

УДК 621.396.1

¹Фелікс Михайлович Андрєєв (доктор технічних наук, професор, професор кафедри)²Андрій Віталійович Статкус (кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри)³Сергій Валентинович Ковбасюк (доктор технічних наук, с.н.с., п.н.с. наукового центру)¹Харківський Національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна²Харківський Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна³Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова, Житомир, Україна

ВИБІР ВАРІАНТУ ПОБУДОВИ АЛГОРИТМУ УТОЧНЕННЯ ВИЩИХ ПОХІДНИХ ДАЛЬНОСТІ ДО БАЛІСТИЧНИХ І КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У попередніх роботах авторами розглянуті теоретичні можливості підвищення точності визначення координат та достовірності класифікації балістичних і космічних об'єктів за рахунок визначення вищих похідних дальності до об'єкту спостереження в радіолокаційних станціях надгоризонтного виявлення. Запропоновані рішення базуються на основі реалізації режиму фазотраєкторного накопичення з 32 імпульсів та розширення вектору когерентних вимірювань. Але авторами не було розглянуто рекомендації щодо практичного обрання варіанту побудови алгоритму уточнення вищих похідних дальності, який забезпечує максимальну точність вимірювання координат цілі. Тому метою статті є оцінка впливу розширення векторів когерентних вимірювань радіальних параметрів на точнісні характеристики інформації про балістичні і космічні об'єкти та обрання варіанту побудови алгоритму уточнення вищих похідних дальності. У статті розглянуто модель для дослідження алгоритму уточнення вищих похідних дальності цілі, характеристики порівнюємих варіантів побудови алгоритму, розроблена методика оцінювання точнісних характеристик алгоритму уточнення вищих похідних дальності до цілі та здійснено вибір найкращих варіантів його побудови.

Ключові слова: радіолокаційні станції надгоризонтного виявлення, аналого-цифрова система когерентного оброблення, алгоритм уточнення вищих похідних дальності цілі

Вступ

Постановка проблеми. Згідно Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року передбачається створення в Україні багатофункціональної системи здійснення контролю та аналізу космічного простору із забезпеченням контролю низькоорбітальних космічних об'єктів та підтримкою їх каталогу. Основними вимірювальними засобами контролю космічного простору є радіолокаційні станції (РЛС) надгоризонтного виявлення (НГВ), які єдині вирішують завдання безперервної розвідки космічного простору у широкому діапазоні нахилу орбіт та висот польоту космічних апаратів.

Україна має РЛС НГВ балістичних та космічних об'єктів (БКО) 5Н86-М («Днепр-М»). На даний час актуальною є вимога підвищення точності визначення параметрів траєкторій балістичних і орбіт космічних об'єктів, зважаючи на збільшення кількості космічних об'єктів в навколоземному просторі, підвищення вимог споживачів інформації каталогу космічних об'єктів та застарілість апаратного і програмно-алгоритмічного комплексу існуючої РЛС. Без зміни конструкції РЛС це може бути здійснено за рахунок модернізації комплексного робочого

алгоритму [1], зокрема, модернізації алгоритму когерентного оброблення (АКО). РЛС має в своєму складі аналого-цифрові системи когерентного оброблення (АЦСКО) пачечних сигналів [2], які забезпечують високоточні незалежні вимірювання радіальних швидкості $R^{(1)}$ та прискорення $R^{(2)}$ БКО. Ці виміри використовуються, по-перше, для визначення «ваги» БКО при прийнятті рішення про взяття цілі на супроводження, по-друге, в алгоритмі точного оброблення для підвищення точності оцінювання радіальних та кутових параметрів БКО, що отримані в ході некогерентних вимірювань [3]. Для цього в РЛС існує режим випромінювання і когерентного оброблення пачки з $N = 16$ імпульсів, що отримав назву режиму фазотраєкторного накопичення ФТН-16.

Високоточна інформація АКО дасть можливість підвищити точнісні характеристики, перш за все, алгоритму уточнення вищих похідних дальності (АУВПД) та, як наслідок, алгоритму уточнення кутових швидкостей. Обидва вказаних алгоритми входять до складу алгоритму точного оброблення. Точність вимірювання параметрів траєкторій балістичних і орбіт космічних об'єктів в першу чергу залежить від точності вимірювання кутових швидкостей БКО.

Тому завдання вибору високоточного варіанту побудови АУВПД є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [4] наведені результати теоретичних досліджень точності вимірювання перших трьох похідних дальності БКО. Встановлено, що при $N = 32$ АЦСКО може забезпечити необхідну для практики точність вимірювання третьої похідної дальності до цілі. Зроблено висновок про доцільність введення додаткового режиму ФТН-32, коли $N = 32$, та розширення вектору когерентних вимірювань радіальних параметрів $\bar{R}_{АЦСКО-3} = (\bar{R}^{(1)}, \bar{R}^{(2)}, \bar{R}^{(3)})$, де $\bar{R}^{(3)}$ – оцінка третьої похідної дальності до БКО.

