

УДК 519.2

МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В. А. Каргин,

канд. техн. наук, доцент

Д. А. Николаев,

инженер-программист

А. Ю. Россиев,

инженер-программист

ЗАО «СКБ Орион», г. Санкт-Петербург

Д. Н. Бородько,

преподаватель

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

На основе результатов исследования вероятностной структуры измерительной информации, полученной с ракеты-носителя типа «Союз», предложены одно- и двумерные модели информационных процессов, которые могут быть положены в основу разрабатываемых оперативных алгоритмов обработки измерительной информации для систем мониторинга реального времени.

Ключевые слова — системы мониторинга, реальный масштаб времени, ракета-носитель, неопределенность измерительной информации, вероятностные смеси.

Введение

Расширение круга решаемых задач в ракетно-космической отрасли, совершенствование старых и разработка новых видов ракетно-космической техники (РКТ) приводят к увеличению объемов информации, требующейся для оценивания и прогнозирования технического состояния испытываемых космических средств. Это связано с необходимостью в кратчайшие сроки принимать решение об эффективности функционирования ракеты-носителя (РН), космического аппарата, разгонного блока и их систем. Для решения одной из таких задач в рамках опытно-конструкторской работы «Плесецк» создается комплекс мониторинга состояния и визуального отображения информации полета РН на активном участке траектории по данным измерительной информации. Данный комплекс решает задачи оценивания и прогнозирования технического состояния бортовых систем РН «Союз-2» (космодром «Плесецк») в целях оперативного получения заключений о контролируемых событиях, происходящих на борту, и своевременной выдачи управляющих воздействий.

Анализ испытаний и сопровождения РКТ показывает, что оперативное заключение о техни-

ческом состоянии РН готовится экспертом, использующим в основном допусковой контроль по результатам оценивания отдельных групп информационно-ценных параметров измерительной информации, преимущественно телеметрической. При этом большинство операций оценивания состояния систем и агрегатов не автоматизировано и не интегрировано в общую систему мониторинга [1].

Системный анализ основных проблем создания и сопровождения подобных автоматизированных комплексов (систем) реального времени, функционирующих в критических приложениях, показывает, что эффективность их во многом зависит от возможностей информационных технологий, на базе которых они создаются. Основные достоинства современных автоматизированных систем мониторинга реального времени представлены на рис. 1.

Дефицит времени, сложность и многопоточность схем автоматизированного анализа предъявляют высокие требования к качеству и достоверности обработки информации, поступающей на вход систем мониторинга реального времени. В то же время существенная неопределенность измерительной информации, вызванная ее неод-



Рис. 1. Пример комплекса мониторинга состояния РН, разработанного в рамках опытно-конструкторской работы «Плесецк»

нородностью, избыточностью и разнообразием смыслового содержания, не позволяет классическими методами провести синтез оперативных алгоритмов обработки и выполнить требования по качеству обработки информации в условиях жестких временных ограничений [2–4].

Классификация измерительной информации как случайных функций

К настоящему времени получены многочисленные результаты по алгоритмизации обработки информации космических средств в реальном масштабе времени. Однако большинство таких результатов представляются весьма разрозненными, они не базируются на едином подходе и их весьма сложно использовать в практических задачах. Проведение дополнительных исследований предполагает формализацию особенностей измерительной информации РН и обоснование обобщенных моделей ее представления для разработки оперативных алгоритмов обработки в системах мониторинга космических средств.

Систематизация особенностей измерительной информации проводилась на основе результатов, полученных в ходе испытаний РН «Союз-2» с 2004-го по 2011 год. Данная РН является сложным динамическим объектом, состоящим из более чем 15 бортовых систем, связанных между собой сложной системой функциональных связей и информационного обмена. Объем данных о функционировании РН «Союз-2» составляет приблизительно 30–40 млн значений измерений, поступающих за 9–10 мин активного участка полета.

Физические процессы, протекающие на борту РН, по своей природе непрерывны, подвержены случайным возмущениям и воздействиям, что предполагает их описание в классе непрерывных случайных процессов [5]:

$$\{\xi(t)\} = \{\xi(t), \xi \in X, t \in T\}, \quad (1)$$

где t — непрерывный параметр времени; T — непрерывное множество значений параметра t ; X — непрерывное пространство состояний переменной ξ .

