

ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОЇ РАДІОЛІНІЇ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

Розглядається використання у військових операціях безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Канал управління БПЛА піддається значному впливу навмисних завад противника. Для виконання бойових задач пропонується використання широкосмугових сигналів, з використанням сигналів з псевдовипадковими послідовностями (ПВП), псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти (ППРЧ) чи ортогональним частотним поділом каналів (OFDM). Показано, що завадозахищеність широкосмугових сигналів відносно оптимальних (для кожного методу) завад однакова.

Розглянуто структуру каналу управління, тип команд та діаграму обміну повідомленнями. Приведена методика оцінки необхідної пропускнуєї спроможності уніфікованого радіоканалу управління безпілотним літальним апаратом.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА), канал управління, псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (ППРЧ), ортогональний частотний поділ каналів (OFDM).

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Аналізуючи ситуацію на сході країни, ми чітко бачимо, що сучасні військові конфлікти зосереджені на вогневому ураженні противника на граничних відстанях. Завдання визначення місцезнаходження бойових одиниць противника доцільно виконувати за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які здатні проводити повітряну розвідку, не ризикуючи життям екіпажу.

На даний момент у світі широко використовуються БПЛА, які здатні вести повітряну розвідку і передавати дані в реальному часі, що дозволяє миттєво приймати певні рішення і змінювати поставлені задачі. Збройні сили України (ЗСУ) на даний час не мають на озброєнні таких засобів, що ускладнює ведення бойових дій та збільшує втрати особового складу. Отже, як ми бачимо, створення і постановка на озброєння БПЛА є необхідною умовою ведення сучасних бойових дій.

Під час проведення антитерористичної операції (АТО) військові зіткнулися з низкою проблем при використанні БПЛА, оскільки ті літальні апарати (ЛА), що доступні для ЗСУ, не мають захищеного каналу управління і придушуються засобами радіоелектронного придушення (РЕП) противника. Незважаючи на дослідження різноманітних способів реалізації такого каналу управління, можна стверджувати, що на сьогоднішній день практично в усіх використовуваних БПЛА реалізовано управління ЛА по радіоканалу. Таким чином, задача забезпечення максимально досяжної завадозахищеності та завадостійкості такого каналу управління не втрачає актуальності.

Постановка проблеми. Розглядаючи основні ситуації застосування БПЛА в тактичній смузі (зоні), а, насамперед, – вплив зловмисника на функціонування радіоліній зв'язку з БПЛА, ми стикаємося з різними умовами придушення низхідного (канал передачі даних та канал передачі бортової телеметрії) і висхідного (канал передачі команд управління) каналів (рис.1). Найсильнішому впливу завади піддається бортовий приймач БПЛА, оскільки він знаходиться на меншій відстані від завадопостановника, отже, значення спектральної щільності завадина вхіді бортового приймача (N_3) є більшою у порівнянні з тією ж щільністю на вхіді приймача наземного пункту управління. Таким чином, постає питання першочергового захисту радіолінії управління БПЛА.

Метою даної статті є порівняльний розгляд сучасних методів захисту радіоліній зв'язку від навмисних завад, основ побудови радіоканалу управління з застосуванням зазначених методів та оцінка реалізуємості зазначеного каналу в різних діапазонах електромагнітних хвиль.

Виклад основного матеріалу. Як ми знаємо, ефективними засобами захисту систем передачі інформації від навмисних завад є широкосмугові методи передачі. Вони

характеризуються методами розширення спектру за допомогою псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ), розширення спектру з використанням шумоподібних (ШПС), псевдовипадкових (ПВС) чи псевдошумових (ПШС) сигналів. Дані методи широко використовуються у системах широкосмугового зв'язку і мають різну оцінку завадозахищеності.



