

## МЕТОД МАКСИМАЛЬНОЇ ПРАВДОПОДІБНОСТІ В ЗАДАЧАХ ЗАХИСТУ РАДІОСИГНАЛУ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В роботі розглянута проблема захисту керування радіосигналом управління безпілотними літальними апаратами, як задача керування параметрами сигналу. Сформульована задача керування параметром радіосигналу і задача захисту від перехоплення керуванням безпілотним літальним апаратом. Проаналізовані методики оцінки параметрів радіосигналу зв'язку і запропоновано методику оцінки параметрів, яка базується на методі максимальної правдоподібності. Дана методика продемонстрована на оцінці фази гармонічного коливання, яке описує радіосигнал і при цьому присутні шумові перешкоди. Проведено імітаційне моделювання розробленого методу, яке підтвердило адекватність запропонованої моделі.

**Ключові слова:** Безпілотний літальний апарат, сигнал, фаза, керування фазою сигналу, оцінка сигналу, асимптотична функція розподілу.

### Вступ

На теперішній час у зв'язку з розвитком нових підходів до ведення бойових дій поширено використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). За своїм призначенням БПЛА уявляє собою багатофункціональний пристрій, який має можливість бути обладнаний як допоміжними пристроями так і відповідною зброєю. Так як розміри БПЛА достатньо малі, то виявити його присутність не завжди є простою задачею. Тому в протидії БПЛА використовують радіоелектронні перешкоди. В багатьох випадках перешкоди, які є засобами радіоелектронної боротьби, здійснюють активно в режимі загород та в режимі прицілу. Цікавим є те, що серед режимів прицільних перешкод загрозами є структурні. Це пов'язано з тим, що їх використання порушує не тільки основні функції БПЛА, пов'язаних з виконанням основних задач, але і привести до того, що керування їм може бути перехоплено при роботі системи «Оператор – БПЛА».

Так як керування радіоканалом управління БПЛА є сигнал, то задача оцінки сигналів, їх параметрів та спектрів є актуальною і відіграє важливу роль в захисті від перехоплення управління БПЛА.

### Постановка проблеми

Однією з основних завдань взаємодії «оператор – БПЛА» є захист цієї системи від можливості перехоплення керування безпілотним літальним апаратом протидіючою стороною. Для запобігання цьому, необхідно вибрати параметр, який характеризує радіосигнал, і за допомогою нього здійснювати керування каналом передачі команд безпілотному літальному апарату. Для розв'язування цього завдання необхідно розробити адекватний метод оцінки визначеного параметру.

### Аналіз публікацій

В роботі [2] розглянута ефективна система криптографічного захисту радіоканалу зв'язку і запропоновано «нависний» захист командно-телеметричної інформації БПЛА за допомогою розробленого шифратора. В роботі [3] розроблена математична модель визначення простору станів каналу управління за частотою та часом, що уявляє собою простір керованості системи «оператор-БПЛА». Недоліком даної моделі є невизначеність в складових, які визначають ймовірність відбиття від несанкціонованого втручання. В роботі [4] Показано, що для зменшення впливу перешкоди на перехоплення керування БПЛА необхідно провести динамічну зміну форм псевдовипадкової перебудови робочої частоти та фазової маніпуляції сигналів. Показано, що динамічна зміна форми сигналів захищає систему «оператор-БПЛА» від перешкод і здійснює на фізичному рівні скритність БПЛА. Недоліком даного підходу є невизначеність в оцінці параметрів сигналу, які є найважливішою складовою в керуванні БПЛА. В роботі [5] запропоновано використовувати таймерові сигнали з ортогональним частотним мультиплексуванням. Перевагою даного підходу є можливість швидкої адаптації параметрів сигналів. Недоліком є неможливість

оперативно здійснити оцінку необхідного параметру сигналу в умовах непередбачених перешкод. В роботі [6] запропоновано структурну схему оптимальної моделі передачі даних системи «оператор-БПЛА», але не розкриті функції компонент, які є реперними точками інформаційного захисту керування радіосигналом при передачі команд керування безпілотному літальному апарату. В роботі [7] запропоновано перемикання режимів роботи системи «оператор-БПЛА» на основі аналізу параметрів сигналу в каналі передачі, коригування яких здійснюється за рахунок кодових конструкцій. Недоліком даного підходу є неможливість змінювати код за відсутності оперативної зміни параметру сигналу. В роботі [8] розглянуті основні задачі інформаційного захисту командно – телеметричного керування БПЛА, розв'язування яких є актуальною проблемою сьогодення.

