

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РАДІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОГО КАНАЛУ УПРАВЛІННЯ ТАКТИЧНИМ БПЛА

Застосування комплексів тактичних безпілотних літальних апаратів відкриває можливість оперативного отримання розвідувальної інформації різноманітних ділянок місцевості, періодичного спостереження заданих районів, цілезахвату, цілевказання та корегування вогню артилерії, забезпечення зв'язку та нанесення вогневих ударів по позиціям противника. Для забезпечення управління польотом тактичного безпілотного літального апарату здійснюється обмін службовою інформацією між ним та наземною станцією управління. Дослідження в даній роботі спрямовані на підвищення завадозахищеності каналу управління тактичним безпілотним літальним апаратом, тобто його спроможності забезпечувати передачу інформації в умовах як природніх, так і навмисних завад, які можуть створюватись засобами радіоелектронної боротьби супротивника. Завадозахищеність каналу управління, в першу чергу, визначається видом (технологією) модуляції, що була обрана при його побудові. Тому в роботі проводиться порівняльний аналіз енергетичних показників, а саме енергетичної ефективності та спектральної щільності потужності сучасних технологій та видів модуляції сигналів, які можуть бути використані при побудові каналу управління тактичним безпілотним авіаційним апаратом.

Ключові слова: канал управління, безпілотний літальний апарат, енергетична ефективність, спектральна щільність потужності, LORA.

Колтовсков Д.Г. Анализ энергетических показателей радиосигналов для построения помехозащищенного канала управления тактическим БПЛА. Применение комплексов тактических беспилотных летательных аппаратов открывает возможность оперативного получения разведывательной информации различных участков местности, периодического наблюдения заданных районов, целезахвата, целеуказания и корректировки огня артиллерии, обеспечения связи и нанесения огневых ударов по позициям противника. Для обеспечения управления полетом тактического беспилотного летательного аппарата осуществляется обмен служебной информацией между ним и наземной станцией управления. Исследования в данной работе направлены на повышение помехозащищенности канала управления тактическим беспилотным летательным аппаратом, то есть его способности обеспечивать передачу информации в условиях как естественных, так и преднамеренных помех, которые могут создаваться средствами радиоэлектронной борьбы противника. Помехозащищенность канала управления, в первую очередь, определяется видом (технологии) модуляции, которая была выбрана при его построении. Поэтому в работе проводится сравнительный анализ энергетических показателей, а именно энергетической эффективности и спектральной плотности мощности современных технологий и видов модуляции сигналов, которые могут быть использованы при построении канала управления тактическим беспилотным летательным аппаратом.

Ключевые слова: канал управления, беспилотный летательный аппарат, энергетическая эффективность, спектральная плотность мощности, LORA.

D. Koltovskov An analysis of the energy performance of radio signals to build an interference-protected control channel for tactical UAVs. The use of tactical unmanned aerial vehicle complexes makes it possible to quickly obtain reconnaissance information from various areas of the terrain, periodically monitor specified areas, target capture, target designation and adjust artillery fire, provide communications and deliver fire strikes to enemy positions. To ensure the flight control of a tactical unmanned aerial vehicle, service information is exchanged between it and the ground control station. The studies in this work are aimed at increasing the noise immunity of the control channel of a tactical unmanned aerial vehicle, that is, its ability to provide information transfer under conditions of both natural and deliberate interference, which can be created by enemy electronic warfare. The noise immunity of the control channel is primarily determined by the type (technology) of modulation that was chosen during its construction. Therefore, a comparative analysis of energy indicators, namely energy efficiency and power spectral density of modern technologies and types of signal modulation, which can be used in constructing a control channel for a tactical unmanned aerial vehicle, is carried out in the work.

Keywords: control channel, unmanned aerial vehicle, energy efficiency, power spectral density, LORA.

Постановка завдання. Канал управління між наземною станцією управління (НСУ) та тактичним безпілотним літальним апаратом БПЛА має забезпечити надійну передачу даних телеметрії (інформації про стан систем та агрегатів БПЛА), а також керування самим БПЛА в складних заводових умовах (дії природніх та навмисних завад). Побудова завадозахищеного каналу управління тактичним (БПЛА) являє собою складне завдання, що потребує проведення ретельних досліджень та практичних випробувань в різних умовах з метою оцінки його надійності та ефективності. Вимоги до завадозахищеності та надійності

каналу управління тактичними БпЛА постійно підвищуються у зв'язку з вдосконаленням засобів радіоелектронної боротьби. Відомо, що швидкість передачі даних в каналі управління тактичним БпЛА має бути відносно не високою та становити декілька десятків кбіт/с, тому порівняння радіосигналів (видів та технологій модуляції) з метою вибору для побудови даного каналу доцільно проводити за енергетичною ефективністю.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз побудови каналів управління БпЛА цивільного призначення свідчить про використання різних технологій модуляції сигналів [1]. Зокрема, широке застосування отримали технології розширення спектру – псевдовипадкове перестроювання робочої частоти (ППРЧ) (від англ. *Frequency Hopping Spectrum Spreading, FHSS*) та пряме розширення (від англ. *Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*). Відомо, що використання ортогонального частотного ущільнення сигналів – *OFDM* (від англ. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), переважає *FHSS* та *DSSS* в умовах багатопроменевого розповсюдження радіохвиль та забезпечує більшу швидкість передачі інформації. В [1] досліджено показники завадозахищеності для технології *SC-FDM* (від англ. *Single Carrier Frequency Division Multiplexing*) з використанням різних видів модуляції сигналів, таких як *BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM, 64-QAM*.

