

УДК 621.371.332.4

Д.А. Гриб, С.В. Яровий, О.Я. Луковський

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСТРОЇВ ДОПЛЕРІВСЬКОЇ СЕЛЕКЦІЇ ЦІЛІ НА ФОНІ ПАСИВНИХ ЗАВАД "АНГЕЛ-ЛУНА"

Описана методика й оцінена ефективність використання пристрою доплерівської селекції цілі на фоні пасивних завад "ангел-луна" за інформаційним критерієм.

Ключові слова: доплерівська частота, "ангел-луна", фазові флуктуації, коефіцієнт розрізнення.

Постановка проблеми та аналіз літератури

У [1] був описаний алгоритм вимірювання доплерівської частоти (ДЧ) сигналу, що є невід'ємною частиною пристроїв виявлення цілей на фоні пасивних завад "ангел-луна" (АЛ). Однак не була оцінена точність вимірювань ДЧ і не були показані переваги використання саме описаних алгоритмів та пристроїв у випадку селекції цілі на фоні завад АЛ над морською поверхнею. При цьому, оскільки розглядається задача селекції сигналу відбитого від цілі не тільки на фоні шумів, але і на фоні відбиттів від АЛ, то виникає задача оцінки ефективності проведення такої селекції.

В [1] описана методика та наведено синтез пристрою вимірювання ДЧ сигналу для випадку локації повітряного об'єкта за межами радіогоризонту. Використовуючи як вихідні дані матеріал роботи [1], є можливість оцінити ефективність синтезованого пристрою за інформаційним критерієм, використовуючи "показник розрізнення" [2, 3]. Доцільність використання як критерію показника розрізнення обґрунтована в [3].

Мета статті – одержати аналітичний вираз, який дозволяє оцінити точність вимірювання ДЧ пристроєм [1]; показати виграв і оцінити ефективність використання запропонованого в [1] пристрою.

Основний матеріал

Експериментальні спостереження, описані в [1], показали, що фазові флуктуації сигналу, відбитого від цілі (літака), та АЛ, що знаходяться над морською поверхнею за межами прямої видимості, розподілені за нормальним законом, а автокореляційна функція має осцилюючий вигляд. При цьому інтер-

вал кореляції фазових флуктуацій сигналу $\tau_k = 0,04, \dots, 0,3$ с. Врахування корельованих складових флуктуацій дозволив у [1] синтезувати оптимальний вимірювач ДЧ сигналу. Для синтезу вимірювача ДЧ луна-сигналу повітряного об'єкта, який знаходиться за межами радіогоризонту, використовувався аналітичний вираз, достатньо точно апроксимуючий автокореляційну функцію реальних фазових флуктуацій цього сигналу. Покажемо перевагу урахування кореляції фазових флуктуацій сигналу для випадку селекції цілі на фоні не тільки шумів, але і відбиттів від АЛ.

З огляду на випадковість просторового положення АЛ, апіорну невизначеність інтенсивності відбитого сигналу і значення доплерівської частоти, у [3] пропонується як інформаційний критерій використовувати показник розрізнення [2].

Показник розрізнення або відстань Бхатачарія s [2, 3], який дозволяє одержати граничні значення імовірностей хибних рішень, розраховується за формулою

$$s = -\ln(\mu), \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт зв'язності або коефіцієнт Бхатачарія [2, 3].

Наприклад, якщо робиться розрізнення двох сигналів s_i та s_j , умовні закони розподілу яких $W(\bar{x}/s_i)$ та $W(\bar{x}/s_j)$, тоді

$$\mu_{ij} = \int_{\Gamma} [W(\bar{x}/s_i)W(\bar{x}/s_j)]^{1/2} d\bar{x}.$$

У [3] показано, що у випадку, якщо розрізнення сигналів s_i та s_j проводиться на фоні нормальних флуктуацій ($W(\bar{x}/s_i)$ та $W(\bar{x}/s_j)$ – гаусові закони розподілу) і середнє значення вимірюваного пара-

метра для сигналу s_i позначити через a_i , а для сигналу s_j – через a_j , то у випадку, коли a_i та a_j не корельовані, для коефіцієнта зв'язності справедливе співвідношення

$$\mu_{ij} = \exp\left\{-\frac{(a_i - a_j)^2}{8\sigma_i\sigma_j}\right\}, \quad (2)$$