Рис.1. Вплив засобів РЕП на канали управління БПЛА

Очевидно, що у ситуації, коли противник здатен забезпечити необхідне для нього значення спектральної щільності завади в усій смузі частот широкосмугового сигналу безперервно протягом необхідного часу, застосування широкосмугових сигналів не допоможе в боротьбі з завадами. Проте, і енергетика станцій РЕП теж обмежена, тому при порівнянні методів виникає питання: які завади є оптимальними (найбільш ефективними при фіксованій середній потужності) для кожного методу.

У [1] показано, що для псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) оптимальними (в класі гаусівських шумових) являються завади, спектр яких зосереджений в частині робочої смуги. Широко відомою щодо порівняння широкосмугових методів передачі інформації є стаття [2]. У ній вказано, що при заваді типу білого гаусівського шуму, відносній фазовій модуляції (ВФМ) і некогерентному прийомі імовірність бітової помилки дорівнює

$$P_{ном} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_0}}, \quad (1)$$

де $\frac{E}{N_0} = h^2$ — відношення енергії сигналу до спектральної щільності шуму.

Якщо завада уражає частину робочої смуги частот, то

$$P_{ном} = \rho \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_3 + \rho N_0}} + (1 - \rho) \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_0}}, \quad (2)$$

де $P_{ном} \leq \rho \leq 1$; ρ — частина смуги, уражена навмисною завадою.

Зазвичай при прийомі сигналу на фоні навмисної завади $N_3 \gg N_0$, тоді

$$P_{ном} \approx \rho \frac{1}{2} e^{-\rho \frac{E}{N_3}}. \quad (3)$$

Показано, що оптимальне значення ρ , яке призводить до максимуму $P_{ном}$ визначається як

$$\rho_{опт} = \frac{N_3}{E}. \quad (4)$$

При цьому

$$\max P_{ном} = \frac{1}{2} \frac{e^{-1}}{E / N_3}. \quad (5)$$

(З фізичних міркувань (4) має сенс при $\frac{E}{N_3} \geq 1$.)

При передачі бітової послідовності на одній несівній ймовірність бітової помилки передачі є функцією інтеграла помилок, який у свою чергу, є функцією бітового відношення сигнал/шум.

На сьогодні широкого розповсюдження набув ще один метод широкопasmової передачі – ортогональне частотне мультиплексування (OFDM). Стосовно OFDM-сигналу ми можемо розглядати передачу бітової послідовності на N незалежних піднесівних (у наслідок їх ортогональності) [3]. Для випадку, що розглядається, ймовірність бітової помилки на одній піднесівній незалежна від інших піднесівних і визначається виразом (1), де E є енергією біта. Для OFDM-сигналу в цілому результуюча ймовірність бітової помилки на всіх піднесівних є усередненням бітової помилки за всіма N піднесівними

$$P_{ном} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, \quad (6)$$

а у разі рівності цих помилок також визначається виразом (1).

Це означає, що оцінити ймовірність бітової помилки при передачі дискретного потоку за допомогою OFDM-сигналів можна за допомогою методики, призначеної для оцінки ймовірності бітової помилки в одному потоці (на одній несівній) з таким же видом дискретної модуляції.

У [4] показано, що при неадаптивних методах передачі та прийому інформації заводозахищеність при ППРЧ (без кодування) відносно шумових завод, що уражають оптимальну частину робочої смуги, значно нижче заводозахищеності відносно шумових завод (тієї ж потужності) з рівномірною спектральною щільністю в смузі сигналу. Висновок стосується і інших видів маніпуляції, а також регулярних (не шумових) завод, дискретної множини гармонічних завод, які уражають частину чи всі робочі частоти.

Для методу захисту від завод з використанням ШПС ймовірність помилки при заводі типу білого гаусівського шуму і аналогічним вище вказаним вимогам визначається за допомогою виразу (1).

Якщо навмисна завод діє тільки певний час передачі, тобто уражає m інформаційних символів із M , $P_{ном}$ визначається виразом (2) (чи (3) при $N_3 \gg N_0$ і $\rho = m/M$).

