

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОЕТАПНОЇ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

к.т.н. В.Є. Саваневич, А.В. Пугач  
(подав д.т.н., проф. О.І. Сухаревський)

*У статті розглядається методика оптимізації параметрів двоетапної багатоканальної системи виявлення космічних об'єктів (КО), що використовує накопичення енергії сигналів в просторі параметрів траєкторії руху об'єкта.*

**Постановка проблеми.** Інтенсивне використання космічного простору (і з військовими цілями), зменшення габаритів перспективних космічних апаратів, збільшення кількості фрагментів космічного сміття та неможливість нарощування енергетичного потенціалу систем виявлення КО роблять доцільними роботи щодо створення нових та модернізації існуючих систем виявлення. При цьому сучасний стан обчислювальних засобів дозволяє використовувати в системах виявлення метод табуляції функції правдоподібності параметрів траєкторії руху КО в просторі параметрів його траєкторії. Цей метод призначений для роботи в складних умовах цільової обстановки.

**Аналіз літератури.** Для одноцільового випадку була розроблена двоетапна модифікація методу табуляції [1], але питання оптимізації параметрів системи виявлення, що реалізує цей метод, залишилося відкритим. Оскільки безумовно оптимальна за середнім ризиком система є практично нереалізуємою, для мінімізації середніх витрат на отримання рішень із заданими показниками якості в [2] був запропонований інформаційний підхід, а в [3] поставлено задачу синтезу системи визначення стану об'єкта контролю за даним підходом. В [4] розглянуто рішення цієї задачі на прикладі системи виявлення об'єкта за бінарно-квантованими сигналами. Але у всіх згаданих публікаціях не розглядалось питання вибору дискретної моделі простору параметрів траєкторії (ДМПТТ) об'єкта, в якому має здійснюватись виявлення об'єкта з мінімальними витратами та заданою якістю. Отже **мета даної статті** полягає в тому, щоб розробити методику оптимізації як внутрішніх параметрів двоетапної багатоканальної системи виявлення космічних об'єктів, так і оптимального вибору ДМПТТ на етапах виявлення.

**Постановка завдання.** Розглядається засіб спостереження, зона огляду

(ЗО) якого налічує  $V$  елементарних об'ємів розрізнення (ЕОР). Виявлення здійснюється на  $T$  оглядах. Протягом виявлення в ЗО може знаходитись не більше одного об'єкта. У випадку наявності об'єкта, він рухається крізь зону огляду по одній з  $N$  детермінованих траєкторій, параметри яких відомі (відома ДМПТТ). Ап'оріорні ймовірності відсутності об'єкта та його руху по траєкторіях з конкретними параметрами задані. Засіб спостереження зондує ЗО. За результатами зондування приймаються сигнали в ЕОР. Відношення сигнал/шум на оглядах відоме. Сигнали в різних ЕОР зони огляду незалежні один від одного як на різних циклах огляду, так і впродовж одного циклу. Після обробки сигналів в пристроях первинної обробки (ППО) на їх виходах формується сукупність позначок. Сукупність позначок з виходу ППО за всі  $T$  оглядів подається на вхід системи виявлення одночасно.

Система виявлення є багатоканальною та реалізує двоетапну процедуру виявлення, що базується на післяпороговому некогерентному накопиченні енергії сигналів вздовж можливих траєкторій об'єкта. Відповідно до моделі руху об'єкта в зоні огляду на кожному з етапів виділені, в загальному випадку,  $M$  просторово-часових областей (ПЧО), за межі однієї з яких ціль, що перебуває в зоні огляду, не вийде протягом виявлення (такими областями можуть бути, наприклад, можливі площини орбіти космічного об'єкта). Відповідно до простору параметрів траєкторії об'єкта кожній виділеній ПЧО відповідає якийсь набір параметрів (набір діапазонів значень параметрів) можливих траєкторій руху об'єкта. Кожній ПЧО відповідає свій канал виявника. Кожна з  $M_1$  ПЧО каналів першого етапу виявлення об'єднує в собі декілька ПЧО каналів другого етапу. ПЧО  $i$ -го каналу першого етапу ( $i = 1, \dots, M_1$ ) налічує  $V_i^*$  ЕОР. Тож канал першого етапу “відповідає” за якусь групу можливих траєкторій руху об'єкта.

У свою чергу кожен канал виявника другого етапу виявлення “відповідає” за окрему детерміновану траєкторію. Кількість каналів другого етапу виявлення дорівнює кількості можливих траєкторій ДМПТТ, тобто  $M_2 = N$ . ПЧО  $i$ -го каналу другого етапу ( $i = 1, \dots, M_2$ ) налічує  $T$  ЕОР, бо на кожному огляді розмір просторової області (ПО) – лише один ЕОР. Таким чином, об'єднання ПЧО каналів другого етапу виявлення в ПЧО каналів першого етапу можна трактувати як введення байдужості (повної або часткової) за якимсь параметром (або за групою параметрів) траєкторії руху об'єкта.

