УДК 629.78.018

И.Б. ТУРКИН, Е.В. СОКОЛОВА, П.А. ЛУЧШЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И АКТУАЛЬНОСТИ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены особенности интерпретации результатов анализа измерительной информации, полученной в процессе функционирования космического аппарата. Реализация сложных программ обработки телеметрии требует специальных методов контроля точности и надежности программной реализации на основе расчетной оценки точности вычисления всех составляющих эту программу операторов и используемых данных. На основе анализа требований к задачам вторичной обработки телеметрии обоснована необходимость использования аффинной интервальной арифметики для учета погрешностей измерения, преобразований и времени получения контролируемой величины.

Ключевые слова: *интервальная арифметика, аффинные операции, актуальность информации, достоверность информации, телеметрический контроль, апертурная погрешность.*

Введение

В процессе функционирования космического аппарата (КА) контролируются различные по физической сущности и динамике процессы, происходящие как на самом объекте, так и вне его. Все контролируемые системы КА взаимосвязаны между собой и представлены совокупностью разнородных параметров. Сложность интерпретации результатов анализа измерительной информации возрастает из-за возможных состояний системы, вызванных неисправностями или внешними возмущающими факторами.

Телеметрический контроль осуществляется в режимах непосредственной передачи телеметрических параметров в реальном масштабе времени (при проведении сеансов связи и нахождении КА в зоне видимости наземных средств) или записи телеметрической информации вне зон видимости с последующим воспроизведением информации.

1. Цель и задачи исследования

Как показывает практика обработки телеметрической информации (ТМИ) летных испытаний КА, результаты первичной обработки информационноценных параметров содержат как одиночные, так и группирующиеся аномальные погрешности. Использование таких результатов в качестве исходной измерительной информации для автоматизированной системы поддержки принятия решений в реальном масштабе времени приводит к ошибочным заключениям о контролируемых событиях [1].

Бортовые информационно-измерительные системы сегодня – это специализированные вычислители, средства сопряжения с объектом контроля и управления, вычислительная сеть, точность и качество которых зависит во многом от внешних по отношению к ИИС сигналов и помех, к которым в процессе обработки в каналах системы добавляются внутренние погрешности и сбои [2]. Распределенная архитектура бортовых систем сбора информации требует учета апертурных погрешностей, то есть погрешностей обусловленных несинхронностью измерений различных параметров, выполненных автономными измерителями.

Реализация сложных программ обработки ТМИ требует специальных методов контроля точности и надежности программной реализации на основе расчетной оценки точности вычисления всех составляющих эту программу операторов и используемых данных [3]. Метрологическая аттестация, как «исследование точностных свойств алгоритма в рамках конкретной измерительной задачи или методики выполнения измерений с целью оценивания характеристик составляющих погрешностей получаемых результатов измерений» [4], проводится для наихудших (с точки зрения искомых характеристик алгоритма или программы) вариантов сочетания моделей полезных сигналов и моделей погрешностей исходных данных. Использование наиболее неблагоприятных вариантов дает гарантированную, но завышенную оценку итоговой погрешности, поэтому создание адаптивных алгоритмов, самостоятельно контролирующих в процессе вычислений точность результата, представляет собой актуальную задачу.

Возможность выполнения доказательных (достоверных, надёжных) вычислений на ЭВМ с гарантированной точностью, когда неопределённость и неоднозначность информации возникает с момента ее получения, является одним из преимуществ методов интервального анализа [5]. В этом случае результат каждого измерения можно рассматривать как интервальную величину с центром, соответствующим показаниям датчика, и шириной интервала, определяемой классом точности датчика. Интервальная модель данных является основой методов обработки информации, обеспечивающих контроль актуальности и достоверности информации. Под актуальностью будем понимать свойство информации в указанный (по умолчанию - текущий) момент времени адекватно отображать состояние объектов предметной области, под достоверностью - соответствие информации реальной действительности. Обеспечение актуальности на этапе обработки ТМИ – это синхронизация информации, полученной от многих автономных вычислительных устройств, объединенных в удаленную бортовую сеть, и приведение этой информации к единой требуемой отметке времени. Обеспечение достоверности – это подтверждение на основе представления объективных доказательств возможности использования результатов обработки ТМИ.

