

С.В. Ковбасюк, к.т.н., с.н.с.  
 О.О. Писарчук, к.т.н.  
 Є.Ю. Пономарьов

*Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова*

### АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВИМІРІВ

*Проведено розробку алгоритму виявлення аномальних вимірів, заснованого на аналізі зміни характеру вимірюваної траєкторії руху літального апарата. Наведені результати математичного моделювання.*

Сучасні задачі моніторингу космічного простору висувають жорсткі вимоги щодо точності визначення параметрів траєкторій руху космічних об'єктів (КО). Точність кінцевого результату значною мірою залежить від якості проведення етапу обробки вимірювальної інформації літальних апаратів (ЛА). Визначення параметрів траєкторії руху КО зазвичай здійснюється з використанням радіолокаційних станцій (РЛС). Процесу вимірювання параметрів траєкторії руху ЛА за допомогою РЛС властива поява похибок вимірювання. Традиційно виділяють реальні та аномальні похибки вимірювання [1], [2]. Реальні похибки вміщують у собі випадкові та динамічні складові, що обумовлені нестабільністю роботи апаратури, невідповідністю моделі руху ЛА реальній траєкторії тощо. Їх статистичні характеристики вважають, як правило, відомими. Під аномальними розуміють похибки, які призводять до різкого відхилення вимірів, що їх містять, від решти експериментальних даних. Причинами появи аномальних похибок є зміна умов розповсюдження радіохвиль у межах інтервалу спостереження, турбулентності атмосфери, збої у роботі апаратури РЛС і т.п.

Вираз для аномального виміру (АВ) може бути записаний у вигляді:

$$y_{an} = x_n + k_n + \Delta,$$

де  $y_{an}$  – аномальний вимір;  $x_n$  – дійсне значення параметра, що вимірюється;  $k_n$  – похибка реального виміру (РВ);  $\Delta$  – похибка аномального виміру.

Аномальні виміри змінюють статистичні характеристики вимірювальної інформації про траєкторію руху об'єкта спостереження, що значно погіршує результати статистичної обробки вимірів [1]. Таким чином, актуальним є зменшення впливу аномальних вимірів на результати обробки радіолокаційної інформації (РЛІ) з метою підвищення точності визначення координат КО.

Розв'язок задачі зменшення впливу аномальних вимірів на якість кінцевого результату полягає у вирішенні двох підзадач: виявлення АВ; зниження впливу АВ при згладжуванні РЛІ [3]. Стаття присвячена вирішенню першої з перерахованих підзадач.

Для виявлення АВ зазвичай використовують алгоритми, які базуються на аналізі перевищення похибок вимірювання встановленого порогового значення на базі методу найменших квадратів (МНК), а також на аналізі різниці між моделлю та реальною траєкторією ЛА [1], [2]. Алгоритм виявлення АВ з використанням МНК [1] є ефективним при значенні коефіцієнта невідповідності похибки АВ трьом середньоквадратичним відхиленням (СКВ) похибки реального виміру  $K_n = \Delta / 3\sigma_p \geq 1$ . Ефективність алгоритму, що базується на аналізі невідповідності моделі реальній траєкторії ЛА, має місце при значенні коефіцієнта невідповідності  $K_n = 3 \dots 5$ . Таким чином, недоліком традиційних алгоритмів є їх низька ефективність виявлення АВ з малими похибками. Тому актуальною є задача розробки алгоритмів виявлення АВ з малими значеннями похибок ( $K_n < 1$ ).

Метою статті є розробка ефективного алгоритму виявлення аномальних вимірів.

Для розробки алгоритму виявлення аномальних радіолокаційних вимірів доцільно розглянути режим супроводження об'єкта спостереження в радіолокаційних станціях. Згладжування параметрів траєкторії ЛА в багатьох існуючих РЛС здійснюється з використанням рекурентного лінійного фільтра Калмана (ФК). Розрахунок кореляційних матриць похибок екстраполяції при використанні ФК здійснюється згідно з виразом [4]:

$$\Psi_{ne} = W \Psi_{m-1} W^T, \quad (1)$$



де  $\Psi_{nc}$  – кореляційна матриця похибок екстраполяції на  $n$ -й огляд ЛА;  $\Psi_{m-1}$  – кореляційна матриця похибок оцінювання параметрів за результатами  $(n-1)$  вимірів;  $W$  – оператор перерахунку похибок на наступний огляд цілі.

