

Апробация автоматизированного алгоритма анализа телеметрических параметров состояния бортовых систем космического аппарата

© О.И. Абанин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Изложен способ решения задачи анализа телеметрической информации (ТМИ), поступающей от космического аппарата, методом вейвлет-преобразования. В статье рассмотрены предпосылки для автоматизации процесса анализа ТМИ, а также указаны возможные результаты внедрения алгоритмов для анализа состояния бортовых систем космического аппарата по предлагаемой схеме. С целью обнаружения аномальных изменений в значении телеметрических параметров (ТМП) предложен алгоритм автоматизированной обработки их значений. Для решения задачи анализа достоверных данных о состоянии бортовых систем космического аппарата приведено описание поэтапного процесса вейвлет-фильтрации временных рядов ТМП. Представлены способы выявления и устранения сбойных значений в ТМИ. Предложен способ автоматизации процесса анализа на основе разрабатываемого специального математического аппарата. Дано краткое описание математических преобразований, на которых основан предлагаемый метод анализа ТМП бортовых систем, и представлены результаты апробации методики на примере анализа архивной ТМИ космического аппарата. Приведены результаты вейвлет-анализа ТМП-системы кондиционирования воздуха и системы электропитания российского сегмента Международной космической станции.

Ключевые слова: космический аппарат, управление полетом, контроль, телеметрическая информация, автоматизация, вейвлет-преобразование, анализ состояния

Введение. Получение необходимой информации для решения задач управления космическим полетом и в итоге принятие решений о дальнейшем продолжении полета осуществляются в значительной степени в результате анализа телеметрической информации (ТМИ), поступающей от космического аппарата (КА).

Автоматизация всех составных частей процесса эффективного и надежного управления полетом КА, особенно с учетом продления сроков активного существования КА и усложнения их конструкции, увеличения числа телеметрических параметров (ТМП), повышения сложности исполняемых задач КА и полетных операций (ПО), является актуальной задачей. Это в значительной степени относится к анализу ТМИ, поскольку такая информация служит основным источником данных о состоянии КА.

Автоматизация контроля состояния КА для решения указанных задач возможна путем интеллектуализации алгоритма анализа ТМИ. Отмечается тенденция к применению средств автоматизации для выявления факта приближения значений ТМП к предельным значениям,

возникновение которых фиксируется методом «допускового контроля», основанного на превышении значения ТМП определенного заданного порога. Необходимо оперативно выявлять такие процессы изменения контролируемого ТМП, предшествующие возникновению потенциальной аномалии, которая сейчас обнаруживается только в момент ее наступления. Аномалия в работе бортовых систем (БС) — это локальное отклонение значений ТМП, находящееся в допустимых пределах, но не соответствующее номинальному среднестатистическому распределению величин ТМП, и это отклонение может иметь потенциальное развитие как нештатная ситуация (НШС) [1].

Существует ряд других методов спектрального анализа данных, которые могут обеспечить оперативное выявление НШС и увеличить время, отводимое на их устранение. Предлагаемый в данной статье метод анализа ТМИ основан именно на использовании математического аппарата вейвлет-преобразования (ВЛП). Сравнение предлагаемого в данной работе подхода с другими методами обработки ТМИ приведено в работе [2]. ВЛП — это интегральное преобразование, представляющее собой свертку двух функций, одна из которых — вейвлет, а вторая — функция исследуемого сигнала. Вейвлетом может называться та функция, которая удовлетворяет ряду условий, основными из которых являются [3]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \text{ — нулевое среднее;}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \text{ — ограниченность вейвлет-функции в пространстве, или квадратичная интегрируемость;}$$

$\psi(t)$ — вейвлет-функция.

Для проведения ВЛП выполняется построение семейства вейвлет-функций, скалярное произведение которых с исходным сигналом составляет поле коэффициентов преобразования, имеющего возможность отразить как частотные, так и временные изменения сигнала. Для построения семейства применяются параметры: масштабный коэффициент a и сдвиг по времени τ . Масштаб представляет собой частотную меру, определяющую детализацию преобразования и обратно пропорциональную частоте. Масштабирование как математическая операция расширяет или сжимает сигнал. Таким образом,

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right),$$

где $\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ — исходный «материнский» вейвлет.

Непрерывный ВЛП (НВЛП) определяют по формуле

$$W(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a, \tau}^*(t) dt.$$

Здесь $W(a, \tau)$ — вейвлет-коэффициенты (ВЛК); $f(t)$ — функция анализируемого сигнала; $\psi_{a, \tau}^*(t)$ — функция, комплексно-сопряженная с выбранным вейвлетом [4, 5].

Суть преобразования состоит в следующем: если при заданном значении масштаба и сдвига значение ВЛП оказалось относительно большим, то при этом масштабе и сдвиге в исходном сигнале существует участок, похожий на анализируемый вейвлет. Из этого следует наличие возможности обнаружения в заданном ряде значений ТМП изменений, похожих на вейвлеты.

Принципы выявления и устранения сбойных значений в ТМИ. На практике при анализе ТМИ любого КА возможно появление сбойных значений такой информации, существенных отклонений, не имеющих физического смысла. Необходимым условием для проведения анализа ТМИ на наличие аномальных отклонений является присутствие в сигнале только достоверной информации. Отсюда возникает задача устранения сбойных значений. Методика анализа ТМИ, основанная на использовании вейвлет-преобразования, также способна решать задачу исключения сбойных значений. Требуется определять, выявлять и устранять недостоверную информацию, чтобы не пропустить ее на дальнейшие этапы анализа мониторинга аномалий. Типичный вид ТМИ, содержащей сбойные значения, показан на рис. 1, 2.