С другой стороны, при передаче измерительная информация подвергается процедурам дискретизации по времени и квантования по уровню, поэтому наиболее удобно для решения практических задач выполнить ее описание в классе случайных последовательностей:

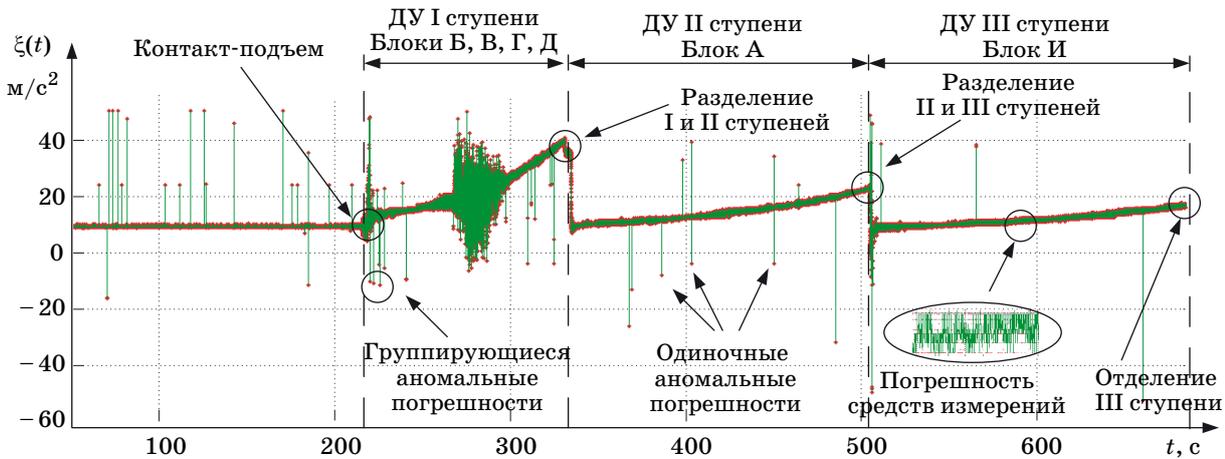
$$\{\xi(t_i)\} = \{\xi(t_i), \xi \in X_1, t_i \in T_1\}, \quad (2)$$

где t_i — дискретный параметр времени; T_1 — дискретное множество значений параметра t_i ; X_1 — квантованное пространство состояний переменной ξ .

Данная классификация (возможности классов случайных функций) учитывается при обосновании моделей и оперативных алгоритмов обработки на различных этапах формирования и передачи измерительной информации с РН.

Модель временной структуры информационных процессов

По результатам исследований измерительная информация РН может быть охарактеризована (рис. 2) [6]:



■ Рис. 2. Измерительная информация, поступающая с датчика осевой перегрузки АЛЕ048 осевого ускорения III ступени РН «Союз-2» с частотой опроса 200 Гц

— сложной, изменяющейся во времени структурой, явно связанной с режимами функционирования систем и агрегатов РН;

— разнообразием смыслового содержания (телеметрируется более 25 различных типов параметров);

— нестационарностью по математическому ожиданию $m_\xi = m_\xi(t) \neq \text{const}$, по дисперсии $\sigma_\xi^2 = \sigma_\xi^2(t) \neq \text{const}$, изменчивостью характеристик одномерных распределений $p(\xi) = p(\xi, t)$ и спектрально-корреляционных $S_\xi(f) = S_\xi(f, t)$, $R_\xi(\tau) = R_\xi(\tau, t)$ во времени;

— неоднородностью 3–13 % (по различным группам параметров), связанной с наличием погрешностей измерений, одиночных и группирующихся аномалий, пропусками данных;

