

УДК 621.396.61

Д.В. Атаманський, І.І. Обод, Г.С. Залевський

ПОТЕНЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОГО ПОСАДОЧНОГО РАДІОЛОКАТОРА ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ І ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

Наводиться порівняльний аналіз потенційних показників якості виявлення і вимірювання координат повітряних цілей при двох підходах до побудови автоматичних виявлювачів–вимірювачів координат повітряних цілей модернізованого посадочного радіолокатора.

Постановка проблеми та аналіз літератури

Основне призначення посадочного радіолокатора (ПРЛ) зводиться до забезпечення керівника зони посадки радіолокаційною інформацією про повітряну обстановку в зоні відповідальності з метою забезпечення контролю та керування посадкою літака в простих і складних метеоумовах [1]. Складність керування літаком на етапі посадки зумовлює більш високі вимоги до надійності виявлення і вимірювання координат літальних апаратів.

Перехід на цифрову обробку сигналів у ПРЛ і реалізація апаратури первинної обробки інформації (АПОІ), що є на меті при модернізації локатора, дозволяють реалізувати активний режим роботи сумісно з режимом селекції рухомих цілей у кожному з каналів обробки ехо-сигналів. У склад АПОІ [2] входить автоматичний виявлювач–вимірювач координат повітряних цілей. Таким чином, виявлювач сигналів модернізованого ПРЛ в активному режимі є триканальним. Даний факт дозволяє розглядати різні схеми АПОІ. У [3, 4] розглядається варіант побудови виявлювача–вимірювача шляхом об'єднання сигналів каналів і реалізація одного автоматичного виявлювача–вимірювача координат повітряних цілей. При такій реалізації треба враховувати відмінності в параметрах прийнятих сигналів пасивного й активного каналів ПРЛ.

Мета статті – порівняльний аналіз показників якості виявлення і вимірювання координат повітряних цілей посадочним радіолокатором в активному режимі при різній реалізації автоматичних виявлювачів–вимірювачів координат повітряних цілей.

Основний матеріал

У кожному з каналів ПРЛ сигнали, що приймаються, після лінійної обробки і детектування порівнюються у пороговому пристрої (ПП) з порогом. Після ПП на подальшу обробку надходить реалізація $x_i = 1$, якщо в елементі часового розділення

$i = \overline{1, m}$, який відповідає просторовому розділенню, що аналізується, відбулося перевищення порога. Якщо таке перевищення не відбулося, то $x_i = 0$. Для прийняття рішення про наявність або відсутність сигналу при суміщеній міжканальній обробці подається сукупність нулів та одиниць x_i . Очевидно, що x_i – випадкова величина, що підлягає розподілу Бернуллі

$$P(x_i) = P_i^{x_i} (1 - P_i)^{1-x_i}, \quad (1)$$

де P_i – ймовірність перевищення порога в i -му каналі обробки.

За відсутності сигналу $P_i = F_i$ – ймовірність хибної тривоги, а при впливі сигналу $P_i = D_i$ – ймовірність виявлення. При цьому будемо враховувати, що у вторинному каналі посадочного радіолокатора $D_i = P_0 P_i$, де P_0 – коефіцієнт готовності (КГ) відповідача літака (ВЛ) [5].

Завдання обробки сигналів можна розглядати в різних постановках. Дійсно, у виявлювачі, що розглядається, можливе керування пороговою напругою спрацювання вихідного ПП, а також напругою порога каналних ПП. Розглянемо характеристики виявлювача при керуванні величиною порога тільки на вихідному ПП.

Припустимо, що на вхід пристрою сумісної обробки сигналів, що приймаються, надходить сукупність випадкових величин x_i . Сумісні розподіли ймовірностей всіх можливих комбінацій x_i як за відсутності, так і при наявності сигналу (гіпотези H_0 і H_1 відповідно), тобто $P(x_i | H_0)$ та $P(x_i | H_1)$, є довільними, але відомими. Для кожної конкретної сукупності x_i сформуємо відношення правдоподібності:

$$\Lambda = P(x_i | H_1) / P(x_i | H_0). \quad (2)$$

Порівняння Λ з порогом, визначеним за припущеною ймовірністю хибної тривоги, забезпечує оп-

тимальне за критерієм Неймана-Пірсона рішення про наявність або відсутність сигналу.