Целью работы является обоснование возможности и целесообразности применения в задачах обработки ТМИ методов аффинно-интервального анализа.

2. Результаты исследований

Определение. **Объект данных** (ОД) – это формализованное представление измеренной или вычисленной величины с учетом погрешностей измерения и преобразований, а также времени, когда эта величина получена:

$$\mathrm{Data}_i = \left\langle V_i, T, k \right\rangle, \tag{1}$$

где $V_i = \left[\underline{V_i}, \overline{V_i}\right] = \left\{V_i \in R \,\middle|\, \underline{V_i} \le V_i \le \overline{V_i}\right\}$ – интервальное значение i -го объекта данных в некоторый интервал времени $T = \left\{t \in R \,\middle|\, \underline{t} \le t \le \overline{t} \,\middle|\, t > 0\right\}$ от момента формирования запроса до момента получения ответа; $k \in R$ – динамическая характеристика для описания максимальной скорости изменения объекта данных.

2.1. Правила выполнения операций над ОД

Результатом арифметической операции $\otimes \in \{+,-,\cdot,/\}$ над ОД A и B с совпадающими интервалами времени $T_A = T_B = T_0$ будет ОД C:

$$C = A \otimes B =$$
$$= \left\langle \left[\min\begin{pmatrix} \underline{V_A} \otimes \underline{V_B}, \overline{V_A} \otimes \underline{V_B}, \\ \underline{V_A} \otimes \overline{V_B}, \overline{V_A} \otimes \overline{V_B} \end{pmatrix}, \right.\right.$$
$$\left.\left. \max\begin{pmatrix} \underline{V_A} \otimes \underline{V_B}, \overline{V_A} \otimes \underline{V_B}, \\ \underline{V_A} \otimes \overline{V_B}, \overline{V_A} \otimes \overline{V_B} \end{pmatrix} \right], T_0, k_C \right\rangle, \tag{2}$$

$$k_c = \begin{cases} k_A + k_B, \otimes \in \{+,-\}, \\ k_A \overline{V_B} + k_B \overline{V_A}, \otimes = \cdot, \dfrac{(k_A \overline{V_B} + k_B \overline{V_A})}{\min\left(\left|\underline{V_B}\right|, \left|\overline{V_B}\right|\right)^2}. \end{cases}$$

Результат операции деления при $\underline{V_B} \le 0 \le \overline{V_B}$ неопределен.

Для автоматической оценки влияния несинхронности получения данных на достоверность результата операции в модель введены три операции.

1. Приведение ОД к моменту времени τ. Результатом приведения ОД $A = \left\langle V_A, t, k_A \right\rangle$ к моменту времени τ будем называть ОД $A_\tau = \left\langle V_{A_\tau}, \tau, k_A \right\rangle$, где

$$\underline{\tau} = \tau = \overline{\tau},\ \overline{V_{A_\tau}} = \overline{V_A} + k_A \cdot \max\left(\tau - \underline{t}, \overline{t} - \tau\right);$$
$$\underline{V_{A_\tau}} = \underline{V_A} - k_A \cdot \max\left(\tau - \underline{t}, \overline{t} - \tau\right).$$