При збільшенні кількості вимірів, що згладжуються, починаючи з деякого значення  $k$ , спостерігається явище розходження фільтра, яке викликане невідповідністю траєкторії (яка в більшості випадків нелінійна), прийнятій у ФК моделі руху об'єкта спостереження. У зв'язку з цим в [5] було запропоновано прийняти гіпотезу про “старіння” вимірювальної інформації, тобто ввести коефіцієнт старіння, значення якого змінюється відповідно до прояву невідповідності реальної траєкторії прийнятій моделі. При введенні коефіцієнта старіння вираз для кореляційної матриці похибок екстраполяції алгоритму ФК (1) матиме вигляд:

$$\Psi_{nc} = S_{cm} W \Psi_{n-1} W^T, \tag{2}$$

де  $S_{cm} = \exp \eta_0 (j-i)$ ,  $\eta_0 \geq 0$  – швидкість старіння інформації;  $i, j$  – дискретні моменти вимірювання та використання результатів вимірювання траєкторії ЛА відповідно.

Таким чином, зміна коефіцієнта старіння відображує динаміку руху ЛА. Оптимальне значення  $S_{cm}$  за мінімумом суми динамічної та флуктуаційної похибок визначається згідно з рівнянням:

$$(S_{cm}^{om} + 4)(S_{cm}^{om} - 1)^5 - A_k^2 (S_{cm}^{om} + 4)^4 = 0, \tag{3}$$

де:  $A_k^2 = \frac{t_{on} \alpha_n^2}{\sigma_k^2}$  – інтенсивність маневру за координатою;  $\alpha_n^2 = \mathcal{G}_n - \mathcal{G}_{n-1}$  – друга кінцева різниця за координатою;  $\sigma_k^2$  – дисперсія вимірювання відповідних координат;  $t_{on}$  – період оновлення інформації. Знайти розв'язок рівняння (3) можливо при використанні методу половинного ділення (дихотомії) [6].

Оскільки коефіцієнт старіння вміщує у собі інформацію про динаміку руху ЛО, логічно припустити, що при появі АВ у вибірці значень  $S_{cm}^{om}$  буде істотно змінюватись, що може бути ознакою АВ. Для підтвердження або спростування такого припущення проведемо додатковий аналіз рівняння (3). Нехай траєкторія руху ЛА описується поліномом не менше як другого порядку. Тоді при відсутності АВ ( $\Delta = 0$ ) флуктуація  $A_k^2$  визначається тільки випадковою похибкою вимірювання та динамікою польоту ЛА. Розв'язок рівняння (3) знаходиться на інтервалі  $[a, b]$ , якій апріорно можна розрахувати. При появі АВ ( $\Delta \neq 0$ ) значення  $A_k^2$  зміниться істотно, а розв'язок рівняння (3) вийде за межі  $[a, b]$ . Вихід за встановлені межі значення  $S_{cm}^{om}$  є ознакою аномальності виміру.

Ефективність алгоритму виявлення АВ залежить від вибору початкового інтервалу пошуку рішення рівняння (3). Апріорно межі пошуку розв'язку рівняння (3) можна встановити згідно з такими міркуваннями. При  $A_k^2 = 0$ , тобто маневр цілі та АВ відсутні, корені рівняння (3) дорівнюють  $S_{cm1}^{om} = -4$ ;  $S_{cm2}^{om} = 1$ . Від'ємний корінь рівняння у даному випадку фізично не має смислу. Тому ліва межа інтервалу пошуку розв'язку рівняння (3) повинна дорівнювати одиниці. Права межа інтервалу відображує динамічні властивості об'єкта спостереження та встановлюється, виходячи з його типу.

