

УДК 629.7.05.001

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Б.-Б.С. Есмагамбетов

Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова,
Шымкент, Республика Казахстан
e-mail: bulatbatyr@mail.ru

Рассмотрен метод обработки нестационарных случайных процессов с использованием непараметрических методов теории решений. Применение таких методов допустимо в системах телеметрии при необходимости обработки в реальном масштабе времени быстроменяющихся случайных процессов в условиях априорной неопределенности о вероятностных свойствах измеряемого процесса.

Ключевые слова: радиотелеметрическая информация, необратимое сжатие данных, непараметрическая статистика, интервал квазистационарности.

STATISTICAL DATA PROCESSING IN RADIO TELEMETRIC SYSTEMS

B.-B.S. Esmagambetov

Auezov Southern Kazakhstan State University, Shymkent, Republic of Kazakhstan
e-mail: bulatbatyr@mail.ru

Application of such methods is admissible in telemetry systems if necessary of processing at real time scale of fast-changing casual processes in the conditions of aprioristic uncertainty about probabilistic properties of measured process.

Keywords: radio telemetric information, irreversible compression of data, nonparametric statistics, interval quasistationarity.

Актуальность проблемы. В ракетно-космической технике всегда была актуальна проблема передачи на Землю в реальном масштабе времени телеметрических данных, особенно при передаче на Землю таких параметров двигательных установок, как температура и давление в камере сгорания, расход топлива. Знание этих параметров в реальном масштабе времени позволяет оперативно принять решение при возникновении аварийных ситуаций в двигательных установках.

Физические параметры в двигательных установках (например, температура и давление в камере сгорания) всегда имеют вид широкополосного нестационарного случайного процесса с шириной спектра 2...32 кГц, т.е. представляют собой нестационарный тренд с наложенной на него широкополосной случайной составляющей. Однако в современных ракетно-технических системах для измерения указанных параметров часто используют низкочастотные датчики, которые на выходе дают неслучайный детерминированный сигнал (тренд). Таким

образом, случайная составляющая физического процесса фильтруется. Данный способ измерения и обработки параметров применяется в целях сокращения вычислительных затрат и уменьшения требований к радиотехническим каналам связи, поскольку частота исходной циклической дискретизации Δt зависит от спектра сигнала ΔF . На практике это соотношение составляет $\Delta t = 1 / ((5 \dots 10)\Delta F)$. Согласно этому соотношению, для измерения и обработки широкополосных сигналов требуется увеличение быстродействия бортовых вычислительных средств и их объемов памяти в 10 раз, а для передачи данных на Землю — пропускную способность каналов связи в 10 раз. Между тем, существует практическая необходимость уменьшения характеристик бортовых вычислительных средств, что связано с требованиями сокращения их массогабаритных характеристик и энергопотребления.

Следовательно, проблема разработки ускоренных методов обработки широкополосных случайных процессов в бортовых радиотелеметрических системах чрезвычайно актуальна. Важность этой проблемы сильно возрастает при необходимости обрабатывать огромные массивы данных в сжатые сроки. Особую актуальность она приобретает в связи с резким увеличением объема обрабатываемых данных, вызванных расширением масштаба и задач исследований, а также стремлением к более детальному исследованию измеряемых процессов.

Такое требование, естественно, приводит к существенному усложнению как систем телеметрии, так и радиотехнических каналов связи. Решение указанных проблем возможно с использованием так называемых методов сжатия данных.

Как правило, в спектре измеряемых параметров доминирующее положение занимают широкополосные процессы. Поэтому внедрение методов квазиобратимого сжатия данных, эффективных только для медленно меняющихся процессов, во-первых, не решает проблемы совокупного сокращения объема передаваемых данных и разгрузки канала передачи данных, а во-вторых, не позволяет существенно сократить сроки экспериментальных исследований вследствие отсутствия возможности оперативного использования всей измеряемой информации. Таким образом, особую актуальность приобретает задача сжатия широкополосных сигналов, которые составляют всего 10...30% общей номенклатуры измеряемых параметров, но загружают канал передачи на 60...80%.