2. Приведения ОД к расширенному временному интервалу. Под расширенным временным интервалом для ОД $A = \left\langle V_A, t, k_A \right\rangle$ будем понимать некоторый интервал времени t_e такой, что $\underline{t_e} \le \underline{t}, \overline{t} \le \overline{t_e}$. Тогда результатом приведения ОД $A = \left\langle V_A, t, k_A \right\rangle$ к временному интервалу t_e будем называть ОД $A_e = \left\langle V_{A_e}, t_e, k_A \right\rangle$, где

$$\overline{V_{A_e}} = \overline{V_A} + k_A \cdot \max\left(\overline{t_e} - \underline{t}, \overline{t} - \underline{t_e}\right);$$
$$\underline{V_{A_e}} = \overline{V_A} - k_A \cdot \max\left(\overline{t_e} - \underline{t}, \overline{t} - \underline{t_e}\right).$$

3. Интерполяция ОД к моменту времени τ. Результатом интерполяции ОД $A = \left\langle V, t, k_A \right\rangle$ к моменту времени τ при известных значениях A_i, A_{i+1}, таких, что: $\underline{t_i} < \tau < \overline{t_{i+1}}$ будем называть ОД $A|_\tau = \left\langle V_A, t, k_A \right\rangle$, где

$$\overline{V_A}|_\tau = \min\left(\overline{V_{A_i}} + k_A\left(\tau - \underline{t_i}\right), \overline{V_{A_{i+1}}} + k_A\left(\overline{t_{i+1}} - \tau\right)\right);$$
$$\underline{V_A}|_\tau = \max\left(\underline{V_{A_i}} - k_A\left(\tau - \underline{t_i}\right), \underline{V_{A_{i+1}}} - k_A\left(\overline{t_{i+1}} - \tau\right)\right).$$

2.2. Учет взаимозависимости ОД

Аффинная математика [6] позволяет получать более точные оценки областей значений, чем интервальное исчисление, на основе учета взаимной зависимости между величинами, возникающей в процессе вычислений. Особенно сильно это проявляется в длинных вычислительных цепочках, когда результаты одних операций становятся входными для других.

Интервальное значение V_i i-того ОД представим аффинной формой $\hat{V}_i$, т.е. полиномом первой степени: $\hat{V}_i = V_{0i} + \sum_{k=1}^{n} V_{ki}\varepsilon_k$, где $V_{ki} \in R$, а $\varepsilon_k \in [-1,1]$. Число V_{0i} называют центром аффинной формы $\hat{V}_i$, коэффициенты V_{ki} — частичными отклонениями, а ε_k — символами шума. Аффинная форма представляет собой интервал, отражающий значение V, т.е. $V = [V_0 - r, V_0 + r]$, где r суммарное отклонение из $\hat{V}, \sum_{k=1}^{n} |V_k|$. В тоже время, любое интервальное значение $V = [\underline{V}, \overline{V}]$ можно представить аффинной формой $\hat{V} = V_0 + \sum_{k=1}^{n} V_k\varepsilon_k$, где $V_0 = (\underline{V} + \overline{V}])/2, V_k = (\overline{V} - \underline{V}])/2$ и ε_k – новый символ шума, не встречающийся в любой другой существующей аффинной форме.

Главная особенность аффинной арифметики состоит в том, что с помощью одного и того же ε_k можно отразить неопределенность нескольких измерений. Например, предположим что значения V_1 и V_2 представлены аффинными формами

$$\hat{V}_1 = 20 - 4\varepsilon_1 \qquad + 2\varepsilon_3 + 3\varepsilon_4;$$
$$\hat{V}_2 = 10 - 2\varepsilon_1 + 1\varepsilon_2 \qquad - 1\varepsilon_4.$$

Тогда, $V_1 = [11, 29]$ и $V_2 = [6,14]$, т.е. пара (V_1, V_2) лежит в прямоугольнике (рис. 1). Однако, учитывая зависимость, пара $(\hat{V}_1, \hat{V}_2)$ лежит в выпуклом многоугольнике симметричном относительно центра (V_{01}, V_{02}), полученном в результате перебора всех значений шумов ε_1 и ε_4 из интервала $[-1,1]$.