Таким чином, алгоритм виявлення АВ повинен містити у собі такі етапи:

1. Встановлення меж пошуку розв'язку рівняння (3).
2. Розрахунок інтенсивності маневру  $A_k^2$ .
3. Перевірка належності значення коефіцієнта старіння інформації (кореня рівняння (3)) встановленим межам.
4. Прийняття рішення про аномальність поточного виміру, ознакою чого є вихід значення  $S_{cm}^{om}$  (3) за встановлені межі.

Оскільки для розрахунку значень  $A_k^2$  одночасно залучаються декілька вимірів, доцільно буде оцінити вірогідність прийняття правильного рішення про аномальність виміру у запропонованому алгоритмі. Розглянемо ситуацію, коли отримано три виміри, з яких друге (середнє) є аномальним. Тоді СКВ похибки визначення інтенсивності маневру для другого виміру дорівнює:

$$\sigma_{\sigma 2} = \frac{2\Delta}{\sigma_k}, \quad (4)$$

а для третього виміру

$$\sigma_{\sigma 3} = \frac{\Delta}{\sigma_k}. \quad (5)$$

Порівняння виразів (4) та (5) дозволяє зробити висновок про те, що вірогідність прийняття за аномальний третій (неаномальний) вимір нижча, ніж другий (аномальний).

Ефективність розробленого алгоритму оцінювалась за результатами математичного моделювання. Порівняння розробленого алгоритму здійснювалось з алгоритмом виявлення АВ на базі МНК (далі – традиційний алгоритм) як найбільш чутливого до малих значень аномальної похибки.

Результати розрахунків наведені на рис. 1..4. На рис. 1, а представлена залежність відношення кількості правильно виявлених АВ  $N_{неAB}$  до загальної кількості АВ  $N_{AB}$  як функція від коефіцієнта невідповідності  $K_n$ . На рис. 1, б подана залежність відношення кількості хибно виявлених АВ  $N_{хаAB}$  до кількості вимірів у вибірці  $n$ , як функція від коефіцієнта невідповідності  $K_n$ . Цифри 1 відповідають криві, отримані при дослідженні традиційного алгоритму, цифри 2 – розробленого алгоритму.

З наведених залежностей видно, щодо  $K_n = 0.56$  ефективність розробленого алгоритму за кількістю правильно виявлених АВ вища, ніж традиційного, при цьому спостерігається велика кількість хибно виявлених АВ розробленим алгоритмом. Починаючи із значення  $K_n = 1$ , традиційний та розроблений алгоритми дозволяють виявляти всі АВ, хоча при  $K_n = 1.7$  переважним з точки зору досягнення мінімуму хибно виявлених АВ є розроблений алгоритм.

Раніше зверталась увага на залежність ефективності розробленого алгоритму від значення початкового інтервалу пошуку розв'язку рівняння (3)  $[a, b]$ . У зв'язку з цим були проведені дослідження залежностей  $N_{неAB} / N_{AB} = f(b)$ , які подані на рис. 2, а, а також  $N_{неAB} / n = f(b)$ , подані на рис. 2, б для різних значень коефіцієнта невідповідності. Цифрою 1 позначено випадок  $K_n = 0,03$ ; цифрою 2 –  $K_n = 0,3$ ; цифрою 3 –  $K_n = 0,6$ .

Криві рис. 2 дозволяють, задаючись величиною правильно виявлених і хибно відбракованих АВ, знайти оптимальне значення границі  $b$ , виходячи із конкретного значення  $K_n$  та специфіки задач, що рішаються.

З метою дослідження роботи традиційного та розробленого алгоритмів при відсутності АВ були отримані графіки залежності відношення кількості хибно відбракованих АВ при їх відсутності  $N_{хаAB}^*$  до кількості згладжених вимірів  $n$  як функції від правої межі  $b$  (рис. 3). На рис. 3 цифри 1 відповідає крива для традиційного алгоритму; цифри 2 – крива для розробленого алгоритму.

Зі збільшенням значення  $b$ , кількість хибно відбракованих АВ розробленим алгоритмом зменшується і, починаючи зі значення  $b = 3,4$ ,  $N_{хаAB}^* / n = 0\%$ . Традиційний алгоритм має постійне значення  $N_{хаAB}^* / n = 0,29\%$ .

