

Г. Е. Заволодько, Д. Б. Павлова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## МІЖЕТАПНА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ОГЛЯДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

**Анотація.** В роботі проведено синтез та аналіз оптимальної структури обробки даних оглядових радіолокаційних систем спостереження, який показує, що завдяки створенню тимчасової інформаційної бази сигнальних даних на потрібну кількість оглядів радіолокаційної системи спостереження, в кожному елементі якої зберігаються сигнальні дані з показниками якості та параметри їх отримання, вдається здійснити міжетапну наскрізну оптимізацію обробки сигналів, первинної та вторинної обробки даних систем спостереження повітряного простору на основі критерія Неймана-Пірсона та з'являється можливість швидше формулювати підготовку інформаційних повідомлень у межах поточного інформування, що істотно впливає на якість прийнятого рішення. Наведені розрахунки показали, які є переваги в якості обробки даних первинних радіолокаторів в порівнянні з варіантом поєднання даних, який здійснюється на рівні прийняття рішень про виявлення повітряного об'єкта в кожному каналі обробки сигнальних даних, та показує неоднорідність якості прийняття рішення, що визначається як якістю, так і складом інформації, на основі якої приймаються рішення. Таким чином наведена структура призведе до якіснішого аналізу інформації про повітряний простор, який значною мірою забезпечує як безпеку країни, так і безпеку повітряного руху.

**Ключові слова:** обробка радіолокаційних даних, системи спостереження, критерій Неймана-Пірсона, міжетапна оптимізація обробки даних, радіолокаційні системи спостереження, об'єднання даних.

### Вступ

**Постановка проблеми й аналіз літератури.** Система контролю повітряного простору значною мірою забезпечує як безпеку країни, так і безпеку повітряного руху. До основних процедур системи контролю повітряного простору відносяться: аналіз повітряної обстановки в зоні відповідальності та прийняття управлінських рішень. Рішення приймаються на основі аналізу інформації про стан повітряної обстановки в зоні відповідальності. Вірні рішення можливо прийняти тільки у тому випадку, коли є достатньо повна, точна, достовірна та безперервна інформація про повітряну обстановку в зоні управління. Отже, якість прийняття рішення визначається як якістю, так і складом інформації, на основі якої приймаються рішення. Основним джерелом інформації про повітряну обстановку в системі контролю повітряного простору є первинний оглядовий радіолокатор (ПОР), обробка даних якого і є основою для прийняття рішень. Це зумовлює вимогу оптимізації обробки даних ПОР, яке зумовлює міжетапну оптимізацію виявлення траєкторії повітряного об'єкта (ПО).

В значній кількості наукових робіт [1-12] піднімаються питання оптимізації обробки даних ПО. В наведених роботах проведено систематичне введення в теорію, розробку та представлено останні результати досліджень технологій обробки радіолокаційних даних. У них описуються алгоритми, придатні для обробки радіолокаційних даних, які мають загальні математичні основи: вони засновані на динамічному моделюванні системи, фільтрації, статистичному вирішенні, оптимальне управління і теорії управління.

У роботах [7-12] розглянуті різні аспекти оптимальної обробки радіолокаційних сигналів та

даних. Показано, що підхід оптимізації обробки сигналів та даних пропонує істотне поліпшення характеристик в порівнянні з існуючим підходом до обробки радіолокаційних даних.

Запропоновані в роботах [8-11] алгоритми оптимізації продуктивності системи обробки радіолокаційних сигналів дозволяють прогнозувати продуктивність на етапі проектування, а також для об'єднання імовірнісних асоціацій Даних для багатопільового відстеження з використанням розподіленої архітектури відстеження. Роботи [12-13] присвячені спільній оптимізації обробки сигнальних даних і даних первинної обробки в інформаційній мережі первинних радіолокаторів.

**Метою роботи** є синтез оптимальної структури міжетапної обробки даних ПО та аналіз якості обробки даних запропонованою структурою, яка дозволяє здійснити міжетапну оптимізацію обробки даних.

### Результати досліджень

**1. Структура обробки даних оглядових радіолокаційних систем спостереження.** Обробка даних ПОР – це приведення інформації, отриманої від ПОР, до виду можливого для використання. Система обробки даних ПО безпосередньо пов'язана з джерелами сигналів і забезпечує вирішення наступних інформаційних завдань: виявлення та вимірювання параметрів прийнятих сигналів і відсіювання завад; виявлення та вимірювання координат ПО; «зав'язки» виявлених сигналів у траєкторії та визначення параметрів траєкторій; обчислення згладжених та упереджених на фіксований відрізок часу координат ПО.