#### Мета статті

Метою даної статті є розробка методу оцінки фази гармонічного коливання, яке моделює радіосигнал, за допомогою якого здійснюється керування БПЛА.

#### Викладення основного матеріалу

Основною складовою в організації зв'язку системи керування БПЛА є радіоканал передачі даних в якому відбуваються процеси прийому та передачі їх. Однією з загроз, пов'язаних з перехопленням управління БПЛА є вплив на систему прийому та передачі інформації, яка здійснюється між оператором і БПЛА. Це призводить до повного контролю над БПЛА з боку протидіючої сторони. Отже, для запобігання цьому, необхідно здійснювати керування радіосигналом з метою недопущення його перехоплення. Одним з таких можливих керувань є керування фазою сигналу.

**Задача керування фазою сигналу полягає в наступному:** необхідно визначити фазу  $\varphi$  сигналу, який передається по закону синуса в момент часу  $t = k$ , безпілотному літальному апарату, який в момент часу  $t = k$  своєчасно отримує правильну команду, при умові, що в лінії передачі присутні перешкоди, які носять випадковий характер. Інакше кажучи, при здійсненні частотної, або амплітудно-частотної модуляції сигналу проводиться маніпуляція його фазою.

Розглянемо сигнал керування, який передається безпілотному літальному апарату, в якому зосереджена антена, яка має  $M$  решіток

$$X(k) = A \sin(\pi k \omega_0 + \varphi) + W(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

де  $W(k)$  – перешкода, яку розглядаємо як Гаусовий білий шум з нульовим математичним сподіванням і невідомим середнім квадратичним відхиленням  $\sigma$ . При цьому параметри  $A$  і  $\omega_0$  відомі. Маючи оцінку параметра  $\varphi$  можна задавати різні значення його при передачі команд. При кожній передачі команди відбувається зміна фази за певним законом, що дає можливість захистити відповідну інформацію від перехоплення. Для здійснення оцінки фази сигнали застосуємо метод максимальної правдоподібності, який полягає в максимізації функції правдоподібності

$$H(X, \varphi) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^M (X(k) - A \sin(\pi \omega_0 k + \varphi))\right). \quad (2)$$

Функція (2) приймає максимальне значення, при мінімумі показника експоненти. Це означає, що максимізувати  $H(X, \varphi)$  еквівалентно мінімізувати функцію

$$\Phi(\varphi) = \sum_{k=0}^M (X(k) - A \sin(\pi k \omega_0 + \varphi))^2. \quad (3)$$

Після диференціювання функції (3) по  $\varphi$ , маємо

$$\frac{d\Phi}{d\varphi} = 2 \sum_{k=0}^M (X(k) - A \sin(\pi k \omega_0 + \varphi)) A \cos(\pi k \omega_0 + \varphi). \quad (4)$$

Прирівнявши похідну (4) до нуля, отримуємо рівність

$$\sum_{k=0}^M X(k) \cos(\pi k \omega_0 + \varphi) = A \sum_{k=0}^M \sin(\pi k \omega_0 + \varphi) \cos(\pi k \omega_0 + \varphi). \quad (5)$$

Праву частину рівності (5) можна записати у вигляді

$$\frac{A}{2} \sum_{k=0}^M \sin(2\pi k \omega_0 + 2\varphi) = \frac{A}{2} \cdot \frac{\sin(\pi(M+1)\omega_0) \cos(\pi M \omega_0 + \varphi)}{\sin(\pi \omega_0)}. \quad (6)$$

Права частина (6) дає можливість визначити, при яких значеннях фази  $\varphi$  вона дорівнює 0. Ця умова визначається з рівності  $\cos(\pi M \omega_0 + \varphi) = 0$ , звідки

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \pi M \omega_0. \quad (7)$$

Рівність (7) визначає середнє значення фази для побудови асимптотичної щільності розподілу ймовірності оцінки фази. З іншого боку, прирівнявши ліву частину рівності (5) до нуля, маємо

$$\sum_{k=0}^M X(k) \cos(\pi k \omega_0) \cos \varphi - \sum_{k=0}^M X(k) \sin(\pi k \omega_0) \sin \varphi = 0.$$

Звідки

$$\varphi = \arctg \frac{\sum_{k=0}^M X(k) \cos(\pi k \omega_0)}{\sum_{k=0}^M X(k) \sin(\pi k \omega_0)}. \quad (8)$$

Підставивши в (8) представлення (1), маємо

$$\varphi = \arctg \frac{\sum_{k=0}^M (A \sin(\pi k \omega_0 + \varphi) + W(k)) \cos(\pi k \omega_0)}{\sum_{k=0}^M (A \sin(\pi k \omega_0 + \varphi) + W(k)) \sin(\pi k \omega_0)}. \quad (9)$$

За допомогою рівності (9) визначимо яка повинна бути мінімальна кількість решіток антени прийому в БПЛА  $M$ , щоб досягти точне значення асимптотичної оцінки фази та її дисперсії. Так як асимптотична щільність розподілу оцінки фази має нормальний закон розподілу, то

$$D(\varphi) = \frac{2\sigma^2}{MA^2}. \quad (10)$$

В таблиці 1 приведені результати імітаційного моделювання в результаті чого отримані середня оцінка  $E(\varphi)$  та дисперсія  $D(\varphi) = E(\varphi) - (E(\varphi))^2$ , де  $\varphi$  - визначається рівністю (9). Розрахунки здійснювались при  $A = 1$ ,  $\omega_0 = 0,08$ ,  $\sigma^2 = 0,02$ .

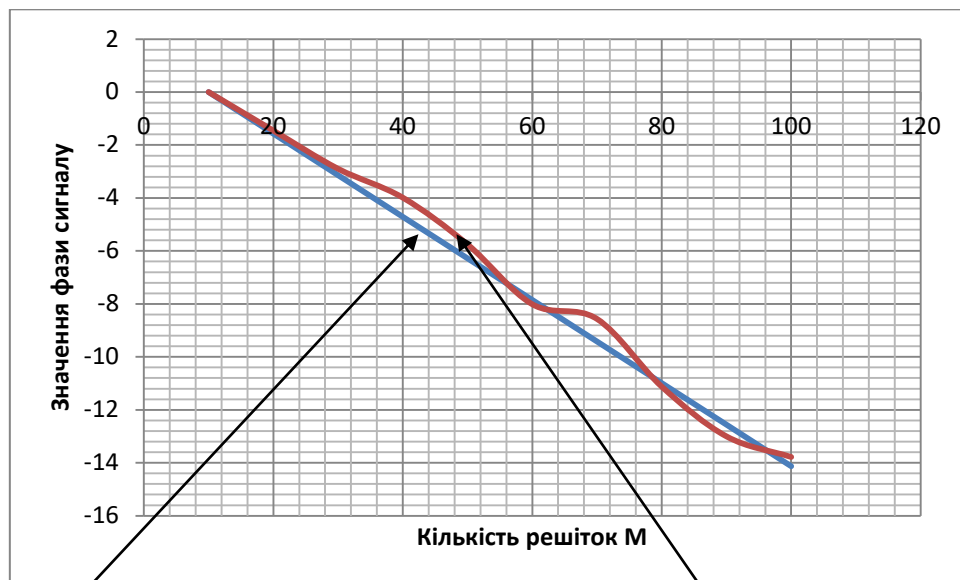
Таблиця 1.

Результати розрахунку середнього значення оцінки фази і дисперсії

$M$	$\varphi$	$E(\varphi)$	$D(\varphi) = E(\varphi) - (E(\varphi))^2$	$D(\varphi) = \frac{2\sigma^2}{MA^2}$
10	0	0,00001	0,0005	0,004
20	-1,57	-1,456	0,0016	0,002
30	-3,14	-2,897	0,0006	0,0013
40	-4,71	-3,987	0,00095	0,001
50	-6,28	-5,754	0,00059	0,0008
60	-7,85	-8,012	0,000556	0,000667
70	-9,42	-8,568	0,000612	0,000571
80	-10,99	-11,123	0,00046	0,0005
90	-12,56	-13,002	0,000356	0,000444
100	-14,13	-13,78	0,0004	0,0004

Як видно з таблиці 1 асимптотичне середнє значення фази і дисперсія оцінки  $\varphi$  досягає точних значень при  $M = 100$ . Якщо  $M < 100$ , то оцінка  $\varphi$  значно зсувна.

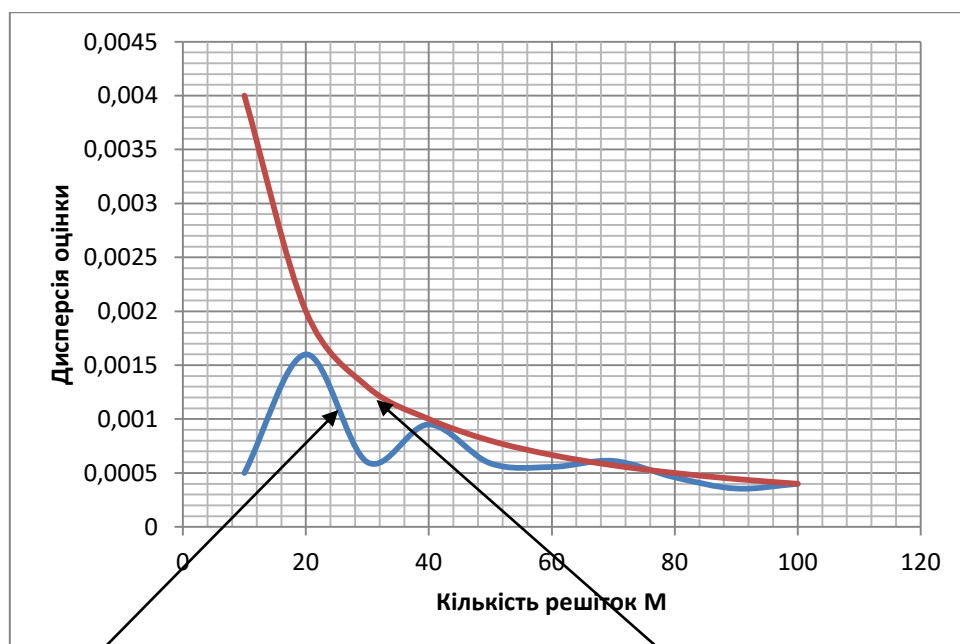
Рисунки 1 і 2 показують, що запропонований метод максимальної правдоподібності оцінки фази сигналу, який моделюється гармонічним коливанням при наявному шумі, функція розподілу ймовірності якого підпорядкована нормальному закону, дає точну оцінку при достатньо великій кількості решіток приймальної антени, яка вмонтовується в БПЛА для керування їм.



Задані значення фази

Асимптотичне значення фази

Рис.1. Порівняльні залежності заданої частоти і розрахункової методом максимальної правдоподібності.



Істинне значення дисперсії

Асимптотичне значення дисперсії

Рис.2. Порівняльні залежності заданої оцінки і розрахункової методом максимальної правдоподібності.

**Висновок**

Для забезпечення захисту радіосигналу керування БПЛА необхідно проектувати антену прийому команд з достатньо великою кількістю решіток. Кількість таких решіток повинна бути не менше 100. Метод максимальної правдоподібності дає можливість здійснювати аналіз параметрів радіосигналу таких як амплітуда, частота і фаза при великій кількості

решіток антени системи «оператор-БПЛА». Крім того, кількість даних решіток впливає на степінь скритності БПЛА при виконання керованих дій.

### Перелік посилань

1. 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.
2. Д.А. Навроцкий, «Система защиты радиоканалов БПЛА от несанкционированного вмешательства», Национальная ассоциация учёных (НАУ) #III(8), г. Киев, сс. 95-99, 2015 / Технические науки.
3. Р.В. Иванов, «Предложения по разработке математической модели воздействия имитационных помех на каналы управления БПЛА в режиме «Ожидания»», Science & ASC, pp. 45-49, 2016.
4. С.С. Серов, «Метод оцінки перешкодо захисту інформаційної системи при використанні сигналів з розширенням спектру», Сучасні інформаційні системи, Том.2, №2, сс. 106-109, 2018.
5. В.В. Гордійчук, «Методика підвищення скритності в системах радіозв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням за рахунок використання таймерних сигнальних конструкцій», Сучасні інформаційні системи, Том.2, №4, сс. 108-113, 2018.
6. О.В. Яровий, «Системи управління безпілотними літальними апаратами для здійснення моніторингу наземних об'єктів», Системи управління, навігації та зв'язку, випуск 3(49), сс. 33-38, 2018.
7. Qasim Abbood Mahdi, «The method of increasing the immunity of communication systems», Advanced Information Systems, Vol.3, №1, pp.126-130, 2019.
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: 21.10.2020

Рецензент: д.т.н., професор Кожухівський А.Д.