

І.В. Пулеко

## АЛГОРИТМ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ СТАНУ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

(Представлено доктором фізико-математичних наук, професором Білоусом Л.М.)

Запропоновано алгоритм статистичної обробки телеметричної інформації, який дозволяє разом з оцінкою телеметричних параметрів отримувати також і оцінку стану інформаційно-вимірювального каналу.

Метою обробки результатів телевимірювань є отримання необхідної інформації про телеметричні процеси із заданою вірогідністю і точністю у вигляді, зручному для подальшого використання. Досягнення цієї мети може бути здійснене на основі послідовного рішення задач відбраковки аномальних вимірів та згладжування телеметричних параметрів (ТМП) за допомогою детермінованих методів. Запропоновані раніше алгоритми обробки телеметричної інформації (ТМІ), що реалізують ці методи, як правило, базуються на використанні специфіки ТМІ і орієнтовані на обмежені обчислювальні потужності та порівняно невисокі вимоги до точності представлення ТМІ. Крім того, ці алгоритми не враховують, що у процесі випробувань та експлуатації технічні параметри інформаційно-вимірювальних каналів (ІВК) систем телеметричного забезпечення (СТМЗ) можуть суттєво змінюватися. У зв'язку з цим результати обробки алгоритмами, які здійснюють оцінку телеметричних параметрів, можуть виявитися незадовільними, точність отриманих оцінок невідома, вірогідність висновків невисока.

Реально інформаційно-вимірювальні канали СТМЗ працюють в таких умовах, коли з тих чи інших причин:

неможливо задати аналітичний вираз процесу, що вимірюється;

у системі може бути відсутній повірочний сигнал, заданий із точністю, що перевищує точність системи;

неможливо здійснювати виміри таким чином, щоб на вхід вимірювальної системи надходив багато разів, хоча і невідомий апріорно, але у незмінному вигляді, сигнал, що повторюється, іншими словами усереднення результатів у їхньому звичайному вигляді неможливе.

Тому актуальною є задача розробки алгоритмів оцінки ТМП, які б ураховували стан та якість ІВК.

Один з можливих підходів до вирішення цієї задачі – включити невідомі параметри законів розподілу похибок вимірів до складу параметрів, що оцінюються.

Це дозволяє досягнути ряду переваг:

можливість більш точної та вірогідної оцінки телеметричних параметрів;

ефективного методу оперативного еталонування інформаційно-вимірювальних каналів у ході проведення вимірів;

оптимального розподілу вимірювальних ресурсів і режимів роботи ІВК СТМЗ.

Необхідною умовою практичного використання будь-якого з методів обробки є наявність апріорної інформації про процес, що досліджується. Ця інформація складається з імовірнісних характеристик похибок вимірів ІВК. У реальних умовах єдиним джерелом одержання такої інформації є статистична обробка результатів вимірів. Необхідно відзначити, що використанню статистичних даних звичайно передуює процес накопичення і обробки вхідних даних, що визначає основний недолік застосування статистичних методів оцінювання. Тому представляє особливий інтерес така форма запису алгоритмів, що забезпечувала б послідовне уточнення оцінок цих параметрів у міру надходження вимірів.

Нехай є результати вимірів  $h(t_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  телеметричних параметрів літального апарату, виконані ІВК СТМЗ:

$$h(t_i) = z(t_i) + \delta h(t_i), \quad (1)$$

де  $z(t_i)$  – значення телеметричного параметру і  $\delta h(t_i)$  – помилки вимірів.

Нехай також виконуються наступні основні обмеження та припущення:

1. Процес, що вимірюється, описується лінійною комбінацією деяких відомих (базисних) функцій часу та невідомими коефіцієнтами, що підлягають оцінюванню за результатами вимірів [2]:

$$z(t_i) = \sum_{k=0}^q a_k \cdot \varphi_k(t_i), \quad (2)$$

де  $\varphi(t_i)$  – відомі функції часу;

$a_k$  – невідомі коефіцієнти (параметри), що підлягають оцінці;

$q$  – задане число.

2. Виміри ТМП можуть бути не обов'язково синхронізовані, але точно відомі моменти часу, у які вони проводились.

3. Сукупність вимірів одного ТМП, виконаної одним ІВК, будемо називати групою вимірів. Відносно похибок вимірів припускається, що для кожної групи вимірів вони являють собою послідовність випадкових величин з математичним сподіванням  $M$  та середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  (СКВ). Припускається також, що всередині кожної групи вимірів похибки вимірів залежні, а між різними групами похибки вимірів незалежні.

4. Під телеметричними параметрами розуміються функціональні ТМП.

За результатами обробки вимірів необхідно:

1. Визначити параметри процесу, що вимірюється, на основі вибору адекватної моделі виміру.

2. Визначити характеристики точності ІВК.

3. Провести статистичний аналіз похибок вимірів ІВК.

Параметрами процесу, що вимірюється, є значення оцінок телеметричних параметрів. Необхідні також оцінки точності вимірів – коваріаційна матриця вектора оцінок ТМП.