Складність структури обробки даних ПОР не дозволяє проводити формалізацію та аналіз її роботи в цілому, що потребує розбивки системи обробки

даних ПОР на декілька частин [1-3]. При цьому важливо відмітити, що послідовна процедура обробки даних ПОР приводить до неможливості здійснення міжетапної оптимізації обробки даних і, як наслідок, до зниження якості даних.

Рішення задач обробки даних ПОР призводить до поетапної обробки потоків даних котрі можливо розділити на наступні етапи: обробка сигналів ПОР, первинної обробки даних (ПОД) та вторинної обробки даних. Поточний же вектор стану ПО з відповідною матрицею точності вимірювання координат складається після закінчення ПОД.

Для виконання задач ПОД з ПОР на пристрій обробки даних надходять сигнальні дані, які несуть інформацію про виявлення сигналів, тобто  $x_1 = 1$ , коли в елементі часового дозволу відбулося перевищення порога; а коли ж не відбулося – то  $x_1 = 0$ .

Для сигнальної обробки інформації показниками якості інформаційного забезпечення може бути імовірність правильного виявлення сигналів

$$D_s = f[q_s, F_s = f(z_s) = const], \quad (1)$$

де  $q_s$  – відношення сигнал/шум,  $F_s$  – імовірність хибної тривоги виявлення сигналу,  $z_s$  – аналоговий поріг виявлення сигналу.

Оптимальність рішення задачі виявлення сигналів приймається, як правило, за критерієм Неймана-Пірсона, котрий зводиться до максимізації імовірності правильного виявлення сигналів при обмеженні на імовірність хибного виявлення. Ці дві імовірності і є показниками якості виявлення сигналів. Операції оцінки параметрів сигналів у загальному випадку оптимізується за критерієм мінімуму середнього ризику. Для ПОД показником якості інформаційного забезпечення споживача є імовірність правильного виявлення ПО  $P = D_1$ , котра є функцією

$$D_1 = f(N, C, F_1 = f(N, C, z_s) = const), \quad (2)$$

де  $N$  – пачка прийнятих сигнальних даних,  $C$  – цифровий поріг виявлення ПО.

Рішення про виявлення ПО з показниками якості  $F_1$  та  $D_1$  надходить на вимірювач координат ПО. Оцінка координат миттєвого положення ПО здійснюється одночасно з виявленням ПО. Задача вимірювача координат ПО полягає у тому, щоб на основі аналізу отриманої послідовності нулів та одиниць оцінити оптимальним чином координати ПО.

Для вторинної обробки даних показником якості інформаційного забезпечення споживача є імовірність правильного виявлення траси ПО  $P = D_2$ :

$$D_2 = f(k/R, F_2 = f(k/R, N, C, z_s) = const), \quad (3)$$

де  $k/R$  – логіка прийняття рішення про виявлення траси ПО.

В алгоритмах виявлення траси ПО застосовується метод накопичення вхідних даних. Для вирішення сформульованої задачі виявлювач ПО обробляє дані, що надходять відповідно до деякого алгоритму. Алгоритм виявлення траси ПО зводиться до перевірки гіпотези  $H_0$  про відсутність траси ПО проти альтернативної гіпотези  $H_1$  про її наявності, тобто до утворення співвідношення правдоподібності і

порівняння цієї відносини з якимось заздалегідь заданим числом, яке обирається, виходячи з допустимої імовірності хибної виявлення траси о ПО.

Для вирішення сформульованої в роботі задачі вимірювач координат ПО повинен обробляти дані, котрі надходять у відповідності до деякого алгоритму. Оптимальний алгоритм вимірювання координат синтезується на основі критерія максимальної правдоподібності.

Для вторинної обробки даних показником якості інформаційного забезпечення споживача є імовірність виявлення траєкторії ПО  $P = D_2$ .

Наведені залежності (1-3) показують, що етапна реалізація обробки даних ускладнює наскрізну оптимізацію як виявлення, так і вимірювання координат ПО. Дійсно стабілізація імовірності хибного виявлення ПО повинна здійснюватися аналоговим порогом виявлення сигналу, що складно забезпечити в існуючих системах обробки даних.

**2. Синтез оптимальної структури обробки даних оглядових радіолокаційних систем спостереження.** Інформаційне забезпечення споживачів первинним оглядовим радіолокатором вимагає ОД на всіх етапах обробки. Припустимо, що радіолокатор має  $M$  елементів дозволу за дальністю та має можливість запам'ятовування дані на  $R$  оглядах. В цьому випадку спільна оптимальна обробка даних ПОР може здійснюватися: при об'єднанні рішень на рівні виявлення: ПО; трас ПО.