В роботі [5] пропонується додатково використовувати на етапі супроводження (режим С8, коли $N = 8$) не тільки вимірювання $R^{(1)}$, а і вимірювання $R^{(2)}$ та формувати вектор когерентних вимірювань радіальних параметрів.

Однак у відомих роботах не проаналізовано вплив розширення векторів когерентних вимірювань та результуючі точнісні характеристики, а також варіанти алгоритму АУВПД, що задовольняють висунутим вимогам точності координатних вимірювань.

Метою статті є оцінка впливу розширення векторів когерентних вимірювань радіальних параметрів на точнісні характеристики алгоритму уточнення вищих похідних дальності БКО та обрання варіанту його побудови, який забезпечує максимальну точність вимірювання координат.

Виклад основного матеріалу дослідження

Характеристика АУВПД цілі. АУВПД за даними ФТН призначений для оцінювання вектору радіальних параметрів БКО на момент закінчення інтервалу супроводження

$$R_V^{(1)} = (R_V^{(1)}, R_V^{(2)}, R_V^{(3)})^T \quad (1)$$

шляхом об'єднання в траєкторію та згладжування після усунення неоднозначності вимірювань (опорних точок (ОТ)) радіальної швидкості $\bar{R}^{(1)}$, отриманих на виході АЦСКО та відселектованих [3]. Число ОТ, що підлягають згладжуванню, складає $n = \overline{N_{\min}, N_{OT}}$, де $N_{\min} = 5$ – мінімальна кількість ОТ, по яких признається АУВПД, $N_{OT} = 18$ – максимальна кількість ОТ, яка визначається тривалістю інтервалу індивідуального обслуговування БКО $T_{IO} = T_3 + T_C$, де T_3, T_C – тривалість інтервалів захвату і супроводження БКО відповідно, та періодом слідування ОТ, що дорівнює $T_{IO} = 2,62$ с. За весь час T_{IO} режим ФТН-16 по певній цілі признається не більше трьох разів.

За наявності дозволу уточнення вищих похідних дальності за даними АЦСКО спочатку здійснюється перевірка зміщення оцінок за даними АЦСКО режиму ФТН-16, яке виникає за рахунок неоднозначності, що властиве фазовим

вимірюванням. Якщо значення оцінки $\bar{R}_{16}^{(2)}$ режиму ФТН-16 незначно відрізняються від оцінок $\bar{R}_C^{(2)}$ зі складу вектору поточної оцінки параметрів траєкторії цілі R_C , отриманих згладжуванням некогерентних вимірювань, і виконується умова $|\bar{R}_{16}^{(2)} - R_C^{(2)}| \leq 4 \text{ мс}^2$, то для подальшого оброблення замість $\bar{R}_C^{(2)}$ використовуються елементи вектору (1), які отримані за даними АУВПД. Вектори, які сформовані з R_C такою заміною оцінки похідних дальності, називаються векторами ФТН R_Φ .

Крім вектору $R_V^{(1)}$ вихідною інформацією АУВПД є інтервал часу T_{IO} [3]. Оцінки $R_C^{(2)}$ або $\bar{R}_\Phi^{(2)}$ та їх дисперсії використовуються алгоритмом уточнення кутових швидкостей.

Модель для дослідження алгоритму уточнення вищих похідних дальності цілі. Для процесу оцінювання вектору радіальних параметрів БКО характерні такі особливості: по-перше, оцінки кожного з параметрів вектору істотно нерівноточні, так як їх дисперсії $\sigma_1^2(C8) > \sigma_1^2(\text{ФТН}-16) > \sigma_1^2(\text{ФТН}-32)$; по-друге, не в кожній ОТ оцінюється трьохмірний вектор $R_{АЦСКО-3} = (R^{(1)}, R^{(2)}, R^{(3)})$, у більшості ОТ він двомірний; по-третє, кількість ОТ не постійна і є випадковим результатом роботи алгоритму селекції. В цих умовах ефективність залучення незалежних спостережень $R_i^{(2)}$ та $R_i^{(3)}$ до згладжування траєкторії можливо оцінити лише шляхом моделювання процесу уточнення вищих похідних R .

Перелічим зроблені при моделюванні припущення.

1. Пропуск i -ої ОТ в результаті роботи алгоритму селекції розглядається як фіктивне вимірювання з нескінченною дисперсією. Це дозволяє звести згладжування в АУВПД до рівнодискретної схеми згладжування.

2. У штатному АУВПД реалізована схема послідовного згладжування ОТ у відповідності з алгоритмом фільтрації Калмана. Для спрощення моделі воно замінюється згладжуванням фіксованої вибірки (фільтрацією Вінера) на підставі рівної точності результуючих оцінок обох схем на розглядаємих інтервалах [6].