Для сжатия широкополосных сигналов часто применяются методы необратимого сжатия данных, которые заключаются в определении на передающей стороне информационно-измерительной системы оценок вероятностных характеристик измеряемых случайных процессов и передача их по каналам связи.

Трудности в реализации методов необратимого сжатия существенно выше, несмотря на то, что эффективность их в смысле сокращения

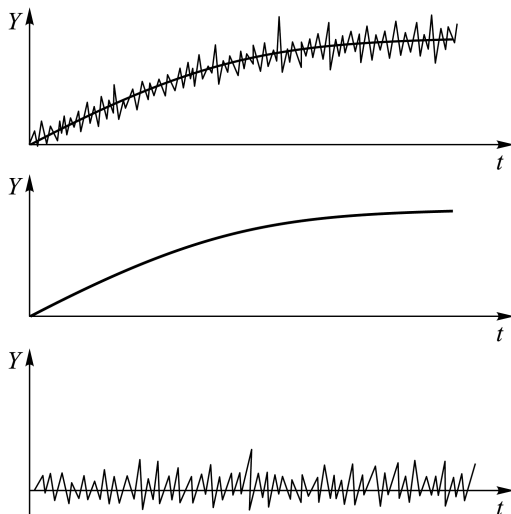


Рис. 1. Аддитивно-мультипликативная модель сигнала

избыточности данных на порядок выше. Это объясняется тем, что обрабатываемые на борту данные очень часто представляют единственную реализацию нестационарных случайных процессов при отсутствии априорных данных о виде функции распределения. Современная математическая статистика не располагает методами для оценки вероятностных характеристик таких процессов.

Цель настоящей работы — разработка метода оценки вероятностных характеристик нестационарного случайного процесса на основе адаптивного деления временного ряда наблюдений на участки стационарности с использованием непараметрической теории принятия решений [1]. Оценка позволяет выделить с некоторой погрешностью нестационарную составляющую (тренд) $F(t)$, а также измерить вероятностные характеристики случайной составляющей $X(t)$ (дисперсию, функцию распределения, корреляционную функцию). При этом структура измеряемого процесса может быть описана аддитивно-мультипликативной моделью вида $Y(t) = X(t) + F(t)$ (рис. 1).

Суть метода заключается в проверке статистической гипотезы о стационарности на основе выборочных данных измеряемого процесса с использованием непараметрических статистик. Различные методы рассмотрены в работах [2–4].

В настоящей статье предлагается способ разделения интервала наблюдений на интервалы стационарности, основанный на реверсивной процедуре с двойным сбросом инверсий (рис. 2).

Алгоритм работает следующим образом. По выборочным данным y_i, y_k измеряемого процесса формируется непараметрическая статистика — статистика Кендалла [1]:

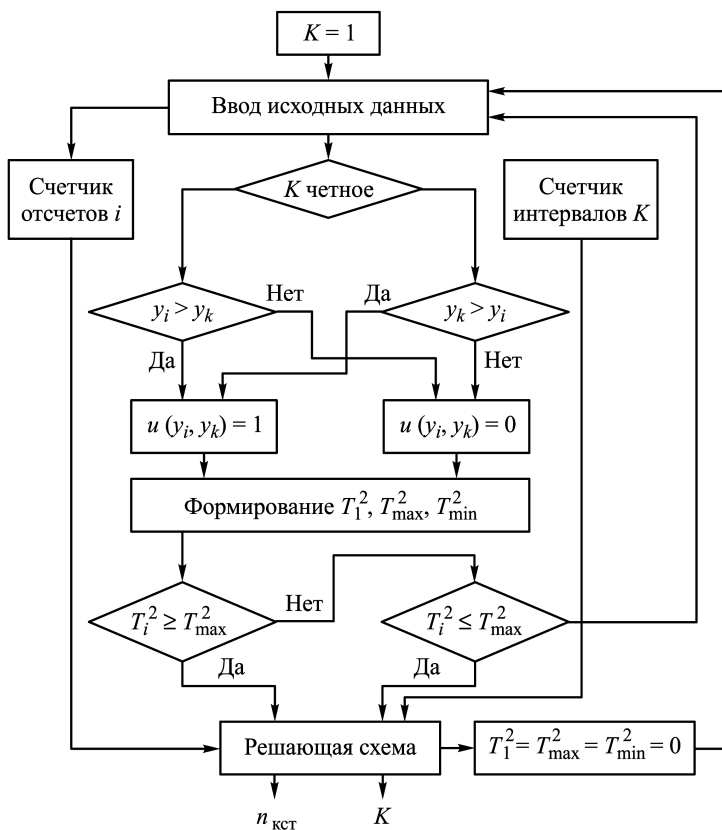


Рис. 2. Блок-схема реверсивного метода двойного сброса

$$T_i^2 = \sum_{k=i+1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n u(y_i, y_k),$$

где

$$u(y_i, y_k) = \begin{cases} 1, & y_i \geq y_k; \\ 0, & y_i < y_k. \end{cases}$$

Одновременно вычисляются допустимые границы T_{\max}^2 и T_{\min}^2 , далее сравниваются функции T_i^2 с функциями T_{\max}^2 и T_{\min}^2 , т.е. для заданного уровня значимости α происходит формирование статистической гипотезы о стационарности: $T_{\min}^2 \leq T_i^2 < T_{\max}^2$.

В момент равенства обобщенных инверсий с одной из допустимых границ определяется первый интервал стационарности, затем происходит “переброс” знаковой функции $u(y_i, y_j)$ на противоположное значение

$$u(y_i, y_k) = \begin{cases} 0, & y_i \geq y_k; \\ 1, & y_i < y_k, \end{cases}$$

а также сброс допустимых границ и обобщенных инверсий в исходное

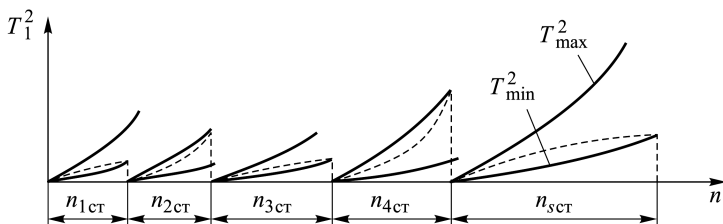


Рис. 3. Определение участков стационарности при $\alpha \equiv \text{const}$ (n – объем выборки)

состояние ($T_i^2 = T_{\max}^2 = T_{\min}^2 = 0$) (рис. 3). Далее выполняется процесс вычисления функций T_i^2 , T_{\max}^2 , T_{\min}^2 и процедура сравнения повторяется для нового интервала стационарности. Таким образом, временной ряд наблюдений делится на произвольное число участков разной длины, на которых процесс с заданной наперед вероятностью считается стационарным.

Полученные на интервалах стационарности данные ранжируются в порядке возрастания или убывания с последующим расчетом оценок вероятностных характеристик на основе порядковых и ранговых статистик ранжированного ряда [5]. В настоящей работе проводилась оценка среднего значения и среднеквадратического отклонения (СКО, дисперсии) случайного процесса. При этом для оценки среднего значения использовалось соотношение $\tilde{m}_{11} = x_{[c]}$ [5], где $x_{[c]}$ – центральная порядковая статистика ранжированного ряда. При измерении дисперсии целесообразно использовать тот же ранжированный ряд порядковых статистик, что и при оценке среднего. При этом лучше всего оценивать не саму дисперсию процесса, а СКО. Для оценки СКО в непараметрической статистике применяют простейшие функции размаха и подразмаха, использующие крайние порядковые статистики ранжированного ряда [5]:

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}_{11} &= \nu(X_{(N)} - X_{(1)}); \\ \tilde{\sigma}_{12} &= \nu(X_{(N-1)} - X_{(2)}).\end{aligned}$$

Возможны различные комбинации центральных порядковых статистик и крайних порядковых статистик (КПС): $\tilde{\sigma}_{2j} = \nu(X_{(N-j+1)} - X_{(j+1)})$.