де σ_i, σ_j – середньоквадратичні відхилення вимірюваних параметрів сигналів s_i та s_j відповідно. Якщо $\sigma_i = \sigma_j$, що справедливо у випадку, якщо вимірювання параметрів сигналів s_i та s_j проводиться тим самим приладом, співвідношення (2) перетвориться до вигляду

$$\mu_{ij} = \exp\left\{-\frac{(a_i - a_j)^2}{8\sigma^2}\right\}. \quad (3)$$

Стосовно до забезпечення доплерівської селекції цілі на фоні відбиттів від АЛ. З аналізу співвідношень (1) і (3), а також залежності коефіцієнта зв'язності μ_{ij} (рис. 1) і показника розрізнення s (рис. 2) від точності вимірювання ДЧ видно, що підвищення точності вимірювання ДЧ (зменшення дисперсії її вимірювань σ^2) призводить до різкого зростання розрізнення сигналів. Причому дана закономірність виражена тим яскравіше, чим більше відрізняються фактичні (апріорні) значення доплерівських частот сигналів s_i та s_j , тобто чим більше Δa . Так, наприклад, якщо здійснювати вимірювання ДЧ одночасно двома вимірювачами, при цьому, якщо один вимірювач забезпечить вимірювання з точністю σ_1^2 , а інший буде робити вимірювання в (n) раз точніше ($\sigma_2^2 = \sigma_1^2 n^{-1}$), то це дозволить підвищити показник розрізнення в (n) раз:

$$\left(\frac{s_2}{s_1} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = n\right).$$

Отже, для підвищення розрізнення сигналів пристроєм доплерівської селекції необхідно підвищувати точність вимірювань ДЧ сигналу.

Для оцінки точності вимірювань визначимо їх дисперсію. Відповідно до [4] потенційна точність вимірювань ДЧ сигналів, відбитих від надводних об'єктів, визначається виразом

$$\sigma_{\Omega_{\text{онт}}}^2 = \left(\int_{-T/2}^{T/2} \text{tr}(t) dt\right)^{-1}, \quad (4)$$

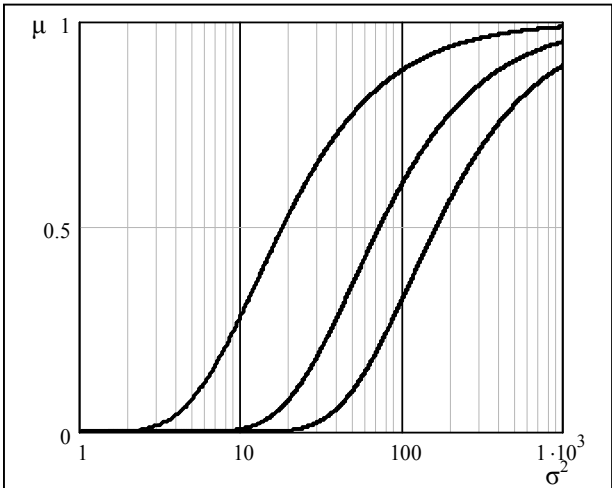


Рис. 1. Графік залежності коефіцієнта зв'язності μ від дисперсії вимірювань параметра; $\Delta a = |a_i - a_j|$ – фактична різниця значень параметрів сигналів s_i та s_j

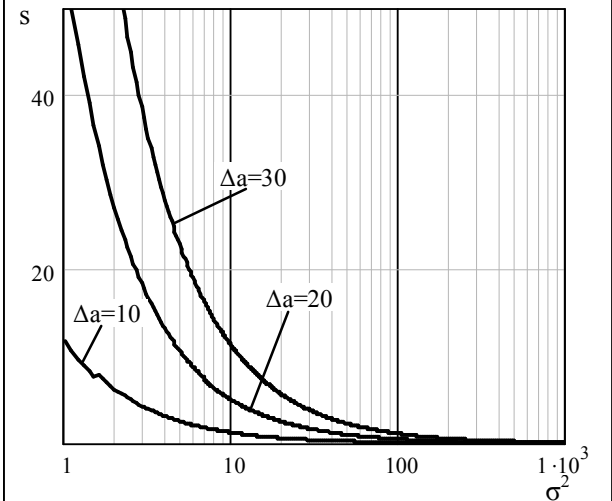


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта розрізнення s від дисперсії вимірювань параметра; $\Delta a = |a_i - a_j|$ – фактична різниця значень параметрів сигналів s_i та s_j

де T – час когерентної обробки;

$$r(t) = \frac{\partial}{\partial \Omega_d} r(t, \Omega_d) - \text{вагова функція, яка знаходиться}$$

із інтегрального рівняння

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(t-s)r(s)ds = t \text{ rect}\left(\frac{t}{T}\right); \quad (5)$$

де $k(t-s)$ – автокореляційна функція фазових флуктуацій сигналу;

$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = 1$ на інтервалі $\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$ та дорівнює 0

при всіх інших значеннях t .