Для устранения сбойных значений необходимо перед выполнением основной задачи анализа ТМИ по обнаружению аномалий выполнить идентификацию сбойной недостоверной информации. Сбойные значения ТМП могут создавать критичное затруднение для дальнейшего автоматического процесса анализа. Обнаружение аномалий на фоне сбойных значений ТМП создает дополнительные сложности для выполнения анализа. Сбойные отклонения ТМП в процессе ВЛП искажают динамику поведения отображаемых вейвлет-коэффициентов (ВЛК), что усложняет процесс обнаружения аномалий в работе КА [6, 7]. Вейвлет-коэффициенты представляют собой результат ВЛП и характеризуют то, насколько анализируемый ТМП локально подобен вейвлет-функции в процессе интегрирования. На рис. 2 не удастся пронаблюдать, как изменятся ВЛК малого масштаба из-за высокого влияния коэффициентов, соответствующих сбойным значениям ТМП.

1	СМ_БОРТ_А виток=3445 (115445) 3 февраля 2019г.с8 Нач.Кадр=0						
2	τ	НША	А	ТСА,	ТСЕ,	ТН1	ЗНАВ1
3		В	А	А	А		В
4	11:27:01.238	28.68574	~	~	~	~	30.14382
5	11:27:01.262	~	304.3	267.7	133.36287	~	~
6	11:27:01.445	~	258.0	265.2	133.36287	~	~
7	11:27:01.468	28.70248	~	~	~	~	30.09361
8	11:27:01.492	~	255.2	265.2	128.04749	~	~
9	11:27:01.514	28.70248	~	~	~	~	30.09361
10	11:27:01.536	~	255.2	267.7	130.70517	~	~
11	11:27:01.560	844.9163	~	~	~	~	30.14382
12	11:27:01.605	28.66901	~	~	~	~	30.14382
13	11:27:01.627	~	255.2	265.2	133.36287	~	~
14	11:27:01.651	28.68574	~	~	~	~	30.14382
15	11:27:01.673	~	258.0	265.2	112.10135	~	~
16	11:27:01.717	~	255.2	265.2	130.70517	~	~
17	11:27:01.739	28.73594	~	~	~	~	30.14382
18	11:27:01.763	~	252.5	262.6	133.36287	~	~
19	11:27:01.786	28.70248	~	~	~	~	30.14382

Рис. 1. Табличный вид исходной телеметрической информации при наличии сбойного значения

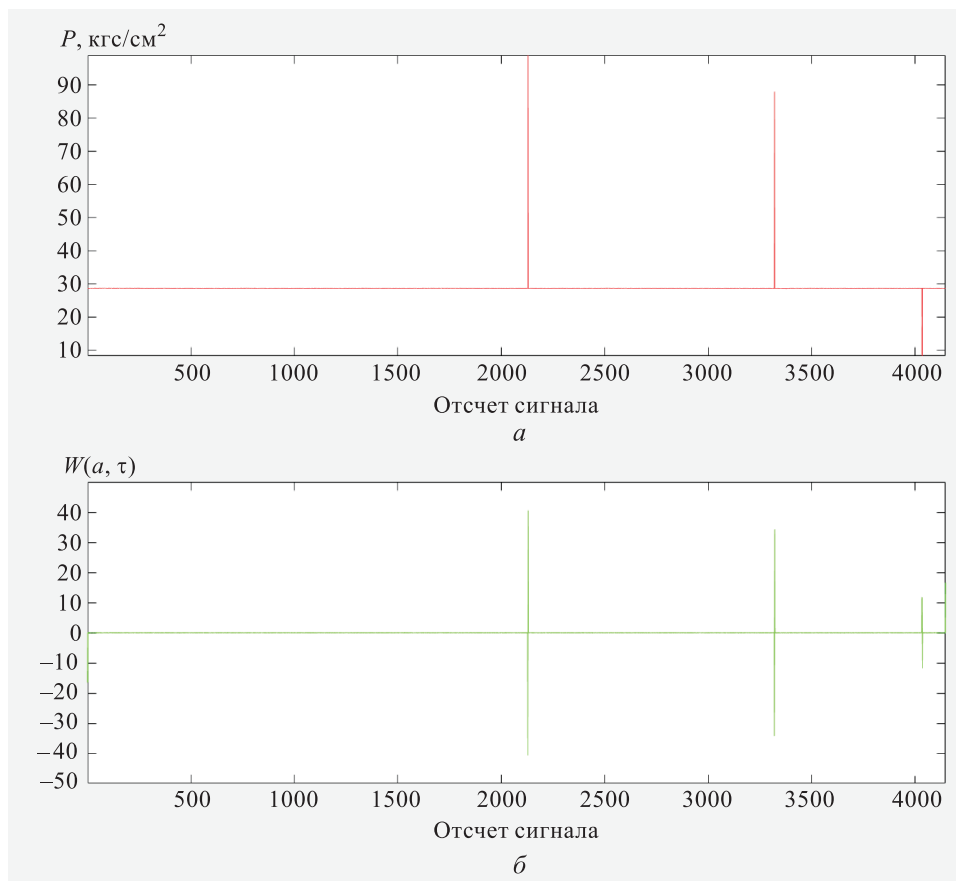


Рис. 2. Графический вид отображения сбойных значений (а) и результаты обнаружения сбойных значений (б) для телеметрических параметров системы электропитания КА

Фильтрация в базисе вейвлет-функций включает три этапа:

- 1) вычисление прямого вейвлет-преобразования — нахождение коэффициентов разложения по сбойным значениям дискретного сигнала;
- 2) удаление тех коэффициентов разложения, которые обозначают сбойные значения;
- 3) вычисление обратного вейвлет-преобразования — восстановление сигнала из отфильтрованных ВЛК [8].