Анализ погрешностей оценок среднего и СКО случайного процесса проводился методом статистического моделирования в среде MathCAD. Для моделирования использовалась случайная функция $X(t)$ с функцией распределения вида $\text{ngorm}(N, \mu, \sigma)$, имеющей нормальное распределение со средним μ и СКО $\sigma > 0$ (например, $\mu = 1$, $\sigma = 0$).

На случайную функцию наложен сигнал (тренд) $F(t)$ вида $F(t) = A(1 - \exp(-a_1 t))$, где A и a_1 – параметры, варьируемые в различных

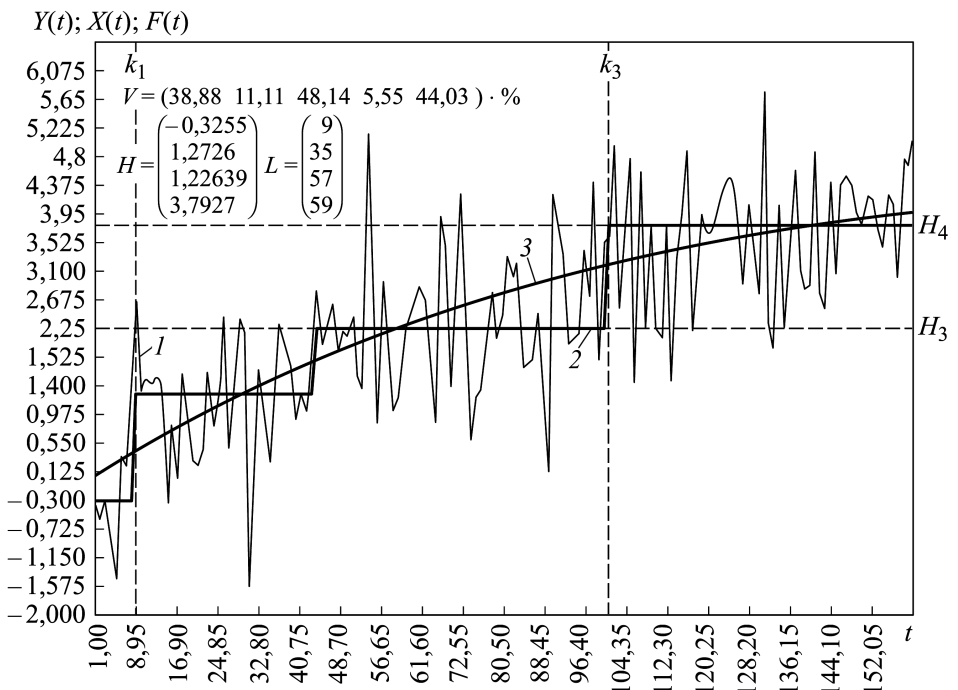


Рис. 4. Выделение нестационарной составляющей случайного процесса с нормальным распределением для $Y(t)$ (1), $X(t)$ (2) и $F(t)$ (3)

пределах для целей моделирования. В некоторых случаях накладывался тренд вида $F(t) = t$. В результате сгенерирован нестационарный случайный процесс $Y(t) = X(t) + F(t)$.

Вычисление среднего значения по формуле $\tilde{m}_{11} = x_{(n)}$ позволяет аппроксимировать тренд $F(t)$ ступенчатым полиномом (полиномом нулевой степени) (рис. 4). На рисунке представлено четыре участка квазистационарности с длинами 9, 35, 57 и 59 отчетов соответственно.

Результаты моделирования показали, что погрешность оценки среднего значения существенно зависит от вида тренда и от отношения случайной и неслучайной составляющих (отношения шум/сигнал).