За умови незалежності шумів у каналах обробки можна записати

$$P(x_1, \dots, x_m | H_0) = \prod_{i=1}^m P(x_i | H_0) = \prod_{i=1}^m F_i^{x_i} (1 - F_i)^{1-x_i}. \quad (3)$$

При впливі сигналу перевищення порогів у каналах обробки є незалежними подіями. Тоді можна записати

$$P(x_1, \dots, x_m | H_1) = \prod_{i=1}^m P(x_i | H_1) = \prod_{i=1}^m D_i^{x_i} (1 - D_i)^{1-x_i}. \quad (4)$$

З урахуванням (3) і (4), вираз (2) можна записати як

$$\Lambda = \prod_{i=1}^m D_i^{x_i} (1 - D_i)^{1-x_i} / \prod_{i=1}^m F_i^{x_i} (1 - F_i)^{1-x_i}. \quad (5)$$

Здійснивши логарифмування (5), отримуємо

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1}^m x_i (\ln D_i - \ln F_i) + (1 - x_i) [\ln(1 - D_i) - \ln(1 - F_i)]. \quad (6)$$

Якщо позначити множники при x_i

$$Q_i = \ln D_i - \ln F_i - \ln(1 - D_i) + \ln(1 - F_i) = \ln(D_i(1 - F_i)/(1 - D_i)F_i) \quad (7)$$

і відкинути складові, що не залежать від x_i , отримуємо оптимальний за критерієм Неймана-Пірсона алгоритм виявлення при об'єднанні попередніх рішень усіх каналів обробки посадочного радіолокатора:

$$L = \sum_{i=1}^m Q_i x_i \stackrel{>}{<} z_0, \quad (8)$$

де z_0 – поріг, що визначається ймовірністю F .

З цього випливає, що сумісна обробка сигналів зводиться до вагового підсумовування одиниць і нулів x_i , які відповідають прийнятим у пасивному й активному каналах обробки попереднім рішенням. Вагові коефіцієнти (7) підвищують роль того каналу, де вище ймовірність D_i і нижче ймовірність F .

Оскільки x_i набувають значень 0 або 1, то ліва частина (8) являє собою суму $n < m$ вагових коефіцієнтів Q_i , і, як наслідок, може набувати лише визначених дискретних значень. Значення порогу z_0 у цьому випадку знаходиться в межах $0 < z_0 < \sum_{i=1}^m Q_i$

для того, щоб, з одного боку, не приймалося завжди тривіальне рішення про виявлення, а з другого – тривіальне рішення про невиявлення. Якщо всі Q_i різні і сума будь-якої групи Q_i не співпадає з сумою будь-якої іншої їх групи, то при різних комбінаціях значень x_i для випадку, що розглядається, можливі три різних правила виявлення.

При фіксованих імовірностях попередніх рішень у каналах обробки F_i і D_i різні правила прийняття рішень дають різні значення ймовірностей F і D . Для того, щоб обрати оптимальне правило, тобто поріг z_0 у (8), отримаємо вирази для ймовірностей хибної тривоги F і виявлення D . Оскільки x_i підлягає розподілу Бернуллі (1) із щільністю $W(x_i) = P\delta(x_i - 1) + (1 - P_i)\delta(x_i)$, то для випадкової величини $z_i = Q_i x_i$ отримаємо щільність імовірності і характеристичну функцію у вигляді

$$W(z_i) = P_i\delta(z_i - Q_i) + (1 - P_i)\delta(z_i), \\ \Theta(u) = P_i \exp(juQ_i) + (1 - P_i).$$

Характеристична функція L – суми незалежних величин (8), тоді

$$\Theta_L(u) = \prod_{i=1}^m \Theta_i(u) = \prod_{i=1}^m [P_i \exp(juQ_i) + (1 - P_i)]. \quad (9)$$

