

М.Ф. Пічугін, к.військ.н., доц.

І.В. Зімчук, к.т.н., ст. викл.

І.О. Канкін, викл.

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

### АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ЧАСТОТИ ДОПЛЕРА В СИСТЕМІ ФАЗОВОГО АВТОМАТИЧНОГО ПІДСТРОЮВАННЯ СУМІСНОЇ РАДІОЛІНІЇ

*На основі операторного методу та теорії інваріантності розроблено алгоритм роботи цифрового фільтра слідкуючого вимірювача частоти, який дозволяє підвищити точність визначення радіальної швидкості в сумісній командно-телеметричній радіолінії. Наведено результати досліджень.*

Світові тенденції, які спостерігаються в космічній галузі, дозволяють зробити висновок про те, що інформаційні можливості космічних систем постійно зростають. Це зумовлює необхідність удосконалення існуючих об'єктів космічної діяльності наземної інфраструктури. Так, зростання роздільної здатності космічних апаратів дистанційного зондування Землі вимагає більш точного прогнозування їх руху. Одним з головних факторів, який впливає на точність прогнозування орбіти КА, є якість результатів вимірювань параметрів траєкторій, отриманих радіотехнічними системами (РТС). У зв'язку з тим, що в Україні балістико-навігаційне забезпечення управління КА здійснюється за однопунктовою технологією, все більша увага приділяється питанням удосконалення багатопараметричних слідкуючих вимірювачів, які забезпечують отримання оцінок декількох параметрів руху [3], [7].

Однією з таких систем є сумісна командно-телеметрична радіолінія (СКТРЛ), яка використовується для вимірювання відстані до КА, його радіальної швидкості та обміну командно-програмною інформацією. Вимірювання радіальної швидкості в СКТРЛ проводиться беззапитним методом, який полягає у вимірюванні доплерівського зсуву частоти сигналу, що прийнятий від КА, за допомогою системи фазового автоматичного підстроювання (ФАП) частоти та подальшим перерахуванням результату в радіальну швидкість. Крім того, отримане значення частоти Доплера використовується як цілевказівка в каналі вимірювання дальності [3]. Однак лінійна модель екстраполяції, яка прийнята в цифровому фільтрі системи ФАП не завжди відповідає закону зміни доплерівського зсуву частоти, що призводить до збільшення динамічних помилок оцінювання параметрів траєкторій КА, особливо коли площина його орбіти проходить через РТС.

Для усунення цього недоліку існує ряд напрямів у розв'язанні задачі оцінювання: мінімакний підхід, принцип адаптації та підхід, оснований на теорії інваріантності [4]. Застосування мінімаксного методу може виявитись недостатнім через відсутність мінімізації помилок оцінювання для всіх умов роботи фільтра, а використанню адаптивних алгоритмів перешкоджає можливість розбіжності процесу адаптації та складність їх аналітичного дослідження [4]. Завдяки тому, що точність оцінювання не залежить від характеристик вхідної дії, на особливу увагу заслуговує підхід, оснований на теорії інваріантності [4]. Інваріантні алгоритми можна побудувати на основі комплексної системи фільтрації, яка має два та більше входів, але це значно обмежує область застосування цих алгоритмів [1]. Інший підхід [5] передбачає відповідну обробку вимірювань та виключення завдяки цьому динамічних помилок оцінювання. Але даний метод не дає змоги синтезувати алгоритми оцінювання тих параметрів, які не підлягають безпосередньому спостереженню. Ця обставина ускладнює застосування їх для оцінювання частоти Доплера в системі ФАП СКТРЛ.

Таким чином, аналіз відомих напрямків досліджень показав, що для розв'язання задачі оцінювання частоти Доплера в системі ФАП СКТРЛ доцільно використовувати методику синтезу інваріантних алгоритмів оцінювання параметрів траєкторій, застосування якої дозволяє виключити динамічні помилки сталого режиму роботи фільтра [6].

У зв'язку з цим метою даної роботи є підвищення точності оцінювання параметрів траєкторій КА за рахунок застосування в системі ФАП СКТРЛ алгоритму цифрової фільтрації частоти Доплера, якому буде притаманна властивість інваріантності відносно вхідної дії.

**Постановка задачі.** Припустимо, що закон зміни частоти Доплера описується системою лінійних різницевих рівнянь:

$$\bar{x}_n = \Phi(1)\bar{x}_{n-1} + B(1)\bar{\varepsilon}_{n-1} \quad (1)$$

де  $\bar{x}_n$  – вектор розмірністю  $k \times 1$ , який складається зі значення частоти Доплера та відповідних похідних;

$\bar{\varepsilon}_n$  – вектор збурень у динаміці зміни частоти розмірністю  $k \times 1$ ;

$\Phi(1)$  – перехідна матриця стану розмірністю  $k \times k$ ;

$B(1)$  – перехідна матриця збурення розмірністю  $k \times 1$ .

Процес вимірювання описується виразом:

$$g(n) = H\bar{x}_n + f(n), \quad (2)$$

де  $H$  – матриця спостереження розмірністю  $1 \times k$ ;

$f(n)$  – некорельована гаусівська помилка вимірювання з нульовим середнім та відомою дисперсією  $R(n)$ , тобто

$$M[f(n)] = 0, \quad M[f(n)f(n-i)] = 0, \quad i > 0,$$

$$M[x(n)f(n)] = 0, \quad R(n) = M[f^2(n)].$$

Необхідно синтезувати алгоритм оцінювання, який задовольняє вимогам інваріантності помилок фільтрації та екстраполяції відносно входньої дії, а також оптимальний за критерієм мінімуму кореляційної матриці помилок оцінювання:

$$P_n = M[\bar{\varepsilon}_n \bar{\varepsilon}_n^T] \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $\bar{\varepsilon}_n = \bar{x}_n - \hat{\bar{x}}_n$  – вектор помилок фільтрації.

**Синтез алгоритмів фільтрації та екстраполяції.** Згідно з методикою синтезу інваріантних алгоритмів оцінювання параметрів траєкторій об'єктів спостереження [6] алгоритми фільтрації та екстраполяції визначаються з рівнянь:

$$A\hat{\bar{x}}_n = (C - B)D\alpha(n), \quad (4)$$

$$\hat{\bar{x}}_e(n) = HF\hat{\bar{x}}_n, \quad (5)$$

де  $\alpha(n) = g(n) - \hat{\bar{x}}_e(n)$  – нев'язка спостереження;  $D$  – матриця розмірністю  $k \times 1$ , елементи якої

відповідають співвідношенню  $d_{k1} = \frac{1}{(k-1)!T^{k-1}}$ ;  $A, B$  – поліноміальні матриці, що визна-

чають точність екстраполяції та фільтрації відповідно;  $C$  – характеристична матриця, яка визначає стійкість фільтра;  $F$  – поліноміальна матриця екстраполяції.

Для усунення динамічних помилок фільтрації та екстраполяції поліноми матриць  $A, B$  визначаються з умов третьої форми досягнення інваріантності [1], [6]:

$$A\bar{x}_n = 0, \quad B\bar{x}_n = 0, \quad A \neq 0, \quad B \neq 0, \quad \bar{x}_n \neq 0 \quad (6)$$

за виразами:

$$a_{kk}(z) = (1 - z^{-1})^{\nu+1-k} (a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}), \quad (7)$$

$$b_{kk}(z) = (1 - z^{-1})^{\nu+1-k} (b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_l z^{-l}), \quad (8)$$

де  $a_m, b_l$  – вагові коефіцієнти, а  $\nu$  – порядок астатизму.

Матриця екстраполяції  $F$  та характеристична матриця  $C$  розраховуються за виразами [6]:

$$F = I - A, \quad (10)$$

$$C = (I - F)^{-1}(A - FB), \quad (11)$$

де  $I$  – одинична матриця.

Розрахунок екстрапольованого значення частоти реалізується шляхом використання оцінок відповідних похідних, застосовуючи рівняння [6]:

$$\Delta^i x(n-j) = \dot{x}(n-j) \frac{T^i}{i!}, \quad (12)$$

де  $\Delta^i$  –  $i$ -та ліва різниця,  $T$  – темп надходження інформації.

Залишаючи другий порядок астатизму системи ( $\nu = 2$ ), для забезпечення високої якості фільтрації випадкових помилок отримаємо алгоритм оцінювання частоти Доплера в системі ФАП СКТРЛ з підвищеною динамічною точністю.

Для цього елементи поліноміальних матриці  $A$ ,  $B$  визначаються з умов (6) за виразами (7), (8) та мають вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} (1 - z^{-1})^2(1 + a_1 z^{-1}) & 0 \\ 0 & (1 - z^{-1})(1 + a'_1 z^{-1}) \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} (b_0 + b_1 z^{-1})(1 - z^{-1})^2(1 + a_1 z^{-1}) & 0 \\ 0 & (b'_0 + b'_1 z^{-1})(1 - z^{-1})(1 + a'_1 z^{-1}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Наявність в елементах поліноміальних матриць, окрім коефіцієнтів  $b_0$ ,  $b'_0$ , інших коефіцієнтів,  $a_1$ ,  $a'_1$ ,  $b_1$ ,  $b'_1$  може дозволяти добиватись зменшення динамічних помилок оцінювання при одночасному збереженні високої якості фільтрації.

Використовуючи матриці (13), (14), у виразах (10), (11) розраховуються матриця екстраполяції  $F$  та характеристична матриця  $C$  замкненої системи:

$$F = \begin{bmatrix} 2z^{-1} - z^{-2} & 0 \\ 0 & z^{-1} \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 - [1 - (1 - z^{-1})^2(1 + a_1 z^{-1})(b_0 + b_1 z^{-1})] & 0 \\ 0 & 1 - [1 - (1 - z^{-1})(1 + a'_1 z^{-1})(b'_0 + b'_1 z^{-1})] \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Підставивши вирази (13), (14) та (15), (16) до співвідношень (4), (5), визначається алгоритм оцінювання частоти Доплера, який має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(n) \\ \hat{\hat{x}}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2 - a_1)\hat{x}(n-1) + (2a_1 - 1)\hat{x}(n-2) - a_1\hat{x}(n-3) \\ (1 - a'_1)\hat{\hat{x}}(n-1) + a'_1\hat{\hat{x}}(n-2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(1 - b_0)\alpha(n) - b_1\alpha(n-1)}{T} \\ \frac{(1 - b'_0)\alpha(n) - b'_1\alpha(n-1)}{T} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Отримавши алгоритм екстраполяції частоти з використанням виразу (12), кінцевий вигляд алгоритмів фільтрації та екстраполяції має такий вигляд:

$$\hat{x}_e(n) = \hat{x}(n-1) + \hat{\hat{x}}(n-1)T - a_1[\hat{\hat{x}}(n-1)T - \hat{\hat{x}}(n-2)T],$$

$$\hat{\hat{x}}_e(n) = \hat{\hat{x}}(n-1) - a'_1[\hat{\hat{x}}(n-1) - \hat{\hat{x}}(n-2)],$$

$$\alpha(n) = g(n) - \hat{x}_e(n),$$

$$\hat{x}(n) = \hat{x}_e(n) + (1 - b_0)\alpha(n) - b_1\alpha(n-1),$$

$$\hat{\hat{x}}(n) = \hat{\hat{x}}_e(n) + \frac{(1 - b'_0)}{T}\alpha(n) - \frac{b'_1}{T}\alpha(n-1).$$

Наведені вирази описують цифровий фільтр, який є системою автоматичного управління зі зворотним зв'язком та постійними коефіцієнтами, що дозволяє застосувати відомі методи аналізу стаціонарних систем для дослідження його характеристик.

**Аналіз характеристик якості фільтра.** Аналіз якості синтезованого алгоритму оцінювання частоти Доплера проведено за відносною дисперсією сумарної (випадкова плюс динамічна) помилки оцінювання в порівнянні з роботою відомого алгоритму послідовного згладжування параметрів лінійної траєкторії ( $\alpha\beta$  - фільтром) [2], аналог якого реалізовано в системі ФАП СКТРЛ. Враховуючи, що система, яка розглядається, лінійна, отримано вираз для відносної дисперсії сумарної помилки оцінювання частоти Доплера:

$$\frac{\sigma_{\Sigma}^2}{\sigma_{ax}^2} = 2I_4 + \varepsilon_{\delta}^2(n),$$

де  $I_4$  - інтеграл Парсеваля 4-го порядку, а  $\varepsilon_{\delta}^2(n)$  - динамічна помилка в сталому режимі роботи. У зв'язку з громіздкістю формул даний матеріал в роботі не наводиться.

У [6] показано, що, позначивши  $b_0 = 1 - \alpha$ ,  $b'_0 = 1 - \beta$ , при  $a_1 = a'_1 = b_1 = b'_1 = 0$  вирази для розробленого алгоритму оцінювання збігаються з алгоритмом  $\alpha\beta$  - фільтра. Враховуючи залежність вагових коефіцієнтів від кількості попередніх вимірів, які використовуються [2]:

$$b_0 = 1 - \frac{2(2n-1)}{n(n+1)}, \quad b'_0 = 1 - \frac{6}{n(n+1)},$$

отримано графіки відносних дисперсій сумарних помилок оцінювання частоти Доплера та її швидкості при постійних значеннях інших коефіцієнтів, які обираються з умов зменшення помилок оцінювання.

Відносні дисперсії сумарних помилок оцінювання частоти Доплера та її швидкості залежно від обсягу пам'яті фільтра, за умови відсутності динамічних помилок оцінювання ( $\varepsilon_d^{(2)}(n)=0$ ), наведені на рис. 1, а залежно від значення відносної другої різниці від вхідної дії  $\frac{\Delta^{(2)}g(n)}{\sigma_{ax}^2}$  при фіксованих коефіцієнтах ( $n=4$ ) – на рис. 2.

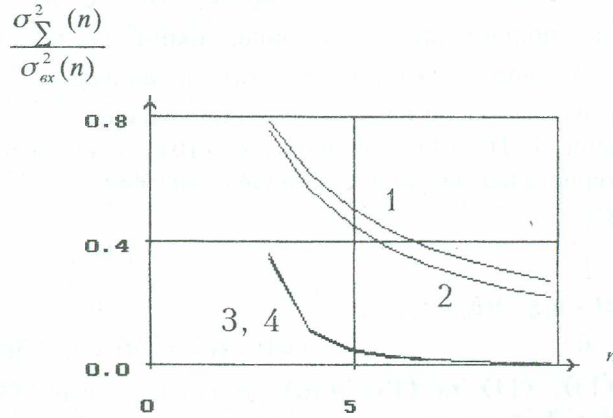


Рис. 1

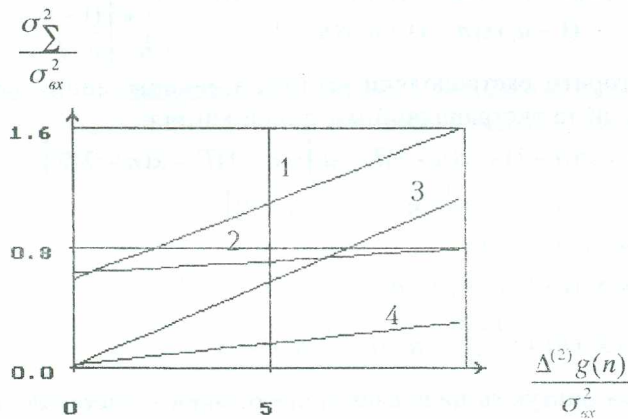


Рис. 2

З графіків видно, що в порівнянні з алгоритмом, реалізованим у СКТРЛ (криві 1, 3), відносна дисперсія помилки оцінювання запропонованого фільтра (криві 2,4) менша як за відсутності (рис. 1), так і за наявності (рис. 2) динамічних помилок, які зумовлені невідповідністю закону зміни частоти Доплера, моделі екстраполяції, яка прийнята у фільтрі.

Таким чином, при використанні отриманого цифрового фільтра в системі ФАП частоти СКТРЛ можливе підвищення точності оцінювання радіальної швидкості та дальності до КА. Підвищення точності визначення параметрів траєкторій КА дозволить забезпечити більшу оперативність та точність прогнозування орбіти, що є актуальним для апаратів з високою роздільною здатністю.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Зайцев Г.Ф., Стеглов В.К. Комбинированные следящие системы. – К.: Техника, 1978. – 263 с.
2. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КВІЦ. – 2000. – 428 с.
3. Крохин В.В. Информационно-управляющие космические радиолнии. – Часть 2. – Москва, 1993. – 214 с.
4. Первачев С.В., Перов А.И. Адаптивная фильтрация сообщений. – М.: Радио и связь, 1991. – 160 с.

5. Пушкарев Ю.А. Анализ и синтез дискретных систем оценивания. – Житомир: ЖВУРЭ, 1989. – 326 с.
6. Пічугін М.Ф., Зімчук І.В., Канкін І.О. Методика синтезу інваріантних алгоритмів оцінювання параметрів траєкторій літальних об'єктів // Вісник ЖДТУ. – 2004. – № 30. С. 76–80.
7. Сильверстов С.Д., Лазарев В.М., Корниенко А.И., Панишин М.И. Точность измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами. – М.: Сов. радио, 1970. – 320 с.

ПІЧУГІН Михайло Федорович – кандидат військових наук, доцент, начальник Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– військова кібернетика.

ЗІМЧУК Ігор Валерійович – кандидат технічних наук, старший викладач Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– алгоритми оцінювання та управління для сучасних інформаційно-керуючих систем.

КАНКІН Іван Олегович – викладач Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– алгоритми оцінювання та управління для сучасних інформаційно-керуючих систем.

Подано 23.09.2004