

Одним из основных требований, предъявляемых к современной телеметрической системе, является безошибочная доставка данных (достоверность передачи). Для защиты данных от шумов физического канала битовый поток кодируется одним или обоими следующими кодами: блочный код Рида-Соломона (255, 233); свёрточный код (7,12). Благодаря комбинации этих кодов канал практически освобождается от ошибок.

Так как космические системы передачи данных имеют ограниченную пропускную способность и ширину полосы частот канала передачи, посредством которого бортовые системы космического аппарата соединяются с системами сбора данных находящимися в космосе или на Земле, то когда многочисленные пользователи совместно используют один канал передачи данных, управление потоком данных становится процессом, определяющим производительность системы. Телеметрическая система должна гарантировать своевременную доставку данных от всех источников, достаточно часто получающих доступ к этому общему ресурсу (каналу), и управление буферизацией данных источников. Длинные пакеты источника, получающие монополярный доступ к каналу на не допустимо длительные для других источников периоды, могут создавать проблемы в управлении потоком данных, связанные с необходимостью необоснованно большой буферизации данных источников, для которых канал не доступен.

**АНАЛИЗ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ  
ПАРАМЕТРОВ В КОСМИЧЕСКОЙ  
ТЕЛЕМЕТРИИ НА ОСНОВЕ  
ЧАСТОТНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

**Л. КОЭНА**

Силаков Д.М., Крячко М.А., Поляков А.Ю.

*Военно-космическая академия  
имени А.Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия*

Обработка радиотелеметрической информации в ракетно-космической технике подразделяется на первичную и вторичную [1]. Задачами первичной обработки радиотелеметрической информации являются прием, синхронизация, уточнения оценок телеметрируемых параметров, масштабирование и приведения их к виду, удобному для дальнейшего использования.

Вторичная обработка обеспечивает анализ телеметрической информации, связанный с формированием данных, необходимых оператору или системе для принятия решения. При-

нятие решения осуществляется при управлении объектами, поиске неисправностей и при исследованиях систем.

Назначение анализа определяет его виды, задачи, принципы построения систем и необходимые объемы телеметрической информации (ТМИ).

В соответствии с назначением различают три вида анализа ТМИ: анализ состояния объекта, локализация неисправностей и исследование поведение телеметрируемого объекта.

Все телеметрируемые параметры обычно разделяют на два класса [2]:

— медленноменяющиеся параметры (ММП) с частотным диапазоном от 0 до 60 Гц, включающие давление в проточных частях (по газу и жидкости), расход жидких компонентов, относительное перемещение элементов конструкции, температура, обороты роторов турбо-насосных агрегатов, показания гироскопов;

— быстроменяющиеся параметры (БМП) с частотным диапазоном от 10 Гц до 20 кГц и выше, включающие пульсацию давления в проточных частях (газовых и жидкостных), относительное виброперемещение, виброускорения и деформацию элементов конструкции, крутильные (угловые) колебания роторов, гироскопов.

Особенности обработки БМП жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в настоящее время осуществляются в частотном диапазоне от 10 до 8000 Гц, верхняя граница которого может увеличиваться в процессе стендовых испытаний.

Необходимо отметить, что современный анализ нестационарных быстроменяющихся параметров весьма сложен в следствие необходимости получения одновременной информации о точном времени наступления того или иного события, а также об его частотной характеристике с достаточными степенями информативности, достоверности и разрешения.

Практика показывает, что существует несколько путей повышения информативности и обеспечения достоверности измеряемых параметров ЖРД: расширение частотного диапазона измерения параметров; расширение номенклатуры измеряемых параметров; измерение параметров, прямо связанных с рабочими процессами, протекающими в ЖРД; обоснованный выбор мест установки измерительных датчиков, оптимальных по информативности; введение входного контроля динамических характеристик измерительных датчиков и вторичных преобразователей; использование технических средств, исключающих потери информации из-за непредвиденного выхода БМП за диапазоны измерения, особенно, при разви-

тии неисправностей или аварийных исходов; проведение мероприятий по обеспечению синхронности измеряемых параметров на всех этапах их измерения и обработки; обеспечение помехозащищенности измерительных каналов.

Тем не менее перечисленные пути в ряде случаев не позволяют провести полный и достоверный анализ технического состояния телеметрируемых агрегатов и систем.

