

В.А. КАРГИН
**ОПЕРАТИВНОЕ НЕОБРАТИМОЕ СЖАТИЕ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Каргин В.А. Оперативное необратимое сжатие телеметрической информации.

Аннотация. Разработан подход к повышению оперативности обработки телеметрической информации, основанный на процедуре уточнения спектрально-корреляционных свойств телеметрируемых процессов с использованием математического аппарата теории выбросов. Применение разработанных алгоритмов в специальном программном обеспечении обработки и анализа телеметрической информации ракеты-носителя на активном участке траектории позволяет за счет уменьшения избыточности результатов обработки ТМИ, используемых в качестве входной информации в системах автоматизированного анализа, оперативно получать типовые интегрированные заключения о контролируемых событиях, происходящих при испытаниях ракеты-носителя.

Ключевые слова: избыточность телеметрической информации, адаптивное сжатие, характеристики «превышения уровня».

Kargin V.A. Operational irreversible compression of telemetry information.

Abstract. An approach to improve the speed of telemetry information processing based on the procedure of spectral correlation properties of the telemetered processes verifying, using the mathematical tools of the theory of runs was developed. Implementation of the developed algorithms in special software for processing and analysis of the launcher rocket telemetry information on the active trajectory allows, reducing the redundancy of TMI processing results used as input information to the computer-aided analysis systems, promptly receive standard integrated conclusions about the controlled events occurring during launcher rocket tests.

Keywords: telemetry information redundancy, adaptive compression, “level increase” characteristics.

1. Введение. В последнее время объем информации, необходимой для оценивания функционирования космических средств в целом, а также их отдельных бортовых систем (БС), значительно расширился. Большинство современных многоканальных телеметрических станций предусматривают одинаковую частоту опроса по всем каналам, поэтому при штатной работе бортовой системы частота опроса оказывается чрезмерно высокой, а объем измерений избыточен. Дефицит времени, отводимого на решение задач многопоточковой обработки, огромные объемы информации с одной стороны, и высокие требования, предъявляемые к качеству оперативно обработанной информации с другой стороны — это то, что характеризует современные автоматизированные системы обработки информации в ракетно-космической технике. Избыточность телеметрической информации (ТМИ) при использовании вычислительных моделей в современных автоматизированных системах, осуществляющих

обработку полного потока ТМИ в реальном масштабе времени, существенно затрудняет обработку. Разрешение этого противоречия связано с необходимостью сокращения потоков телеметрической информации, поступающих на вход систем мониторинга технического состояния космических средств, при сохранении максимальной достоверности и оперативности обработки [1, 2].

2. Источник телеметрической информации. Ракета-носитель (РН), как источник ТМИ, является наиболее сложной динамической системой среди остальных космических средств. Это связано, в основном, со сложностью оценивания режимов функционирования РН и контроля его технического состояния на активном участке траектории (АУТ).

Наиболее информативными телеметрируемыми параметрами РН являются функциональные и функционально-сигнальные параметры с частотами опроса, равными 50, 100 и 200 Гц и составляющими около 70% от общего числа информационно-ценных параметров. Для обеспечения в реальном масштабе времени (РМВ) формализации процессов функционирования бортовых систем и РН в целом, а также возможного нештатного поведения, необходимо строить вероятностные модели, описывающие и учитывающие не только особенности отдельных телеметрируемых параметров, но и зависимости между параметрами, которые формируют «структуру поведения» системы. Такие вероятностные обобщенные модели в РМВ построить сложно, а в некоторых случаях практически невозможно. Поэтому для задач оперативной обработки целесообразно использовать отдельные вероятностные характеристики оцениваемых телеметрируемых процессов [3].

Как показывает практика обработки ТМИ летных испытаний, результаты первичной обработки информационно-ценных параметров имеют неоднородную структуру из-за различных помеховых воздействий. Эти факторы существенно снижают достоверность обработки и искажают результаты заключений о контролируемых событиях и состоянии БС РН при автоматизированном анализе в РМВ [4, 5].