Система виявлення має порогові пристрої, в яких встановлені рівні вхідних ( $P_{вх1}, P_{вх2}$ ) і вихідних ( $P_{вих1}, P_{вих2}$ ) порогів на першому та другому етапах відповідно. Вхідний поріг другого етапу є власне порогом на виході ППО  $P_{вх2} = P_{ППО}$ .

Двоетапна процедура накопичення та прийняття рішення працює наступним чином. Вся сукупність позначок, сформованих на виході

ППО за Т оглядів, записується до буферу позначок.

**Перший етап виявлення.** В кожному з каналів етапу обробляються лише ті позначки, що належать до ПЧО, за яку “відповідає” даний канал. З позначок, амплітуда яких перевищила  $P_{вх1}$ , формується статистика першого етапу даного каналу. Якщо ця статистика не перевищує  $P_{вих1}$ , приймається рішення „в ПЧО даного каналу об’єкта немає”; якщо ж статистика перевищує  $P_{вих1}$ , приймається рішення „в ПЧО даного каналу може бути об’єкт, необхідно провести другий етап виявлення”. В разі, коли рішення „об’єкта немає” приймається для всіх каналів першого етапу, другий етап виявлення взагалі не проводять і вважається, що в ЗО об’єкта немає.

**Другий етап виявлення.** Проводиться лише для тих каналів другого етапу, що входять до каналів першого етапу, відносно яких було прийнято рішення „в ПЧО даного каналу може бути об’єкт”. При цьому з буферу позначок витягуються позначки, що відносяться до вказаних ПЧО. В каналі другого етапу також обробляються лише ті позначки, що належать до ПЧО, за яку “відповідає” даний канал. З них формується результуюча статистика даного каналу. Якщо ця статистика не перевищує  $P_{вих1}$ , приймається результуюче рішення „в ПЧО даного каналу об’єкта немає”; а якщо перевищує, приймається результуюче рішення „в ПЧО даного каналу є об’єкт” (тобто – „є об’єкт з даними параметрами траєкторії”). Задані вимоги до якості результуючих рішень для будь-якої з можливих траєкторій – умовна ймовірність хибної тривоги (УІХТ)  $F^*$  та умовна ймовірність правильного виявлення (УПВ)  $D^*$ . Крім того протабульовані можливі значення умовної ймовірності проведення другого етапу виявлення у випадку відсутності цілі (УІХТ на виході окремого каналу першого етапу виявлення)  $F_1^*$ .

ПЧО першого етапу виділяють так, щоб вони мали однакові розміри просторових областей (ПО) на всіх оглядах.

Необхідно знайти найкращі параметри системи виявлення:

– розбиття ДМППТ на ПЧО „відповідальності” каналів першого етапу виявлення;

– величини порогів першого ( $P_{вх1}$ ,  $P_{вих1}$ ) та другого ( $P_{вх2}$ ,  $P_{вих2}$ ) етапів.

Вказані параметри мають бути найкращими в тому сенсі, що вони повинні забезпечувати задану якість результуючих рішень синтезованої системи виявлення при найменших середніх витратах  $Z_{сеп}$  на їх прийняття:

$$F_2^* \leq F^*; \quad D_2^* \geq D^*; \quad Z_{сеп} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Недоліком використаного методу табуляції є велика кількість дискрет ДМППТ (каналів), потрібних для його реалізації. Введення двоетапної модифікації значно зменшує їх потрібну кількість, але вона все одно залишається великою. Тому в якості витрат використовується трудомісткість операцій, що

реалізують післяпорогове некогерентне накопичення сигналів, при мінімально можливій кількості дискрет ДМППТ, при якій забезпечуються задані показники якості. При цьому вважається, що вказана мінімальна кількість досягається при максимально можливому розмірі ПО першого етапу виявлення, а розміри вказаних ПО повинні бути рівними на всіх оглядах.