Так, например, в случае проведения регламентных работ на объектах ракетно-космической техники, применение известных методов диагностики для анализа технического состояния низкооборотных роторных агрегатов (редуктор и ротор генератора бортового напряжения ракеты-носителя Зенит, насосы терморегулирования космического аппарата, механизмы поворота антенн, рулевые машинки управления крыльями) менее эффективно, чем для средне и высокооборотных агрегатов. Причина этого - существенное снижение соотношения сигнал - помеха в информативной полосе частот измеряемой вибрации [3].

Наряду с особенностями формирования высокочастотной вибрации, роторным агрегатам присущи некоторые другие качества, существенно влияющие на методологию извлечения диагностической информации из нестационарного вибропроцесса. К числу таковых

следует отнести кратковременность протекания динамических явлений в опорах агрегата, связанных с действием локальных дефектов, в сравнении с периодом их следования  $T$ . Примерами могут быть кратковременные изменения нагрузки в опорах при прокатывании тела качения через трещину или раковину обоймы, ударная нагрузка при вступлении в контакт дефектного зуба зубчатого колеса и др. Вышеуказанное существенно ограничивает возможности использования спектрограмм и текущих спектров для анализа процессов изменения энергии различных частотных компонент вибрации под действием скоротечных изменений нагрузки на опору.

Частотно - временные распределения [4] (ЧВР) позволяют в значительной мере решить проблему анализа нестационарного вибропроцесса, однако их применение требует рассмотрения ряда вопросов связанных как с оценкой свойств выбранного распределения, так и с возможностью практической реализации метода на его основе.

Л.Коэн показал [5], что для процесса  $s(t)$  интегрируемого в квадрате может быть получено бесчисленное множество ЧВР на основе особого класса двухпараметрических функционалов вида

$$P(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iiint e^{-j(\theta t + \omega t + \theta u)} \phi(\theta, \tau) s^* \left(u - \frac{\tau}{2}\right) s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) du d\tau d\theta \quad (1)$$

где  $\phi(\theta, \tau)$  - ядро ЧВР;  $t, \omega$  - параметры функционала, время и частота, соответственно;  $*$  - знак комплексного сопряжения. Здесь и далее все интегралы берутся в бесконечных пределах.

Если каждое  $k$ -е явление в роторном агрегате, сопровождающееся динамической нагрузкой на опору, характеризуется соответ-

ствующей компонентой  $s_k(t)$  в составе вибрации опоры, то, при выполнении принципа суперпозиции, результирующая вибрация  $s(t)$ , регистрируемая на корпусе опоры, будет равна

$$s(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t). \quad (2)$$

Частотно-временное распределение многокомпонентного сигнала  $s(t)$  будет включать помимо ЧВР собственно компонент вибрации  $P_{kk}(\omega, t)$  еще и составляющие их перекре-

стного взаимодействия  $P_{kl}(\omega, t)$ , обусловленные билинейностью преобразования [4]

$$P(t, \omega) = \sum_{k=1}^K P_{kk}(\omega, t) + \sum_{\substack{k, l=1 \\ k \neq l}}^K P_{kl}(\omega, t),$$

где

$$P_{kk}(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iiint e^{-j(\theta t + \omega t + \theta u)} \phi(\theta, \tau) s_k^* \left(u - \frac{\tau}{2}\right) s_k \left(u + \frac{\tau}{2}\right) dud\tau d\theta, \quad (3)$$

$$P_{kl}(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iiint e^{-j(\theta t + \omega t + \theta u)} \phi(\theta, \tau) s_l^* \left(u - \frac{\tau}{2}\right) s_k \left(u + \frac{\tau}{2}\right) dud\tau d\theta, \quad (4)$$

Цзуй и Вильямс показали [6], что за счет выбора ядра  $\phi(\theta, \tau)$  можно добиться минимизации перекрестных членов

$$\sum_{\substack{k, l=1 \\ k \neq l}}^K P_{kl}(\omega, t) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Ядро, обеспечивающее выполнения условия (5), имеет вид

$$\phi(\theta, t) = e^{-\frac{\theta^2 \tau^2}{\sigma}}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  - константа, изменяя которую можно управлять уровнем перекрестных членов.

Из соотношения (6) видно, что  $\sigma$  задает размеры некоторой области в окрестности центра подвижной системы координат  $(\theta, \tau)$ , определяющей значение результата интегрирования

$P(t, \omega)$  для заданной выборки  $s(t)$  и параметров  $(\omega, t)$ .