Характеристикою точності вимірювальних каналів є середньоквадратичне відхилення випадкової помилки вимірювального каналу СМЗ.

Особливістю статистичного аналізу похибок вимірів СМЗ є те, що самі похибки вимірів безпосередньо не спостерігаються. Замість них для статистичного аналізу використовуються різниці між результатами вимірів та їх статистичними оцінками. Щоб ці різниці суттєво не відрізнялись від похибок, необхідно, щоб точність оцінок була значно (у 3–5 разів) вище точності вимірів [6].

Ефективність, стійкість і універсальність алгоритмів згладжування значною мірою залежить від вибору виду та типу базисних функцій.

Вибір виду базисних функцій є важливою задачею, від рішення якої залежить швидкість збіжності ряду.

Відомо [9], що не існує єдиного універсального базису, оптимального для усіх класів множини різних за фізичною суттю і поведінкою у часі ТМП. Вибір того чи іншого базису визначається рівнем завдання апріорної інформації про вимірюваний процес, практичними вимогами до обробки вимірювань і технічними можливостями системи обробки вимірювальної інформації.

Використання найпростіших алгебраїчних поліномів, які є неортогональними, має ряд суттєвих недоліків, які розглянуті [2, 11].

У порівнянні з неортогональними, використання ортогональних базисних функцій має ряд переваг:

1. Для будь-якого виду ортогонального базису процедура розрахунку коефіцієнтів полінома лишається однією і тією ж і не зв'язана з громіздкою задачею рішення системи лінійних рівнянь.

2. При зміні ступеня апроксимуючого полінома відпадає необхідність перерахунку усіх розрахованих раніше коефіцієнтів полінома.

3. В силу інтегрального характеру оператора розрахунку коефіцієнтів алгоритм обробки має гарні фільтруючі властивості по відношенню до випадкових помилок вимірювань.

4. Значно спрощується процедура згладжування і процедура знаходження оптимального ступеня апроксимуючого полінома.

Теоретичний аналіз показує, що при наявності апріорної інформації, для широкого класу процесів, за базисні функції доцільно використовувати тригонометричні функції, власні вектори кореляційної матриці вимірюваного процесу, або канонічний базис. Перший з них – тригонометричні функції оптимальні для процесів коливального характеру (квазіперіодичних регулярних функцій). Канонічний базис використовується при наявності повної апріорної статистичної інформації про вимірюваний процес і оптимальний для складних за поведінкою у часі квазістаціонарних випадкових процесів.

Деякі види ортогональних базисів з тих чи інших причин не зручні для використання. Наприклад, застосування поліномів Лаггера ускладнюється тим, що область визначення (інтервал ортогональності) нескінчена. Введення поняття квазіортогональності на кінцевому інтервалі [11] різко знижує швидкість збіжності ряду. Прямокутні ортогональні функції Уолша і Хаара [11] також мають низьку збіжність при апроксимації безперервних функцій.

На практиці найбільш типова ситуація, коли детальної апріорної інформації про процес, який вимірюється, немає. Тоді за базисні функції доцільно використовувати дискретні поліноми Чебишева (ДПЧ), котрі є поліномами найкращого наближення [1]. Вони тісно пов'язані як з тригонометричними функціями, так і з ступеневими функціями [1, 2].

При необхідності легко перерахувати коефіцієнти апроксимації по поліномах Чебишева у коефіцієнти розкладення по степеневих та тригонометричних функціях. У випадку рівновідда-

лених значень аргументу, ДПЧ є кінцево-різничним аналогом поліномів Лежандра, які мають високу швидкість збіжності. Крім того, ДПЧ легко реалізуються на ЕОМ.

Для знаходження оцінок невідомих коефіцієнтів  $a_k$  скористаємось зваженим методом найменших квадратів (ЗМНК) [2]. При помилках вимірів, розподілених за нормальним законом, система нормальних рівнянь ЗМНК співпадає з системою рівнянь правдоподібності. Властивості одержуваних оцінок докладно розглянуті у [7]. Доведено, що при розглянутих припущеннях оцінки, що одержуються, є спроможними, асимптотично нормальними, а у випадку нормально розподілених похибок вимірів каналів – асимптотично ефективними.

Тоді алгоритм оцінювання матиме вигляд:

1. Проводиться відбраковка аномальних вимірів одним з відомих методів, наприклад, методом перших різниць [1].

Якщо  $h(t_i)$  не є аномальним, то йому присвоюється вага:  $\omega = 1/\sigma_0$ , де паспортне значення середньоквадратичне відхилення випадкових похибок вимірювального приладу ІВК.

Якщо ж  $h(t_i)$  є аномальним та якщо в обробці повинні бути всі виміри, то надається вага:  $\omega = 1/s \cdot \sigma_0$ , де  $s$  – ціле число, що вибирається у залежності від конкретного ТМІ так, щоб вимір не впливав на результати подальшої обробки.

