

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАНИЦІ РАО-КРАМЕРА ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ШПИГУНСЬКИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В роботі розглянуто проблему виявлення положення безпілотних літальних апаратів, які оснащені відповідним обладнанням для несанкціонованого отримання конфіденційної інформації на об'єкті інформаційної діяльності. Застосовано границю Рао-Крамера для визначення кута пеленгу шпигунських безпілотних літальних апаратів зі застосуванням кільцевих, дугоподібних та L -подібних антенних решіток для радіопеленгації зі застосуванням методу максимальної правдоподібності та MUSIC. Обчислені границі Рао-Крамера для розташування сигналів по азимуту та для відношення сигнал/шум. Отримано залежність середньоквадратичного відхилення для азимутової та кутової пеленгації в умовах наявності шумів.

Ключові слова: Безпілотний літальний апарат, радіопеленгація, границя Рао-Крамера, оцінка сигналу, кут пеленгу.

Вступ

На теперішній час дуже широке використання отримали безпілотні літальні апарати (БПЛА), які приймають участь в бойових діях, в отриманні конфіденційної інформації через радіоканали, та інше. При цьому керування БПЛА є основним процесом якісної його роботи. Однак, існують методи, за допомогою яких можна виявляти БПЛА з метою перехоплення керування їм, або перехоплення інформації, яку передає БПЛА оператору, який їм керує. Одним з таких методів є радіопеленгація за допомогою антенних решіток, яка дає можливість виявити БПЛА. Так як передача інформації від БПЛА відбувається по радіоканалу, то оцінка кутових координат положення БПЛА, який випромінює радіосигнал, уявляє собою важливу задачу та використовується в багатьох випадках для розділення цілей.

Постановка проблеми

При проведенні конфіденційних та секретних перемовин однією з завдань є забезпечення неможливості здійснення несанкціонованого доступу до приміщень, де ці перемовини відбуваються. Так як на теперішній час існує багато засобів для забезпечення захисту інформації, яка висвітлюється на перемовинах від витоку її через акустичні, віброакустичні канали витоку інформації, через радіоканали та візуальні канали, то зловмисники намагаються створювати нові підходи щодо несанкціонованого проникнення на об'єкти інформаційної діяльності, де оброблюється, приймається та передається конфіденційна інформація. Одним з таких підходів є використання безпілотних літальних апаратів, які оснащені відповідним обладнанням і спроможне знімати інформацію на достатній відстані від приміщення, де відбуваються перемовини і при цьому виявити їх положення є достатньо складною задачею. Так як зчитування конфіденційної інформації з боку безпілотних літальних апаратів відбувається через радіоканали, то актуальною є задача виявлення кута пеленгу, який дозволяє виявити положення шпигунського БПЛА.

Аналіз публікацій

В роботі [1] розглянуто метод оцінки кутових координат джерела радіовипромінювання при дослідженні розділення цілей. При цьому конфігурації гратчастих антен, які були досліджені, тільки в азимутівій площині і відносились до рівномірних лінійних, прямокутних та рівномірних кільцевих гратчастих антен. В роботі [2] для розв'язування задач азимутової та кутової радіопеленгації розглядалися планарні та плоскі гратчасті антени. В роботах [3-4] досліджено визначення порівняльних характеристик радіопеленгації з наддозвілом з використанням оцінки Рао-Крамера для різних конфігурацій гратчастих антен, але для окремих типів антен. Показано, що для зменшення впливу шпигунських БПЛА необхідно провести динамічну зміну форм псевдовипадкової перебудови робочої частоти та фазової маніпуляції сигналів. Показано, що динамічна зміна форми сигналів захищає систему захисту об'єкта інформаційної діяльності від перешкод і здійснює на фізичному рівні

скритність ґратчастих антен для пеленгації шпигунського БПЛА. Недоліком даного підходу є невизначеність в оцінці параметрів сигналу, які є найважливішою складовою в системі захисту. В роботі [5] показано, що точність радіопеленгації залежить від міжелементної відстані, а також від форми ґратчастої антени. В роботах [6] та [7] показано, що L -подібні антени та дугоподібні дають кращі характеристики на відміну від кільцевих.