3. Модель адаптивного сжатия ТМИ. В предположении, что искажения результатов обработки, связанные с аномальными погрешностями, решены, задачу выделения существенных измерений можно рассматривать как задачу оценивания низкочастотной компоненты телеметрируемых (ТМ) процессов. Так как частота этой компоненты низка по сравнению со спектром процесса, то ее можно выделить в математическое ожидание и надежно оценить

фильтрацией. По совокупной ошибке наилучшим в широком диапазоне интервалов фильтрации (сжатия) является симметричный оператор текущего среднего, который обладает такими важными достоинствами, как простота реализации и низкие вычислительные затраты [6, 7].

Настраиваемой характеристикой оператора текущего среднего является интервал осреднения, называемый так же «окном» или «памятью» оператора. От него зависит текущая динамическая и случайная ошибки оператора. Для определения оптимального интервала осреднения ΔT в качестве критерия оптимальности выбрано условие минимума дисперсии оценки оператора $D[z_{\xi}^*(t)]$ для текущих спектрально-корреляционных характеристик процесса $\xi(t)$:

$$D[z_{\xi}^*(t)] = \frac{2\sigma_{\xi}^2}{\pi} \int_0^{\infty} |\Phi_k(2\pi f_0)|^2 \left(\int_0^{\infty} r_{\xi}(\tau) e^{-j2\pi f_0 \tau} d\tau \right) d(2\pi f_0) + \frac{A_c^2}{2} |\Phi_k(2\pi f_0) - 1|^2, \quad (1)$$

где

$$\Phi_k(j2\pi f_0) = \left(\frac{\sin(2\pi f_0 \Delta T / 2)}{2\pi f_0 \Delta T / 2} \right)^k \quad \text{— импульсная характеристика}$$

симметричного оператора текущего среднего,

k — порядок фильтра,

$r_{\xi}(\tau)$ — нормированная корреляционная функция процесса $\xi(t)$,

f_0 — средняя частота процесса $\xi(t)$ [8],

α — коэффициент вариации $\xi(t)$ [9].

Продифференцировав выражение (1) по интервалу осреднения ΔT и приравняв полученную зависимость к нулю, получаем уравнение для нахождения оптимального интервала осреднения, в данном случае являющегося интервалом сжатия:

$$\int_0^{\infty} \left[\frac{\left(\frac{\sin(2\pi f_0 \Delta T / 2)}{2\pi f_0 \Delta T / 2} \right)^k}{d\Delta T} \left(\int_0^{\infty} r_{\xi}(\tau) e^{-j2\pi f_0 \tau} d\tau \right) d(2\pi f_0) + \left(\frac{\pi}{\alpha^2} \right) \frac{d \left| \left(\frac{\sin(\pi f_0 \Delta T)}{\pi f_0 \Delta T} \right)^k - 1 \right|^2}{d\Delta T} \right] = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения зависит от моментных и спектрально-корреляционных характеристик процесса $\xi(t)$ и порядка k фильтра (оператора текущего среднего):

$$\Delta T_{opt} = f(r_{\xi}(\tau), f_0, \alpha, k). \quad (3)$$

Результатами решения трансцендентного уравнения (2) являются номограммы, полученные для фиксированных значений спектрально-корреляционных свойств ТМ процессов (частота опроса параметра, вид корреляционной функции) при различных α динамических свойствах ТМ процесса (см. рис. 1).

В соответствии с опросностью, типом датчика (согласно программы телеизмерений) и корреляционными свойствами ТМ процесса полученные номограммы заносятся в статические таблицы. Поиск значения ΔT_{opt} в таблице осуществляется методом прямого доступа, что позволяет сократить временную сложность алгоритма обработки до времени обращения к памяти на ЭВМ [10].

4. Разработка алгоритмов оценивания спектрально-корреляционных свойств ТМИ. Статистические исследования результатов измерений функциональных и функционально-сигнальных ТМ параметров, полученных при запусках РН семейства «Союз» показали, что на интервалах анализа, соответствующих «устоявшимся» режимам работы бортовых систем, их флюктуативная (шумовая) компонента подчиняется закону распределения, близкому к нормальному. Это позволило использовать безразмерные характеристики «превышения уровня» (см. табл. 1) для оценивания спектрально-корреляционных свойств ТМ процессов [11,12].