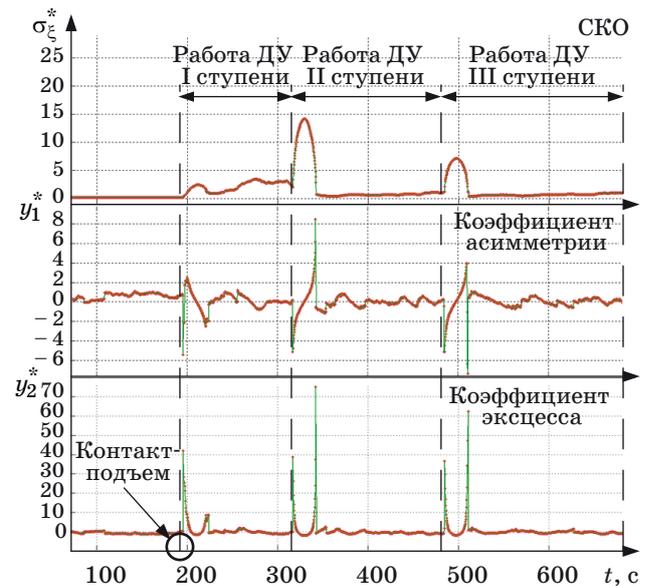
— избыточностью данных, обусловленной фиксированной частотой опроса локального коммутатора различных по динамичности параметров, приводящей к увеличению объема поступающей информации в 10–30 раз.

По результатам оценивания моментов одномерных распределений можно сделать вывод, что информационный процесс $\xi(t)$ является нестационарным по математическому ожиданию и дисперсии. При этом выделяются продолжительные по времени участки, на которых изменения полученных оценок дисперсии σ_ξ^{2*} , коэффициентов асимметрии γ_1^* , эксцесса γ_2^* случайной компоненты информационного процесса $\xi(t)$ близки к нулю. Резкие изменения характерны только для переходных процессов, связанных с включением-выключением двигательных установок (ДУ) и разделением ступеней РН, что позволяет рассматривать случайную компоненту устоявшихся режимов работы ДУ РН как непрерывный стационарный случайный процесс. Результаты оценивания среднеквадратического отклонения (СКО) σ_ξ^* , ко-

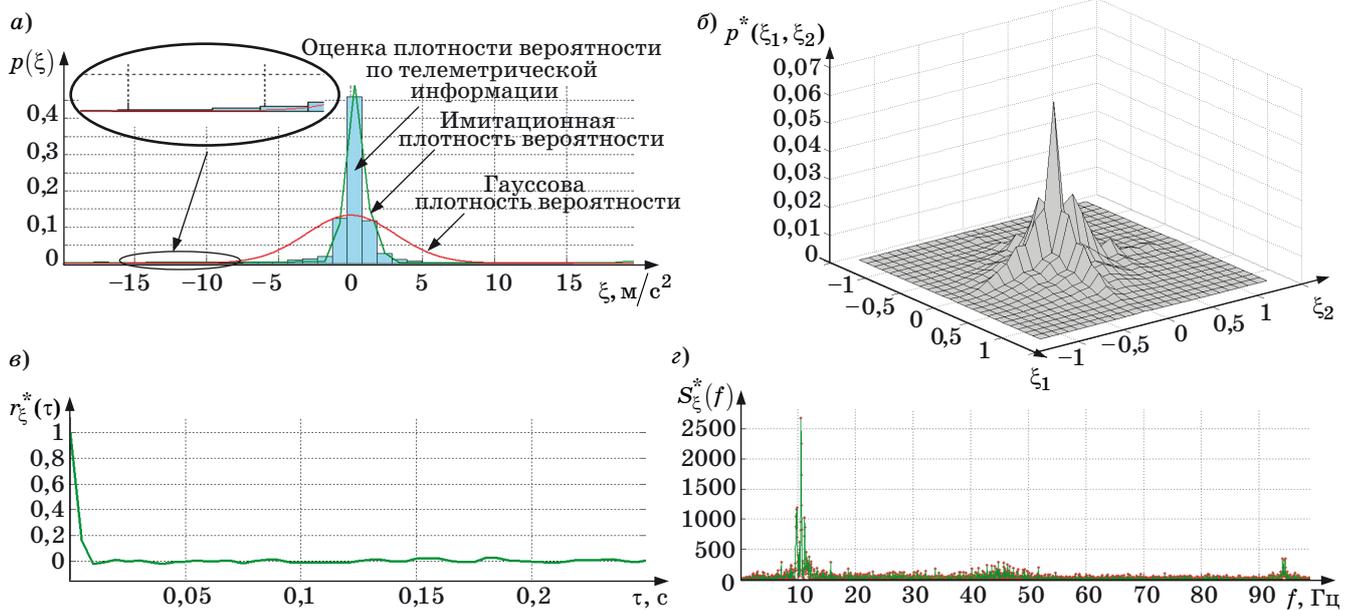
эффициентов асимметрии γ_1^* и эксцесса γ_2^* случайной компоненты параметра осевой перегрузки $\xi(t)$ представлены на рис. 3.