Проведемо синтез та аналіз структури ОД ПОР для варіантів обробки даних що розглядаються. При цьому будемо вважати, що мається сигнальні дані які надходять від ПОР за  $R$  кругових оглядів простору. В ПОР прийняті сигнали після оптимальної лінійної обробки та детектування порівнюються в пороговому пристрої з пороговою напругою котра визначає імовірність хибної тривоги. Після порогового пристрою на подальшу обробку поступають рішення тобто сигнальні дані. Таким чином, з ПОР споживачу видається сукупність сигнальних даних  $x_1$ , з показниками якості виявлення яке визначається порогом та відношенням сигнал/шум сигналу, що приймається. При такій постановці питання виявлення траси ПО спостерігач має  $R$  матрицю сигнальних даних  $\bar{X} = \|x_{ijr}\|$ , де  $\|x_{ijr}\| = 1$ , коли в елементе часового розділення  $i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}, r = \overline{1, R}$ , котре відповідає просторовому розділенню що розглядається, відбулося перевищення порога; коли ж не відбулося –  $x_{ijr} = 0$ .

Для прийняття рішення про виявлення ПО при сумісній обробці на рівні сигнальних даних піддається обробці сукупність нулів та одиниць  $x_{ijr}$ . Зрозуміло, що  $x_{ijr}$  – випадкова величина, котра відповідає розподілу Бернуллі:

$$P(x_{ijr}) = P_{ijr}^{x_{ijr}} (1 - P_{ijr})^{1-x_{ijr}},$$

де  $P_{ijr}$  – імовірність перевищення порога в  $i$ -му часовому каналі обробки. При відсутності сигналу  $P_{ijr} = F_{ijr}$  – імовірність хибної тривоги, а при наявності ( $P_{ijr} = D_{ijr}$ ) – імовірність виявлення сигналу в ПОР.

Будемо рахувати що на вхід пристрою сумісної обробки усього масиву попередніх рішень, що приймаються надходить сукупність наведених вище імовірних величин. Сумісний розподіл імовірності усіх можливих комбінацій  $x_{ijr}$  як у відсутності, так і при наявності сигналу (гіпотези  $H_0$  и  $H_1$ ), тобто  $P(x_{ijr} | H_0)$  та  $P(x_{ijr} | H_1)$  довірливі, однак відомі. Для кожної конкретної сукупності  $x_{ijr}$  сформуємо відношення правдоподібія:

$$\Lambda = P(x_{ijr} | H_1) / P(x_{ijr} | H_0). \quad (4)$$

Порівняння відношення правдоподібія  $\Lambda$  з порогом котрий визначається за допустимою імовірністю хибної тривоги, забезпечує оптимальне за критерієм Неймана-Пірсона рішення про наявність чи відсутність сигналу  $x_{ijr}$ . Так як шуми в каналах часової обробки незалежні то можливо записати:

$$P(x_{ijr} | H_0) = \prod_{j=1, i=1, r=1}^{M, N, R} P(x_{ijr} | H_0) = \prod_{j=1, i=1, r=1}^{M, N, R} F_{ijr}^{x_{ijr}} (1 - F_{ijr})^{1-x_{ijr}}. \quad (5)$$

При дії сигналу перевищення порогів у каналах обробки - незалежні події. Тоді (4) можливо записати у наступному вигляді:

$$P(x_{ijr} | H_1) = \prod_{i=1, j=1, r=1}^{M, N, R} P(x_{ijr} | H_1) = \prod_{i=1, j=1, r=1}^{M, N, R} D_{ijr}^{x_{ijr}} (1 - D_{ijr})^{1-x_{ijr}}. \quad (6)$$

Враховуючи вирази (5) та (6) вираз (4) можливо записати у наступному вигляду

$$\Lambda = \frac{\prod_{i=1, j=1, r=1}^{M, N, R} D_{ijr}^{x_{ijr}} (1 - D_{ijr})^{1-x_{ijr}}}{\prod_{i=1, j=1, r=1}^{M, N, R} F_{ijr}^{x_{ijr}} (1 - F_{ijr})^{1-x_{ijr}}}. \quad (7)$$

Логарифмуючи вираз (7), отримаємо:

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1, j=1, r=1}^{M, N, R} x_{ijr} (\ln D_{ijr} - \ln F_{ijr}) + (1 - x_{ijr}) [ (1 - \ln D_{ijr}) - (1 - \ln F_{ijr}) ].$$