Совокупность указанных этапов принято называть вейвлет-фильтрацией. Очевидно, что качество фильтрации зашумленного сигнала определяется алгоритмами обработки, используемыми на втором этапе. Большинство применяемых на практике алгоритмов носит пороговый характер: коэффициент разложения, меньший по абсолютной величине некоторой пороговой величины, обнуляется. В противном случае коэффициент сохраняется или подвергается некоторому преобразованию.

С помощью математического аппарата кратномасштабного анализа (КМВА) выполняется многоуровневое разложение сигнала с расчетом ВЛК на каждом уровне. Для каждого ряда аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов устанавливается пороговая функция. Пороговая величина, в свою очередь, устанавливает, для каких масштабов учитывать коэффициенты с большим весом, а для каких — с меньшим (рис. 3, *слева*). Результат фильтрации формируется между «сглаженностью» и полным удалением сбойных значений. Алгоритм вейвлет-фильтрации на основании КМВА заложен в интерактивную среду MATLAB в приложении по работе с вейвлетами, он позволяет выполнять очистку сигнала от сбойных значений и шума путем настройки пороговых значений для вейвлет-функции на каждом уровне преобразования. Пример использования настройки пороговых функций на каждом уровне ВЛП показан на рис. 3 [9–13]: *слева* — ВЛК на различных уровнях разложения сигнала ($d_1 - d_{10}$); *по центру* последовательно — исходный и наложенный отфильтрованный сигнал, сетка распределения ВЛК для всех значений масштаба и отфильтрованные ВЛК; *справа* — панель настройки параметров вейвлет-фильтра для каждого уровня разложения сигнала.

Вейвлет-преобразование позволяет обнаружить и зафиксировать сбойное значение даже на фоне наличия естественных скачков значений ТМП несбойного характера. Это можно наблюдать на примере вейвлет-анализа параметра «Т174» температуры системы электропитания (СЭП) КА (рис. 5).

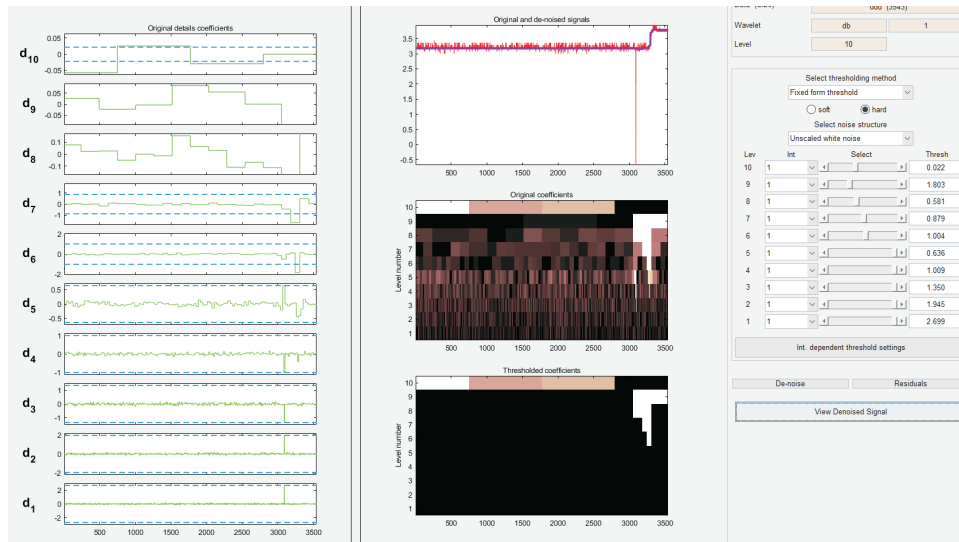


Рис. 3. Настройка пороговых значений для каждого уровня вейвлет-преобразования в программной среде MATLAB

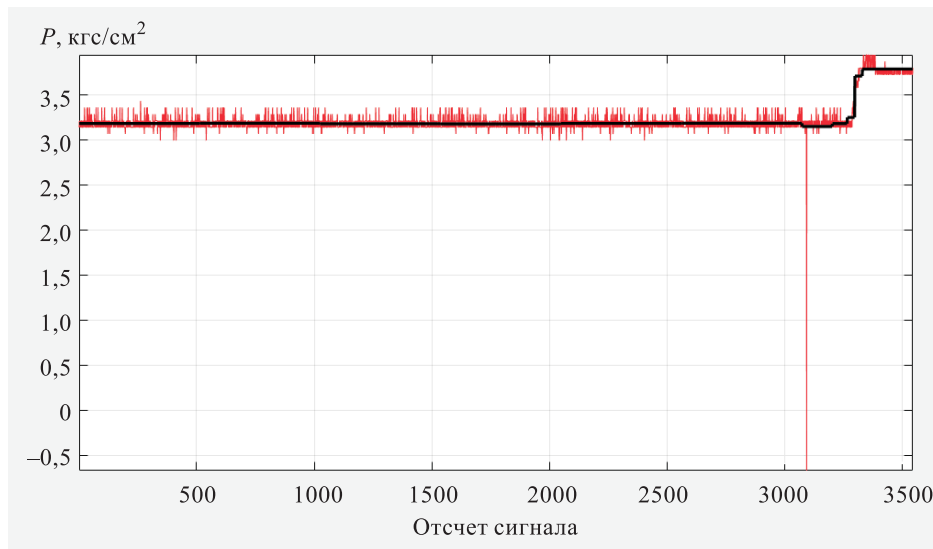


Рис. 4. Результат вейвлет-фильтрации для значений телеметрических параметров: красным цветом показан оригинальный сигнал, содержащий сбойное значение, черным — наложен вид сигнала, прошедшего фильтрацию