Мета статті

Метою даної статті є розробка методу виявлення кута пеленгації положення шпигунських безпілотних літальних апаратів, які здійснюють несанкціонований доступ до конфіденційної інформації на об'єкті інформаційної діяльності.

Викладення основного матеріалу

В задачах оцінки сигналів та їх спектрів, які є реалізацією певних класів випадкових процесів, широке використання отримала границя границя Рао-Крамера. Ця границя визначається наступним чином: нехай щільність розподілу ймовірності $p(t, \theta)$ задовольняє умові

$$M\left(\frac{\partial \ln p(t, \theta)}{\partial \theta}\right) = 0, \text{ для довільного } \theta, \quad (1)$$

де $M(\Xi)$ - математичне сподівання випадкової величини Ξ . Тоді, для дисперсії $D(\hat{\theta})$ будь-якої незміщеної оцінки $\hat{\theta}$ виконується нерівність

$$D(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{-M\left(\frac{\partial^2 \ln p(t, \theta)}{\partial \theta^2}\right)}, \quad (2)$$

де похідні обчислюються за справжнім значенням θ . Зрозуміло, що верхня межа незміщеної оцінки $\hat{\theta}$ досягає тоді і тільки тоді, коли

$$\frac{\partial \ln p(t, \theta)}{\partial \theta} = T(\theta)[\varphi(t) - \theta], \quad (3)$$

де $T(\theta)$, $\varphi(t)$ - деякі функції.

Границя Рао-Крамера для довільного скалярного параметра θ визначається нерівністю (2). Якщо оцінка $\hat{\theta}$ належить до класу оцінок з мінімальною дисперсією, то $\hat{\theta} = \varphi(t)$, а мінімальна дисперсія при цьому дорівнює $1/T(\theta)$. Знаменник, що входить в праву частину нерівності (2) називається інформацією по Фішеру

$$T(\theta) = -M\left[\frac{\partial^2 \ln p(t, \theta)}{\partial \theta^2}\right]. \quad (7)$$

Основний метод виявлення БПЛА полягає в використанні ґратчастих антен (ГА), за допомогою яких визначається кут пеленгу, який дає можливість отримати координати положення БПЛА. На рисунку 1 зображено ґратчасту антену, яка складається з n ґрат.

Припустимо, що на ГА надходить вузькосмуговий сигнал, математичне представлення якого має вид

$$S(t) = A(t) \sin(\omega_0 t + \nu(t)), \quad (8)$$

де ω_0 - несуча частота, а $A(t)$, $v(t)$ - функції, які повільно змінюється з часом і уявляють собою амплітуду та фазу сигналу відповідно.

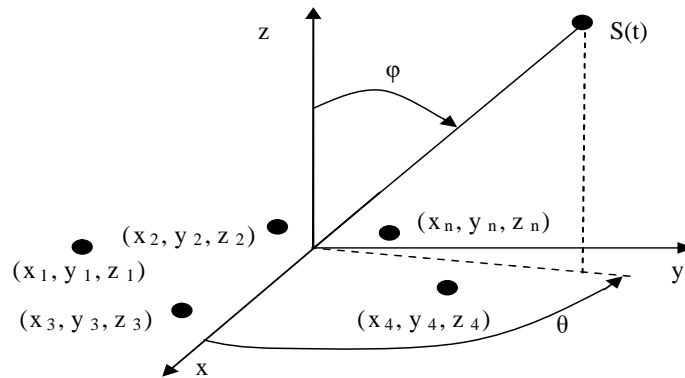


Рис. 1. Загальне розташування в просторі n ґрат, з яких складається антена.