Коли множники  $x_{ijr}$  позначити як

$$Q_{ijr} = \ln D_{ijr} - \ln F_{ijr} - \ln(1 - D_{ijr}) + \ln(1 - F_{ijr}) = \ln \left( \frac{D_{ijr} (1 - F_{ijr})}{(1 - D_{ijr}) F_{ijr}} \right)$$

та відкинути доданки, що не залежать від  $x_{ijr}$ , то отримуємо оптимальний, за критерієм Неймана-Пірсона, алгоритм виявлення траси ПО при об'єднанні попередніх рішень всіх часових і просторових каналів обробки:

$$L = \sum_{i=1, j=1, r=1}^{M, N, R} Q_{ijr} x_{ijr} \stackrel{\leq}{>} C, \quad (8)$$

де поріг виявлення траси, котрий визначається імовірністю хибного виявлення траси ПО.

Алгоритм (8) отримано для випадку поєднання на рівні виявлення ПО.

Для випадку поєднання рішень на рівні виявлення трас алгоритм можливо записати як

$$L_1 = \sum_{i=1, r=1}^{M, R} Q_{ir} x_{ir} + \sum_{j=1}^N Q_j x_j \stackrel{\leq}{>} C. \quad (9)$$

В обох варіантах обробки даних імовірність виявлення трас ПО оптимізується за рахунок сумісної оптимізації виявлення сигналів, виявлення ПО та виявлення трас ПО, тобто здійснюється оптимізація всіх етапів обробки даних. Для цього повинна бути створення інформаційна база зберігання радіолокаційних даних на необхідне число кругових оглядів радіолокатора, в кожному елементі якої повинні зберігатися сигнальні дані з показниками якості їх отримання.

За виразами (8) та (9) можливо розрахувати імовірність виявлення траси ПО для різних значень відповідних величин та відповідного вирішального правила. При цьому слід зазначити, що для реалізації міжетапної оптимізації обробки даних у відповідності до алгоритмів (8) та (9) повинна бути створена тимчасова інформаційна база сигнальних даних, яка дозволить формулювати підготовку інформаційних повідомлень у межах поточного інформування. Для її функціонування необхідна структура збереження та швидкого доступу до даних з загальним обсягом пам'яті що дорівнює

$$P = M \cdot N \cdot R \cdot k,$$

де  $k$  - розрядність вагового коефіцієнта  $Q_{jr}$ .

**3. Аналіз оптимальної структури обробки даних оглядових радіолокаційних систем спостереження** На рис. 1 и 2 приведено залежності імовірності виявлення траси ПО  $D = f(q, C, k / R, N = 15)$  для обох способів обробки даних (криві, позначені I для цього слід зазначити, що обробки) та різних порогів виявлення ПО та правил виявлення траси ПО при імовірності хибної тривоги виявлення траси ПО котра дорівнює 0,001.

Представлені залежності показують, що при малих порогових значеннях виявлення ПО  $C=5$  кращий існуючий алгоритм обробки даних первинних оглядових радіолокаторів. Так при для логіки обробки 2/3 вигреш в імовірності виявленні ПО становить 0,1 відсоток, а для логіки 3/5 вигреш в імовірності виявлення становить 0,3 відсотка в порівнянні з другим алгоритмом. Однак при підвищенні цифрового порогу прийняття рішення про виявлення ПО ( $C=8$ ) другий метод оптимізації виявлення більш кращий, тому що дозволяє отримати більшу імовірність виявлення траси ПО в порівнянні з існуючим. Дійсно при  $q = 1.28$  імовірність виявлення траси ПО для обох логік обробки даних підвищується.

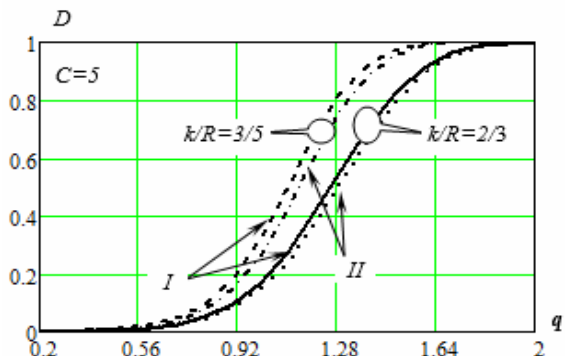


Рис. 1. Імовірність виявлення траси ПО

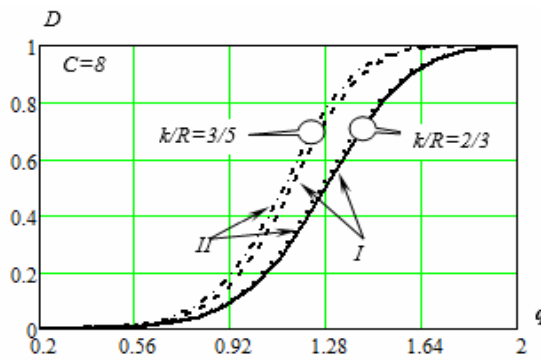


Рис. 2. Імовірність виявлення траси ПО

### Висновки

В роботі отримана інформаційна структура обробки даних первинних радіолокаційних систем, яка

дозволила здійснити міжетапну оптимізацію обробки як сигнальних даних, так і даних первинної і вторинної обробки.