Опускаючи проміжні перетворення, приведемо кінцевий вираз для дисперсії вимірювань ДЧ оптимальним вимірювачем [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2 &= 2\sigma_{\Phi}^2\tau_k^{-1} \times \\ &\times \left\{ \frac{a^3T^3}{12} - \frac{2w_0^2}{a} \frac{Ta + 4(\tau_k a)^{-1}}{\tau_k^{-1}\text{ch}(0,5aT)s + \text{sh}(0,5aT)} \times \right. \\ &\times [0,5T\text{ch}(0,5aT) - a^{-1}\text{sh}(0,5aT)] + \\ &+ T \left[1 + 0,5T\tau_k^{-1} + \right. \\ &\left. \left. + w_0^2 \frac{0,7T\text{ch}(0,5aT) - 0,5a^{-1}\text{sh}(0,5aT)}{\tau_k^{-1}\text{ch}(0,5aT) + \text{sh}(0,5aT)} \right] \right\}^{-1}, \quad (6) \end{aligned}$$

де $\tau_k^{-2} + w_0^2 = a^2$.

Для оцінки ефективності застосування вимірювача ДЧ [1] і одержання чисельних значень величини виграшу W у точності вимірювання ДЧ при використанні у вимірювачі ДЧ алгоритму, оптимального до корельованого шуму фази, стосовно до алгоритму, оптимального до некорельованого шуму (білого шуму), одержимо вираз для дисперсії σ_{Ω}^2 помилки вимірювання ДЧ.

Врахуємо, що кореляційна функція білого шуму описується виразом

$$k_o(t-s) = \frac{N_0}{2} \delta(t-s),$$

де N_0 – спектральна щільність шуму;

$\delta(t-s)$ – дельта-функція.

Вимірювання обома пристроями проводяться на фоні корельованих флуктуацій фази з кореляційною функцією

$$k(t-s) = \sigma_{\Phi}^2 \exp\left\{-\frac{|t-s|}{\tau_k}\right\} \cos w_0(t-s), \quad (7)$$

де σ_{Φ}^2 – дисперсія фазових флуктуацій;

τ_k, μ, w_0, β – параметри, що визначають вигляд кореляційної функції;

$$\tau_k = \tau'_k \mu; \quad \mu = 0, 1, \dots, 10.$$

Для останнього випадку дисперсія оцінки ДЧ буде такою:

$$\sigma_{\Omega}^2 = \frac{144}{T^6} \iint \text{tsk}(t-s) dt ds. \quad (8)$$

Після підстановки (7) у (8) одержимо

$$\begin{aligned} \sigma_{\Omega}^2 &= \frac{\sigma_{\Phi}^2}{T} \frac{9c^2}{m_1} \times \\ &\times \left\{ \frac{4}{3c} - \frac{2c^2}{m_1} \left[\gamma \left(m_7 m_2 - \frac{c^2 m_7}{m_1} m_4 - \gamma + \frac{2c\gamma}{m_1} \right) - \right. \right. \\ &- \frac{1}{c} \left(m_7 m_5 - \frac{c^2 m_7}{m_1} m_5 - \frac{1}{c} + \frac{m_6}{m_1} \right) \left. \right] + \\ &+ \frac{2c^4}{m_1} \left[m_3 \left(m_7 m_5 - \frac{c^2}{m_1} m_7 m_4 - \frac{1}{c} + \frac{m_6}{m_1} \right) - \right. \\ &\left. \left. - \frac{2\gamma}{c} \left(m_7 m_2 - \frac{c^2 m_7}{m_1} m_4 - \gamma + \frac{2c\gamma}{m_1} \right) \right] \right\}. \quad (9) \end{aligned}$$

У співвідношенні (9) прийняті такі позначення:

$$m_1 = 1 + (c\gamma)^2; \quad m_2 = -\frac{1}{c} \sin 2\gamma - \gamma \cos 2\gamma;$$

$$m_3 = \frac{1}{c^2} - \gamma^2; \quad m_4 = m_3 \sin 2\gamma + \frac{2\gamma}{c} \cos 2\gamma;$$

$$m_5 = \frac{1}{c} \cos 2\gamma + \gamma \sin 2\gamma; \quad m_6 = 1 - (c\gamma)^2;$$

$$m_7 = \exp\left\{-\frac{2}{c}\right\}; \quad c = \frac{2\tau_k}{T}; \quad \gamma = w_0 \frac{T}{2}.$$

Використовуючи співвідношення (6) і (9), оцінимо виграш $W = \sigma_{\Omega}^2 / \sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2$ та одержимо чисельні значення показника розрізнення.