Стосовно до АУВПД траєкторія радіальної швидкості БКО на інтервалі супроводження являє собою поліном третього ступеню

$$R_i^{(1)}(R_V^{(1)}) = \sum_{m=1}^3 R_V^{(m)} (i - N_{OT})^{m-1} T_{IO}^{m-1} / (m-1)! \quad (2)$$

Оцінюванню методом максимальної правдоподібності підлягає вектор параметрів траєкторії радіальної швидкості (1), а точність цієї оцінки повністю визначається кореляційною

матрицею похибок (КМП) вектору параметрів оцінювання K_Y . Згідно з [1, 5] вибірка вимірювань кожного параметру $\{R^{(k)}, k=1,2,3\}$ вектору $\{R_{АЦСКОi}, i=\overline{1, N_{OT}}\}$ є нормальним процесом з некорельованими відліками

$$K_{k,ij} = M\{R_i^{(k)}R_j^{(k)}\} = \delta_{ij}\sigma_{ki}^2; i, j = \overline{1, N_{OT}}, \quad (3)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, а вимірювання параметрів вектору $R_{АЦСКОi}$ у кожний момент часу незалежні, тобто $M\{R_i^{(k)}R_i^{(m)}\} = 0; i = \overline{1, N_{OT}}; k, m = 1, 2, 3$.

Дисперсії вимірювання параметрів визначаються режимом роботи АЦСКО. Вважаємо, що точності оцінок $R_i^{(k)}$ та $R_j^{(k)}$ однакові

$$K_{k,ii} = \sigma_{ki}^2 = \sigma_{kj}^2 = K_{k,ij}, \quad (4)$$

якщо співпадають режими роботи АЦСКО при формуванні i -ої та j -ої ОТ, та обидві ці ОТ пройшли селекцію на вході АУВПД. Внаслідок (3) функція правдоподібності вектору $\bar{R}_Y^{(1)}$ з точністю до константи C записується як [7]

$$L(\bar{R}_Y^{(1)}) = C \exp\left\{-0,5 \sum_{k=1}^3 \Delta \bar{R}_{АЦСКО}^{(k)T} \bar{K}_k^{-1} \Delta \bar{R}_{АЦСКО}^{(k)}\right\}, \quad (5)$$

де $\Delta \bar{R}_{АЦСКО}^{(k)} = \left\| R_i^{(k)} - R_i^{(k)}(\bar{R}_Y^{(1)}) \right\|$ – вектори нев'язок вимірювань $R_i^{(k)}$ зі складу $\bar{R}_{АЦСКОi}$ відносно оцінок цього параметра у відповідності з (2)

$$R_i^{(k)}(R_Y^{(1)}) = \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} R_i^{(1)}(R_Y^{(1)}), \quad (6)$$

$$\bar{K}_k = \left\| K_{k,ij} \right\|, \quad k = 1, 2, 3; \quad i, j = \overline{1, N_{OT}} \quad (7)$$

– КМП вимірювання параметрів вектору $R_{АЦСКО}$. З урахуванням (3) та (4) маємо

$$\bar{K}_k = \text{diag} \left\| K_{k,ij} \right\| = \text{diag} \left\| \sigma_{ki}^2 \right\|, \quad (8)$$

$$k = \overline{1, 3}; \quad i, j = \overline{1, N_{OT}}.$$

Узагальнення звичайної процедури знаходження оцінки методом максимальної правдоподібності [7] на випадок, що розглядається, приводить до формули КМП вектору оцінюємих параметрів $R_Y^{(1)}$ у вигляді

$$\bar{K}_Y = M \left\{ \left(\Delta \bar{R}_Y^{(1)} \right) \left(\Delta \bar{R}_Y^{(1)} \right)^T \right\} = \bar{C}_Y^{-1}, \quad (9)$$

де інформаційна матриця оцінювання $R_Y^{(1)}$ записується як

$$\bar{C}_Y = \sum_{k=1}^3 \bar{J}_k^T \bar{K}_k^{-1} \bar{J}_k, \quad (10)$$

$$\bar{J}_k^T = \left\| \frac{\partial}{\partial (\bar{R}_Y^{(1)})} \left[R_i^{(k)}(\bar{R}_Y^{(1)}) \right]^T \right\| \quad (11)$$

– якобіан перетворення N_{OT} -мірного простору вимірювань k -го параметру вектора $R_{АЦСКО}$ у чотириохмірний простір вектору оцінювання параметрів $R_Y^{(1)}$, матриця розмірності $4 \times N_{OT}$. Реалізація алгоритму (9) забезпечує отримання КМП вектору $R_Y^{(1)}$ за вказаних умов, припущеннях та заданих КМП вимірювань.

Модель дослідження точнісних характеристик АУВПД, крім власно розрахунку КМП варіантів побудови АУВПД, повинна забезпечувати можливість порівняння їх точнісних характеристик. Це досягається заміною КМП сукупністю скалярних (часткових та узагальнених) показників точності [8]. В якості часткових показників точності використовуються дисперсії оцінок параметрів вектора $R_Y^{(1)}$ ν -м варіантом побудови АУВПД $\sigma_{Ym}^2(\nu)$, $m = \overline{1, 4}$. В якості часткового ефекту від його застосування замість самого простого ($\nu = 0$), коли вимірюються тільки радіальні швидкості в режимі С8 та трьох точках ФТН-16, використовуємо відносний виграш в точності оцінювання m -го параметра вектора $R_Y^{(1)}$

$$\xi_m(\nu) = \sigma_{Ym}^2(0) / \sigma_{Ym}^2(\nu); m = \overline{1, 4}, \quad (12)$$

де $\sigma_{Ym}^2(0)$ – дисперсія оцінювання m -го параметра вектора самим простим варіантом побудови АУВПД.