Анализ результатов оценивания одномерных плотностей вероятности $p^*(\xi)$ информационных процессов показывает, что полученные оценки не могут быть однозначно сопоставлены с каким-либо параметрическим семейством одномерных распределений. В то же время совместные исследования формы γ_2^* результирующей плотности вероятности $p^*(\xi)$ и величины энтропийной погрешности Δ_3 показывают близость полученных оценок плотностей $p^*(\xi)$ к гауссовым [7].

Учитывая условия формирования и передачи информационного процесса $\xi(t)$, а также ре-



■ Рис. 3. Результаты оценивания моментных характеристик случайной компоненты параметра осевой перегрузки



■ **Рис. 4.** Полученные для параметра осевой перегрузки во время работы ДУ II ступени (340–480 с) оценки: *a* — плотности вероятности с наложенной кривой гауссова распределения; *б* — двумерной плотности вероятности; *в* — нормированной корреляционной функции; *г* — спектральной плотности

зультаты исследования и численного моделирования, результирующую плотность вероятности $p^*(\xi)$ можно представить моделью с α -загрязнением, состоящей из «смеси» двух компонент [6, 8, 9]:

— флуктуационной компоненты — непрерывного широкополосного случайного процесса, имеющего гауссово распределение $p_\Phi(\xi)$;

— аномальной компоненты — узкополосного непрерывного случайного процесса, имеющего гауссово распределение $p_a(\xi)$:

$$p(\xi) \approx (1 - \alpha_a) p_\Phi(\xi) + \alpha_a p_a(\xi) = \frac{1 - \alpha_a}{\sigma_\Phi \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\Phi^2}\right) + \frac{\alpha_a}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_a^2}\right), \quad (3)$$

где весовой коэффициент α_a ($0 < \alpha_a < 1$) играет роль вероятности появления аномальной составляющей; σ_Φ^2 — дисперсия флуктуационной компоненты; σ_a^2 — дисперсия аномальной компоненты.

Результаты имитационного моделирования подтвердили согласованность модели с реальными информационными процессами $\xi(t)$, протекающими на борту РН «Союз-2» (рис. 4, а).

Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что затянутые «хвосты» распределения оцениваемой телеметрической информации объясняются влиянием аномальной компоненты. Представленная вероятностная модель отражает основные особенности временной структуры информационных процессов $\xi(t)$.

Модель измерительной информации

В качестве модели двумерного распределения для значений $\xi_1(t) = \xi(t_1)$ и $\xi_2(t) = \xi(t_2)$ случайной составляющей информационного процесса $\xi(t)$ было использовано представление негауссовой двумерной плотности вероятности в виде двухкомпонентной «смеси» двумерных распределений:

$$p(\xi_1, \xi_2; t_1, t_2) = (1 - \alpha_a) p_\Phi(\xi_1, \xi_2 | \sigma_\Phi, r_\Phi(\tau)) + \alpha_a p_a(\xi_1, \xi_2 | \sigma_a, r_a(\tau)), \quad (4)$$

где значения коэффициента α_a совпадают со значением α_a для модели одномерного распределения $p(\xi)$;

— $r_\Phi(\tau)$ и $r_a(\tau)$ — нормированные корреляционные функции флуктуационной и аномальной компонент;

— при оценивании функции $p(\xi_1, \xi_2, | \sigma, r(\tau))$ значения переменных $\xi_1(t) = \xi(t_1)$ и $\xi_2(t) = \xi(t_2)$ выбираются из условия некоррелированности выборок.