При цьому слід зазначити, що отримана структура спільної оптимальної обробки як сигнальних даних первинного радіолокатора, так і даних первинної і вторинної обробки дозволила реалізувати два способи обробки даних. Наведені розрахунки показали, що для способу обробки даних при якому поєднання даних здійснюється на рівні прийняття рішень про виявлення ПО в кожному каналі обробки сигнальних даних має деякі переваги в якості обробки даних первинних радіолокаторів в порівнянні з використовуваним в даний час варіантом поєднання даних. Все це дозволяє підвищити якість інформаційного забезпечення в системі контролю повітряного простору.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Farina A., Studer F.: Digital radar data processing, Radio i svyaz, Moscow 1993.
2. You, X. Jianjuan, G. Xin. Radar Data Processing with Applications. Publishing House of Electronics Industry. 2016. DOI: 10.1002/9781118956878.
3. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / под ред. С.Г. Пятко и А.И. Краснова. - СПб.: Политехника, 2004. – 446 с.
4. Нахмансон Г. С., Акиншин Д. С. Обнаружение траекторий движущихся прямолинейно воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 61–70. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-61-70
5. H. You, X. Jianjuan, G. Xin. Radar Data Processing with Applications. Publishing House of Electronics Industry. 2016. DOI: 10.1002/9781118956878.
6. Gyuejeong Lee, Seungeui Lee, Kwansung Kim, Nojun Kwak. Probabilistic Track Initiation Algorithm Using Radar Velocity Information in Heavy Clutter Environments. 2018 15th European Radar Conference (EuRAD) . DOI: 10.23919/EuRAD.2018.8546666
7. He You Xiu Jianjuan Guan Xin. Practical Application of Radar Data Processing. 2016. DOI: 10.1002 / 9781118956878.ch19
8. G.A. Ybarra; S.M. Wu; G.L. Bilbro; S.H. Ardalan; C.P. Hearn; R.T. Neece. Optimal signal processing of frequency-stepped CW radar data. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (Volume: 43, Issue: 1, Jan 1995) DOI: 10.1109/22.363002
9. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Maistrenko G., Zavolodko, G., Pavlova, D. Fusion of Airspace Surveillance Systems Data. 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT 2019
10. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Okachova, T., Zavolodko, G. Optimal request signals detection in cooperative surveillance systems. 019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019
11. D. B. Pavlova; G. E. Zavolodko; I. I. Obod; I.V. Svyd; O. S. Maltsev; L. F. Saikivska. Optimizing Data Processing in Information Networks of Airspace Surveillance Systems. 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)
12. Obod, I., Svyd, I., Maltsev, O., Vorgul O., Maistrenko, G., Zavolodko, G. Optimization of Data Transfer in Cooperative Surveillance Systems. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T
13. Strelnytskiy A. A. Data processing optimization in the aerospace surveillance system network / A. A. Strelnytskiy, G. E. Zavolodko / V. A. Andrushevich // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – № 75 (13). – P. 1193-1200.

Received (Надійшла) 25.11.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.01.2021

### Inter-stage optimization of data processing of survey radar system of airspace

G. Zavolodko D. Pavlova

**Abstract.** Work describe a synthesis and analysis of the data processing optimum structure of radar survey systems, thanks to the creation of a temporary information base of signal data for the required number of inspections of the radar observation system, In each element of which signal data with quality indicators and parameters for their production are stored, it is possible to perform cross-stage optimization of signal processing, primary and secondary data processing of air surveillance systems on the basis of the Neumann-criterion Pearson and the possibility to formulate information messages faster within the scope of current information, which significantly affects the quality of the decision made. These calculations showed the advantages of primary radar data processing compared to the combination of data at the level of decision-making on the detection of a gliding object in each signal processing channel, and shows ambiguity in the quality of decision-making, both in quality and in the composition of the information on which decisions are based. In this way, the structure will lead to better analysis of information on air expanse, ensuring to a large extent both the security of the country and the safety of air traffic.

**Keywords:** radar data processing, surveillance systems, Neumann-Pearson criterion, inter-stage optimization of data processing, radar observation systems, data fusing.