Обрані рівні порогів етапів виявлення будуть визначати значення таких ймовірностей:

$F_1, D_1$  – УІХТ та УІПВ в одному ЕОР на одному огляді для першого етапу виявлення (умовні ймовірності перевищення амплітудою окремої позначки порогу  $\Pi_{\text{вх1}}$  відповідно у випадку відсутності та наявності цілі в ЕОР);

$F_1^*, D_1^*$  – УІХТ та УІПВ в ПЧО для каналу першого етапу виявлення (умовні ймовірності перевищення результуючою статистикою каналу першого етапу виявлення порогу  $\Pi_{\text{вих1}}$  відповідно у випадку відсутності та наявності цілі в ПЧО першого етапу), можуть також трактуватись як умовні ймовірності проведення другого етапу виявлення для даної ПЧО першого етапу у випадку відсутності та наявності цілі відповідно;

$F_2, D_2$  – УІХТ та УІПВ в одному ЕОР на одному огляді для другого етапу виявлення (умовні ймовірності формування окремої позначки на виході ППО відповідно у випадку відсутності та наявності цілі в ЕОР);

$F_2^*, D_2^*$  – УІХТ та УІПВ в ПЧО для каналу другого етапу виявлення (умовні ймовірності перевищення результуючою статистикою каналу другого етапу виявлення порогу  $\Pi_{\text{вих2}}$  відповідно у випадку відсутності та наявності цілі в ПЧО другого етапу).

**Середні витрати системи виявлення.** У відповідності з логікою роботи описаної двоетапної системи виявлення середні витрати на прийняття рішень  $Z_{\text{сер}}$  в області “відповідальності” окремого каналу першого етапу виявлення (в одній ПЧО першого етапу) є сумою

$$Z_{\text{сер}} = K_{\text{запсер}} \cdot Z_{\text{зап}} + K_{1\text{сер}} \cdot z_1 + p_2 \cdot K_{2\text{сер}} \cdot z_2, \quad (2)$$

де  $K_{\text{запсер}}, K_{1\text{сер}}, K_{2\text{сер}}$  – середні кількості записаних до буферу позначок і тих, що обробляються на першому та на другому етапах, відповідно;  $Z_{\text{зап}}, z_1, z_2$  – питомі витрати, пов’язані з записом окремої позначки до буферу та її обробкою на першому та на другому етапах відповідно (є константами алгоритму оптимізації);  $p_2$  – ймовірність проведення другого етапу виявлення.

Оскільки  $\Pi_{\text{вх2}} = \Pi_{\text{ппо}}$ , то середня кількість записаних до буферу позначок

$$K_{\text{запсер}} = \left( p_{0\text{к}} V^* F_2 + p_{1\text{к}} \left( D_2 + (V^* - 1) F_2 \right) \right) T, \quad (3)$$

де  $p_{0\text{к}}, p_{1\text{к}}$  – апіорні ймовірності відповідно відсутності та наявності об’єкта в ПЧО каналу першого етапу виявлення ( $p_{0\text{к}} + p_{1\text{к}} = 1$ );  $V^*$  –

об'єм ПО каналу першого етапу виявлення, що розглядається.

Аналогічний вигляд має вираз для середньої кількості позначок, що обробляються на першому етапі виявлення. Відмінність пов'язана з залежністю від рівня порогу  $\Pi_{\text{вх1}}$ :

$$K_{1\text{сер}} = \left( p_{0\text{к}} V^* F_1 + p_{1\text{к}} \left( D_1 + (V^* - 1) F_1 \right) \right) T. \quad (4)$$

Імовірність проведення другого етапу виявлення залежить від рівня вихідного порогу першого етапу  $\Pi_{\text{вих1}}$  і описується виразом

$$p_2 = p_{0\text{к}} F_1^* + p_{1\text{к}} D_1^*. \quad (5)$$

Середня кількість позначок, що обробляються на другому етапі виявлення, залежить від того, скільки саме траєкторій з ДМПТ “об'єднані” в даному каналі першого етапу виявлення

$$K_{2\text{сер}} = T \cdot \sum_{j=1}^{N_T} (p_{0j} F_2 + p_{1j} D_2), \quad (6)$$

де  $N_T$  – кількість траєкторій, “об'єднаних” в даному каналі першого етапу виявлення;  $p_{0j}, p_{1j}$  – апіорні ймовірності відповідно відсутності та наявності об'єкта, що рухається по конкретній траєкторії з параметрами  $\Theta_j$  ( $p_{0j} + p_{1j} = 1$ ).

Як витікає з (2) – (6), середні витрати на прийняття рішень  $Z_{\text{сер}}$  в області “відповідальності” окремого каналу першого етапу виявлення – є функцією від таких параметрів системи виявлення:

$$Z_{\text{сер}} = f(V^*, \Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}}, \Pi_{\text{вх2}}). \quad (7)$$

**Оптимізацію параметрів багатоканальної двоетапної системи виявлення пропонується проводити в два етапи.**

Спочатку знаходять об'єм типової ПО  $V^*$  для першого етапу виявлення – найбільший допустимий об'єм ПО, для якої забезпечуються вимоги до якості результуючих рішень (1). Водночас для нього розраховують рівні порогів етапів виявлення. Потім визначають розбиття ДМПТ як можливе розміщення типових ПО в ЗО засобу спостереження.

