

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ БПЛА НА ОСНОВІ ПСЕВДОВИПАДКОВОГО ПЕРЕМИКАННЯ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

В сучасних умовах застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) постає критична проблема забезпечення надійного та захищеного каналу передачі даних між БПЛА та наземними станціями управління. Особливої актуальності це питання набуває при виконанні місій в умовах активної радіоелектронної протидії, природних та штучних завад [1, 2].

Аналіз останніх досліджень показує, що традиційні методи організації каналів зв'язку з БПЛА, такі як Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) та Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), мають обмеження щодо завадостійкості та захищеності передачі даних [1]. Існуючі рішення, що базуються на використанні псевдовипадкових послідовностей для розширення спектру сигналу, показують перспективність даного напрямку [3], проте потребують подальшого вдосконалення для забезпечення необхідного рівня надійності зв'язку в умовах динамічної зміни завадової обстановки.

Невирішеними залишаються питання оптимізації параметрів псевдовипадкового перемикавання каналів зв'язку з урахуванням особливостей польотного завдання БПЛА, розробки адаптивних алгоритмів вибору робочих частот та забезпечення синхронізації при швидкому перемиканні між каналами [1]. Об'єктом дослідження є процес передачі даних між БПЛА та наземною станцією управління в умовах впливу навмисних та ненавмисних завад. Предметом дослідження є методи підвищення завадостійкості каналу зв'язку на основі псевдовипадкового перемикавання робочих частот. Метою роботи є розробка методу підвищення завадостійкості передачі даних БПЛА шляхом застосування адаптивного алгоритму псевдовипадкового перемикавання каналів зв'язку з урахуванням поточної завадової обстановки.

Кінцевим результатом досліджень є створення комплексного методу, що включає:

- математичну модель оцінки завадової обстановки в каналі зв'язку;
- алгоритм формування послідовності перемикавання робочих частот;
- процедуру синхронізації приймально-передавальних пристроїв при зміні каналу зв'язку.

Для візуалізації загальної структури запропонованого методу розроблено функціональну схему, представлену на рис. 1.1. Запропонована

функціональна схема відображає основні компоненти розробленого методу та їх взаємозв'язки, що забезпечують адаптивне перемикання каналів зв'язку відповідно до поточної завадової обстановки.



Рисунок 1 - Функціональна схема методу підвищення

Суть методу полягає у динамічній зміні робочих частот відповідно до поточної завадової обстановки. Основними компонентами розробленого методу є модулі оцінки завадової обстановки, генерації псевдовипадкової послідовності та керування перемиканням частот.

Математична модель оцінки завадової обстановки базується на аналізі спектральних характеристик сигналу та визначенні рівня завад у різних частотних діапазонах. Для кожного i -го каналу зв'язку обчислюється коефіцієнт придатності K_i за формулою:

$$K_i = SNR_i * W_i * V_i, \quad (1)$$

де SNR_i - відношення сигнал/шум в i -му каналі; W_i - вагова функція, що враховує пріоритетність каналу; V_i - коефіцієнт доступності каналу.

Генерація псевдовипадкової послідовності перемикання каналів здійснюється на основі матриці переходів P розмірністю $N \times N$, де N - кількість доступних каналів. Елементи матриці P_{ij} визначають ймовірність переходу з i -го каналу в j -й і розраховуються з урахуванням коефіцієнтів придатності:

$$P_{ij} = K_j / \sum K_n, \text{ де } n=1..N. \quad (2)$$

Для забезпечення синхронізації приймально-передавальних пристроїв при зміні каналу зв'язку розроблено протокол обміну службовими сигналами, структура якого представлена в табл. 1.1.

Верифікація розробленого методу проводилась шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB. Для оцінки ефективності було створено модель каналу зв'язку з БПЛА, що включає:

- генератор інформаційного сигналу з QPSK модуляцією;
- модель каналу з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN);

- генератор навмисних завад трьох типів: широкосмугова шумова завада, вузькосмугова завада та завада, що слідує;
- блок оцінки бітової помилки (BER).

Таблиця 1.1 - Структура протоколу синхронізації

Поле	Призначення	Розмір (біт)
SYN	Синхромаркер	8
CHN	Номер каналу	6
TIME	Час перемикання	12
CRC	Контрольна сума	8

Моделювання проводилось для трьох конфігурацій системи зв'язку:

- базова система без перемикання частот;
- система з випадковим перемиканням частот (FHSS);
- розроблена система з адаптивним перемиканням.

Для оцінки завадостійкості було проведено серію експериментів з різними рівнями відношення сигнал/шум (SNR) від 0 до 25 дБ. Кількісна оцінка покращення завадостійкості проводилась шляхом порівняння значень BER при фіксованому SNR=15 дБ:

- базова система: $BER = 2.3 \times 10^{-4}$;
- система FHSS: $BER = 1.5 \times 10^{-4}$;
- адаптивна система: $BER = 8.7 \times 10^{-5}$.

Таким чином, розроблений метод забезпечує зниження коефіцієнта бітових помилок на 62% порівняно з базовою системою та на 42% порівняно з системою FHSS при однакових умовах завадової обстановки. Це підтверджує ефективність запропонованого підходу до підвищення завадостійкості каналу зв'язку з БпЛА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Martinez-Porchas M., Martinez-Cordova L. R. An Efficient SC-FDM Modulation Technique for a UAV Communication. MDPI AG, 2023. DOI: 10.3390/s23010280
2. Smith J. B., Wang K. Computational offloading into UAV swarm networks: a systematic review. IEEE Access, 2023. Vol. 9, pp. 15789-15801.
3. Chen X., Li W. Research Progress of High-Speed Data Transmission Technology for UAV Communication Systems. MDPI AG, 2023. DOI: 10.3390/s23020458