Вважаючи, що згладжування вимірювальної інформації, після супроводження ЛА, здійснюються з використанням МНК, були отримані графіки залежностей відносного виграшу в точності згладжування  $\delta\sigma$  при попередній обробці вимірів запропонованим алгоритмом виявлення АВ, порівняно з традиційним підходом, як функція від кількості АВ у вибірці  $N_{AB}$  (рис. 4).

Рис. 4, а отриманий для точки з найвищою точністю згладжування, рис. 4, б – для точки з найнижчою точністю згладжування. Суцільна лінія відповідає значенню  $K_n = 0,03$ , штрих-пунктирна  $K_n = 0,3$ , штрихова  $K_n = 0,6$ .

При  $K_n = 0,03$  розроблений алгоритм ефективний при будь-якій кількості АВ. Зі збільшенням величини помилки АВ ефективність розробленого алгоритму спостерігається при  $N_{AB} > 10\%$  для  $K_n = 0,3$  і  $N_{AB} > 20\%$  для  $K_n = 0,6$ .



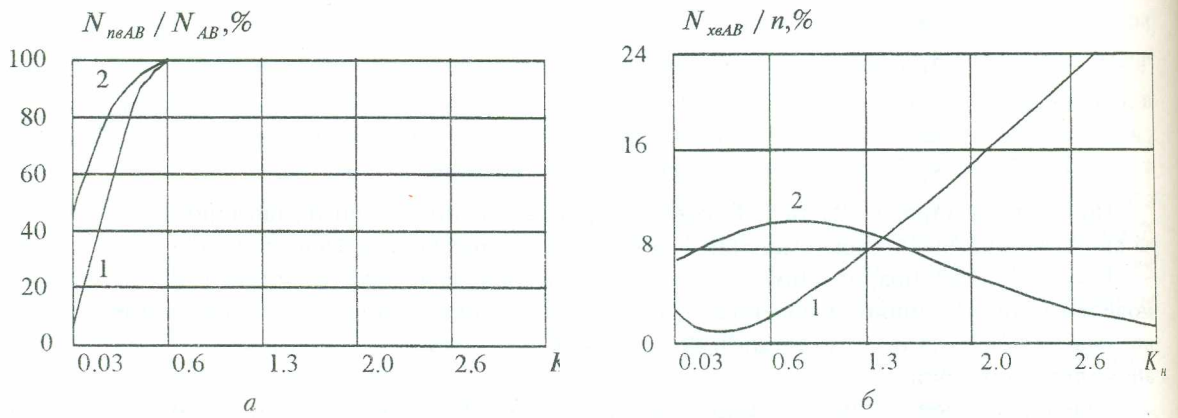


Рис. 1

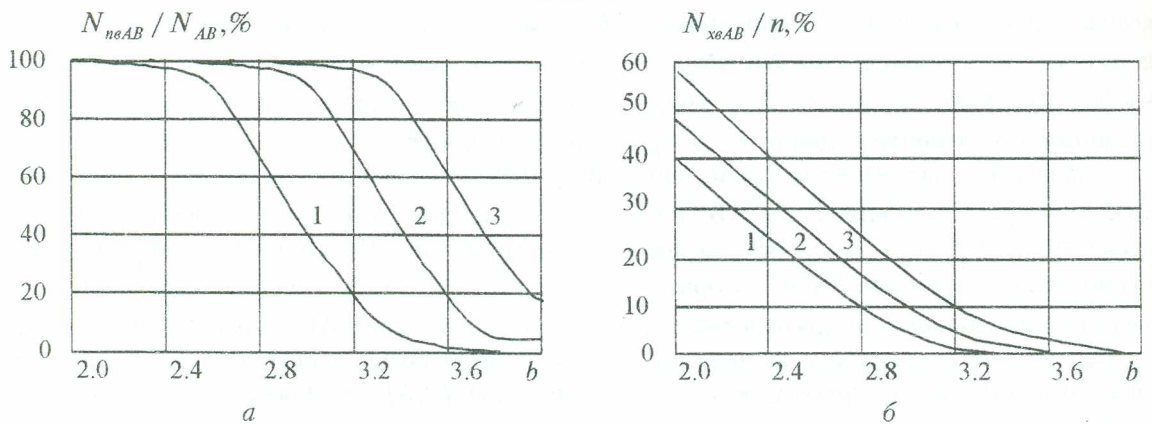


Рис. 2

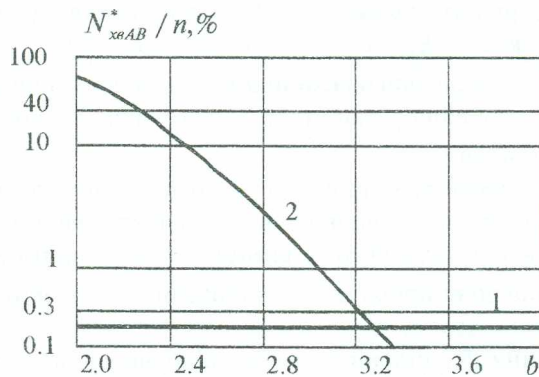


Рис. 3

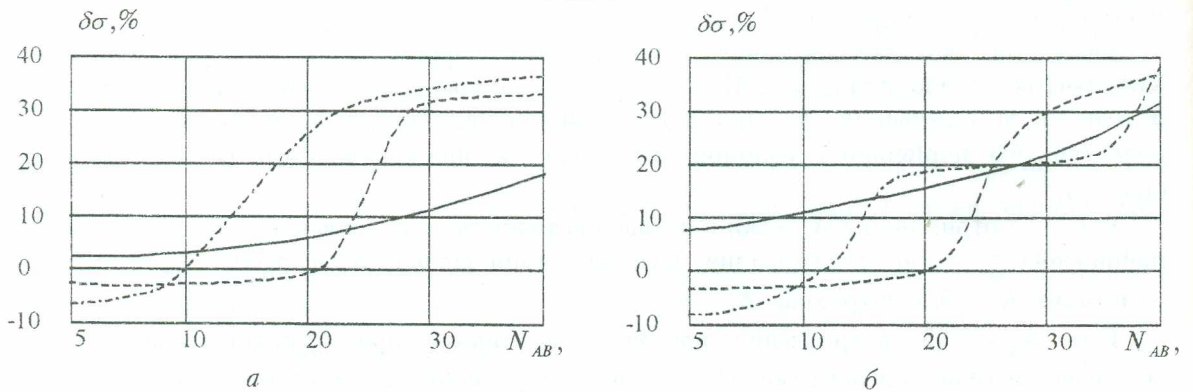


Рис. 4

Таким чином, проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що розроблений алгоритм, оснований на аналізі зміни характеру вимірної траєкторії, є більш ефективний при

малих значеннях помилок аномальних вимірювань, ніж відомі. Вибір для використання розробленого або відомих алгоритмів повинен проводитися, виходячи із апріорних даних про зміст і точнісні характеристики вимірювальної інформації, враховуючи вимоги споживачів до якості вихідних параметрів.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Жданюк В.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978.
2. *Саверсов Ю.С.* Алгоритмы и программы в радиолокации. – М.: Радио и связь, 1985.
3. *Кириченко А.А., Коломийцева Г.А., Логинов В.В. и др.* Оценивание вектора состояния динамической системы при наличии аномальных измерений // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 12.
4. *Кузьмин С.З.* Основы цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974.
5. *Тарн Ци-Йонг, Заборшский В.П.* Практически нерасходящийся фильтр // Ракетная техника и космонавтика. Том 8. – № 6. – 1970.
6. *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП «РАСКО», 1991.

**КОВБАСЮК** Сергій Валентинович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідницького відділу Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– розробка та дослідження радіоелектронних інформаційних систем космічної інфраструктури.

**ПИСАРЧУК** Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри “Комп’ютеризованні системи” Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– розробка та дослідження систем моніторингу космічного простору.

**ПОНОМАРЬОВ** Євген Юрійович – курсант Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– алгоритми обробки експериментальних даних.

Подано 04.07.2003