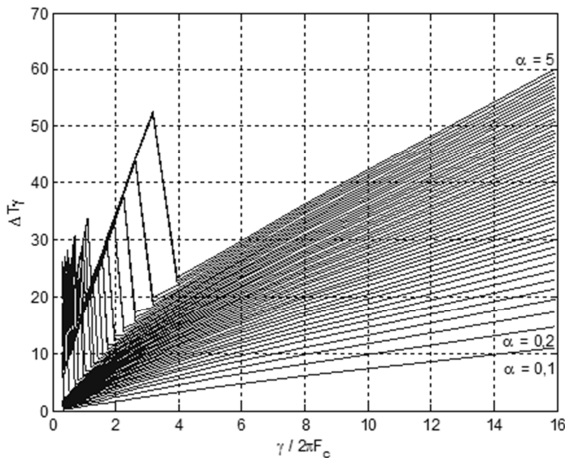


Рис. 1. Номограмма определения интервала осреднения ΔT_{γ} для фильтра первого порядка процесса $\xi(t)$ с корреляционной функцией вида $e^{-\beta\tau^2}$ при частоте опроса параметра $\gamma = 100 \text{ Гц}$

Оценивание средней частоты функциональных и функционально-сигнальных ТМ параметров. Как отмечалось, наиболее информативными телеметрируемыми параметрами РН являются функциональные и функционально-сигнальные параметры с частотами опроса, равными 50, 100 и 200 Гц и составляющими около 70% от общего числа информационно-ценных параметров. Для ТМ процессов с ненулевой шириной спектра (в основном реализуется на практике) предложено оценивать среднюю частоту \hat{f}_0 процесса $\xi(t)$ с учетом смещения, вызванного расширением спектра:

$$\hat{f}_0 = \frac{1}{T} n^+(0, T) - \Delta f_0, \quad (4)$$

где Δf_0 — смещение оценки f_0 .

Таблица 1. Зависимость характеристик «превышения уровня» от корреляционных свойств для гауссовых ТМ процессов

Наименование характеристики	Обозначение	Зависимость характеристик от свойств процесса
Количество пересечений заданного уровня H	$N_1^+(H)$ $N_1^-(H)$	$N_1^+(H) = N_1^-(H) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-r_\xi'(0)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{H - m_\xi}{\sigma_\xi} \right)^2 \right\}$
Количество пересечений «нуля»	$N_1^+(0)$ $N_1^-(0)$	$N_1^+(0) = N_1^-(0) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-r_\xi'(0)}$
Число локальных максимумов / минимумов	$N_{1\max}$ $N_{1\min}$	$N_{1\max} = N_{1\min} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{r_\xi^{(4)}(0)}{-r_\xi'(0)}}$

В работе [13] получены результаты, связывающие оценку средней частоты с формой спектра и формой кривой плотности распределения вероятностей информационного процесса

$$M \left\{ \hat{f}_0 \right\} = \frac{1}{T} M \left\{ n^+(0, T) \right\} = N_1^+(0) = \frac{1}{2\pi} \left((2\pi f_0)^2 - \rho''(0) \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\lambda_2}{8} \right), \quad (5)$$

где $\rho''(0)$ — вторая производная от огибающей нормированной корреляционной функции $r_\xi(\tau)$ информационного процесса в нулевой точке; λ_2 — коэффициент эксцесса информационного процесса.

На «устоявшихся» режимах работы бортовых систем ($\lambda_2 \rightarrow 0$) в основу алгоритма оценивания средней частоты ТМ процесса $\xi(t)$ положено аналитическое выражение

$$\hat{f}_0^2 = (N_1^+(0))^2 + \frac{1}{4\pi^2} \rho''(0). \quad (6)$$

Оценивание корреляционных свойств ТМ параметров. Оценивание второй производной огибающей нормированной корреляционной функции $\rho''(0)$ осуществляется посредством ее аппроксимации. Подробно исследованы девять наиболее часто используемых в задачах обработки информации моделей информационных процессов с различными видами корреляционных функций. Для практического использования выделены три модели (см. табл. 2), которые, с одной стороны, являются наиболее простыми, с другой – на практике позволяют с высокой степенью доверия оценивать корреляционные свойства телеметрируемых процессов.

