Barnett, J. Zero-crossing rates of mixtures and products of Gaussian processes / J. Barnett, B. Kedem // IEEE. – 1998. – Vol. 44. – P. 1672–1677.
18. Фомин, А. Ф. Отбраковка аномальных результатов измерений / А.Ф. Фомин, О.Н. Новоселов, А.В. Плющев. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.