При проведении вычислений с учетом взаимозависимости ОД каждая элементарная операция над действительными значениями $z \leftarrow f(x, y)$ заменяется соответствующей процедурой $\hat{z} \leftarrow f(\hat{x}, \hat{y})$ над аффинными формами, результатом которой тоже является аффинная форма.

Вычисление $\hat{x} - \hat{x}$ даст точный ноль, тождества подобные $(\hat{x} + \hat{y}) - \hat{x} = \hat{y}$ недействительные в интервальной арифметике, работают в аффинной (за исключением ошибок округления и переполнения).

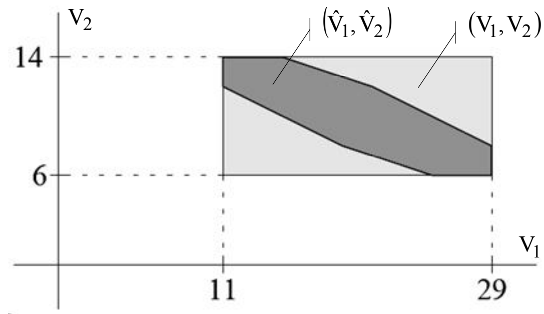

Рис. 1. Пример объединения двух частично зависимых аффинных форм

Если сама операция f является неаффинной $z \leftarrow f(x, y)$ функцией, то наиболее точный результат будет получен, если представить z в виде суммы аффинной комбинации шумов и дополнительного терма $z_k\varepsilon_k$, представляющего ошибку аппроксимации:

$$\begin{aligned} \hat{z} &= f^*(\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n) + z_k\varepsilon_k = \\ &= z_0 + z_1\varepsilon_1 + \ldots + z_n\varepsilon_n + z_k\varepsilon_k. \end{aligned} \tag{3}$$

ε_k должен отличаться от других шумов участвующих в этом же вычислении и коэффициент z_k должен быть верхним пределом абсолютной величины ошибки аппроксимации f^e, т.е. $|z_k| \geq \max\left\{\left| f^*(\varepsilon_1, ..., \varepsilon_n) - f^a(\varepsilon_1, ..., \varepsilon_n)\right| : \varepsilon_1, ..., \varepsilon_n \in U\right.$, остаточный коэффициент z_k должен также учитывать какие-либо ошибки округления, полученные при вычислений других коэффициентов $z_{0,...}z_n$. Замена $z_k\varepsilon_k$ в $f^e(\varepsilon_1, ..., \varepsilon_n)$ в (3) приведет к потере информации: шум ε_k фактически является функцией от $\varepsilon_1, ..., \varepsilon_n$, но это не учитывается, таким образом, в последующих вычислениях ε_k будет рассмотрен как независимый. Поэтому, $|z_k|$ учитывает потерю информации, т.е. ошибку аппроксимации при операции $\hat{z} \leftarrow f(\hat{x}, \hat{y})$.

Пример. Рассмотрим умножение двух аффинных форм, $\hat{z} \leftarrow \hat{x}\hat{y}$, где $\hat{x} = 30 - 4\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$ и $\hat{y} = 20 + 3\varepsilon_1 + 1\varepsilon_3$. Операнды частично коррелируют через ε_1. Сгруппируем термы произведения в аффинную часть A и квадратичный остаток Q, где

$$A(\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n) = 600 + 10\varepsilon_1 + 40\varepsilon_2 + 30\varepsilon_3;$$
$$Q(\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n) = (-4\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)(3\varepsilon_1 + 1\varepsilon_3).$$

Оценка диапазона Q даст интервал $\overline{Q} = [-24, 24]$, следовательно, аффинная форма

$\hat{z} = 600 + 10\varepsilon_1 + 40\varepsilon_2 + 30\varepsilon_3 + 24\varepsilon_4$ доказывает, что z лежит в диапазоне $600 \pm 104 = [496, 704]$. Фактическим диапазоном $\hat{x}\hat{y}$ будет $[528, 675]$, поэтому диапазон, полученный с помощью аффинной арифметики, только в 1,42 раза шире, чем точный. Для сравнения, диапазон, полученный по правилам интервальной арифметики, в 3,26 раза шире. Большое несоответствие получается из-за отрицательной корреляции между x и y, отмеченной шумом ε_1. Корреляционные термы $-80\varepsilon_1$ и $90\varepsilon_1$ почти уравновешиваются в аффинной арифметике, но добавляются в интервальной.