Варіант $\nu = 1$ відповідає штатному режиму функціонування АЦСКО. Необхідність введення узагальнених показників обумовлена неоднозначністю завдання вибору варіанту побудови АУВПД, що забезпечує найвищу точність оцінювання багатомірної величини $R_Y^{(1)}$. В роботі [9] обґрунтовується вибір узагальненого показника Y точності оцінювання багатомірної величини, який враховує усі кореляційні зв'язки параметрів оцінюємого вектору. За допомогою визначника показник Y зв'язаний з КМП оцінюємого вектору

$$Y(\nu) \approx \det K_Y(\nu). \quad (13)$$

Порівняння різних варіантів побудови АУВПД за цим показником еквівалентно порівнянню визначників КМП $R_Y^{(1)}$, що відповідають цим варіантам при інших однакових умовах. В якості ефекту від застосування ν -го варіанту побудови АУВПД використовуємо виграш в точності $z(\nu)$, що оцінюється приведеним узагальненим показником на основі (13)

$$z(\nu) = Y(0) / Y(\nu). \quad (14)$$

Попередній аналіз точності оцінки $R_Y^{(1)}$ показав суттєву її залежність від положення ОТ на осі часу при фіксованому числі вимірювань M . Ця обставина потребує обліку всіх

$$k(M) = C_{N_{OT}-N_{\min}}^{M-N_{\min}} = (N_{OT} - N_{\min})! / (M - N_{\min})!(N_{OT} - M)! \quad (15)$$

варіантів розміщення M ОТ з N_{OT} можливих (C_N^M – число сполучень з N по M).

Формула (15) враховує, що перші N_{\min} ОТ є у кожному розміщенні при будь-якому M . Врахування проведено на основі імовірного підходу до результатів селекції. Він передбачає оцінку математичних сподівань точнісних характеристик (12) і (14) варіантів порівняння побудови АУВПД. Усереднення здійснюється за всіма $k(M)$ розміщеннями при кожному фіксованому значенні M . Для цього необхідно знати закон розподілення кожного з розміщень ОТ при кожному фіксованому значенні M , який визначається характеристиками процесу селекції ОТ у відповідності до алгоритму точного оброблення. Процес селекції ОТ можна розглядати як серію випробувань з позитивним та негативним (пропуск чергової ОТ) результатами, які є незалежними. Імовірності позитивного результату p_i та негативного результату $q_i = 1 - p_i$ в загальному випадку залежать від співвідношення сигнал/шум, розміру стробу, завадо-цільової обстановки в околі траєкторії ОТ. Ці залежності мають суперечливий характер. В якості першого наближення до описання залежності $p_i(i)$ правомірно допустити її сталість у часі на інтервалі індивідуального обслуговування БКО. Передбачаєм також, що імовірності p і q не залежать від розглядаємого ν -го варіанту побудови АУВПД. У цьому випадку модель процесу селекції описується біноміальним законом з рівною імовірністю всіх розміщень M ОТ із N_{OT} , а математичне сподівання точнісних характеристик варіантів АУВПД як функція M представляє собою середнє арифметичне відповідних параметрів, що обчислюється за всіма варіантами розміщення M ОТ з N_{OT} .

Характеристика порівнюємих варіантів побудови алгоритму уточнення вищих похідних дальності цілі. Все різноманіття можливих варіантів побудови АУВПД при викладеній вище організації моделі дослідження може бути представлено набором КМП вимірювань АКО $\{K_k(\nu); k = \overline{1,3}\}$ у відповідності з (9). Точнісні характеристики АЦСКО в різних режимах функціонування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Точнісні характеристики АЦСКО в різних режимах функціонування

Характеристика точності	Режим функціонування (N – кількість імпульсів в пачці)		
	$N=8$	$N=16$	$N=32$
$\sigma_1, \text{ м / с}$	1,0	0,5	0,3

$\sigma_2, \text{ м / с}^2$	2,2	0,5	0,3
$\sigma_3, \text{ м / с}^3$	–	–	0,63

Характеристика пакетів вхідної інформації, що відповідає табл. 1, для порівнюємих варіантів побудови АУВПД наведена в табл. 2. У всіх пакетах ОТ на позиціях 4, 11, 17 відповідають режиму ФТН. Позначення, що використані в табл. 2, мають такий зміст:

$$\begin{bmatrix} 1 (8; 32, 16, 16) \\ 2 (-; 32, 16, 16) \\ 3 (-; 32, -, -) \end{bmatrix} \text{ – символічна характеристика}$$

пакету вхідної інформації $\{R_{АЦСКОi}, i = \overline{1, N_{OT}}\}$ ν -го варіанту побудови АУВПД. Рядки 1, 2, 3 показують в яких режимах отримана вхідна інформація АУВПД по $R^{(1)}, R^{(2)}, R^{(3)}$ відповідно. Перше число в круглих дужках k -го рядка характеризує залучення до згладжування вимірювань $R^{(k)}$ в режимі С8; друге, третє та четверте – вимірювань в режимі ФТН із складу 1-ї, 2-ї та 3-ї ОТ ФТН відповідно.