ЧВР вида (1), полученное с использованием ядра (6) для многокомпонентного сигнала (2) стремится к ЧВР искомым компонент (3). После подстановки ядра (6) в (1) и интегрирования, ЧВР многокомпонентного вибросигнала  $s(t)$  может быть представлено в виде

$$P_s(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint \frac{1}{\sqrt{\tau^2 / \sigma}} e^{-\left[\frac{(u-\tau)^2}{4\tau^2} \sigma\right] - j\omega\tau} s^* \left(u - \frac{\tau}{2}\right) s \left(u + \frac{\tau}{2}\right) dud\tau \quad (7)$$

Частотно-временное распределение (7), названное по имени авторов как ЧВР Цзуй и Вильямса, обладает необходимым набором свойств [4], что бы однозначно отображать распределение плотности энергии нестационарного процесса в частотно - временной области, гарантируя минимум перекрестных составляющих за счет выбора параметра ядра  $\sigma$ .

Однако, использование одного пусть и совершенного метода получения ЧВР еще недостаточно для получения оценок распределения плотности энергии периодически нестационарного случайного процесса. Причина в том, что ЧВР для выборочного процесса  $s_m(t)$  носит случайный характер, так как процедура его вычисления не включает операции нахождения математического ожидания. Поэтому получаемые выборочные оценки распределения энергии вибрации в частотно - временной области несостоятельны. Подобная ситуация возникает при вычислении спектральной плотности мощности стационарных процессов пе-

риодограммным методом [7] и разрешается она путем использования псевдоусреднения по ансамблю реализаций. Прямой перенос этого метода на рассматриваемую здесь задачу невозможен ввиду нестационарности процесса  $s(t)$ . Решение может быть найдено за счет использования свойства «периодичности» моментных характеристик периодически - нестационарного процесса [8].

Выражение (7) как двухпараметрический функционал ставит в соответствие при заданных значениях параметров  $(\omega = \omega_j, t = t_j)$   $m$ -ю выборку случайной функции времени  $s_m(t)$  и число  $P_m(\omega_j, t_j)$ . На множестве выборок  $\{s_m(t)\}$  ( $m=1, 2, 3, \dots, \infty$ ), ЧВР (7) задает множество чисел  $\{P_m(\omega_j, t_j)\}$ , определяющих случайную величину  $P(\omega_j, t_j)$ , описывающую распределение плотности энергии в окрестности заданных значений  $\omega_j, t_j$ . Интегрируемость в квадрате вибропроцесса  $s(t)$  предопределяет существование математического ожидания  $M_p(\omega_j, t_j)$  и дисперсии  $D_p(\omega_j, t_j)$  случайной величины  $P(\omega_j, t_j)$ .

С другой стороны ЧВР (7) можно рассматривать как процесс относительно переменной  $t$  при заданном параметре  $\omega = \omega_l$ . Независимость ядра (6), используемого в ЧВР (7) от процесса  $s(t)$ , исключает параметрические яв-

ления при вычислении ЧВР и гарантирует отсутствие в нем как функции переменной  $t$  субгармоник периодического силового воздействия на опору

$$F(t) = F(t + nT),$$

где  $T$  - период изменения силы,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Билинейность преобразования (7) может быть причиной появления высших гармоник воздействия  $F(t)$  в процессе  $P(\omega_l, t)$ . Таким образом, обусловленная повторяемостью  $F(t)$  периодическая нестационарность  $s(t)$  порождает периодическую нестационарность случайной функции  $P(\omega_l, t)$ . На основании вышеиз-

ложенного, а так же известного свойства периодичности моментных характеристик периодически - нестационарных процессов [8] можно утверждать, что математическое ожидание  $M_p(\omega_l, t)$  случайной функции  $P(\omega_l, t)$  будет характеризоваться периодом не меньшим чем  $T$ . Таким образом

$$M_p(\omega_l, t) = M_p(\omega_l, t + nT) \quad (8)$$

будет всегда справедливо.

Из равенства (8) следует, что из достаточно длинной реализации  $P(\omega_l, t)$  можно выделить сегменты  $P_{rp}(\omega_l, t)$ , протяженностью  $T$ , закон изменения математического ожидания

внутри которых один и тот же. Так как равенство (8) справедливо для любых значений  $\omega = \omega_l$ , его можно переписать для любого фиксированного значения частоты и времени

$$M_{rp}(\omega, t) = M_p(\omega, t).$$

Отклонение ЧВР от своего математического ожидания на  $r$ -ом сегменте

$$\Delta P_r(\omega, t) = P_r(\omega, t) - M_p(\omega, t) \quad (9)$$

будет при заданных  $\omega = \omega_l$  и  $t = t_l$  случайной величиной с дисперсией  $D_{pr}(\omega_l, t_l)$ . Для любых

значений частоты и времени, определенных на сегменте этому соответствует  $D_p(\omega, t)$ .