Зворотне перетворення Фур'є дає щільність імовірності L

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^m (1 - P_i)\delta(z) + \sum_{k=1}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \\ \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1}P_{i_2}\dots P_{i_k} \delta\left(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r}\right) \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (10)$$

При зміні k від 1 до m кратність суми в (10) у загальному випадку також змінюється від 1 до m . Оскільки нас цікавить випадок при $m = 3$, отримуємо

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^3 (1 - P_i)\delta(z) + \sum_{i_1=1}^3 P_{i_1}\delta(z - Q_{i_1}) \times \\ \times \prod_{j=1, j \neq i_1}^3 (1 - P_j) + \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=i_1+1}^3 P_{i_1}P_{i_2}\delta[z - (Q_{i_1} + Q_{i_2})] \times \\ \times \prod_{j=1, j \neq i_1, i_2}^3 (1 - P_j) + P_1P_2P_3\delta[z - (Q_1 + Q_2 + Q_3)]. \quad (11)$$

При цьому зауважимо, що в одному з каналів обробки (у другому) присутній КГ ВЛ (у виразі (11) не показаний).

Імовірність хибної тривоги або виявлення отри-
маємо, підставивши в (11) F_i або D_i і проінтегру-
вавши його від z_0 до ∞ . Оскільки $z_0 > 0$, то перший
член (11) не дає внеску в інтеграл, що обчислюється.
Те ж саме відноситься до всіх членів, у яких в аргу-
менті δ -функції $\sum_{r=1}^k Q_{ir} < z_0$. Якщо більше, ближче
до z_0 значення суми вагових коефіцієнтів містить n
складових і дорівнює $\sum_{r=1}^k Q_{ir}$, то ймовірність пере-
вищення порога z_0 може бути записаною у вигляді

$$P = \sum_{k=n}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (12)$$

Наприклад, для випадку $m = 3$ вираз (12) може
бути записаним як $P = P_2 P_3 (1 - P_1) + P_1 P_2 P_3$. З вира-
зу (12) при заданих значеннях F_i , D_i можна обчис-
лити вихідні ймовірності F і D для будь-якого зна-
чення порога z_0 і відповідного йому розв'язуваль-
ного правила. Чим більше z_0 (тобто чим жорсткіше
розв'язувальне правило), тим менше F і D .

Таким чином, оптимізація сумісного виявлення
сигналів ПРЛ зводиться до вибору для сумісної об-
робки одного з розв'язувальних правил, що задоволь-
няють алгоритму (8), і до встановлення однакових
відносних порогів в обох каналах посадочного ра-
діолокатора, що забезпечують такі значення F_i , які
при обраному розв'язувальному правилі дають по-
трібне значення результуючої ймовірності F . Викла-
дене вище дозволяє зобразити структуру автоматич-
ного виявлювача-вимірювача координат у вигляді,
наведеному на рис. 1.

З виходу виявлювача сумісних сигналів ПРЛ по-
слідовність нулів та одиниць надходить на входи
виявлювача і вимірювача координат. Виявлення
повітряної цілі здійснюється шляхом аналізу пачки

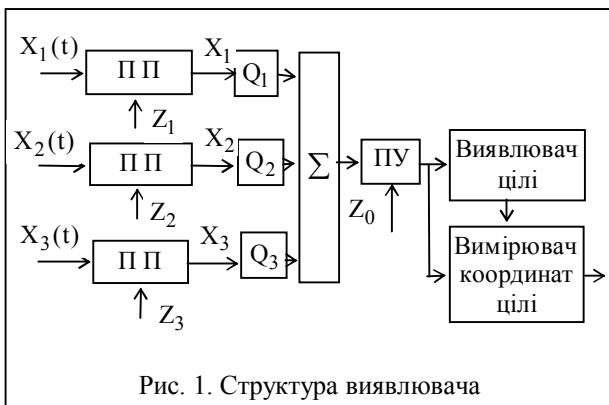


Рис. 1. Структура виявлювача

бінарно-квантованих імпульсів відповідно до алго-
ритму

$$P_{ц} = \sum_{i=k}^M C_M^i P^i (1 - P)^{M-i}, \quad (13)$$

де k – поріг виявлення повітряної цілі, який обира-
ється, як правило, рівним половині числа імпульсів
у пачці M .