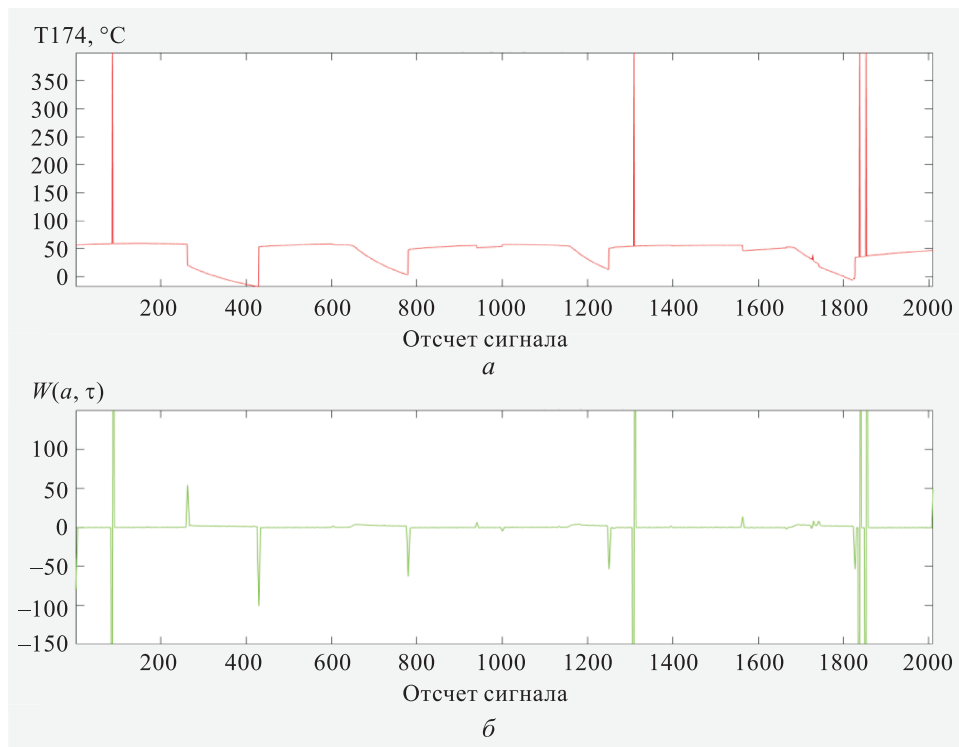


Рис. 5. Результаты обнаружения сбойных значений для параметра T174 с использованием вейвлета Хаара

Скачкам значений параметра, связанным с отсутствием ТМИ на определенном интервале времени внутри витка (рис. 5, а), соответствует односторонний относительно нуля всплеск на диаграмме распределения ВЛК (кривая зеленого цвета на рис. 5, б). В свою очередь, для сбойного значения ВЛП формирует двусторонний относительно нуля симметричный скачок. Последнее связано с тем, что сбойное значение существует на графике крайне непродолжительное время: за нарастанием мгновенно следует убывание и отображается на графике как зигзагообразный скачок. Таким образом, критерием для автоматизированного выявления сбойных значений является знакопеременное и значительное отклонение ВЛК на малом (менее секунды) интервале времени.

Работа алгоритма. Сформированные ряды значений ТМП после процедуры предварительной обработки поступают в вейвлет-фильтр. После применения обратного ВЛП (ОВЛП) происходит восстановление сигнала ТМП по отфильтрованным ВЛК.

Согласно последовательности действий, показанных на рис. 6, поэтапно получены результаты ВЛП, схема алгоритма анализа которых приведена на рис. 7.