Із співвідношень (6) і (9) видно, що виграш залежить від часу когерентної обробки T і параметрів $c = 2\tau_k/T$ та $\gamma = 0,5w_0T$. На рис. 3, 4 наведені графіки цієї залежності. З даних, наведених на рис. 3, випливає, що використання у вимірювачі ДЧ алгоритму, який описано в [1], дозволить підвищити показник розрізнення маловисотного літака, який локується на фоні пасивних завад АЛ над морською поверхнею за межами радіогоризонту, у 1,7...3 рази.

До того ж, аналіз наведених виразів і графіків дозволяє стверджувати, що посилення коливного характеру кореляційної функції фазових флуктуацій (зростання γ) призведе до кращого їх згладжування

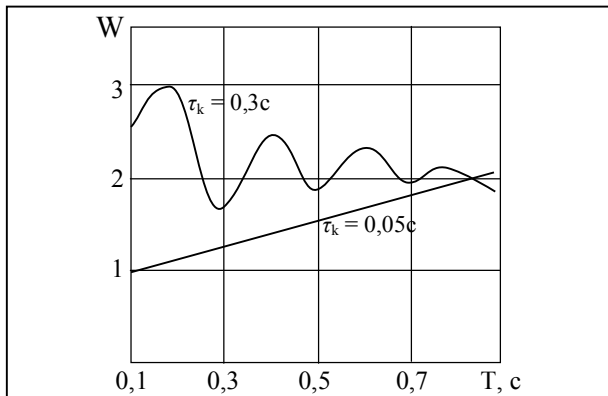


Рис. 3. Графік залежності виграшу W від часу когерентної обробки T

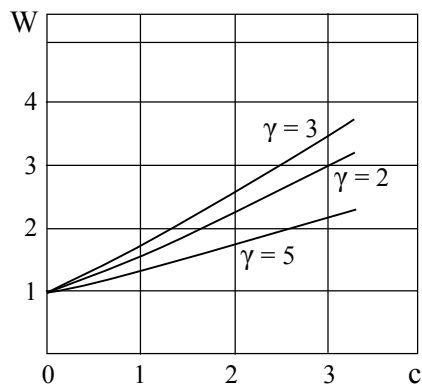


Рис. 4. Графік залежності виграшу W від відносного інтервалу кореляції c

пристроєм, а отже, до зменшення $\sigma_{\Omega_{\text{опт}}}^2$ і підвищення розрізнення сигналів.

Висновки

1. Для підвищення розрізнення сигналів пристроєм доплерівської селекції необхідно підвищувати точність вимірювань ДЧ сигналу.

2. Використання у вимірювачі ДЧ алгоритму, описаного в [1] дозволить підвищити показник розрізнення маловисотного літака, який локується на фоні пасивних завад АЛ над морською поверхнею за межами радіогоризонту, у 1,7...3 рази.

3. Посилення коливного характеру кореляційної функції фазових флуктуацій сигналів призводить до зменшення дисперсії вимірювань ДЧ розглянутим пристроєм, а отже, до підвищення розрізнення повітряних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яровой С.В. Оптимальный алгоритм обнаружения низколетящей надводной цели на фоне “ангел-эхо” за пределами радиогоризонта // Збірник наукових праць ХУ ПС: Науково-практичний збірник. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 3(52). – С. 14 – 19.
2. Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
3. Зюкин В.Ф., Грызо А.А., Андришин В.М. Потенциальные возможности селекции движущихся целей в обзорных РЛС при воздействии нестационарных по мощности пассивных помех // Сборник научных трудов. – Х.: ХГТУРЭ, 2001. – Вып. 117. – С. 3 – 12.
4. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации: Уч. пособ. для вузов. – М.: Сов. радио, 1970. – 559 с.
5. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.

Надійшла 26.04.2006

Рецензент: д-р техн. наук професор В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.