*Оптимізація об'єму типової ПО й відповідних рівнів порогів етапів двоетапної системи виявлення.* Оптимізація здійснюється за рядом критеріїв [5] і являє собою вирішення наступної послідовності часткових оптимізаційних задач для окремого каналу виявлення.

1. Типова ПО для першого етапу виявлення на кожному з оглядів може налічувати від одного до  $V$  ЕОР.

Необхідно визначити найбільший об'єм ПО на огляді  $V^*$ , при якому можуть бути обрані такі параметри порогів системи виявлення, які задо-

вольняють вимогам до якості результуючих рішень, тобто

$$V^* \in 1...V; F_2^* \leq F^*; D_2^* \geq D^*; V^* \rightarrow \max. \quad (8)$$

Критерій оптимізації – максимум об'єму типової ПО  $V^*$ .

2. Заданий об'єм ПО для першого етапу виявлення на кожному з оглядів  $V^*$ . Задані вимоги до якості результуючих рішень  $F^*$ ,  $D^*$ . Значення умовної ймовірності проведення другого етапу виявлення у випадку відсутності цілі  $F_1^*$  може приймати одне з табульованих значень в інтервалі  $F^* \dots C_F$ , де  $C_F$  – деяка константа, задана до початку оптимізації. Рівні порогів (оптимальні) певним чином залежать від значення  $F_1^*$ .

Необхідно вибрати з табульованих таке значення  $F_1^*$ , при якому обрані певним чином параметри  $\Pi_{\text{вх1}}$ ,  $\Pi_{\text{вих1}}$ ,  $\Pi_{\text{вх2}}$ ,  $\Pi_{\text{вих2}}$  дозволять задовольнити вимоги (1). Критерій оптимізації – мінімум цільової функції середніх витрат  $Z_{\text{сер}}$ .

3. Розглядається лише перший етап виявлення. Заданий об'єм ПО для першого етапу виявлення на кожному з оглядів  $V^*$ . Задані вимоги до значень умовної ймовірності хибної тривоги  $F_{1\text{в}}^*$  та правильного виявлення  $D_{1\text{в}}^*$  в ПЧО каналу першого етапу.

Необхідно визначити оптимальні (в смислі забезпечення вимог до якості рішень, що приймаються на першому етапі, з мінімальними середніми витратами) рівні порогів першого етапу  $\Pi_{\text{вх1}}$ ,  $\Pi_{\text{вих1}}$ .

Фактично ця задача містить в собі дві.

3.1. Необхідно визначити найбільший рівень вхідного порогу першого етапу  $\Pi_{\text{вх1}}$ , при якому можуть бути забезпечені вимоги до якості рішень, що приймаються на етапі

$$F_1^* \leq F_{1\text{в}}^*; D_1^* \geq D_{1\text{в}}^*; \Pi_{\text{вх1}} \rightarrow \max. \quad (9)$$

Критерій оптимізації – максимум рівня порогу  $\Pi_{\text{вх1}}$  або мінімум  $F_1$  (див. (4)).

3.2. Додатково до згаданих умов відомий рівень вхідного порогу першого етапу  $\Pi_{\text{вх1}}$ . Таким чином відомий параметр, від якого залежать можливі значення результуючої статистики першого етапу виявлення у випадках наявності або відсутності цілі в ПЧО.

Необхідно визначити рівень вихідного порогу першого етапу  $\Pi_{\text{вих1}}$ , який би забезпечував вимогам до якості рішень, що приймаються на етапі.

Критерій оптимізації – критерій Неймана – Пірсона.

4. Заданий об'єм ПО для першого етапу виявлення на кожному з

оглядів. Відомі параметри першого етапу виявлення  $\Pi_{\text{вх1}}$ ,  $\Pi_{\text{вих1}}$ .

Розглядається другий етап виявлення. (Для аналогії з попередньою задачею можна вважати, що для окремого каналу другого етапу  $V^* = 1$ ). Задані вимоги до якості результуючих рішень – умовні ймовірності хибної тривоги  $F^*$  та правильного виявлення  $D^*$ .

Необхідно визначити оптимальні (в сенсі забезпечення при заданому першому етапі виявлення вимог до якості результуючих рішень при мінімальних середніх витратах на їх отримання) рівні порогів другого етапу  $\Pi_{\text{вх2}}$ ,  $\Pi_{\text{вих2}}$ .

Задача також містить в собі дві, аналогічні попереднім.

$$4.1. \quad F_2^* \leq F^*; \quad D_2^* \geq D^*; \quad \Pi_{\text{вх2}} \rightarrow \max. \quad (10)$$

Критерій оптимізації – максимум рівня порогу  $\Pi_{\text{вх2}}$  або мінімум  $F_2$  (див. (3), (6)).