Изменение отношения мощности стационарной составляющей и амплитуде нестационарной составляющей (отношение шум/сигнал) приводит к изменению погрешности выделения тренда. Так, изменение отношения шум/сигнал в диапазоне значений 0,14...0,8 увеличивает погрешности в 3 раза (рис. 5).

Приведенные зависимости указывают на наличие ярко выраженного минимума погрешности выделения нестационарного среднего, который находится в диапазоне значений уровня значимости $\alpha = 0,05 \dots 0,06$. Увеличение погрешности при значениях α , находящихся вне этого диапазона, объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, при $\alpha < 0,05$ происходит увеличение области принятия

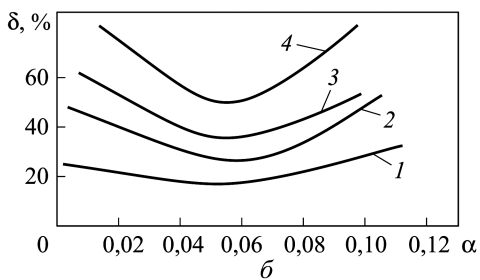
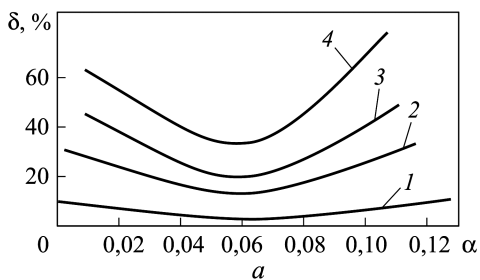


Рис. 5. Зависимость погрешности выделения тренда от уровня значимости для $F(t) = A(1 - \exp(-a_1 t))$ (а) и $F(t) = t$ (б) и $\sigma/A = 0,1$ (1), $0,4$ (2), $0,6$ (3) и $0,8$ (4)

гипотезы о стационарности, что автоматически приводит к снижению точности выделения нестационарной компоненты. Во-вторых, при уменьшении области принятия гипотезы о стационарности ($\alpha > 0,06$) снижается число отсчетов на участие стационарности, что приводит к возрастанию погрешности оценки среднего. Положение минимума $\alpha = 0,05 \dots 0,06$ не зависит ни от характера тренда, ни от соотношения шум/сигнал.

Анализ проведенных исследований при оценке СКО показал следующее: при фиксированном значении коэффициента ν нет удовлетворительных оценок в широком диапазоне изменения значения n . Зависимость погрешности оценок СКО при различных коэффициентах ν от объема выборки для некоррелированных отсчетов приведена на рис. 6. Согласно зависимостям, значение коэффициента ν необходимо назначать адаптивным образом, исходя из объема выборки.

Результаты моделирования показали, что погрешность выделения нестационарного среднего реверсивным методом двойного сброса в 1,5 раза ниже погрешности выделения нестационарного среднего методом отраженных инверсий. Таким образом, именно предполагаемый реверсивный метод двойного сброса позволяет получить наименьшую погрешность выделения нестационарного среднего.

Заключение. Случайные процессы в радиотелеметрических системах, как правило, представлены единственной реализацией в условиях априорной неопределенности о виде функции распределения. Обработка нестационарных широкополосных случайных процессов в реальном масштабе времени возможна с использованием непараметрических методов теории решений. В настоящей работе рассмотрен метод деления временного ряда наблюдений на интервалы стацио-

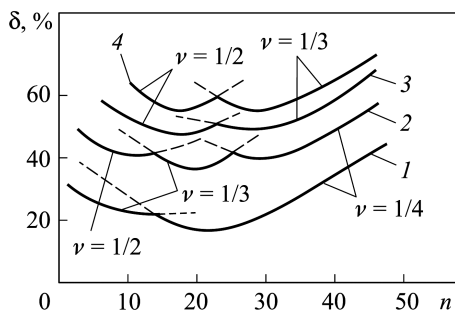


Рис. 6. Зависимость погрешности оценок СКО $\bar{\sigma}_{11}$ (1), $\bar{\sigma}_{12}$ (2), $\bar{\sigma}_{21}$ (3) и $\bar{\sigma}_{22}$ (4) от величины n