Пропуск деякого числа в круглих дужках k -го рядка означає відсутність у вхідних даних вимірювань $R^{(k)}$ у відповідному режимі. Варіанти в табл. 2 сформовані таким чином, щоб мати можливість аналізу впливу на точність оцінок АУВПД кожного додаткового вимірювання АЦСКО порівняно з самим простим пакетом вхідних даних (варіант $\nu = 0$). Це обумовлено, по-перше, нерівноцінним вкладом вхідних даних в точність оцінок АУВПД; по-друге, різними витратами на отримання цих вхідних даних.

Таблиця 2

Характеристика пакетів вхідної інформації

№ варіанта	Умовне позначення	№ варіанта	Умовне позначення
0	1 (8; 16, 16, 16) 2 (-; -, -, -) 3 (-; -, -, -)	6	1 (8; 32, 16, 16) 2 (8; 32, 16, 16) 3 (-; 32, -, -)
1	1 (8; 16, 16, 16) 2 (-; 16, 16, 16) 3 (-; -, -, -)	7	1 (8; 16, 32, 16) 2 (-; 16, 32, 16) 3 (-; -, 32, -)
2	1 (8; 16, 16, 16) 2 (8; 16, 16, 16) 3 (-; -, -, -)	8	1 (8; 16, 32, 16) 2 (8; 16, 32, 16) 3 (-; -, 32, -)
3	1 (8; 32, 32, 32) 2 (8; 32, 32, 32) 3 (-; 32, 32, 32)	9	1 (8; 32, 32, 32) 2 (-; -, -, -) 3 (-; -, -, -)
4	1 (8; 32, 16, 16) 2 (-; 32, 16, 16) 3 (-; 32, -, -)	10	1 (8; 32, 16, 16) 2 (-; -, -, -) 3 (-; -, -, -)
5	1 (8; 32, 32, 32) 2 (-; 32, 32, 32) 3 (-; 32, 32, 32)	–	–

Аналіз різних факторів підвищення точності оцінки $R_V^{(1)}$ дозволяє вибрати варіант, переважний за критерієм «ефект-вартість». Під ефектом розуміється вигреш в точності оцінки $R_V^{(1)}$ в сенсі (12) та (14). Вартість $B(v)$ визначається часткою енергетичного ресурсу циклу повільного обзору $B_{ПО}$, що виділяється для реалізації того або іншого режиму функціонування АЦСКО, та відповідними витратами обчислювальних ресурсів $B_{ОК}$ (кількість арифметичних операцій та комірок пам'яті) на когерентне оброблення послідовності N фазових відліків при АКО

$$B(v) = B_{ПО} + B_{ОК} \quad (16)$$

Методика оцінювання точнісних характеристик алгоритму уточнення вищих похідних дальності цілі. Методика оцінювання точнісних характеристик АУВПД передбачає:

1. Задання всіх точнісних характеристик одиничних вимірювань $R_{АЦСКОj}$ у відповідності до табл. 1;

2. Задання v -го варіанту побудови АУВПД шляхом формування діагональних КМП вимірювань АЦСКО $\{K_k(v); k = \overline{1,3}; v = \overline{0,10}\}$ у відповідності до табл. 2;

3. Задання кількості ОТ, які пройшли селекцію, $M = \overline{5,18}$ (або задання пари $(p_{ОТ}, q_{ОТ})$);

4. Перебір усіх варіантів розміщення M ОТ, які визначаються формулою (15);

5. Обчислення для кожного n -го варіанту абсолютних та приведених точнісних характеристик: $\xi_m(v; M, n); n = \overline{1, k(M)}, m = \overline{1, 4}$ у відповідності до (13); $z(\sigma; M, n); n = \overline{1, k(M)}$ у відповідності до (15);

6. Формування середніх показників як функції кількості M вимірювань, що пройшли селекцію,

$$\xi_m(v; M) = (1/k(M)) \sum_{n=1}^{k(M)} \xi_m(v; M, n), \quad (17)$$

$$m = \overline{1, 4}; M = \overline{5, 18}; v = \overline{1, 10};$$

$$z(v; M) = (1/k(M)) \sum_{n=1}^{k(M)} z(v; M, n), \quad (18)$$

$$M = \overline{5, 18}; v = \overline{1, 10}.$$

Аналіз результатів оцінювання точнісних характеристик та вибір варіанту побудови алгоритму уточнення вищих похідних дальності цілі.