4.2. Додатково до згаданих умов відомий рівень порогу  $\Pi_{\text{вх2}}$ .

Необхідно визначити рівень вихідного порогу другого етапу  $\Pi_{\text{вих2}}$ , який би забезпечував вимоги до якості результуючих рішень.

Критерій оптимізації – критерій Неймана – Пірсона.

Викладені часткові оптимізаційні задачі є “вкладеними одна в одну”. Тобто розв’язання попередньої задачі неможливе без розв’язання наступної. З іншого боку, результат кожної попередньої оптимізаційної задачі є однією з умов наступної.

Таким чином оптимізація об’єму типової ПО й відповідних рівнів порогів етапів двоетапної системи виявлення є результатом розв’язання всього комплексу вказаних часткових оптимізаційних задач і виконується наступним чином.

Для розв’язання задачі 1 для об’єму ПО в інтервалі  $1 \dots V$  використовується метод дихотомії.

На кожному з кроків дихотомії для отриманого значення об’єму ПО  $V^*$  розраховуються оптимальні (в сенсі забезпечення мінімальних витрат на отримання рішень) рівнів порогів етапів. При цьому  $V^*$  на кожному конкретному кроці дихотомії виступає як константа – умова подальшого розрахунку порогів.

Для кожного конкретного значення об’єму ПО вирішується оптимізаційна задача 2. Тобто виконується перебір всіх табульованих значень умовної ймовірності  $F_1^*$  – ймовірності проведення другого етапу виявлення при відсутності об’єкта в ПЧО першого етапу даного об’єму.

Для кожного зі значень  $F_1^*$  спочатку вирішується оптимізаційна задача визначення рівнів порогів першого етапу виявлення (див. умову

задачі 3). При цьому  $\Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}} = f(V^*, F_1^*)$  знаходять як вирішення часткової оптимізаційної задачі 3, використовуючи методика синтезу інформаційних систем мінімальної складності [3].

Надалі зафіксовані значення  $\Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}}$  використовують як додаткові умови для вирішення оптимізаційної задачі визначення рівнів порогів другого етапу виявлення (задача 4) –  $\Pi_{\text{вх2}}, \Pi_{\text{вих2}} = f(V^*, \Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}})$ . Задача також вирішується за методикою синтезу інформаційних систем мінімальної складності [3], але в якості можливих просторів спостережень, що перебираються, використовують лише ті сукупності амплітуд позначок, які відповідають умові проведення другого етапу виявлення (тобто сформована з них статистика першого етапу перевищила вихідний поріг першого етапу).

За отриманими оптимальними рівнями порогів етапів розраховується значення середніх витрат на прийняття рішень в системі виявлення  $Z_{\text{сер}}$  (2).

Таким чином, для конкретного значення на поточному кроці дихотомії кожному з табульованих значень  $F_1^*$  ставлять у відповідність оптимальні рівні порогів системи виявлення  $(\Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}}, \Pi_{\text{вх2}}, \Pi_{\text{вих2}})$  та розраховане для них значення середніх витрат  $Z_{\text{сер}}$ . З усіх табульованих значень  $F_1^*$  обирають те, якому відповідає  $Z_{\text{сер}} \rightarrow \min$ .

Поточний крок дихотомії вважається завершеним. У результаті нього значенню  $V^*$  поставлені у відповідність  $\Pi_{\text{вх1}}(F_1^*)$ ;  $\Pi_{\text{вих1}}(\Pi_{\text{вх1}}, F_1^*)$ ;  $\Pi_{\text{вх2}}(\Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}}, F^*)$ ;  $\Pi_{\text{вих2}}(\Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}}, \Pi_{\text{вх2}}, F^*)$ ;  $Z_{\text{сер}}(\Pi_{\text{вх1}}, \Pi_{\text{вих1}}, \Pi_{\text{вх2}})$ .

Якщо для даного значення об'єму ПО вдалося знайти рівні порогів, які б забезпечували вимогам щодо якості рішень, то на наступному кроці дихотомії проводять розбиття залишку інтервалу можливих об'ємів ПО в напрямку збільшення об'єму. Якщо ж для даного значення об'єму ПО забезпечити вимоги щодо якості рішень не вдалося, наступний крок дихотомії проводять в напрямку зменшення об'єму.

Обраний таким чином об'єм ПО  $V^*$  вважають надалі типовим об'ємом просторової області першого етапу виявлення. Відповідний типовий канал системи виявлення – виявник, який на першому етапі буде оптимальним в сенсі забезпечення заданих показників якості рішень, що приймаються на першому етапі  $(F_{1\text{в}}^*, D_{1\text{в}}^*)$ . На другому етапі виявник буде умовно оптимальним в сенсі забезпечення заданих показників якості результуючих рішень  $(F^*, D^*)$  з мінімальними середніми витратами на їх отримання при заданому виявнику першого етапу.