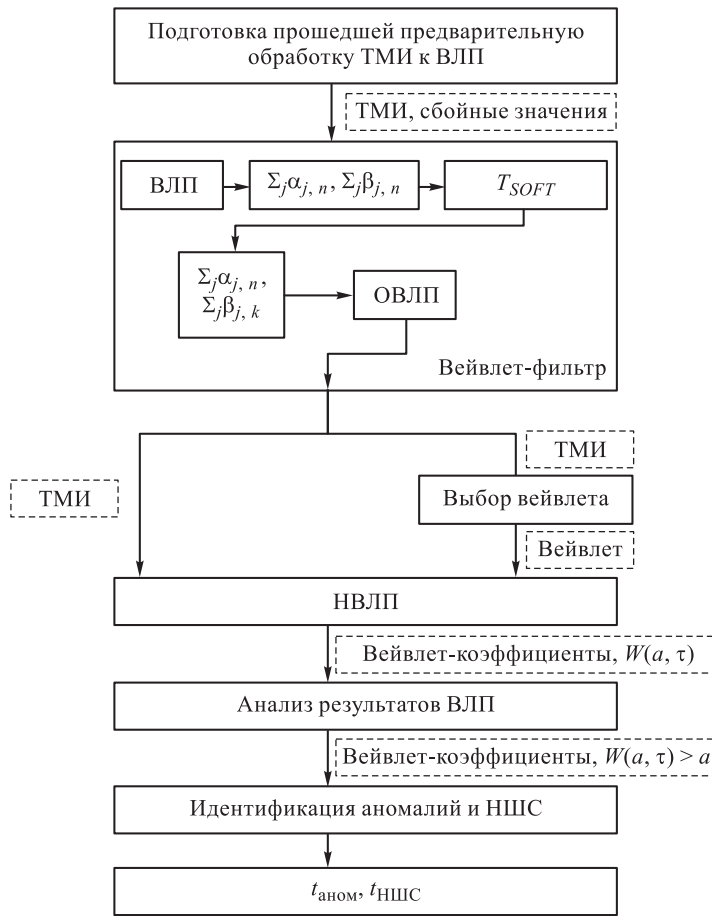


Рис. 6. Последовательность этапов алгоритма анализа телеметрической информации на основе вейвлет-преобразования

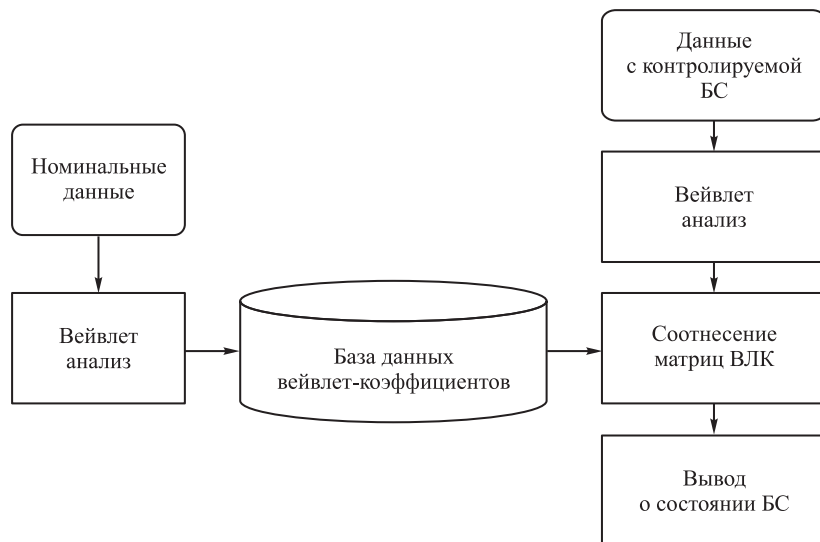


Рис. 7. Принципиальная схема алгоритма анализа вейвлет-коэффициентов

Для выявления аномалий по указанной схеме алгоритм выполняет предварительный поиск ВЛК, соответствующих номинальным данным и их запоминание в базе данных. После выполнения ВЛП для анализируемых значений отдельного ТМП КА проводится сравнение полученных ВЛК со значениями результатов преобразования для номинальных данных этого параметра. В случае отклонения значений выносится заключение о дополнительном контроле этого параметра с фиксацией аномальных участков.

Этапы анализа ТМП о состоянии БС КА показаны на рис. 6. После подготовки (форматирование и объединение) к ВЛП информации, прошедшей предварительную обработку, выполняется фильтрация значений ТМИ от шумов и удаление сбойных значений. Данная операция проводится с помощью предварительного ВЛП, вейвлет-функция которого имеет свойства, наиболее подходящие для устранения сбоев в последовательности значений ТМП.

Перед выполнением основного НВЛП требуется выбрать анализирующую вейвлет-функцию. Для этого определяется тип вейвлета и начальное значение масштаба, для которого будут отображены результаты, подлежащие последующему анализу.

После определения масштаба вейвлета и его формы выполняется НВЛП, результатом которого является матрица ВЛК, ее визуализация приведена на рис. 8.

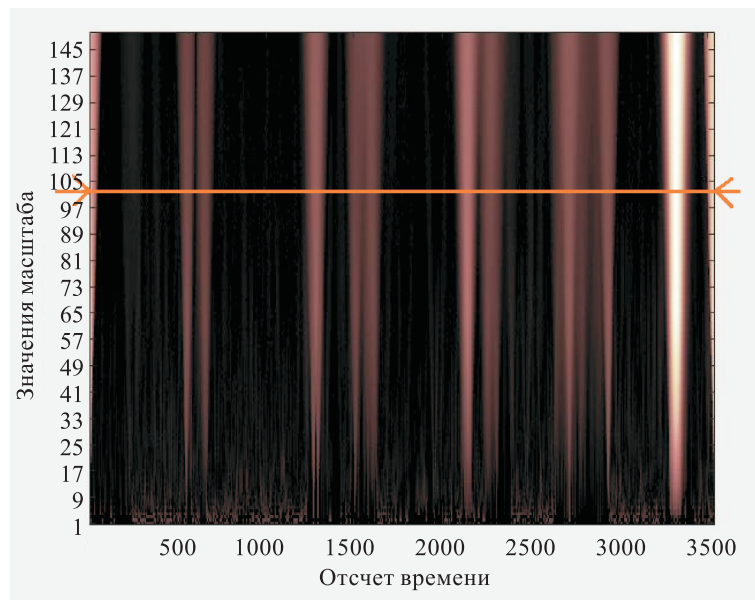


Рис. 8. Диаграмма распределения значений вейвлет-коэффициентов как результат непрерывного вейвлет-преобразования

На диаграмме (см. рис. 8) видим, что, начиная со значений масштаба $a=103$ (указаны по вертикальной оси), полосы высоких по величине ВЛК начинают сливаться, это означает потерю детализации локальных отклонений. Поэтому для рассчитанного в данном примере значения масштаба $a=103$ выполняется извлечение ВЛК в целях проведения анализа. ВЛК i -го масштаба можно представить как сечение диаграммы (оранжевая линия на рис. 8). В действительности получаем график, приведенный на рис. 9.