Закономірності, що встановлені у поведінці часткових показників $\xi_m(v; M)$, проявляються і у поведінці узагальненого показника $z(v; M)$. Залежність узагальненого показника у значній мірі визначається високоточними вимірюваннями режиму ФТН-32 (їх наявністю, кількістю, розміщенням). Ця залежність монотонно зменшується при $v = 4, 6, 10$ (використовується тільки 1-а ОТ ФТН в режимі ФТН-32) та при $v = 2$ (використовуються вимірювання $R_i^{(2)}$ в режимі С8

та три ОТ ФТН в режимі ФТН-16). Вона монотонно зростає при $v = 7$, коли немає вимірювань $R_i^{(2)}$ в режимі С8 і використовується тільки 2-а ОТ ФТН в режимі ФТН-32. Залежність має точку мінімуму ($M=8$) при $v = 3, 5, 9$ (використовуються всі три ОТ ФТН режиму ФТН-32), а також точку максимуму ($M=7$) при варіанті $v=1$, що відповідає штатному режиму роботи АЦСКО.

За результатами аналізу закономірностей поведінки часткових та узагальнених показників можна зробити висновки відповідності переважності тих чи інших варіантів побудови АУВПД:

1. В цілому вигреш в точності оцінювання похідних дальності у порівнянні зі штатним варіантом побудови АУВПД при $M \leq M_0 = 8$ визначається, головним чином, залученням до згладжування вимірювань $R_i^{(2)}$ в режимі С8, а при $M \geq M_0$ – залученням високоточних вимірювань режиму ФТН-32. Причина цього факту очевидна: при малій кількості вимірювань кожне додаткове, навіть низької точності вимірювання, вносить вагомий вклад в точність результуючої оцінки. Зі збільшенням кількості вимірювань точність результуючої оцінки стає велика настільки, що суттєво підвищити її можуть лише високоточні вимірювання.

2. З точки зору вигрешу в точності найкращим є варіант $v = 3$. Варіанти $v = 1, 2, 7, 8$ – найгірші. Проміжне положення займають варіанти $v = 4, 5, 6$; незначно гірше при малих M варіанти $v = 9, 10$. Цей результат передбачуваний, оскільки зростання вигрешу пропорційно витратам на реалізацію того або іншого варіанту. Однак, примітним є той факт, що рівноцінні з точки зору витрат варіанти $v = 4$ і 7 ; $v = 6$ і 8 проявляють суттєво різну якість оцінок.

Обчислювальні витрати $B_{ОК}$ на реалізацію модернізації АКО, яка неможлива при штатному обчислювальному комплексі, виявляються цілком несуттєвими для модернізованого обчислювального комплексу РЛС НГВ. Тому у функції вартості реалізації v -го варіанту АУВПД (16) ними можна знехтувати та далі вважати, що стримуючим фактором є обмежені енергетичні ресурси циклу повільного обзору РЛС. Тому нераціональними є варіанти $v = 3, 5, 9$.

3. Згідно теорії прийняття рішень процес пошуку розв'язку задачі векторної оптимізації, зокрема, за критерієм «ефект-вартість» складається з двох етапів: виділення зі всієї сукупності розв'язків множини ефективних розв'язків та вибору серед цієї множини найбільш переважного [10]. Застосування методик теорії прийняття рішень до задачі вибору найкращого варіанту побудови АУВПД приводить до діаграми, що зображена на рис. 1 та якісно характеризує варіанти побудови АУВПД в координатах «ефект-вартість». На рис. 1 V_1 відповідає трьом ОТ ФТН-

16; B_2 – одній ОТ ФТН-32 та двом ОТ ФТН-16; B_3 – трьома ОТ ФТ-32.

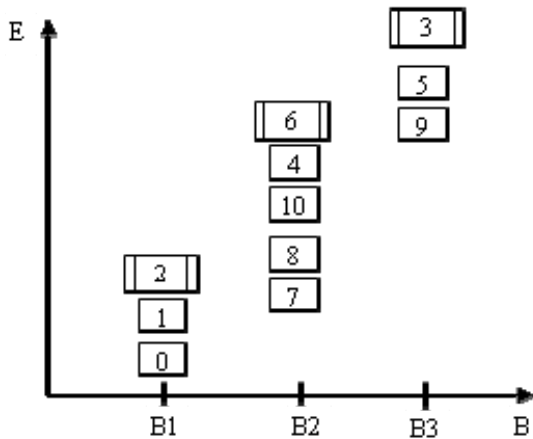


Рис.1. Діаграма характеристики варіантів побудови алгоритму АУВПД

Ефект E визначається показником $z(\nu)$, що отримано шляхом усереднення $z(\nu; M)$ по M . По осі абсцис відкладена вартість B реалізації варіантів, умовно виражений витратами на формування трьох ОТ режиму ФТН. З діаграми на рис. 1 видно, що множину ефективних рішень складають варіанти $\nu = 2, 6, 3$.