Результати розрахунку умовної ймовірності пра-
вильного виявлення повітряної цілі при дробовій
логіці сумісної обробки каналних сигналів і
 $F_{ц} = 10^{-6}$ наведені на рис. 2 (канал глісади) і рис. 3
(канал курсу). На тих же рисунках наведені й криві
виявлення при реалізації автоматичного виявлювача
повітряних цілей відповідно до [2]. Порівняльний
аналіз наведених залежностей показує, що виграш у
пороговому відношенні сигнал–шум виявлювача
повітряних цілей, запропонованого у даній роботі,
досягає $\approx 0,8$ дБ порівняно з рекомендованим.

З виходу виявлювача сумісних сигналів ПРЛ по-
слідовність нулів і одиниць надходить також на вхід
вимірювача координат повітряних цілей. Вимірю-
вання кутових координат, зокрема, здійснюється
шляхом аналізу пачки бінарно-квантованих імпуль-
сів. Дисперсію помилки, що визначає потенційну

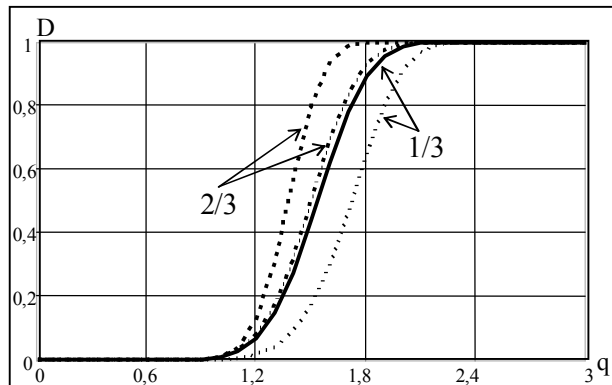


Рис. 2. Імовірність виявлення цілі каналом глісади

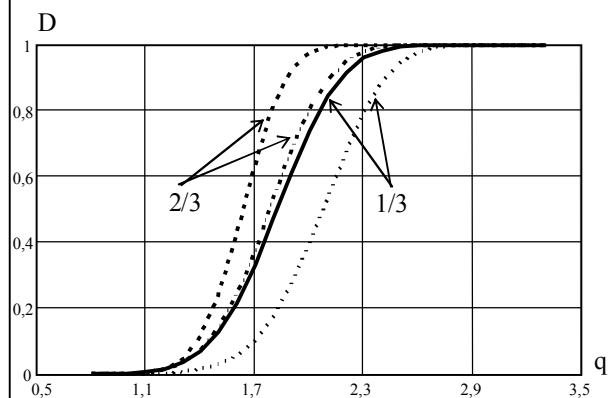


Рис. 3. Імовірність виявлення цілі каналом курсу

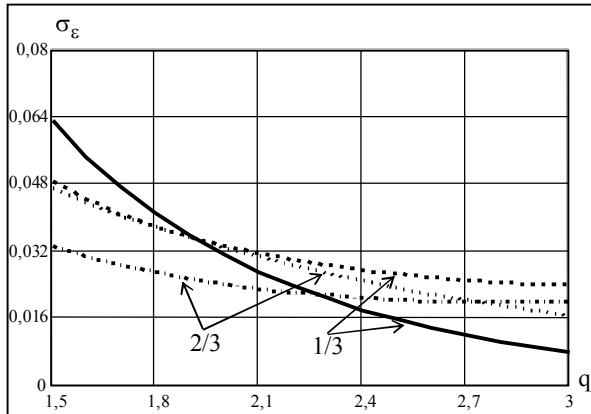


Рис. 4. Помилки вимірювання кута каналом глісади

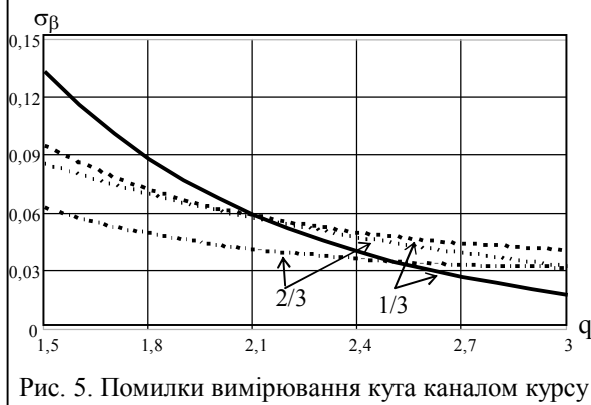


Рис. 5. Помилки вимірювання кута каналом курсу

точність вимірювання кутових координат, можна оцінити за допомогою нижньої межі Рао-Крамера, яка для випадку, що розглядається, визначається відповідно до виразу [6]

$$\frac{\sigma}{\Delta\beta} = \frac{\varphi^2 \exp(z_1^2 / 2)}{2\sqrt{2}z_0 q_0 P_0} \left\{ \sum_{k=1}^{(M-1)/2} g^2(k) \exp(-q_k^2) k^2 I_1(z_1 q_k) B_1 \right\}^{1/2},$$

$$\text{де } B_i = \sum_{i=0}^n \frac{[P_{11}^{1-i}(k) P_{10}^{n-i-1}(k) (i - n P_{11}(k))]^2}{P_0 P_{11}^i(k) P_{10}^{n-i}(k) + (1 - P_0) P_{01}^i (1 - P_{01})^{n-i}};$$

φ – ширина діаграми спрямованості антени ПРЛ;

z_1 – поріг виявлення сигналів у каналах ПРЛ;

n – значність сигналу відповіді;

P_{11} – імовірність виявлення сумісного сигналу;