По результатам оценивания экспериментальных данных (по форме полученных двумерных распределений $p^*(\xi_1, \xi_2, | \sigma, r(\tau))$) можно заключить, что флуктуационная и аномальная компоненты имеют гауссово распределение (рис. 4, б).

В условиях «дефицита времени» в системах мониторинга оценивание двумерных плотностей вероятности не представляется возможным, поэтому при решении практических задач используются наиболее простые и распространенные двумерные характеристики, такие как оценки кор-

реляционных функций и спектральных плотностей. Нормированная корреляционная функция $r_{\xi}(\tau)$ и соответствующая ей нормированная спектральная плотность мощности $S_{\xi}(f)$ также могут быть представлены моделью с α -загрязнением:

$$r_{\xi}(\tau) \approx (1 - \alpha_a)r_{\phi}(\tau) + \alpha_a r_a(\tau); \quad (5)$$

$$S_{\xi}(f) \approx (1 - \alpha_a)S_{\phi}(f) + \alpha_a S_a(f). \quad (6)$$

Полученные оценки нормированных корреляционных функций $r_{\xi}^*(\tau)$ случайной составляющей информационного процесса $\xi(t)$ представляют собой некоторую осциллирующую, достаточно быстро затухающую функцию, подтверждающую выдвинутое предположение о стационарности процесса $\xi(t)$ на участках с устоявшейся работой ДУ (рис. 4, в).

Анализируя характер соответствующей оценки спектральной плотности $S_{\xi}^*(f)$ (рис. 4, г), можно сделать вывод, что спектрально-корреляционные характеристики информационных процессов $\xi(t)$ действительно могут быть представлены в виде смеси широкополосной и узкополосной гауссовых компонент.

Заключение

Измерительная информация РН характеризуется сложной изменяющейся во времени веро-

ятностной структурой. Учитывая особенности передачи и формирования, измерительную информацию с РН можно отнести к двум классам случайных функций: непрерывным случайным процессам и случайным последовательностям.

На длительных интервалах времени случайная составляющая представляет собой нестационарный по дисперсии и спектрально-корреляционным свойствам непрерывный случайный процесс. В то же время на этапе анализа выборочные функции информационных процессов могут быть разделены на стационарные участки, соответствующие режимам работы систем и агрегатов РН.

Анализ экспериментальных данных и результаты численных экспериментов позволили обосновать вероятностную двухкомпонентную модель измерительной информации в виде вероятностной смеси распределений (4). Основные составляющие этой смеси позволяют исследовать временную (3) и частотную (5), (6) структуры аномальной и флуктуационной компонент измерительной информации РН. Полученные результаты хорошо согласуются для различных групп параметров РН и дополняют известные к настоящему времени исследования временной и вероятностной структур информационных процессов в системах мониторинга состояния космических средств.

Литература

1. Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю. Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном времени состояния ракетно-космической техники // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. № 11. С. 20–23.
2. Россиев А. Ю., Каргин В. А. Анализ основных проблем при создании автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Ч. II: Технические науки. СПб.: ГУАП, 2010. С. 173–175.
3. Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Россиев А. Ю. Автоматизированная система управления подготовкой и пуском ракет космического назначения как корпоративная информационная система // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 7. С. 78–83.
4. Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий // Информационные технологии. 2011. № 10. Приложение. С. 32.
5. Туманова А. В. Вероятностная структура сигналов и помех в лазерных системах передачи и обработки информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: ГУАП, 2008. — 30 с.
6. Каргин В. А., Нездоровин Н. В., Николаев Д. А., Самойлов Е. Б. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном времени // Информация и космос. 2009. № 4. С. 77–82.
7. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Электроатомиздат, 1991. — 304 с.
8. Тихонов В. И., Хименко В. И. Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 5. С. 501–523.
9. Хименко В. И. Проблемы речевых технологий. Вероятностная структура и обобщенная математическая модель речевых сигналов // Вестник молодых ученых. 2005. № 8. С. 5–17.