

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ДОПУСКОВ**

д.т.н., проф. И.Ф. Оленович, к.т.н. П.П. Топольницкий, А.В. Андреев,  
А.Р. Рыхальский

*Предложен вариант модификации метода допусков для обнаружения грубых аномальных телеметрических измерений. Правомерность принятых решений доказана путем математического моделирования. Определена область применения предложенного метода обнаружения аномальных телеметрических измерений.*

Решение космической системой стоящих перед ней целевых задач в значительной степени зависит от качества управления космическими аппаратами, одной из составляющих которого является проведение контроля технического состояния бортового обеспечивающего и специального комплексов. Единственным источником данных, на основании которых может быть сделан вывод о техническом состоянии бортовых систем космического аппарата, есть телеметрические измерения, получение, передача и обработка которых производится радиотелеметрическими комплексами.

Современные цифровые радиотелеметрические системы относятся к многоканальным системам передачи информации. Поток измерительной информации, поступающей на цифровые электронные коммутаторы, представляет собой совокупность показаний телеметрических датчиков, опрос которых осуществляется с определенной частотой. Наиболее распространенным способом разделения информационных каналов в этих системах является временное разделение, которое предусматривает формирование информационного кадра известной структуры и выделение отдельных каналов для передачи служебной информации, позволяющей произвести разделение каналов на приемной стороне. Под действием помех и сбоев в канале связи возможно нарушение структуры телеметрического кадра, что приводит к нарушению в работе измерительного канала в виде появления в случайные моменты времени аномальных измерений, причем величина аномалии также является случайной. Динамика поведения самого телеметрического параметра также может в ряде случаев изменяться достаточно резко в случайные моменты времени. Об этом свидетельствуют изменения во времени ряда телеметрических параметров бортовой аппаратуры космического аппарата «Січ-1» [7].

Входными данными, подлежащими обработке, как правило, являются

ограниченные во времени дискретные реализации случайного процесса  $\mathbf{y}(\mathbf{t})$ , который является функцией полезного сигнала  $\mathbf{x}(\mathbf{t})$  и помехи  $\mathbf{v}(\mathbf{t})$  [2]. Достаточно большое разнообразие телеметрических процессов не позволяет иметь единого математического описания телеметрического параметра. Функциональные параметры являются случайными функциями времени, представленными в цифровом виде и принимающими либо непрерывное, либо дискретное множество значений. Вследствие такого представления они являются случайной непрерывной или дискретной последовательностью [8]. Динамика изменения телеметрического параметра, как и любой динамической системы, в каждый момент времени  $\mathbf{t}_k$ ,  $k = \overline{1, n}$  может быть описана линейным дискретным разностным уравнением [2]:

$$\mathbf{x}(\mathbf{k} + 1) = \Phi(\mathbf{k})\mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{G}(\mathbf{k})\mathbf{W}(\mathbf{k}) + \gamma(\mathbf{k})\mathbf{1}(\mathbf{k}, \mathbf{m}), \quad (1)$$

где  $\Phi(\mathbf{k})$  – переходная матрица, описывающая изменение параметра за период опроса датчика  $\Delta \mathbf{t} = \mathbf{t}_{i+1} - \mathbf{t}_i$ ;  $\mathbf{G}(\mathbf{k})$  – переходная матрица шумов возмущений;  $\mathbf{W}(\mathbf{k})$  – случайный вектор гауссовских шумов возмущений с нулевым средним и корреляционной матрицей  $\mathbf{Q}(\mathbf{k})\delta(\mathbf{k}, \mathbf{j})$ ;  $\delta(\mathbf{k}, \mathbf{j})$  –  $\delta$ -символ Кронекера;  $\gamma(\mathbf{k})$  – приращение вектора состояния за счет изменения динамики поведения параметра;  $\mathbf{1}(\mathbf{k}, \mathbf{m})$  – ступенчатая единичная функция;  $\mathbf{m}$  – неизвестный момент возникновения изменений в динамике поведения параметра.

Механизм образования данных, доступных наблюдению в каждый дискретный момент времени, соответствующий моменту опроса телеметрического датчика, определяется уравнением наблюдений

$$\mathbf{y}(\mathbf{k}) = \mathbf{H}(\mathbf{k})\mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{V}(\mathbf{k}) + \gamma_a(\mathbf{k})\delta(\mathbf{k}, \mathbf{s}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{y}(\mathbf{k})$  – вектор измерений;  $\mathbf{H}(\mathbf{k})$  – матрица наблюдений;  $\mathbf{V}(\mathbf{k})$  – случайный вектор гауссовских шумов измерений с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ ;  $\gamma_a(\mathbf{k})$  – неизвестный вектор, характеризующий величину аномалии;  $\mathbf{s}$  – неизвестный момент возникновения изменений в измерениях.

Передача функциональных параметров в цифровой форме осуществляется путем передачи последовательностей двоичных импульсов. Предположим, что непрерывный телеметрический параметр передается по симметричному каналу простым двоичным  $\mathbf{p}$ -разрядным кодом. Вероятность появления аномальной ошибки при передаче сообщения зависит от качества канала связи, характеризуемого вероятностью искажения элементарного символа  $\mathbf{P}_{\text{ош}}$ , а также длины кодового слова (шкалы параметра).

Как было показано в [9], на этапе первичной обработки целесообразно применение для обнаружения аномальных измерений метода допусков. Однако при этом достаточно сложно определить граничные значения допустимого изменения между измерениями для каждого параметра и по-

этому изменения в поведении параметра, описываемые (1), могут быть приняты за аномальные измерения. В связи с этим важной задачей является повышение достоверности обнаружения сбоев типа (2) при телеметрических измерениях параметра, который описывается (1), при  $\gamma(\mathbf{k}) \neq 0$ .

В гауссовских каналах связи ошибки при приеме элементарных символов в кодовой комбинации с простым кодированием можно считать независимыми, т.е. вероятность искажения каждого из разрядов кодовой комбинации одинакова и постоянна [4]. Для этого случая вероятность того, что среди кодовой комбинации длиной в  $p$  символов встретится ровно  $q$  ошибочных символов, может быть определена на основании формулы Бернулли [4]:

$$P_{\text{ош}}(q) = C_p^q P_{\text{ош}}^q (1 - P_{\text{ош}})^{p-q}, \quad (3)$$

где  $C_p^q = \frac{p!}{(p-q)! q!}$  – количество возможных положений  $q$  ошибочных символов в пределах  $p$ -разрядной комбинации.

В соответствии с (3), для случая  $q = 1$ , имеем

$$P_{\text{ош}}(1) = C_p^1 P_{\text{ош}} (1 - P_{\text{ош}})^{p-1} = p P_{\text{ош}} - p(p-1) P_{\text{ош}}^2 + \dots + p P_{\text{ош}}^p.$$

При относительно низком уровне шумов в канале связи можно считать, что  $P_{\text{ош}}(1) \approx p P_{\text{ош}}$ , а при  $q = p$ ,  $P_{\text{ош}}(p) = P_{\text{ош}}^p$ . Следовательно, вероятность  $P_{\text{ош}}(q)$  достаточно быстро уменьшается с ростом  $q$  и преобладающую часть ошибок, при передаче телеметрических сообщений, будут составлять одиночные сбои, которые описываются (2). Одиночные ошибки, вызванные этими сбоями, с вероятностью  $P_{\text{ош}}(1 - P_{\text{ош}})^{p-1}$  могут принимать одно из следующих значений [1]:

$$\Delta_{\text{ш}} = \pm 2^0 d_{\text{кв}}; \pm 2^1 d_{\text{кв}}; \dots; \pm 2^{p-1} d_{\text{кв}}, \quad (4)$$

где  $d_{\text{кв}}$  – шаг квантования.

При этом, вероятность появления один за другим  $r$  раз подряд аномальных измерений может быть определена следующим образом:

$$P_{\text{ош}}^r(1) = (p P_{\text{ош}})^r < P_{\text{ош}}, \text{ при } p P_{\text{ош}} < 1.$$

Тогда возможность повышения достоверности правильного принятия решения методом допусков по обнаружению аномальных измерений телеметрических параметров достигается путем следующей модификации алгоритма принятия решения. Если для  $r$  соседних разностей  $\Delta_j = |y(j) - y(j-1)|$ ,  $j = \overline{1, r}$ , которые следуют за достоверным измерением  $y(0)$ , выполняются условия:

$$\begin{cases} \Delta 1 = |y(\mathbf{1}) - y(\mathbf{0})| > \Delta y_{\max}; \\ \Delta j \leq \Delta y_{\max}, j = \overline{2, r}, \end{cases} \quad (5)$$

то с достаточно высокой вероятностью можно полагать, что превышение допуска произошло из-за изменения значений самого телеметрического параметра, а, следовательно, измерения  $y(\mathbf{j})$ ,  $j = \overline{1, r}$  являются достоверными.

Проведем сравнительную оценку эффективности отбраковки аномальных телеметрических измерений с использованием на этапе обработки метода допусков и модифицированного метода для процессов с различной динамикой изменения. При этом будем полагать, что шкала параметра составляет 50 условных единиц, а относительная погрешность измерений параметра – 1 %. Значение относительной величины аномалии  $\gamma_a = \Delta_{\text{ш}}/3\sigma$  зависит от того, в каком разряде кода передаваемого сообщения произошел одиночный сбой. Величину абсолютной шумовой ошибки, вызванной одиночным сбоем в любом разряде кода передаваемого сообщения и соответствующее ей значение относительной величины аномалии можно оценить исходя из того, что  $\Delta_{\text{ш}}$  принимает значения из ряда (4). При этом наибольшая ошибка возникает при искажении старшего разряда кода и по абсолютной величине она соответствует половине шкалы.

Обнаружение аномальных измерений представляет собой задачу проверки двух альтернативных гипотез  $\mathbf{H}_0$  и  $\mathbf{H}_1$ , которые выдвигаются относительно достоверности проверяемого измерения [5]. Гипотеза  $\mathbf{H}_0$  является основной и представляет утверждение о том, что полученное измерение является достоверным. Гипотеза  $\mathbf{H}_1$  утверждает, что полученное измерение является аномальным. В отношении каждого аномального измерения решающее правило, в качестве которого выступает тот или иной метод, принимает решение, в результате которого все множество аномальных измерений  $N_a$  разбивается на те, в отношении которых принято решение об их аномальности и те, в отношении которых принято решение об их достоверности, т.е.

$$\frac{N_{\text{по}}}{N_a} + \frac{N_a - N_{\text{по}}}{N_a} = 1,$$

где  $N_{\text{по}}$  – количество правильно обнаруженных аномальных измерений.

В тоже время, среди общего количества измерений, признанных решающим правилом аномальными  $N_{\text{обн}}$ , могут находиться как измерения действительно являющиеся таковыми, так и достоверные измерения, т.е.

$$\frac{N_{\text{обн}} - N_{\text{по}}}{N_{\text{обн}}} + \frac{N_{\text{по}}}{N_{\text{обн}}} = 1.$$

Введем в рассмотрение коэффициент  $K_{01} = (N_a - N_{\text{по}})/N_a$ , который характеризует относительное количество неправильно принятых решений о

достоверности аномального измерения для данной реализации и коэффициент  $K_{10} = (N_{обн} - N_{по})/N_{обн}$ , характеризующий относительное количество ошибочно принятых решений об аномальности достоверных измерений в данной реализации. С точки зрения теории статистических решений, коэффициент  $K_{10}$  может трактоваться как ошибка первого рода, а коэффициент  $K_{01}$  – как ошибка второго рода. Согласно критерия минимума суммы условных вероятностей ошибок, который является частным случаем критерия минимума среднего риска, оптимальным решающим правилом будет то, которое обеспечивает минимум суммы двух ошибок [6].

При этом величины  $K_{01}$  и  $K_{10}$ , получаемые по реализациям конечной длительности, в силу случайности выборки являются случайными величинами. Поэтому для повышения достоверности результатов, получаемых посредством моделирования, расчет коэффициентов  $K_{10}$  и  $K_{01}$  проводился осреднением по 200 случайным шумовым реализациям, что обеспечило относительную погрешность оценки искомых коэффициентов не более 0,14 с доверительной вероятностью 0,95 [3].

Величина шумовой ошибки  $\Delta_{ш}$  для каждого аномального измерения во всех реализациях задавалась равной максимально возможному значению, вызываемому сбоем в том разряде кода, который задавался условиями моделирования, а количество аномальных измерений в выборке изменялось от 0.5 до 3 % от общего количества измерений.

При оценке эффективности метода допусков пороговое значение  $\Delta y_{max}$  рассчитывалось согласно выражения

$$\Delta y_{max} = |\dot{y}| \Delta t + \beta \sigma$$

для максимальной скорости изменения параметра  $\dot{y}$  и значении коэффициента  $\beta = 4$ .

Для модифицированного метода ( $r = 2$ ) пороговое значение  $\Delta y_{max}$  рассчитывалось на основе полученной реализации измерений

$$\Delta y_{max} = m_{\Delta y} + \beta \sigma_{\Delta y}, \quad (6)$$

где  $m_{\Delta y}$  и  $\sigma_{\Delta y}$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной разницы между соседними измерениями  $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ .

Значения коэффициентов  $K_{01}$  и  $K_{10}$ , рассчитанные по результатам моделирования, при количестве аномальных измерений 1 %, приведены в табл. 1. Анализ данных показывает, что при сбоях в разрядах с номерами от ( $p - 1$ ) до ( $p - 3$ ), метод допусков практически всегда обнаруживает аномальные измерения ( $K_{01} = 0$ ). При этом он допускает ложное признание достоверных измерений аномальными ( $K_{10} \neq 0$ ). Модифицированный ме-

тод в этих же условиях обнаруживает фактически все аномальные измерения и при этом не принимает ошибочных решений в отношении достоверных измерений. При сбоях в разряде с номером (**p - 4**) модифицированный метод признает достоверными большее количество аномальных измерений, чем метод допусков. Однако, в отличие от метода допусков, модифицированный метод по-прежнему обеспечивает признание аномальными измерений, которые действительно таковыми и являются (**K<sub>10</sub> = 0**).

Таблица 1

Показатели качества обнаружения аномальных измерений

Параметр	Номер разряда	Метод допусков		Модифицированный метод	
		<b>K<sub>10</sub></b>	<b>K<sub>01</sub></b>	<b>K<sub>10</sub></b>	<b>K<sub>01</sub></b>
Медленно меняющийся	<b>p - 1</b>	0,242	0	0	0
	<b>p - 2</b>	0,242	0	0	0
	<b>p - 3</b>	0,231	0	0	0
	<b>p - 4</b>	0,231	0,03	0	0,16
Быстро меняющийся	<b>p - 1</b>	0,038	0	0	0
	<b>p - 2</b>	0,057	0	0	0
	<b>p - 3</b>	0,057	0	0	0,03
	<b>p - 4</b>	0,579	0,6	0	0,99

Показатели качества обнаружения аномальных измерений быстромеменяющегося телеметрического параметра типа «ступенька», характер поведения которого описывается выражением (1), при условии, что значение  $\gamma(\mathbf{k})$  оставалось постоянным на интервале от  $\mathbf{k} = \mathbf{m}$  до  $\mathbf{k} = \mathbf{m} + 30$  приведены в табл. 2. При моделировании значение  $\gamma(\mathbf{k})$  выбиралось от 3 до 6.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показал, что при обнаружении аномальных измерений ступенчато изменяющегося процесса, метод допусков фактически оказывается неспособным обнаруживать сбои в разряде (**p - 4**), величина которых соизмерима со скоростью измерения самого параметра. Метод допусков не обнаруживает аномальные изменения (**K<sub>01</sub> = 1**), а, следовательно, все признанные аномальными измерения являются достоверными (**K<sub>10</sub> = 1**). В тоже время модифицированный метод с расчетным порогом имеет меньшее значение коэффициента **K<sub>01</sub>** и при этом не принимает ложных решений в отношении достовер-

ных измерений. Кроме того, при сбое в разряде кода передаваемого сообщения с номером ( $p - 3$ ) метод допусков обнаруживает аномальные измерения лишь при недостаточно большой амплитуде “ступеньки”, в то время как модифицированный метод обеспечивает уверенное обнаружение аномалий.

По результатам проведенного моделирования также был сделан вывод о том, что при сбоях в старших разрядах кода ( $p - 1$ ,  $p - 2$ ) передаваемого сообщения оба метода обеспечивают устойчивое обнаружение аномалий. При увеличении количества аномальных измерений пороговое значение  $\Delta y_{\max}$ , рассчитываемое по выборке, будет также возрастать, что приводит к уменьшению количества правильно обнаруживаемых аномальных измерений модифицированным методом допусков.

Таблица 2

Показатели качества обнаружения аномальных измерений ступенчато изменяющегося процесса

Амплитуда “ступеньки”	Номер разряда	Метод допусков		Модифицированный метод	
		$K_{10}$	$K_{01}$	$K_{10}$	$K_{01}$
6	$p - 3$	1	1	0	0
	$p - 4$	1	1	0	0,8
5	$p - 3$	0,675	0,987	0	0
	$p - 4$	1	1	0	0,65
3	$p - 3$	0,02	0,02	0	0
	$p - 4$	1	1	0	0,4

При условии равномерного распределения передаваемого параметра по шкале, математическое ожидание ошибок после усреднения по всем передаваемым кодовым комбинациям  $M[\Delta_{\text{ш}}] = 0$ , а дисперсия ошибки определяется выражением [1]:

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = \sum_{i=0}^{p-1} (2^i d_{\text{кв}})^2 P_{\text{ош}} (1 - P_{\text{ош}})^{p-1} .$$

Из этого выражения видно, что за счет обнаружения ошибок, вызванных сбоями в старших разрядах кода передаваемого сообщения, величина  $\sigma_{\text{ш}}$  может быть уменьшена в два или более раз.

Таким образом, обнаружение сбоев в старших разрядах кода передаваемого сообщения позволит существенно повысить достоверность

телеметрических данных. Модифицированный метод (5) с расчетным значением  $\Delta u_{\max}$  по полученной реализации измерений обеспечивает наименьшее значение суммы условных вероятностей ошибок, и поэтому он будет обеспечивать наилучшее обнаружение сбоев в старших разрядах кода передаваемого сообщения. Определение допуска  $\Delta u_{\max}$  по полученной выборке измерений возможно при условии, что количество аномальных измерений не превышает 1 %. В связи с тем, что количество аномальных измерений на входе системы обработки обычно не превышает 0,5 % от общего количества измерений [8], применение модифицированного метода является целесообразным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белицкий В.И., Зверев В.И. и др. *Телеметрия*. – М.: МО СССР, 1984. – 465 с.
2. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М. *Динамические системы, устойчивые к отказам*. – М.: Радио и связь, 1981. – 176 с.
3. Демидов Б.А. *Методы военно-экономического анализа*. Ч.1. – Х.: ВИРТА, 1985. – 619 с.
4. Новоселов О.Н., Фолин А.Ф. *Основы теории и расчета информационно-измерительных систем*. – М.: Машиностроение, 1980. – 280 с.
5. Пустыльник Е.И. *Статистические методы анализа и обработки наблюдений*. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
6. *Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Под ред. Ю.М. Казаринова*. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
7. *Результаты эксплуатации космического аппарата «Січ-1»*. – Технический отчет. – Днепропетровск: КБЮ, 1998. – 58 с.
8. Сафаров Р.Т., Зверев Р.И., Шитов И.В. *Радиотелеметрия*. Ч.2. – М.: МО СССР, 1973. – 308 с.
9. Топольницький П.П., Андреев О.В., Рихальський О.Р. *Аналіз можливостей застосування статистичних методів відбракування аномальних вимірів для підвищення вірогідності телеметричних даних // Системи обробки інформації*. – 2002. – Вип. 2(18). – С. 114 – 119.

Поступила 2.07.2002

**ОЛЕНОВИЧ Иван Федорович**, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Национальной академии обороны Украины. В 1988 году окончил Военную академию Генерального штаба ВС СССР. Область научных интересов – системный анализ и синтез военно-технических проблем.

**ТОПОЛЬНИЦКИЙ Павел Петрович** – канд. техн. наук, зам. нач. кафедры Житомирского военного института радиоэлектроники имени С.П. Королёва. В 1994 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – обработка информации в информационно-измерительных системах.

**АНДРЕЕВ Александр Владимирович** – доцент кафедры Житомирского военного института радиоэлектроники имени С.П. Королёва. В 1990 году окончил Новосибирский государственный университет. Область научных интересов – обработка информации в информационно-измерительных системах.



**РЫХАЛЬСКИЙ Александр Ростиславович** – доцент кафедры Житомирского военного института радиоэлектроники имени С.П. Королёва. В 1988 году окончил ВИРТА. Область научных интересов – телеметрические измерения, обработка информации в информационно-измерительных системах.

---