нарности с последующей оценкой среднего значения и дисперсии. Предложенный метод имеет меньшую погрешность по сравнению с погрешностями аналогичных методов. Планируется также провести исследования по оценке функции распределения и корреляционной функции нестационарного широкополосного случайного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тарасенко Ф.П.* Непараметрическая статистика. Томск: Изд-во Томского университета, 1976.
2. *Егоров Ю.М.* Способы построения и пути реализации систем передачи командно-телеметрической информации. Отчет о НИР. Инв. № 1285. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1987. 163 с.
3. *Есмагамбетов Б.-Б.С.* Использование непараметрических методов теории решений для необратимого сжатия данных // Вестник Казахского Национального Технического Университета им. К. Сагпаева. 2006. № 3(53). С. 126–130.
4. *Esmagambetov B.* Use of not parametrical criteria at irreversible compression of the data // *Turk dunyasi arastirmalari*. 2007. No. 171. P. 1–6.
5. *Дейвид Г.* Порядковые статистики; пер с англ. М.: Наука, 1987. 163 с.
6. *Лысенко Л.Н., Соловьев В.А., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 902 с.
7. *Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В.* Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и техника, 2007. 627 с.
8. *Матюшин М.М.* Оперативная оценка параметров состояния космического аппарата. [Сайт] i-Маш. Ресурс машиностроения. URL: <http://www.i-mash.ru/materials/automation/15003-operativnaja-ocenka-parametrov-sostojaniija.html> (дата обращения: 20.12.2013).

REFERENCES

- [1] Tarasenko F.P. *Neparametricheskaya statistika* [Nonparametric statistics]. Tomsk, TGU Publ., 1976. 289 p.
- [2] Egorov Yu.M. *Sposoby postroeniya i puti realizatsii sistem peredachi komandno-telemetricheskoy informatsii* [Methods of building and way of implementation of transmission systems of command and telemetry information]. The R&D report. Inv. no. 1285, Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 1987. 163 p.
- [3] Esmagambetov B.-B.S. Use of nonparametric methods of the decision theory for irreversible compression of data. *Vestn. Kazakhskogo Natsional'nogo Tekh. Univ. im. K. Satpaeva* [Herald of the Kazakh National Technical University of K. Satpayev], 2006, no. 3 (53), pp. 126–130 (in Russ.).
- [4] Esmagambetov B. Use of not parametrical criteria at irreversible compression of the data. *Turk dunyasi arastirmalari*, 2007, no. 171, pp. 1–6.
- [5] David H.A. *Order Statistics*. 2nd Ed. N.Y., Wiley, 1981. (Russ. ed.: Deyvid G. Poryadkovye statistiki. Per. s angl. Moscow, Nauka Publ., 1987. 163 p.).
- [6] Lysenko L.N., Solov'ev V.A., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Control of space flights]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2009. 902 p.
- [7] Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike* [Modern telemetry in theory and practice]. SPb., Nauka i tekhnika Publ., 2007. 627 p.

[8] Matyushin M.M. Operativnaya otsenka parametrov sostoyaniya kosmicheskogo apparata. [Operational evaluation of the state parameters of the spacecraft]. Available at: <http://www.i-mash.ru/materials/automation/15003-operativnaja-ocenka-parametrov-sostojaniya.html> (accessed 20.12.2013).

Статья поступила в редакцию 27.02.2014

Есмагамбетов Булат-Батыр Саухымович — д-р техн. наук, профессор Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова. Автор более 50 научных работ в области систем обработки данных.

Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан, 160012, Шымкент, пр-т Тауке хана, д. 5.

Esmagambetov B.-B.S. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the Auezov Southern Kazakhstan State University. Author of more than 50 publications in the field of data processing systems.

Auezov Southern Kazakhstan State University, pr. Tauke khan 5, Shymkent, 160012 Republic of Kazakhstan.