*Тепер необхідно знайти ДМППТ руху об'єкта, або, що те саме, най-*



краще повне покриття зони огляду просторово-часовими областями з об'ємом  $V_{\text{обл}}$ , не більшим за типовий

$$V_{\text{обл}} \leq V^* . \quad (11)$$

Під повним покриттям в даному випадку мають на увазі те, що будь-яка з можливих траєкторій руху космічного об'єкта має належати хоча б одній з обраних просторово-часових областей повністю. Покриття може здійснюватись різноманітними способами, наприклад такими, що зображені на рис. 1. Оскільки зобразити дискретизацію в чотирьох-вимірному просторі параметрів складно, зображені варіанти лише для дискретизації в просторі параметрів траверзних кута та дальності  $(\varphi, \rho)$ . Спосіб зображений на рис. 1, а приводить до ДМППТ, яку можна умовно назвати “клаптевою ковдрою”, при цьому всі параметри дискретизуються в межах своїх областей визначення (з урахуванням конкретного значення сукупності параметрів) і крок дискретизації по кожному з параметрів не є постійним. При цьому задовольняють вимогам щодо зменшення кількості каналів, бо майже всі вони можуть бути обрані так, що  $V_{\text{обл}} = V^*$ , але дуже трудомістким буде процес визначення належності отриманої позначки до певної траєкторії.

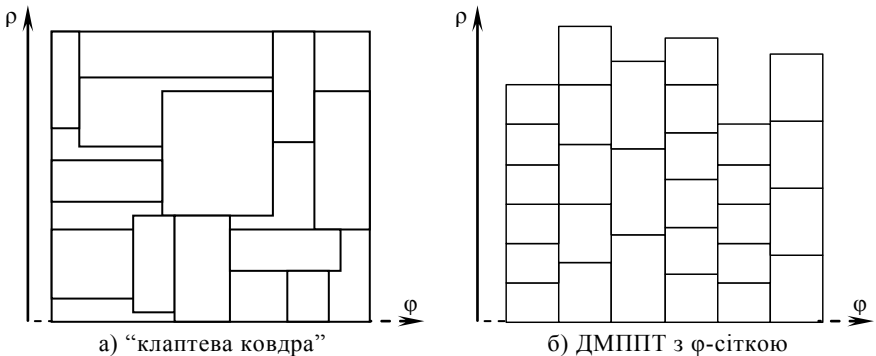


Рис. 1. Можливі способи дискретизації в просторі параметрів траверзних кута та дальності

Характерна ознака способу на рис. 1, б – наявність чіткої сітки дискретизації за траверзним кутом  $\varphi$  з постійним кроком по всій області визначення. Отриману ДМППТ можна назвати “ДМППТ з  $\varphi$ -сіткою”. Крім того крок дискретизації траверзної дальності фіксується для конкретного значення траверзного кута, хоча й може бути різним для різних значень  $\varphi$ . При цьому суттєво менше трудомісткість визначення належ-

ності позначки до конкретного каналу, що дозволяє сподіватись на більшу швидкість обробки.

Тож пошук повного покриття зони огляду ПЧО буде здійснюватись серед таких, що здійснювались другим способом (ДМППТ з ф-сіткою, рис. 1, б) і відповідають наступним обмеженням:

1) параметри траверзного кута траєкторії руху об'єкта  $\varphi$  та його швидкості  $v$  є параметрами, що задаються, тобто розбиття простору параметрів траєкторій за кожним з них здійснюється рівномірно згідно з міркуваннями розробника;

2) параметри траверзної дальності  $\rho$  та початкового положення  $\ell_0$  є параметрами, що визначаються, крок дискретизації за ними залежить від їхньої області визначення для конкретного набору раніше протабульованих параметрів і визначається таким чином, щоб отримані ПЧО задовольняли вимозі (11). Крок дискретизації для цих параметрів буде постійним лише для конкретного значення параметрів, що задаються, але для різних значень параметрів, що задаються, може бути різним.

Алгоритм пошуку оптимальної ДМППТ може виглядати наступним чином.

Визначається ф-сітка, яка буде основою подальшого розбиття простору параметрів траєкторії руху об'єкта.

Вже на цьому етапі забезпечують повне покриття зони огляду виділеними областями, тому пропонується наступна послідовність дій, зображена на рис. 2.

Прямокутна зона огляду засобу спостереження описується колом (щоб домогтись покриття навіть найдовшої з траєкторій руху – діагонали зони огляду) з центром  $O$ .