Таблица 2. Значения характеристик информационных процессов с различными корреляционными свойствами

№	Виды $\rho(\tau)$	$\rho''(0)$	$\rho^{(4)}(0)$	$N_1^+(0)$	$N_{1\max}$	ν^2
1	$\frac{\sin(\Delta(2\pi f)\tau/2)}{\Delta(2\pi f)\tau/2}$	$-\frac{\Delta(2\pi f)^2}{12}$	$\frac{\Delta(2\pi f)^4}{80}$	$\frac{\Delta(2\pi f)}{4\sqrt{3}\pi}$	$\sqrt{\frac{3}{5}} \frac{\Delta(2\pi f)}{4\pi}$	$\frac{4}{9}$
2	$e^{-\beta\tau^2}$	$-2\beta^2$	$12\beta^4$	$\frac{\sqrt{\beta}}{\pi\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2\pi}\sqrt{6\beta}$	$\frac{6}{9}$
3	$\left(1 + \beta \tau + \frac{1}{3}(\beta\tau)^2\right)e^{-\beta \tau }$	$-\frac{1}{3}\beta^2$	β^4	..	$\frac{\beta\sqrt{3}}{2\pi}$	$\frac{8}{9}$

Для классификации телеметрируемых процессов по виду корреляционной зависимости в алгоритмах обработки в качестве метрики используется точечная характеристика ν^2 , учитывающая корреляционную зависимость между значениями процесса и его второй производной в одинаковые моменты времени (см. рис. 2):

$$\nu^2 = 1 - \left(N_1^+(0) / N_{1\max}\right)^2. \quad (7)$$

Данная характеристика может принимать значения в диапазоне от нуля (для гармонического процесса) до единицы (широкополосный

шум). Исследования зависимости функции плотности вероятности высоты локальных экстремумов ($N_{1\max}$) от характеристики v^2 привели к выводу о том, что три модели информационных процессов (см. табл. 2) наиболее равномерно (изменение свойств) перекрывают диапазон от узкополосного гармонического до широкополосного процессов. Также исследования показали, что увеличение порядка фильтра ($k = 2, 3, \dots$) значительно усложняет решение уравнения (2), увеличивает вычислительную сложность алгоритмов обработки, но не оказывает ощутимого влияния на увеличение коэффициента сжатия [14].

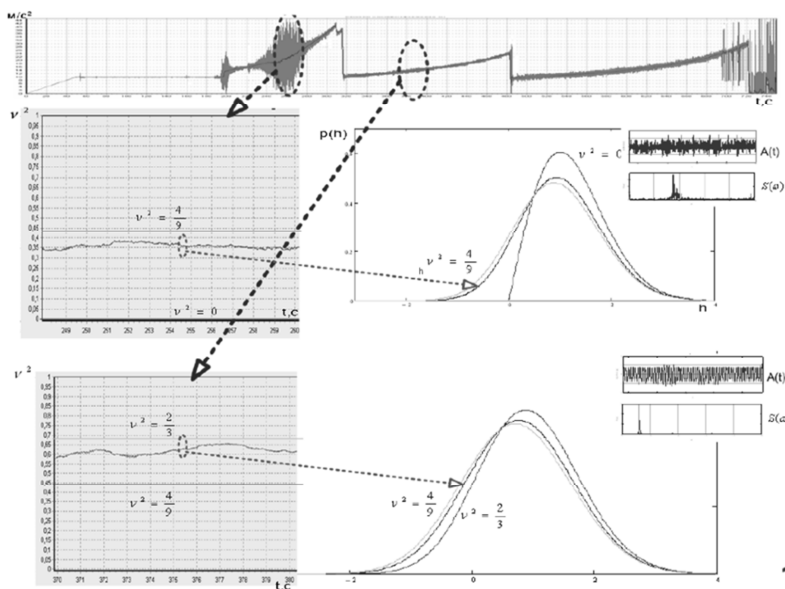


Рис. 2. Оперативное оценивание корреляционных свойств телеметрируемого параметра осевой перегрузки при различных режимах работы РН на АУТ.