2.3. Обработка ошибки округления

Для учета ошибки округления необходимо расширить результирующую формулу $\hat{z}$ дополнительным термом $z_k \varepsilon_k$, где z_k верхняя граница суммы всех абсолютных ошибок d_i, внесенных вычислением коэффициентов z_i и ε_i, являющаяся шумом не входящим в другие аффинные формы.

Пример. В работе [8] рассмотрена задача нахождения последовательности: $I_n = \frac{1}{e}\int_0^1 x^n e^x dx$, для которой справедливо: $I_0 = 1 - e^{-1}$, а после интегрирования по частям для **n > 0** доказывается рекуррентное равенство: $I_n = 1 - n \cdot I_{n-1}$. Очевидно, что $\forall n, 0 \prec I_n \le \frac{1}{n+1}$. Из-за накопления ошибок округления прямая расчетная схема является неустойчивой, так как расчетная ошибка, внесенная при определении I_0, возрастает пропорционально $n!$. При увеличении точности расчета I_0 растет максимальная величина **n,** при которой погрешность расчета остается допустимой, но сам процесс на определенном этапе всё равно теряет устойчивость (рис. 2)

Точное значение на рис. 2 получено из обратной рекуррентной схемы: $I_{30} = 0, I_{n-1} = \frac{1 - I_n}{n}$. С применением правил аффинных операций, предполагая, что производится округление до 12 цифр, для вычислений в прямом направлении получим оценку шума ε_n для каждого I_n: $\varepsilon_0 = 0{,}5 \cdot 10^{-12}, \varepsilon_n = n \cdot \varepsilon_{n-1} + \varepsilon_0$, а при вычислениях в обратном: $\varepsilon_{30} = \frac{1}{30+1}, \varepsilon_{n-1} = \frac{\varepsilon_n}{n} + 0{,}5 \cdot 10^{-12}$ (рис. 3).

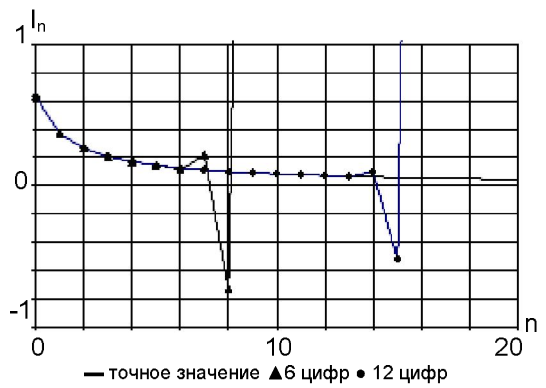

Рис. 2. Зависимость I_n от n и количества учитываемых цифр при расчете I_0

Рис. 3. Зависимость шума от n для прямой и обратной схемы расчета

Расчетная зависимость шума для прямой и обратной схемы расчета доказывает необходимость контроля корректности даже простейших алгоритмов, и возможность выполнения такого контроля с помощью аффинных преобразований.

Выводы

В настоящее время состав телеметрируемых параметров, необходимый для оценивания функционирования КА, значительно расширился. Этому способствуют разработка новых КА и электронно-вычислительных средств, расширение круга решаемых задач и развитие современных информационных технологий, которые позволяют проводить обработку полного потока ТМИ в реальном масштабе времени. Разрабатываемые интеллектуальные информационные технологии предъявляют высокие требования к исходной измерительной информации прежде всего из-за ограниченности времени, отводимого на решение задачи. Применение методов интервальной математики решает важную задачу обеспечения актуальности и достоверности результатов обработки ТМИ.