2. В залежності від апріорної інформації про процес, що вимірюється, обирається один із режимів роботи алгоритму: поліноміальне згладжування на усьому інтервалі вимірів чи ковзне поліноміальне згладжування.

Визначаються параметри згладжування, що в залежності від обраного режиму роботи алгоритму можуть включати:

- введення початкового порядку моделі вимірів  $q$ ;
- визначення числа точок на ділянці згладжування  $n$ ;
- визначення кількості зрушень ділянки згладжування;
- визначення номера середньої точки ділянки згладжування;
- визначення кінця поточного інтервалу згладжування;
- визначення часу у середній точці інтервалу ковзання.

Порядок моделі вимірів уточнюється при перевірці адекватності моделі вимірів, де здійснюється підбір найкращого степеня згладжуючого полінома на поточному інтервалі згладжування, починаючи з 1 степеня.

3. Розраховуються значення функцій ДПЧ згідно з рекурентним алгоритмом:

$$\begin{cases} \varphi_0(t_i) = 1, \\ \varphi_i(t_i) = t_i - \frac{i-1}{n}; \end{cases} \quad (3)$$

і для будь-якого  $k > 1$ :

$$\varphi_{k+1}(t_i) = (t_i + \beta_{k+1}) \cdot \varphi_k(t_i) + \gamma_{k+1} \cdot \varphi_{k-1}(t_i) \quad (4)$$

де

$$\beta_{k+1} = - \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot \varphi_k^2(t_i)}{\sum_{i=1}^n \varphi_k^2(t_i)}, \quad (5)$$

$$\gamma_{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \varphi_{k-1}(t_i) \varphi_k(t_i)}{\sum_{i=1}^n \varphi_{k-1}^2(t_i)}. \quad (6)$$

4. Визначаються оцінки  $k$  невідомих параметрів моделі вимірів за формулою:

$$\bar{a}_k = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot \varphi_k(t_i)}{\sum_{i=1}^n \varphi_k^2(t_i)}, \quad k = 1, 2, \dots, q. \quad (7)$$

5. Визначаються оцінки параметрів процесу, що вимірюється:

$$\hat{z}(t_i) = \sum_{k=0}^q \hat{a}_k \cdot \varphi_k(t_i). \quad (8)$$

Обчислюються нев'язки.

6. Обчислюється оцінка середньоквадратичного відхилення випадкових помилок:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - h_i)^2. \quad (9)$$

7. Перевіряється виконання критерію припинення ітерацій

$$RV = |\hat{a}_k - \hat{a}_k^*| < E, \quad (10)$$

де  $\hat{a}_k^*$  – значення оцінки коефіцієнта  $\hat{a}_k$  на попередній ітерації;

$E$  – задане наперед число.

8. У випадку продовження ітерацій уточнюється вага вимірів:

$$w_1 = 1/\sigma^2. \quad (11)$$

9. Проводиться перевірка адекватності моделі вимірів. Задача перевірки адекватності моделі вимірів докладно розглянута у [8].

10. Будується масив згладжених значень ТМП  $\hat{Z}$ .

11. Будується масив нев'язок, що є оцінками помилок вимірів у кожний момент  $t_i$ :

$$u_i = \hat{z}_i - h_i. \quad (12)$$

12. Проводиться статистичний аналіз похибок вимірів, який дозволяє проводити метрологічну атестацію ІВК. Алгоритм статистичного аналізу докладно розглянуто в [7].

13. Видаються результати оцінки телеметричних параметрів, характеристики точності ІВК та результати статистичного аналізу похибок вимірювань.

Таким чином, розроблено алгоритм обробки телеметричної інформації, який дозволяє разом з оцінкою ТМП отримувати також і оцінку стану ІВК.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Богомолов О.С., Степкин В.С. Автоматизированная обработка телеметрической информации: Учебное пособие. – М.: МО СССР, 1977. – 166 с.
2. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Советское радио, 1978. – 384 с.
3. Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
4. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
5. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений: Квазиправдоподобные оценки. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.
6. Пулеко И.В. Комплексование информационно-измерительных каналов радиотелеметрических станций в условиях временной и структурной избыточности // Сборник докладов X военно-научной конференции. – Житомир: ЖВУРЕ, 1996.
7. Пулеко И.В. Алгоритмы статистического анализа погрешностей информационно-измерительных каналов радиотелеметрических станций // Сборник докладов X военно-научной конференции. – Житомир: ЖВУРЕ, 1996.
8. Пулеко И.В. Алгоритм проверки адекватности модели измерений телеметрируемых параметров с выбором наилучшей из класса возможных // Сборник докладов X военно-научной конференции. – Житомир: ЖВУРЕ, 1996.
9. Шмыголь С.С. и др. Новые методы и алгоритмы обработки информации. – Ленинград: ЛВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1976. – 136 с.

ПУЛЕКО Ігор Васильович – ад'юнкту Житомирського військового інституту радіоелектроніки.

Наукові інтереси:

– алгоритми статистичної обробки інформації в автоматизованих системах управління.