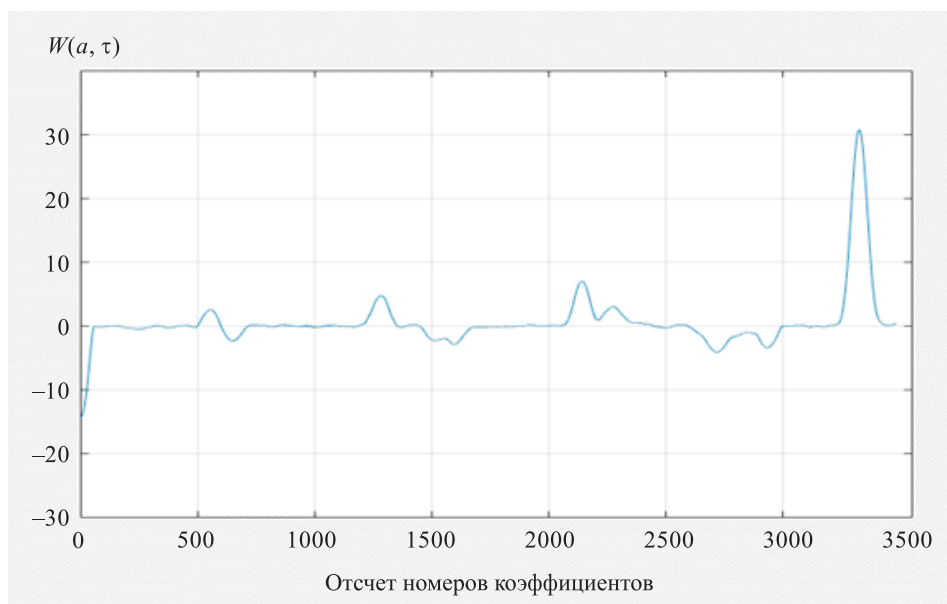


Рис. 9. Вейвлет-коэффициенты определенного масштаба

Анализ результатов преобразования. Анализ ВЛК выполняется в целях обнаружения признаков аномалий и НШС в значениях рассматриваемых ТМП КА. В данной работе предложена следующая схема анализа ТМП. Перед началом активной работы алгоритма методики выполняется накопление значений ВЛК номинальных данных о работе КА. Сохраняемые ВЛК содержатся в базе данных. Схема анализа ВЛК была приведена на рис. 7.

Работа алгоритма начинается с выполнения вейвлет-преобразования поступающих значений ТМП КА. Затем проводится соотношение матриц ВЛК номинального и текущего состояний параметров в рамках определенного масштаба. В случае наличия отклонения значений текущих коэффициентов относительно номинальных фиксируется время возникновения этой аномалии.

Апробация методики обнаружения аномальных процессов на борту КА на примере пробного исследования ТМИ. Проверка работы методики анализа ТМИ с помощью предлагаемого специально-

го математического аппарата выполнялась для параметров отдельной БС КА.

Для апробации методики анализа ТМИ выбран такой характерный параметр для данной системы, как температура хладона 2Т223 на входе компрессора, в распределении значений этого параметра определяется НШС. Значения температуры, соответствующие номинальной работе системы кондиционирования воздуха (СКВ) российского сегмента Международной космической станции, показаны на рис. 10.

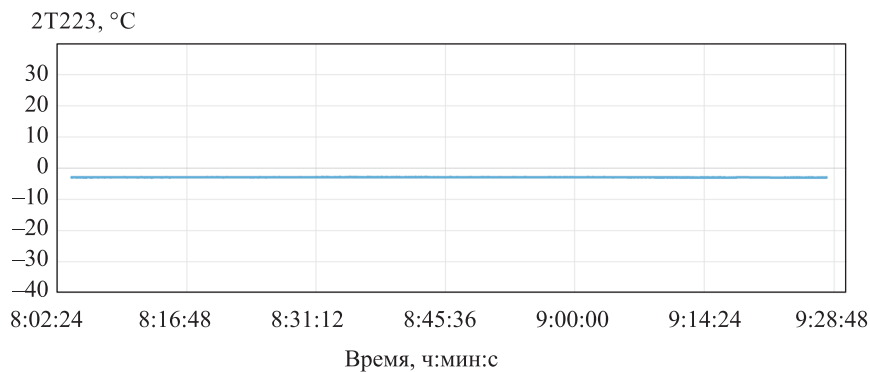


Рис. 10. Изменение значений температуры хладона 2Т223 во времени

Распределение значений ВЛК, показанное на рис. 11, соответствует номинальным данным (см. рис. 10), результат преобразования локализован в малой окрестности относительно нуля (значения масштаба $a = 125$).