Литература

1. Эволюция и тенденции развития комплексов управления КА за рубежом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nash-cosmos.ru/sredstva-vuvedenija/39-kompleksu-ypravleniy/73-kurazvitie.html.

2. Совершенствование телеметрических систем на основе рекомендаций Комитета CCSDS [Электронный ресурс] / А.В. Кантор, А.В. Невзоров, А.Е. Ширшаков, О.С. Шмонов // Автоматические космические аппараты для планетных и астрофизических исследований. Проектирование, конструкция, испытания и расчет: материалы XXXIII Академических чтений по космонавтике, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 26-29 янв. 2009. – Режим доступа: http://www.ihst.ru/~akm/34t18.htm.

3. PACKET TELEMETRY recommendation for space data system standards [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://public.ccsds.org/publications/archive/102x0b5s.pdf.

4. Каргин В.А. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном масштабе времени. / В.А. Каргин, Н.В. Нездоровин, Д.А. Николаев // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 77-82.

5. Жукова Н.А. Методы и модели оперативного контроля состояния сложных динамических объектов на основе измерительной информации с использованием алгоритмов интеллектуального анализа данных: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Жукова Наталия Александровна; С.- Петерб. гос. электротехн. ун-т. – СПб., 2008. – 19 с.

6. Stolfi J. Self-validated numerical methods and applications / J. Stolfi, L. H. de Figueiredo // Brazilian Mathematics Colloquium monograph, IMPA. – Rio de Janeiro, Brazil, 1997. – 116 p.

7. Половинкин Е. С, Балашов М. В. Элементы выпуклого и сильно выпуклого анализа. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

8. Бабушка И. Численные процессы решения дифференциальных уравнений / И. Бабушка, Э. Витасек, М. Прагер. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

Поступила в редакцию 17.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой И.В. Чумаченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ИНТЕРВАЛЬНІ МОДЕЛІ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВІРОГІДНОСТІ Й АКТУАЛЬНОСТІ ТЕЛЕМЕТРІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

І.Б. Туркін, Є.В. Соколова, П.О. Лучшев

Розглянуто особливості інтерпретації результатів аналізу вимірювальної інформації, отриманої у процесі функціонування космічного апарату. Реалізація складних програм обробки телеметрії вимагає спеціальних методів контролю точності і надійності програмної реалізації на основі розрахункової оцінки точності обчислення всіх складових цю програму операторів і використовуваних даних. На основі аналізу вимог до завдань вторинної обробки телеметрії обгрунтована необхідність використання афінної інтервальної арифметики для обліку похибок вимірювання, перетворень і часу отримання контрольованої величини.

Ключові слова: інтервальна арифметика, афінні операції, актуальність інформації, вірогідність інформації, телеметричний контроль, апертурна погрішність.

INTERVAL MODELS IN THE AUTOMATIC CONTROL RELIABILITY PROBLEMS AND TELEMETRY SPACE VEHICLES URGENCY

I.B. Turkin, E.V. Sokolova, P.A. Luchev

The features of the measurement data the results interpreting obtained in the spacecraft operation. The implementation of complex programs for processing telemetry requires special control of accuracy and reliability software methods implementation based on the estimated accuracy estimates calculate all components of this program operators and data used. Based on the analysis of requirements for the secondary processing telemetry tasks the necessity to use the affine interval arithmetic to account for measurement errors, changes and time of the controlled variable receipt.

Key words: interval arithmetics, affine operations, information urgency, reliability information, telemetering control, aperture error.

Туркин Игорь Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: energy@d4.khai.edu, nikrutrogi@mail.ru.

Соколова Евгения Витальевна – ст. преп. кафедры инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: EVSkhai@gmail.com, Sev_ai@mail.ru,.

Лучшев Павел Александрович – к.т.н., доц. каф. кафедры инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: lpa@ai.kharkov.com.