5. Заключение. Получены аналитические зависимости характеристик «превышения уровня» от спектрально-корреляционных свойств телеметрируемых процессов. На их основе предложена процедура адаптивного оценивания свойств телеметрируемых процессов, в которой учтено влияние формы спектра на смещение оценки средней частоты процесса. При этом оценивание производится

с помощью простейших измерителей типа «счетчик нулей», что значительно уменьшает вычислительную сложность алгоритмов обработки [15,16].

В результате разработан алгоритм оперативного сжатия телеметрируемых процессов с использованием структурно-параметрической адаптации к моментным и спектральным характеристикам ТМИ. Данный алгоритм использован при создании специального программного обеспечения обработки телеметрической информации ракеты-носителя на активном участке траектории. Экспериментальная отработка проводилась во время пусковых компаний в Гвианском космическом центре в 2011-2012 годах.

Литература

1. *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» // Приложение. 2011. №10. 14-20 с.
2. *Каргин В.А., Николаев Д.А., Охтилев М.Ю., Россиев А.Ю., Чуприков А.Ю.* Анализ особенностей телеметрической информации ракет космического назначения - Аэрокосмические технологии: Научные материалы Второй международной научно-технической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения академика Челомея В.Н. / Под ред. Симоньянца Р.П. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 189-190.
3. *Каргин В.А., Николаев Д.А., Нездоровин Н.В., Самойлов Е.Б.* Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном времени – Информация и космос. 2009. №4. 77-82 с.
4. Научно-технический отчет № 754-0327/07-2-016-2008-10 по НИР «Телеприбор». Методы и модели повышения достоверности результатов обработки измерительной информации. Формирование тезауруса и основных соотношений. Анализ существующих моделей и алгоритмов отбраковки аномальных измерений.
5. Научно-технический отчет № 754-0327/07-2-016-2009-7 по НИР «Телеприбор». Моделирование и стендовая отработка технических решений по средствам управления КА НСЭН и контроля запусков средств выведения. Моделирование системы информационного обмена с автоматическими и пилотируемыми КА при полетах к Луне и планетам Солнечной системы, книга 1, часть 1.
6. *Стёпкин В.С., Шмыголь С.С.* Автоматизированная обработка и анализ измерительной информации. – МО СССР, 1980. 515 с.
7. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под редакцией доктора технических наук, профессора Р.М. Юсупова // МО СССР, 1984. 563 с.
8. *Фомин А.Ф., Новосёлов О.Н., Плюцев А.В.* Отбраковка аномальных результатов измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
9. *Волгин В.В., Каримов Р.Н.* Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления. – М.: Энергия, 1979. 80 с.
10. *Николаев Д.А., Каргин В.А., Охтилев М.Ю., Чуприков А.Ю., и др.* Вопросы реализации программного комплекса мониторинга состояния РН в РМВ – Научная сессия ГУАП: Сб. докладов: В 4 ч. – Ч. II. Технические науки – СПб: Изд-во СПб ГУАП, 2011. С. 146-150.

11. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987. 304 с.
12. *Каргин В.А., Николаев Д.А., Россиев А.Ю., Бородько Д.Н.* Модель измерительной информации в системах мониторинга космических средств // Информационно-управляющие системы, 2012. №1. С. 39-43.
13. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Проблема пересечений уровня случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника, 1998. Том 43. № 5. С. 501–523.
14. *Нездоровин Н.В.* Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2011.
15. *Нездоровин Н.В., Самойлов Е.Б.* Формирование обобщенных спектральных характеристик телеметрируемых параметров при экспресс-анализе по пересечению нуля // Сб. научных трудов ВКА им. А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. С. 309-314.
16. *Николаев Д.А.* Разработка средств повышения достоверности и уменьшения избыточности измерительной информации – Научная сессия ГУАП: Сб. докладов: В 4 ч. – Ч. II. Технические науки – СПб: Изд-во СПб ГУАП, 2009 г. С. 207-210.