Аналогічно випадку з ППРЧ, оптимальне значення ρ , що призводить до максимуму $P_{ном}$ при використанні ШПС визначається виразом (4), а $\max P_{ном}$ - виразом (5).

Однак, не дивлячись на те, що вираз для максимуму ймовірності помилки при впливі оптимальних (в класі шумових) завод однакові, передавач переривистих завод для випадку з ШПС повинен мати імпульсну (тільки в інтервалі випромінювання завод) потужність, яка в g разів перевищує середню, а при ППРЧ середня та імпульсна потужності передавача завод можуть бути майже однаковими.

У цьому разі можна оцінити, на скільки імпульсна потужність передавача оптимальних переривистих по часу завод перевищує середню потужність передавача неперервних

шумових завад при фіксованій ймовірності помилки і енергії сигналу. Аналіз показав, що це перевищення (g_{onm}) для неперервної завади дорівнює E / N_3 [5].

Для фіксованих значень ймовірності завади P і енергії сигналу E та використовуючи вирази (1), (4) отримуємо оптимальне значення ρ

$$\rho = -\frac{1}{\ln 2P_{ном}} . \quad (7)$$

Аналізуючи розглянуті вище вирази ми бачимо, що значення перевищення (g_{onm}) дорівнює

$$g_{onm} = \frac{1}{r_{onm}} . \quad (8)$$

$$g_{onm} = - \ln 2P_{ном} [\text{рази}] . \quad (9)$$

$$g_{onm} = 10 \lg(- \ln 2P_{ном}) [\text{дБ}] . \quad (10)$$

На основі цього будуюмо таблицю 1 для декількох значень ймовірності помилки (при некогерентному прийомі сигналів з ВФМ).

Таблиця 1

Значення перевищення імпульсної потужності для значень ймовірності помилки

$P_{ном}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
g_{onm} , дБ	5,9	7,9	9,3	10,3

З таблиці видно, що перевищення імпульсної потужності передавача оптимальних переривистих завад над середньою потужністю передавача безперервних завад не велике, наприклад, для $P_{ном} = 10^{-4}$ складає всього 9.3 дБ.

При проектуванні БПЛА основна увага звертається на канал управління ЛА. Такий канал повинен мати відповідну заводозахищеність та заводостійкість. Приступаючи безпосередньо до проектування каналу управління, нам необхідно визначити, які саме завдання повинен вирішувати радіоканал та яку пропускну спроможність повинен мати.

Сформулюємо основні завдання штатного радіоканалу управління БПЛА[6]:

1. Надходження разових команд, що визначають суть запитуваної до виконання дії і її параметри. Для передачі разових команд необхідні механізми, що гарантують доставку команди. Періодичність видачі даних команд можна оцінювати як 1-10 секунд.

2. Прийом команд ручного управління, що є кодованими сигналами (безпосередньо положення рулів – «ручне управління», або необхідний крен, тангаж, висота, курс – «напівавтоматичне управління»). У залежності від динаміки пристроїв, що використовуються та об'єкта управління темп видачі команд ручного управління знаходиться у межах 15-50 Гц.

3. Передача телеметричної інформації (ключові показники функціонування апарату: положення в просторі, швидкість, параметри життєзабезпечення, режими роботи). При вирішенні задач ручного управління достатньо 15-25 Гц.

4. Прийом або передача довільного набору вихідних даних або результатів роботи корисного навантаження не потокового характеру. До даного класу даних можна віднести польотне завдання БПЛА.

При розгляді сутності кожного з перерахованих завдань, можна розділити їх на дві групи: з гарантією доставки й без гарантії доставки. Коректне виконання завдання управління БПЛА вимагає розподілу пропускну здатності радіоканалу між декількома

потоками інформації. У таблиці 1 зведені проаналізовані завдання в порядку зменшення пріоритету.