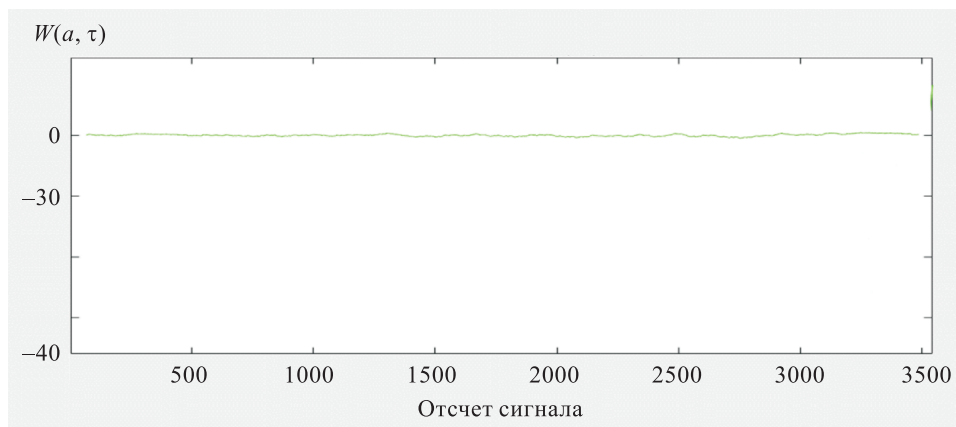


Рис. 11. Визуализация распределения ВЛК для номинального поведения температуры хладона 2Т223

При анализе архивной ТМИ за отдельный период полета была обнаружена НШС. График изменения температуры хладона 2Т223 с выделенной НШС на интервале одного витка полета КА показан на рис. 12. В результате ВЛП сигнала для параметра 2Т223 (см. рис. 12) получены ВЛК, приведенные на рис. 13 (значения масштаба $a = 125$).

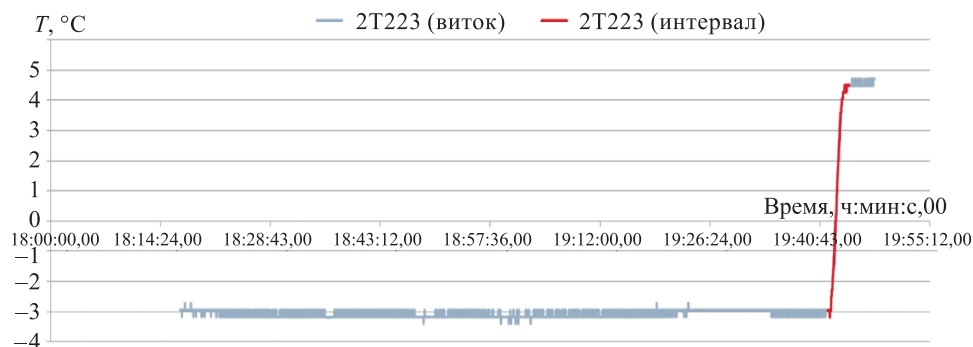


Рис. 12. Изменение значений температуры хладона 2Т223

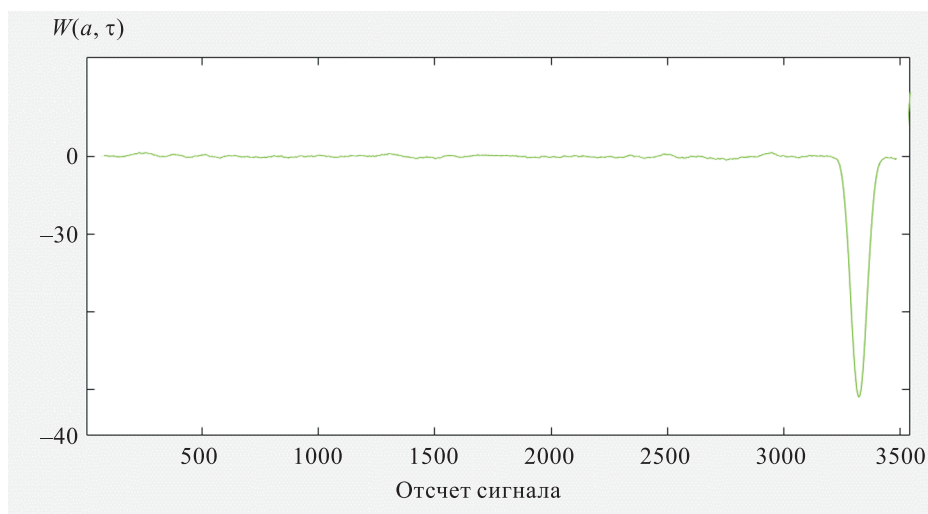


Рис. 13. Распределение значений ВЛК для параметра 2Т223

Как видно по данным на рис. 13, математическое преобразование фиксирует изменение температуры на том самом участке, где происходит НШС. В этом сигнале отсутствуют аномалии, и тем не менее ВЛП позволяет автоматически обнаружить НШС.

Следует отметить, что возникшее нарастающее отклонение обнаруживается по превышению модуля коэффициентов определенного заранее установленного значения. Горизонтальное постоянство

значений коэффициентов на большей части графика вызвано постоянной схожестью исследуемого сигнала и вейвлета.

Заключение. На основе рассмотренных примеров можно выделить следующие особенности предлагаемой методики, основанной на ВЛП.

1. Предлагаемый автоматизированный алгоритм анализа ТМИ КА позволяет успешно обнаруживать и устранять сбойные значения поступающей ТМИ.

2. С помощью алгоритма анализа ТМИ, основанного на использовании ВЛП, открывается возможность выявлять аномалии в поведении ТМП и анализировать процесс развития НШС.