Каргин Виктор Александрович – к.т.н, доцент; инженер-программист 1-й категории ЗАО «СКБ Орион». Область научных интересов: прикладная теория случайных процессов, модели и алгоритмы обработки информационных процессов космических средств, автоматизированные системы управления в космической отрасли. Автор более 20 научных публикаций. kargin@skborion.ru; ЗАО «СКБ Орион», ул. Тобольская, д. 12, Санкт-Петербург, 194044, РФ, р.т., факс +7 (812) 600-15-12.

Kargin Viktor Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Software Engineer Category 1st at JSC «SKB Orion» Research interests - applied the theory of stochastic processes, models and algorithms for processing information process space vehicles, automated control systems in the space industry. Author of more than 20 scientific publications. kargin@skborion.ru, JSC "SKB Orion", Tobolskaya st., 12, St. Petersburg, 194044, Russia, ph/fax +7 (812) 600-15-12.

Рекомендовано ЗАО «СКБ Орион», д.т.н., профессор, заместитель Генерального конструктора Охтилев М.Ю.
Статья поступила в редакцию 13.06.2013.

РЕФЕРАТ

Каргин В.А. **Оперативное необратимое сжатие телеметрической информации.**

Рассматривается задача разработки алгоритмического и специального программного обеспечения адаптивного сжатия телеметрируемых параметров, поступающих с ракеты-носителя (РН) в реальном масштабе времени (РМВ). Это вызвано необходимостью уменьшить избыточность результатов обработки ТМИ, используемой в качестве входной информации в комплексах мониторинга технического состояния ракеты-носителя на активном участке траектории в реальном масштабе времени.

В результате решения задачи:

– получены аналитические зависимости характеристик «превышения уровня» от спектрально-корреляционных свойств телеметрируемых процессов;

– предложена процедура оперативной классификации телеметрической информации РН, учитывающая спектрально-корреляционные свойства процессов за счет введения новой метрики, использующей характеристики «превышения уровня»;

– разработан алгоритм адаптивного сжатия ТМИ с элементами самонастройки, как параметров, так и структуры фильтра в зависимости от формы спектра, средней частоты, коэффициента вариации и частоты опроса телеметрируемого процесса.

Разработанный алгоритм обработки телеметрической информации реализован в специальном программном обеспечении обработки и анализа телеметрической информации РН на активном участке траектории во время пусковых компаний в Гвианском космическом центре в 2011-2012 годах. Данная реализация позволила адаптивно в РМВ уменьшать избыточность результатов обработки ТМИ и оперативно получать интегрированные заключения о контролируемых событиях, происходящих при запусках РН.

SUMMARY

Kargin V.A. **Operational irreversible compression of telemetry information.**

The problem of developing algorithm and special software for adaptive compression of telemetered parameters coming from the launch rocket (LR) in real time scale (RTS) is considered. It is dictated by the need to reduce redundancy of TMI processing results used as input information in the launch rocket condition monitoring complexes on the active trajectory in real time scale.

As a result of the problem solving:

– analytical dependence of the "level increase" characteristics on the spectral correlation properties of the telemetered processes was received;

– procedure of quick LR telemetry classification, taking into account the spectral correlation properties of the processes by introducing a new metric that uses the "level increase" characteristics, was proposed;

– the algorithm of TMI adaptive compression with self-regulation elements of both parameters and structure of the filter according to the shape of the spectrum, average frequency, variation coefficient and the telemetered process polling rate was developed.

The developed algorithm of telemetry information processing is implemented in the special software for processing and analysis of LR telemetry information on active trajectory during the launch campaigns at the Guiana Space Centre in 2011-2012. This implementation allows adaptively reduce redundancy of TMI processing results in PMB and promptly receive integrated conclusions on controlled events that occur during LR launching.