При вузькосмуговому сигналі запізнення τ_i породжує зсув фази і при цьому справедлива залежність

$$S(t - \tau_i) = S(t)e^{-j\tau_i\omega_0}, \tag{9}$$

при цьому

$$\tau_i = -\frac{1}{c} (x_i \sin\varphi \cos\theta + y_i \sin\varphi \sin\theta + z_i \cos\varphi), \tag{10}$$

де c - швидкість світла в повітрі.

Якщо ГА складається з n ґрат, то сигнал, що надходить на i - ґрату має вид

$$X_i(t) = S(t)e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x_i \sin\varphi \cos\theta + y_i \sin\varphi \sin\theta + z_i \cos\varphi)}, \tag{11}$$

де λ - довжина хвилі, яка визначається як $\lambda = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

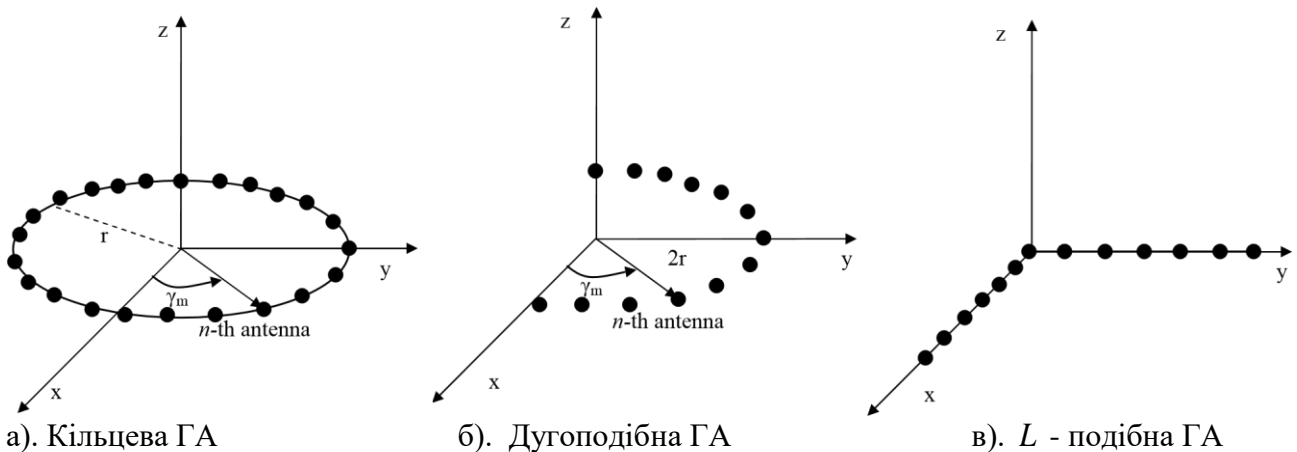


Рис. 2. Види ґратчастих антен.

На рисунку 2 представлено види ґратчастих антен, які використовуються в системах технічного захисту інформації на об'єктах інформаційної діяльності для радіопеленгації шпигунських БПЛА, функції яких є несанкціонований доступ до конфіденційної інформації.

Представлення (11) можна представити в векторній формі, якщо записати вектор $X(t)$ сигналів, який приймає ґратчаста антена, що складається з n ґрат, у вигляді рівності

$$X(t) = A(t)s\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right)e^{-j\tau\omega_0} + N(t), \quad (12)$$

де $N(t)$ - білий шум, який має спектральну щільність N_0 .

Функція правдоподібності відліків $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$, які є незалежними з однаковими щільностями розподілу задається наступним чином

$$p(X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n) / \theta, R, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\pi^n \det(R)} e^{-X^T(t_i)R^{-1}X(t_i)}, \quad (13)$$

де R - кореляційна матриця сигналів, $\det(R)$ - визначник кореляційної матриці, $X^T(t)$ - матриця, транспонована матриці $X(t)$, R^{-1} - матриця, обернена до матриці R .

Так як в якості скалярного параметра вибирається кут пеленга по азимуту θ (рисунк 1), то для визначення нижньої границі похибки цього кута застосовується границя Рао-Крамера (7), підставивши в (7) праву частину рівності (13).