3. Процесс изменения ТМП и развития НШС можно отслеживать автоматизированно с использованием обновляемой базы данных ВЛК, характеризующих номинальное поведение этих параметров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Донсков А.В., Мишурова Н.В., Соловьев С.В. Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата. *Вестник Московского авиационного института*, 2018, т. 25, № 3, с. 151–160.
- [2] Абанин О.И., Соловьев С.В. Новые математические методы анализа телеметрической информации в задачах контроля при управлении полетом космического аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1788>
- [3] Сакрутина Е.А., Бахтадзе Н.Н. Идентификация систем на основе вейвлет-анализа. *XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014*. Москва, ИПУ РАН, 2014, с. 2868–2889.
- [4] Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. *Успехи физических наук*, 1996, т. 166, № 11, с. 1145–1170.
- [5] Козинев И.А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования. Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 1, с. 4.
- [6] Дьяконов В.П. *Вейвлеты. От теории к практике*. Москва, Солон-Р, 2002, 448 с.
- [7] Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холод И.И. *Анализ данных и процессов*. 3-е изд. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2009.
- [8] Воробьев В.И., Грибунин В.Г. *Теория и практика вейвлет-преобразования*. Санкт-Петербург, ВУС, 1999, с. 1–204.
- [9] Коньшева В.Ю., Максимов Н.А., Шаронов А.В. Вейвлет-анализ в задачах контроля и диагностики линейных динамических систем. *Труды МАИ*, 2018, вып. № 97. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/911/Konysheva_Maksimov_SHaronov_ru.pdf
- [10] Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование. *Успехи физических наук*, 2001, т. 171, № 5, с. 465–501.
- [11] Дьяконов В., Абраменкова И. *MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник*. Санкт-Петербург, Питер, 2002, 608 с.

- [12] Петухов А.П. *Введение в теорию базисов всплесков*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГТУ, 1999, 132 с.
- [13] Переберин А.В. О систематизации вейвлет-преобразований. *Вычислительные методы и программирование*, 2001, т. 2, с. 15–40.

Статья поступила в редакцию 30.11.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Абанин О.И. Апробация автоматизированного алгоритма анализа телеметрических параметров состояния бортовых систем космического аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2149>

Абанин Олег Игоревич — аспирант кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, младший научный сотрудник НИИЯФ МГУ. Область научных интересов: управление полетом космических аппаратов, интеллектуальные системы анализа данных, космическая физика.
e-mail: olegaban@mail.ru

An automated algorithm approbated for the analysis of telemetric parameters of the state of spacecraft onboard systems

© O.I. Abanin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper focuses on the problem of analyzing spacecraft telemetric information solved by wavelet transform, reveals the prerequisites for automating the analysis process, and indicates the possible results of implementing algorithms for analyzing the state of spacecraft onboard systems according to the proposed method. To detect abnormal changes in telemetric parameters, we propose an algorithm for automated processing of their values; to analyze reliable data on the state of spacecraft onboard systems, we describe the step-by-step process of wavelet filtering of telemetric parameters time series. The study also introduces the ways to identify and eliminate faulty values in telemetric information. The method for automating the analysis process is based on the developed special mathematical apparatus; the paper briefly describes the mathematical transformations used in the study. We tested the method by analyzing the archival spacecraft telemetric information. The test results are given, as well as the results of the wavelet analysis of the telemetric parameters of the air conditioning system and the power supply system of the ISS Russian Segment.

Keywords: spacecraft, flight control, control, telemetric information, automation, wavelet transform, state analysis

REFERENCES

- [1] Donskov A.V., Mishurova N.V., Solovlev S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 151–160.
- [2] Abanin O.I., Soloviev S.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1788>
- [3] Sakrutina E.A., Bakhtadze N.N. Identifikatsiya sistem na osnove veyvlet-analiza [System identification based on wavelet analysis]. In: *XII Vserossiyskoe soveshanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian Meeting on Management Problems 2014]. Moscow, Institute of Control Sciences RAS Publ., 2014, pp. 2868–2889.
- [4] Astafeva N.M. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170.
- [5] Kozinov I.A. *Informatsionno-upravlyayuschie sistemy — Information and Control Systems*, 2015, no. 1, p. 4.
- [6] Dyakonov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From theory to practice]. Moscow, Solon-R Publ., 2002, 448 p.
- [7] Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Kholod I.I. *Analiz dannykh i protsessov* [Analysis of data and processes]. 3rd ed. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2009.
- [8] Vorobiev V.I., Gribunin V.G. *Teoriya i praktika veyvlet-preobrazovaniya* [Theory and practice of wavelet transform]. St. Petersburg, VUS Publ., 1999, pp. 1–204.
- [9] Konysheva V.Yu., Maksimov N.A., Sharonov A.V. *Trudy MAI (Proceedings of MAI)*, 2018, no. 97. Available at:
http://trudymai.ru/upload/iblock/911/Konysheva_Maksimov_SHaronov_ru.pdf

- [10] Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitaylo V.A. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2001, vol. 171, no. 5, pp. 465–501.
- [11] Dyakonov V., Abramenkova I. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy. Spetsialny spravochnik* [MATLAB. Signal and image processing. Special reference book]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002, 608 p.
- [12] Petukhov A.P. *Vvedenie v teoriyu bazisov vspleskov* [Introduction to the theory of wavelet bases]. St. Petersburg, SPSIT Publ., 1999, 132 p.
- [13] Pereberin A.V. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye — Numerical Methods and Programming*, 2001, vol. 2, pp. 15–40.

Abanin O.I., post-graduate student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University; Senior Researcher, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Research interests: spacecraft flight control, intelligent data analysis systems, space physics. e-mail: olegaban@mail.ru