Компромісно-оптимальним рішенням є той з варіантів, який забезпечує найвищу точність

Література

1. Андреев Ф. М. Анализ существующих и разработка новых методов определения траекторных параметров космических объектов / Ф. М. Андреев, С. В. Ковбасюк // Известия вузов. Радиоэлектроника. – Киев: НТУУ «КПИ», 1994. – т.37, № 3. – С. 3–8. 2. Андреев Ф. М. Оценка точности измерения радиальных скорости и ускорения цели по данным системы когерентной обработки РЛС / Ф. М. Андреев, А. В. Статкус // Системы управления, навигации та зв'язку, 2012. – вип. 4 (24). – С. 17–24. 3. Изделие 5Н86. Рабочий алгоритм и программа. Техническое описание алгоритма 4П – 00 – 00 – 00. Часть I. – 1985. – 243 с. 4. Статкус А.В. Совместное минимаксное оценивание трех первых производных дальности для системы когерентной обработки РЛС / А. В. Статкус, Ф. М. Андреев // Системы обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2013. – вип. 9 (11). – С. 78–84. 5. Андреев Ф. М. Оценка ошибок измерения радиальных скорости и ускорения цели по данным моделирования / Ф. М. Андреев, А. В. Статкус // Вісник Харківського національного

університету. Серія: «Математичне моделювання, інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – Харків: ХНУ, 2013. – вип. 1086. – С.47–52. 6. Фалькович С. Е. Вторичная обработка сигналов в радиотехнических системах. Учебное пособие / С. Е. Фалькович, И. Г. Ноздрин. – Харьков: ХАИ, 1980. – 59 с. 7. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М.: Сов. Радио, 1974. – 432 с. 8. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с. 9. Андреев Ф. М. Многомерное интервальное оценивание совокупности нормальных параметров при произвольной размерности пространства измерений / Ф. М. Андреев, М. М. Бендерский, А. В. Статкус // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 1992. – т. 35, № 11-12. – С. 1009–1014. 10. Демидов Б. А. Теория и методы военно-научных исследований вооружения и военной техники / Б. А. Демидов. – Харьков: ВИРТА ПВО, 1990. – 558 с.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Розроблена методика оцінювання точнісних характеристик алгоритму уточнення вищих похідних дальності цілі, проведено моделювання та вибір варіантів його побудови дозволяє обрати найкращий варіант оброблення даних вимірювання координат БКО в РЛС НГВ в залежності від завадо-цільової обстановки в зоні огляду. При штатному виділенні енергетичного ресурсу циклу повільного огляду компромісно-оптимальним є варіант 2, при можливості призначення одного режиму ФТН-32 – варіант 6, при можливості призначення трьох режимів ФТН-32 – варіант 3. Такий адаптивний підхід дозволить підвищити точність вимірювання координат БКО та оцінювання траєкторій балістичних і орбіт космічних об'єктів з використанням алгоритму точного оброблення даних вимірювань.

ВЫБОР ВАРИАНТА ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА УТОЧНЕНИЯ ВЫСШИХ ПРОИЗВОДНЫХ ДАЛЬНОСТИ ДО БАЛЛИСТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

¹Феликс Михайлович Андреев (доктор технических наук, профессор, профессор кафедры)

²Андрей Витальевич Статкус (кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры)

³Сергей Валентинович Ковбасюк (доктор технических наук, с.н.с., в.н.с. научного центра)

¹*Харьковский Национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина*

²*Харьковский Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина*

³*Житомирский военный институт им. С. П. Королева, Житомир, Украина*

В предыдущих работах авторами рассмотрены теоретические возможности повышения точности определения координат и достоверности классификации баллистических и космических объектов за счет определения высших производных дальности до объекта наблюдения в радиолокационных станциях надгоризонтного обнаружения. Предложенные решения базируются на основе реализации режима фазотраекторного накопления из 32 импульсов и расширения вектора когерентных измерений. Однако авторами не были рассмотрены рекомендации по практическому выбору варианта построения алгоритма уточнения высших производных дальности, который обеспечивает максимальную точность измерения координат цели. Поэтому целью статьи является оценка влияния расширения векторов когерентных измерений радиальных параметров на точностные характеристики информации о баллистических и космических объектах и выбор варианта построения алгоритма уточнения высших производных дальности. В статье рассмотрены модель для исследования алгоритма уточнения высших производных дальности цели, характеристики сравниваемых вариантов построения алгоритма, разработана методика оценивания точностных характеристик алгоритма уточнения высших производных дальности до цели и осуществлен выбор наилучших вариантов его построения.