В методі MUSIC використовується проекція сигналу на весь шумовий простір, який дуже ретельно описано в роботі [5].

При дослідженні ґратчастих антен для визначення кута пелінгу положення шпигунських БПЛА були обрані кільцева ГА (рис.2 а), дугоподібна ГА (рис.2 б) та L - подібна ГА (рис.2 в). Кількість ґратчат було обрано $n = 25$ відстань між ґратами дорівнювала $0,25\lambda$. Для всіх експериментів було взято $\theta = 30^\circ$.

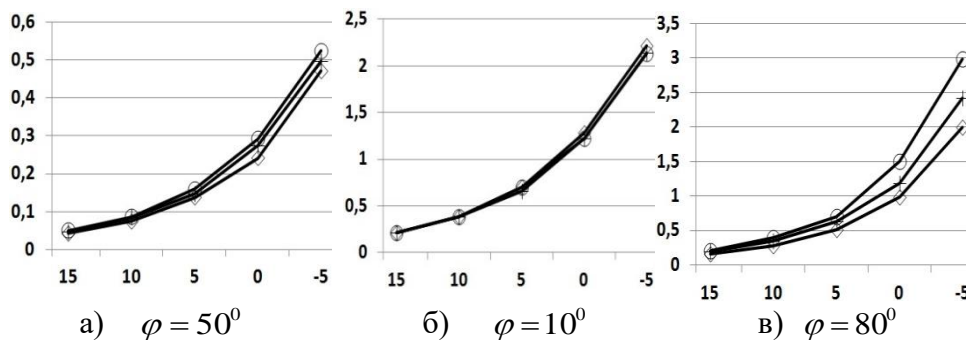


Рис. 3. Метод максимальної правдоподібності для одного шпигунського БПЛА.

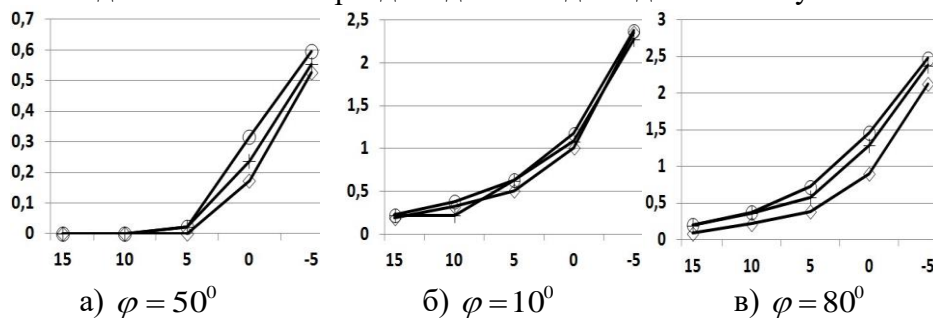


Рис. 4. Метод MUSIC для одного шпигунського БПЛА.

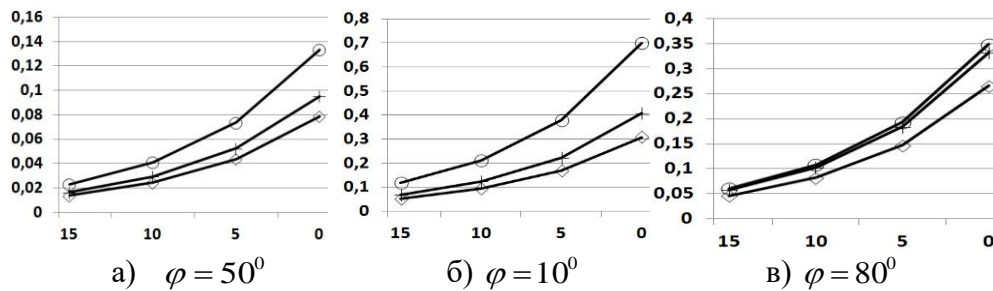


Рис. 5. Границя Рао-Крамера для одного шпигунського БПЛА.

На рисунках 3 – 5 по вісі абсцис значення оцінки середньоквадратичного відхилення оцінки пеленга по азимуту, а по вісі абсцис кут місця положення. На цих графіках, крива, на якій позначено 0 – відповідає кільцевій ГА, $+$ – відповідає дугоподібній ГА і \times – відповідає L -образній ГА. З отриманих експериментальних даних, можна зробити висновки, що для визначення кута пеленгу положення шпигунського БПЛА з мінімальною похибкою дає дугоподібна антена. Найбільша похибка виникає при застосуванні кільцевої ГА. При цьому, різниця між середньоквадратичними відхиленнями не менше $0,5^{\circ}$ становить при умові, якщо джерело сигналу, тобто якщо шпигунський БПЛА має кут не менше $\varphi = 80^{\circ}$. При значеннях кута φ , який не перевищує 50° , то ця різниця несуттєва.

Висновок

В роботі розглянуто проблему несанкціонованого отримання інформації на об'єкті інформаційної діяльності з використанням шпигунських безпілотних літальних апаратів, які спроможні на достатній відстані за рахунок радіовипромінювання отримувати доступ до конфіденційної інформації. Для виявлення та пеленгації шпигунських БПЛА запропоновано використовувати ґратчані антени різних геометричних форм, а саме кільцевих, дугоподібних та L -образних. Для розв'язання задачі радіопеленгації при оцінці сигналів та їх спектрів, що дає можливість отримати точні значення кута пеленгу, варто використовувати оцінку Рао-Крамера. Встановлено, що для отримання більш точних оцінок кутових координат і навіть на випадок, коли шпигунські БПЛА розташовані в складних місцях простору, та у випадках появи хибних піків, необхідно використовувати метод максимальної правдоподібності для дугоподібної ГА.

Перелік посилань

1. Tuncer T. E. and Friedlander B. (2009) [Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation](#), Academic Press, 456 p.
2. Godara L.C. (1997) Applications of antenna arrays to mobile communications. [Proceedings of the IEEE](#), Vol. 85, Iss. 8, pp. 1195-1245. DOI: 10.1109/5.622504.
3. Nechaev Yu., Borisov D. and Peshkov I. (2011) Beamforming algorithm for circular antenna array immune to multipath propagation and non-stationary interference sources. [Radioelectronics and Communications Systems](#), Vol. 54, No. 11, pp. 604-612. DOI: 10.3103/S0735272711110045
4. Nechaev Yu.B., Peshkov I.V., Aalmuttar Atheer Y.O. and Al Khafaji Sarmad K.D. (2016) Accuracy evaluation of superresolution DOA estimation methods for ring and concentric antenna arrays. [Teoriya i tekhnika radiosvyazi](#), Vol. 1, Iss. 2, pp. 79-86 (in Russian).
5. В.И. Тихонов, Б.И. Шахтарин, В.В. Сизых, «Случайные процессы, примеры и задачи», Том.5 Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации, Горячая линия – Телеком, Москва, 2009.- с.400.
6. Nechaev Y. and Peshkov I. (2016) Building circular, octagonal, hexagonal and rectangular antenna arrays for direction-of-arrival via superresolutional method MUSIC. [Radiotekhnika - Radioengineering](#), No. 6, pp. 137-142.
7. Hua Y., Sarkar T. K. and Weiner D. D. (1991) An L-shaped array for estimating 2-D directions of wave arrival. [IEEE Trans. Antennas Propag.](#), Vol. 39, No 2, pp. 143-146, DOI: 10.1109/8.68174.
8. А.В.Науменко, Г.В. Шуклін, Барабаш О.В. « Проблема інформаційного захисту командної телеметрії безпілотних літальних апаратів », Сучасний захист інформації. Київ: ДУТ, №4, сс.40-44, 2019.

Надійшла: 26.03.2021

Рецензент: д.т.н., професор Гайдур Г.І.