Таблиця 1

Класифікація завдань радіоканалу «борт-земля» по вимогам гарантії доставки

Пріоритети	Характер інформації, яка передається	
	З гарантією доставки	Без гарантії доставки
4		Команди ручного управління
3		Телеметрія
2	Разові команди	
1	Вихідні/цільові дані	

Пріоритет команд ручного управління та телеметрії диктується мінімізацією затримок на шляху доставки сигналів, що беруть участь в радіоуправлінні.

Сформулюємо вимоги до структури кадру (рис.2). Синхронізуючі символи відповідають за кадрову (пакетну) синхронізацію, визначаючи початок заголовку посилки. Контрольна сума заголовку скорочує вірогідність помилкової синхронізації, а також гарантує достовірність даних заголовка. Поле «тип посилки» визначає характер її обробки. Довжина посилки визначає розмір даних, переданих на рівень обробки даної інформації згідно з типом посилки.

Заголовок посилки					Дані
Символи синхронізації, 2 байта	Контрольна сума заголовку, 4 біта	Тип посилки, 4 біт	Довжина посилки, 2 байта	Контрольна сума даних посилки, 2 байта	

Рис. 2. Базова структура кадру уніфікованого протоколу передачі даних

Проаналізуємо задачу автоматичної передачі даних з гарантією доставки. Типовим підходом у даному випадку є циклічна відправка фіксованої посилки до отримання квитанції від віддаленої сторони, з повторенням вищесказаного для наступної посилки.

Поля протоколу достовірної передачі транслуються в складі поля «дані» базової посилки. На малюнках 3 та 4 представлені структури посилки цільових даних та квитанції відповідно.

Номер програмного каналу, 1 байт	Номер з'єднання, 1 байт	Кількість посилок у послідовності, 4 біта	Номер посилки в послідовності, 4 біта	Номер послідовності в передачі, 4 байта	Цільові дані посилки
-------------------------------------	----------------------------	--	--	--	----------------------

Рис. 3. Структура посилки цільових даних для протоколу гарантованої доставки

Номер програмного каналу, 1 байт	Номер з'єднання, 1 байт	Номер послідовності в передачі, 4 байта	Прапорці прийнятих посилок в послідовності, 2 байта
-------------------------------------	----------------------------	--	--

Рис. 4. Структура посилки підтвердження для протоколу з гарантованою доставкою

Поле «номер програмного каналу» визначає приналежність посилки до того чи іншого каналу прикладної частини програмного забезпечення. Номер з'єднання ідентифікує сесію передачі.

Для протоколу, що не гарантує доставку, у складі посилки достатньо мати ідентифікатор програмного каналу (рис.5). Посилка даних протоколу не гарантованої доставки після її ідентифікації транслуються всім читачам програмного каналу.

Номер програмного каналу	Дані посилки
--------------------------	--------------

Рис. 5. Структура посилки даних для протоколу не гарантованої доставки

Мінімальні розміри посилки, що містять дані, визначаються обсягом службової інформації, необхідної для однозначної інтерпретації. Дані малюнків 2-5 зведені в таб. 2.

Таблиця 2

Розміри посилки радіоканалу «борт-земля»

Тип посилки	Мінімальний розмір посилки, байт	Максимальний розмір посилки, байт
Базовий заголовок	7	—
Дані не гарантованої доставки	9 (1 байт даних)	65 000
Дані гарантованої доставки	15 (1 байт даних)	65 000
Квитанції на посилку даних гарантованої доставки	15	15

Оцінка необхідної пропускної спроможності уніфікованого радіоканалу зводиться до визначення максимального потоку інформації, що забезпечує штатне функціонування БПЛА [6]. Найбільш завантаженим режимом є радіокерований політ з трансляцією телеметричної інформації (рис. 6).