Вводиться опорна траєкторія  $E_0F_0$ , що має  $\varphi_0 = 0$  (початок ф-сітки) та  $\rho = 0$ .

Виходячи з міркувань щодо задовільних помилок виявлення початкового положення визначається опорне значення  $\Delta\ell_0$  (або ж набір таких опорних значень).

Виходячи зі співвідношення

$$V^* = \Delta\ell_0 \cdot \Delta\rho \quad (12)$$

визначається значення  $\Delta\rho$ . Це значення є висотою виділеної прямокутної області, яка відповідає опорній траєкторії (замальований прямокутник  $ABCD$  на рис. 2).

Для виключення з подальшого врахування крайового ефекту, відстають від верхньої  $BC$  та нижньої  $AD$  меж виділеної області на відс-

тань  $5\sigma$  ( $\sigma$  – величина середнього квадратичного відхилення похибки вимірювання траверсної дальності), проводять умовні межі  $B'C'$  та  $A'D'$ .

Позначають діагоналі зменшеної області  $A'C'$  та  $B'D'$ . Потім проводять умовний поворот всієї виділеної області відносно опорної траєкторії проти годинникової стрілки навколо центру  $O$  доки при оберті діагональ  $B'D'$  не співпадає з положенням, що його до повороту займала діагональ  $A'C'$ . При цьому точки опорної траєкторії  $E_0$  та  $F_0$ , перемістившись по колу будуть відображені як  $E_1$  та  $F_1$ . Так отримане перше значення  $\phi$ -сітки  $\phi_1$ , яке дорівнює значенню кута  $F_1OF_0$ . Далі виконуючи такий же умовний поворот області навколо центру  $O$ , але вже відносно траєкторії  $E_1F_1$ , отримують значення  $\phi_2$ . Цю процедуру, поступово отримуючи значення “вузлів”  $\phi$ -сітки, повторюють до тих пір, доки не ”обійдуть” все коло. При цьому всі  $N_\phi$  значень  $\phi$ -сітки стають відомими та надалі вважаються заданими.

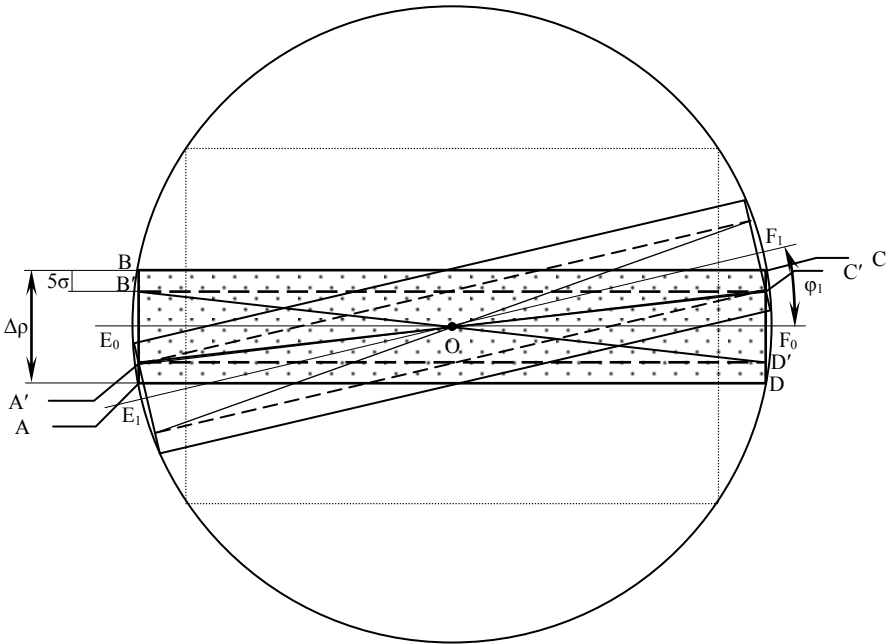


Рис. 2. Визначення  $\phi$ -сітки

Розбиття простору параметрів за швидкістю об’єкта  $v$  задається розробником з таких міркувань, що швидкість об’єкта не є довільною, тож діапазон, в якому можуть перебувати значення швидкості, залежить

від висотного шару, для якого визначається ДМППТ. Надалі всі  $N_v$  значень швидкості вважаються заданими.

Подальша оптимізація ДМППТ полягає у визначенні дискретизації параметрів, що визначаються, для кожних конкретних значень параметрів  $\varphi$  та  $v$ . Тож необхідно обрати дискретизацію для траверсної дальності  $\Delta\rho(\varphi_i)$ ,  $i=1\dots N_\varphi$  та початкового положення  $\Delta l_0(\varphi_i, \rho_j, v)$ ;  $i=1\dots N_\varphi$ ,  $j=1\dots N_\rho(\varphi_i)$ ,  $k=1\dots N_v$  таким чином, щоб, з одного боку, всі отримані в результаті дискретизації просторово-часові області задовольняли вимозі (11), а з іншого, виконувалась умова

$$C_1 Tr + C_2 N_{\text{ПЧО}} \rightarrow \min, \quad (13)$$

де  $C_1, C_2$  – константи, що задаються, виходячи зі співвідношень витрат (трудомісткості) на обробку позначок та на траекторні накопичувачі відповідно;  $Tr$  – трудомісткість обробки позначок;  $N_{\text{ПЧО}}$  – кількість ПЧО для отриманої ДМППТ (або, теж саме, кількість траекторних накопичувачів).

Як бачимо, що (13) можна переписати у вигляді

$$Tr \rightarrow \min; \quad N_{\text{ПЧО}} \rightarrow \min. \quad (14)$$

У свою чергу,

$$N_{\text{ПЧО}} = \sum_{i=1}^{N_\varphi} \sum_{j=1}^{N_\rho(\varphi_i)} \sum_{k=1}^{N_v} N_{l_0}(\varphi_i, \rho_j(\varphi_i), v_k),$$

де  $N_\rho(\varphi_i)$  – кількість дискрет траверсної дальності для значення траверсного кута  $\varphi_i$ ;  $N_{l_0}(\varphi_i, \rho_j(\varphi_i), v_k)$  – кількість дискрет початкового положення об'єкта, що налічує обрана ДМППТ, для траверсного кута  $\varphi_i$ , траверсної дальності  $\rho_j(\varphi_i)$  та швидкості  $v_k$ .

Кількості дискрет для параметрів, що визначаються, обирають, виходячи з геометрії зони огляду (траекторія, що перетинає ЗО по діагоналі, більша за інші і т. ін.), і вони тим більше, чим менші за розміром ПЧО виділяються.

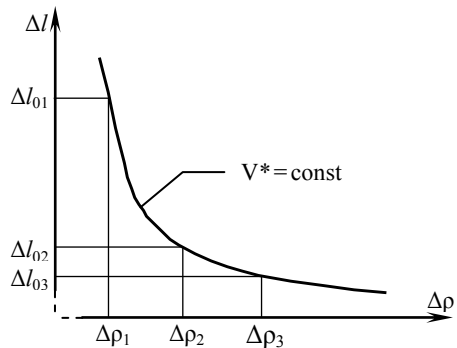


Рис. 3. Залежність між дискретизацією траверсної дальності та початкового положення

Оскільки з (12) витікає залежність між дискретизацією траверсної дальності  $\Delta r$  та початкового положення  $\Delta \ell_0$ , як на рис. 3, тож обирають кілька варіантів пар  $(\Delta r, \Delta \ell_0)$  і для них розраховують трудомісткість обробки та кількість ПЧО.

Потім з обраних залишають лише ту пару  $(\Delta r, \Delta \ell_0)$ , яка задовольняє умові (14).

**Висновки.** Викладена методика дозволить синтезувати таку систему виявлення космічних об'єктів, в якій рішення будуть прийматись з якістю, не меншою за задану, а витрати на прийняття таких рішень будуть мінімальні. Подальше удосконалення вказаної методики може бути пов'язане з урахуванням особливостей (схемних рішень, економічних показників розробки й експлуатації) та обмежень конкретних систем виявлення, що розробляються або вдосконалюються.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Деденок В.П., Писаренко Г.Г., Саваневич В.Е. Обнаружение объектов с локально неизменными параметрами движения // Збірник наукових праць міжнародного симпозиуму «Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів». – Т. 2. – Ч. 1 / За ред. Я.П. Драгана. – Львів – Харків – Тернопіль, 1993. – С. 98 – 104.
2. Саваневич В.Е. Информационный подход к синтезу статистических алгоритмов с минимальной сложностью // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – С. 123 – 128.
3. Саваневич В.Е. Постановка задачи синтеза алгоритмов минимальной сложности // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 4(20). – С. 67 – 69.
4. Саваневич В.Е. Синтез последовательного обнаружителя объекта по бинарно квантованным сигналам // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 5(21). – С. 15 – 22.
5. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: Сов. радио, – 1976. – 280 с.

Надійшла 2.04.2004

**САВАНЕВИЧ Вадим Євгенович**, канд. техн. наук, доцент, докторант ХВУ. В 1986 році закінчив Харківське ВУРЕ. Область наукових інтересів – обробка локаційної інформації, інформетрія.

**ПУГАЧ Андрій Віталійович**, ад'юнкт Харківського військового університету. В 1997 році закінчив ХВУ. Область наукових інтересів – обробка локаційної інформації.