Псевдоусреднение сегментов ЧВР, представленных как

$$P_r(\omega, t) = M_p(\omega, t) + \Delta P_r(\omega, t)$$

в соответствии с периодограммой Барлетта [7], позволяет получить оценку математического ожидания ЧВР

$$\tilde{P}(\omega, t) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N P_r(\omega, t). \quad (10)$$

Величина дисперсии полученной оценки ЧВР может быть найдена на основе известной зависимости для дисперсии суммы взаимнокоррелированных величин [9]

$$D_{\tilde{P}}(\omega, t) = D_p(\omega, t) \sqrt{N[1 + (N-1)\rho]}.$$

Относительная погрешность оценки  $\tilde{P}(\omega, t)$  определится как

$$\delta P(\omega, t) = \frac{z D_p(\omega, t)}{M_p(\omega, t)} \cdot \frac{\sqrt{1 + (N - 1)\rho}}{\sqrt{N}}, \quad (11)$$

где  $z$  - коэффициент, определяемый доверительной вероятностью [10];

$\rho$  - коэффициент взаимной корреляции [9].

На основе анализа соотношения (11) легко получить предельное значение погрешности оценки при заданных  $N$  и  $\rho$ , убедиться в возможности достижения ее допустимого уровня за счет увеличения  $N$  при  $\rho < 1$ .

#### Заключение

В результате выполненных исследований получено обоснование применения метода частотно-временного распределения для анализа быстроменяющихся параметров при обработке телеметрии объектов космического назначения на примере диагностики и анализа технического состояния низкооборотных роторных агрегатов объектов космической техники на базе усредненной оценки частотно - временных распределений высокочастотной вибрации опор качения. Получены соотношения для определения относительной погрешности усредненных оценок ЧВР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 19619-74.
- Дмитриев Э.А. Диагностические модели виброакустических сигналов // Тр. Одес. политехн. ун-та. - Одесса, 1996.- Вып. 2. - С. 44-46.
- Barkov A., Barkova N. Condition assessment and life prediction of rolling element bearings.- Part 1, Sound and Vibration, 1995, №6, - pp.28-36.
- Коэн Л. Время - частотные распределения: Обзор. - ТИИЭР, т. 77, №10, 1989, С. 72-121.
- Cohen L. Generalized phase - space distribution functions. J. Math. Phys., 1966, №7, pp. 781-786.
- Choi H., Williams W. Improved time - frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-37, 1987, №10.
- Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер с англ. - М.: Мир, 1990. - 584 с.
- Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976, - 494 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). - М.: Мир, 1973. - 832 с.
- Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. - К.: «Вища школа», 1976. - 432 с.

#### Экономические науки

### ПРОБЛЕМЫ И УСЛОВИЯ ПРИОРИТЕТА РОССИЙСКОГО ВЫСШЕГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПО ТУРИЗМУ В ЕДИНОМ ЕВРОПЕЙСКОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Боголюбова С.А., Боголюбов В.С.

Переход России на двухуровневую систему образования становится реальностью – подготовку бакалавров и магистров уже осуществляют многие вузы России. Однако вопросы остаются не только у преподавателей вузов, но и у работодателей и студентов. Многие представители туристического бизнеса нечетко представляют себе компетенции будущих бакалавров, воспринимая их как «недоучившихся специалистов». Это, в свою очередь, вызывает растерянность абитуриентов, которые не могут быть уверены в своем трудоустройстве после трех-четырёхлетнего обучения.

Наш взгляд на положения Болонской конвенции достаточно критичен. Первоначальные цели Болонского процесса таковы.

Во-первых, привлечь в Европу как можно больше молодых талантливых людей для обучения и проведения исследований. Подчеркиваю – в Европу. Если мы поддерживаем это стремление, значит, сознательно хотим усилить нашего стратегического конкурента. Во-вторых, сделать европейскую систему образования конкурентоспособной по отношению к США. За счет чего? - Путем привлечения как можно большего количества студентов из стран-соседей, не входящих в Европейский союз. Таким образом Европа планирует значительно повысить уровень доходов за счет обучения дополнительного контингента иностранцев в области образования – пока они в полтора раза ниже, чем в США. Заметим, что при этом расходы на обучение “варягов” из стран не Европейского союза обходится де-