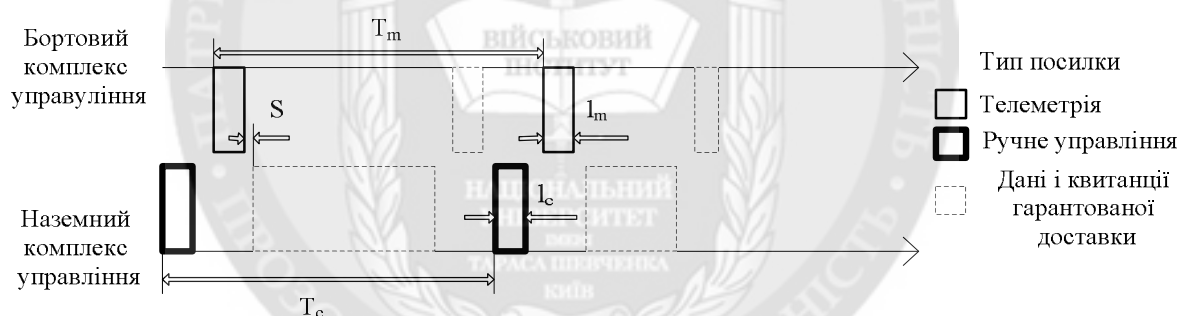


Рис. 6. Діаграма прийому-передачі даних в радіоканалі «борт-земля»

Пропускна спроможність радіоканалу в режимі радіоуправління:

$$V = v_c + v_m + I, \quad (11)$$

де: v_c – потік даних команд ручного управління; v_m – потік даних телеметрії; I – простій радіоканалу, який є параметром для оптимізації.

Для передачі команд ручного управління:

$$v_c = (l_c + s) \frac{1}{T_c}, \quad (12)$$

де: s – затримка переключення режиму прийомо-передавача; T_c – період видачі команд; l_c – довжини посилки з командами.

Аналогічно для телеметрії:

$$v_m = (l_m + s) \frac{1}{T_m}, \quad (13)$$

де: l_m – довжини посилки телеметрії; T_m – період видачі телеметрії.

Першочерговою задачею є досягнення стабільного значення періодів T_c і T_m . Для простоти оцінки використовують рівність періодів:

$$T_c = T_m = T. \quad (14)$$

Отримуємо:

$$V = \frac{\mu}{T} + I, \quad (15)$$

де: μ – сукупна довжина даних, які пересилаються для життєзабезпечення БПЛА і визначається як:

$$\mu = l_c + l_m + 2s. \quad (16)$$

Також необхідна гарантована доставка інформації (разових команд) [7]. Вважається, що час передачі потрібного об'єму інформації набагато більший, ніж період забезпечення обміну сигналами ручного управління. Необхідно забезпечити розділення вихідних даних на посилки, довжина яких l_d задовольняє нерівності:

$$l_d < \tau, \quad (17)$$

де: l_d довжина посилки вихідних даних, а τ визначається як:

$$\tau = VT - \mu. \quad (18)$$

Вираз для оптимального розподілу ресурсів радіоканалу між обміном для життєзабезпечення і передачею вихідних даних формується як:

$$l_d = VT - \mu. \quad (19)$$

Звідси потрібна пропускна спроможність розраховується як:

$$V = (l_d \lambda + \mu) \frac{1}{T}, \quad (20)$$

де λ – параметр, який характеризує накладні витрати передачі і визначається як:

$$\lambda = \frac{n_d + n_a}{n_d}, \quad (21)$$

де: n_d – число посилок вихідних даних, n_a – число квитанцій.