P_{10} – імовірність пропуску сумісного сигналу;

P_{01} – імовірність хибного виявлення сигналу;

$\Delta\beta$ – кутова відстань між зондуваннями.

Результати розрахунку СКП вимірювання кутової координати ПРЛ при дробових логіках виявлення сумісних сигналів наведені на рис. 4 (канал глісади) і рис. 5 (канал курсу). На тих же рисунках наведено й СКП вимірювання кутових координат вимірювачів, рекомендованих у роботі [2].

Подані залежності показують, що вимірювання кутових координат як запропонованих у даній роботі, так і рекомендованих у [2] вимірювачами здійснюється з практично однаковими СКП.

Висновки

Порівняльний аналіз показників якості виявлення і вимірювання координат повітряних цілей дозволяє зробити висновок, що запропонований автоматичний виявлювач-вимірювач модернізованого ПРЛ є більш ефективним порівняно з рекомендованим у [2].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рысаков Н.Д. Посадочный радиолокатор и устройства отображения РСР-6М2. – Х.: ХВВАУРЭ, 1990. – 123 с.
2. Стандарт СЭВ 3201-81. Аппаратура первичной обработки радиолокационной информации. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 17 с.
3. Обод И.И., Обод А.И. Обнаружение сигналов в посадочном радиолокаторе // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2001. – Вип. 7 (37). – С. 62 – 63.
4. Обод И.И., Обод А.И. Оптимизация обнаружения сигналов в посадочном радиолокаторе // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2002. – Вип. 8. – С. 160 – 163.
5. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦНТИ, 1998. – 119 с.
6. Измерение координат воздушных целей при совместном использовании сигналов первичных и вторичных радиолокаторов / Обод И.И., Гаврутенко А.А. и др. // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2002. – Вип. 1 (39). – С. 77 – 79.

Надійшла 19.09.2005

Рецензент: д-р техн. наук доцент Г.В. Єрмаков, Харківський університет Повітряних Сил.