Ключевые слова: радиолокационные станции надгоризонтного обнаружения, аналого-цифровые системы когерентной обработки, алгоритм уточнения высших производных дальности цели

DESIGN SUBSTANTIATION FOR THE ALGORITHM OF INCREASING THE ACCURACY OF RANGE HIGHER ORDER DERIVATIVES FOR BALLISTIC AND SPACE TARGETS

¹*Felix M. Andreev (Doctor of Technical Science, Professor, Professor of chair)*

²*Andrei V. Statkus (PhD in Radar and Wireless Systems, Associate professor, Professor of chair)*

³*Sergei V. Kovbasjuk (Doctor of Technical Science, Senior researcher, Leading researcher of research centre)*

¹*V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine*

²*Kharkov National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine*

³*S. P. Korolev Zhitomir Military Institute, Zhitomir, Ukraine*

The theoretical capabilities of increasing the both an accuracy of coordinate estimation and reliability of ballistic and space targets classification by using estimates of range higher order derivatives for surveillance object in early warning radars (EWR) were studied in previous papers of the authors. The solutions proposed there are based on the so called phase trajectory accumulation mode implementation for the coherent train of 32 pulses and widening the vector of coherent measurements. Nevertheless, the recommendations were not considered as to practical design selection for the algorithm of increasing the accuracy of range higher order derivatives (IARHOD algorithm) under the criterion of maximum accuracy of target coordinates estimation. Thus, the paper's aim is the effect evaluation of widening the vectors of the radial parameters coherent measurement on EWR performance as well as the design substantiation for the IARHOD algorithm. In the paper the model was elaborated for the IARHOD algorithm research; the performance was determined for the entire set of the IARHOD algorithm possible versions to be compared; the evaluation technique was developed for the IARHOD algorithm performance; the design substantiation was fulfilled for the best versions of the IARHOD algorithm.

Key words: early warning radar, EWR, hybrid coherent processing system, algorithm of increasing the accuracy of range higher order derivatives

Reference

1. Andreev F.M. Analysis of the existing and new methods development for space object trajectory parameters determination [Analiz sushchiestvuiushchikh i razrabotka novykh mietodov opriedielieniia traiektornykh paramietrov kosmichieskikh obektov] / F. M. Andreev, S. V. Kovbasjuk // Izvestija vuzov. Radioelectronics, 1994. – v.37, No. 3. – PP. 3–8. **2. Andreev F.M.** Evaluation

of measurement accuracy in Doppler and range acceleration for radar coherent processing system [Otsenra tochnosti izmierieniia radialnykh skorosti i uskorieiia tseli po dannym sistiemy obrabotki RLS] / F. M. Andreev, A. V. Statkus // Control, navigation and communication systems, 2012. – No. 4 (24). – PP. 17–24. **3. Item 5N86.** Operational algorithm and programme. Technical specification 4P-00-00-00. Part I [Rabochii algoritm i programma.

- Tiekhnichieskoie opisaniie algoritma 4P-00-00-00. Chast I*. – 1985. – 243 p. **4. Statkus A. V.** Simultaneous minimax MSE estimation of three first range derivatives for radar coherent processing system [*Sovmiestnoie minimaksnoie otsenivaniie triokh piervykh proizvodnykh dalnosti dlia sistemy kogierientnoi obrabotki RLS*] / A. V. Statkus, F. M. Andreev // *Information Processing Systems*. – 2013. – No. 9 (11). – PP. 78–84. **5. Andreev F. M.** Evaluation of measurement accuracy in Doppler and range acceleration using simulation [*Otsenka oshibok izmiereniia radialnykh skorosti i uskorieiia tseli po dannym modelirovaniia*] / F. M. Andreev, A. V. Statkus // *Kharkov National University Bulletin. Section “Mathematical Modeling. Information Technologies. Automated Control Systems”*. – Kharkov: Kharkov National University, 2013. – No. 1086. – PP.47–52. **6. Falkovich S. Ye.** Signal secondary processing in radiotechnical systems. A tutorial [*Vtorichnaia obrabotka signalov v radiotiekhnichieskikh sistemakh. Uchiebnoie posobie*] / S. Ye. Falkovich, I. G. Nozdrin. – Kharkov: Kharkov Aviation Institute, 1980. – 59 p.
- 7. Kuzmin S. Z.** Fundamentals of radar information digital processing theory [*Osnovy tieorii obrabotki radiolokatsionnoi informatsii*] / S. Z. Kuzmin. – Moscow: Sov. Radio, 1974. – 432 p. **8. Kuzmin S. Z.** Fundamentals of radar information digital processing systems design [*Osnovy proektirovaniia sistem tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii*] / S. Z. Kuzmin. – Moscow: Radio and Communications, 1986. – 352 p. **9. Andreev F. M.** Multivariate interval estimation of normal parameters for an arbitrary parameter-space dimensionality [*Mnogomiernoie intervalnoie otsenivaniie sovokupnosti normalnykh paramietrov pri proizvolnoi razmernosti prostranstva izmiereniia*] / F. M. Andreev, M. M. Benderskii, A. V. Statkus // *Radiophysics and quantum electronics*. – 1992. – V. 35. – No. 11-12. – PP. 646-649. **10. Dtmidov B. A.** Theory and methodology of research of weaponry and military technology [*Tieoriia i mietody voienno-nauchnykh issliedovaniia vooruzhenii i voiennoi tiekhniki*] / B. A. Demidov. – Kharkov: Military Engineering Radiotechnical Academy of Air Defence, 1990. – 558 p.