Потрібна довжина посилки вихідних даних, виходячи з часу t_d , потрібного для доставки загального об'єму даних L_d , оцінюється як:

$$l_d = L_d \frac{T}{t_d}. \quad (22)$$

Довжина посилки вихідних даних – це сукупність технологічного заголовку (h) і безпосередньо складу посилки (d):

$$l_d = h + d. \quad (23)$$

Ефективність передачі вихідних даних γ визначається як:

$$\gamma = \frac{d}{h + d} = \frac{l_d - h}{l_d}. \quad (24)$$

Використовуючи наведену методику розрахуємо мінімально необхідну пропускну здатність каналу управління БПЛА:

При частоті видачі разових посилок $f = 1$ Гц та розмірі посилки 17 байт (рис.3, 4) пропускна спроможність дорівнює

$$V_{pk} = 17 * 8 * 1 = 136 \text{ біт/с.}$$

При частоті видачі команд ручного управління $f = 15$ Гц та розмірі посилки 13 байт (рис.3, 5)

$$V_{py} = 13 * 8 * 15 = 1560 \text{ біт/с.}$$

При частоті видачі команд ручного управління $f = 15$ Гц та розмірі посилки 28 байт (рис.3, 4)

$$V_{py} = 28 * 8 * 15 = 3360 \text{ біт/с.}$$

Загальна пропускна спроможність каналу управління враховуючи з урахуванням команд переключення розмір якої дорівнює 1 байт дорівнює:

$$V_{\Sigma} = 136 + 1560 + 3360 + 2 * 1 = 5058 \text{ біт/с.}$$

Висновки. Порівняння широкосмугових методів передачі ППРЧ, ШПС і OFDM підтверджують, що завадозахищеність сигналів відносно оптимальних (для кожного методу) завад однакова і прийнятна для використання у каналах управління БПЛА. Розглядаючи структуру уніфікованого каналу управління, тип команд (рис.2-5) та діаграми обміну даними (рис.6) ми бачимо, що для ручного управління БПЛА нам достатньо стандартного каналу зв'язку починаючи з КХ і закінчуючи СВЧ діапазонами.

ЛІТЕРАТУРА:

- 1.Финкин Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е переработаное, дополненное. Изд-во «Советское радио», 1970. – 728 с.
- 2.Биленко А.П., Волков Л.Н. Сравнение помехозащищенности радиолиний с широкополосными сигналами / А.П. Биленко, Л.Н. Волков // Радиотехника. – 1986. –№4. – С. 19-21.
- 3.В.А. Балашов, П.П. Воробийченко, Л.М. Ляховецкий. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами. — М.: Эко-трендз, 2012. – 228 с.
- 4.Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. — М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
- 5.Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. / Пер. с англ. под ред. В.П. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. - 520с.
- 6.Канащенкова А.И. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения. / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: «Радиотехника», 2004 — 320с.:ил.
- 7.Barnard J. Small UAV command-control and communication issues//IEEE on communicating with UAV's. 2007. P. 75-85.

Без рецензії.

д.т.н., с.н.с. Рома А.Н., Василенко С.В.

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОЙ РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Рассматривается использования в военных операциях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Канал управления БПЛА подвергается значительному влиянию умышленных помех противника. Для выполнения боевых задач предлагается использование широкополосных сигналов, с использованием сигналов с псевдослучайных последовательностей (ПСП), псевдослучайной перенастройкой рабочей частоты (ППРЧ) или ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Показано, что помехозащищенность широкополосных сигналов относительно оптимальных (для каждого метода) помех одинакова.

Рассмотрены структура канала управления, тип команд и диаграмму обмена сообщениями. Приведена методика оценки необходимой пропускной способности унифицированного радиоканала управления беспилотным летательным аппаратом.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), канал управления, псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ), ортогональное частотное разделение каналов (OFDM).

Prof. Roma O.M., Vasilenko S.V.

**FUNDAMENTALS OF BUILDING NOISE IMMUNITY RADIOCONTROL
UNMANNED AERIAL VEHICLES**

We consider the use of the military operations of unmanned aerial vehicles (UAVs). The control channel is subjected to significant influence UAV intentional interference opponent. To combat missions provided the use of wideband signals, using signals with pseudorandom sequences (PRS), Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) or Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). It is shown that the noise immunity of wideband signals on the optimum (for each method) identical interference.

The structure of the control channel, the type of chart commands and messaging. The technique of evaluating the necessary bandwidth unified radio control unmanned aerial vehicles.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM).