

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]:

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

где $\mathbf{\Phi}(\mathbf{k})$ – 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 $\mathbf{Q}(\mathbf{k})\delta(\mathbf{k}, \mathbf{j})$; $\delta(\mathbf{k}, \mathbf{j})$ – δ -символ Кронекера; $\boldsymbol{\gamma}(\mathbf{k})$ – 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

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

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 $\boldsymbol{\sigma}^2$; $\boldsymbol{\gamma}_a(\mathbf{k})$ – 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 Δy_{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 Δy_{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 (**K₁₀ = 0**).

Таблица 1

Показатели качества обнаружения аномальных измерений

Параметр	Номер разряда	Метод допусков		Модифицированный метод	
		K₁₀	K₀₁	K₁₀	K₀₁
Медленно меняющийся	p - 1	0,242	0	0	0
	p - 2	0,242	0	0	0
	p - 3	0,231	0	0	0
	p - 4	0,231	0,03	0	0,16
Быстро меняющийся	p - 1	0,038	0	0	0
	p - 2	0,057	0	0	0
	p - 3	0,057	0	0	0,03
	p - 4	0,579	0,6	0	0,99

Показатели качества обнаружения аномальных измерений быстромменяющегося 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 (**K₀₁ = 1**), а, следовательно, все признанные аномальными измерения являются достоверными (**K₁₀ = 1**). В тоже время модифицированный метод с расчетным порогом имеет меньшее значение коэффициента **K₀₁** 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 Δy_{\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 Δu_{\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 Δu_{\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.