В [2] розглядається важливість досліджень архітектури та методів побудови завадозахищених каналів управління БпЛА військового призначення в США. В свою чергу, пропонується обрання військових систем обміну інформації, таких як *Link 11, 16* та *22* для побудови завадозахищеного каналу управління *Command and Control (C2)* БпЛА військового призначення.

Дослідження завадозахищеності каналів управління БпЛА за рахунок використання різних типів антенних систем (багатосекційні антенні решітки, секторні антени та антени на поворотних пристроях), а також використання сигналів в *P*-діапазоні (400 – 600 МГц) розглянуто в [3].

Швидкісні показники обміну інформації між НСУ та БпЛА розглянуто в роботі [4] та доведено, що для забезпечення якісного управління БпЛА з НСУ швидкість в каналі повинна складати близько 56 кбіт/с при ймовірності бітової помилки *BER* (від англ. *Bit Error Ratio*) не більше 10^{-6} . Шляхи підвищення показників енергетичної ефективності та спектральної щільності потужності сигналів (СЩП) завадозахищених каналів управління БпЛА за рахунок застосування *QAM* модульованих сигналів розглянуто в [5].

В [6] автор доводить, що фазоманіпульовані шумоподібні сигнали (ФМ ШПС) володіють кращими показниками завадозахищеності ніж сигнали із ППРЧ та в декілька разів перевищують їх за коефіцієнтом пригнічення навмисної завади.

Аналіз вищевказаних джерел показує, що дослідження завадозахищеності каналів управління БпЛА проводилися лише для конкретних вихідних даних, а саме – типів БпЛА та їх призначення, без порівняльного аналізу енергетичних показників сучасних та перспективних технологій та видів модуляції. Тому метою роботи є аналіз сучасних технологій та видів модуляції сигналів за критеріями енергетичної ефективності та СЩП для побудови завадозахищеного каналу управління тактичним БпЛА.

Виклад основного матеріалу. Використання сучасних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) супротивником з метою впливу на канали управління тактичними БпЛА обумовлює необхідність проведення досліджень технологій перетворення сигналів та видів модуляції, сигнально-кодових конструкцій, методів адаптації параметрів сигналів до завадової обстановки для побудови завадозахищених каналів управління БпЛА.

Незважаючи на можливість виконання БпЛА льотних завдань в автоматичному режимі (автопілотування) з повною автономністю, наявність каналів управління між НСУ та БпЛА залишається актуальною.

Як правило, на борту БпЛА розташовано не менш двох систем зв'язку з НСУ, таких як дуплексна апаратура передачі командно-телеметричної інформації та симплексна апаратура передачі інформації від корисного навантаження. Передача телеметричної

інформації при польотах на великі відстані (більш 100 км) може здійснюватися за допомогою супутникових систем (*Iridium*, *Globalstar* та ін.) [2]. Для тактичних БПЛА доцільно використовувати окремі канали зв'язку для передачі командно-телеметричної інформації та інформації від корисного навантаження [6].

До каналів управління тактичними БПЛА висуваються спеціальні вимоги: мінімальні затримки в каналі управління (робота в режимі реального часу);

симетрична робота каналу управління;

можливість роботи в складних заводових умовах (наявність навмисних та ненавмисних завод) та умовах багатопроменевого розповсюдження сигналів;

адаптація каналу управління по швидкості обміну інформацією між НСУ та БПЛА, ефективне використання спектру сигналу та вихідної потужності;

можливість забезпечувати скритне управління БПЛА (розвідзахищеність);

низьке енергоспоживання для підвищення автономності роботи БПЛА;

ймовірність бітової помилки не повинна перевищувати показника 10^{-6} [4].

Аналіз перерахованих специфічних вимог показує, що практична реалізація заводозахищеного каналу управління тактичним БПЛА неможлива на базі відомих протоколів, таких як *Bluetooth*, *Wi-Fi*, *WiMAX* та ін. Основними їх недоліками таких є низька енергетична ефективність та заводозахищеність.

Важливим завданням при проектуванні заводозахищеного каналу управління тактичним БПЛА є вибір діапазону робочих частот.

Відомо, що основні втрати при розповсюдженні радіосигналів (втрати у вільному просторі), розраховуються за наступним виразом [6]:

$$FSL = 10 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2,$$

де d – відстань між БПЛА та НСУ, f – частота сигналу, c – швидкість світла.

На рис. 1 представлено залежність основних втрат від відстані між НСУ та БПЛА для різних значень робочої частоти каналу управління. В реальних умовах втрати на трасі розповсюдження сигналу будуть більшими за рахунок рельєфу місцевості та місцевих предметів (споруд). Для їх урахування доцільно використовувати рекомендації ІТУ-Р, зокрема Р.1546 та Р.528 [7].

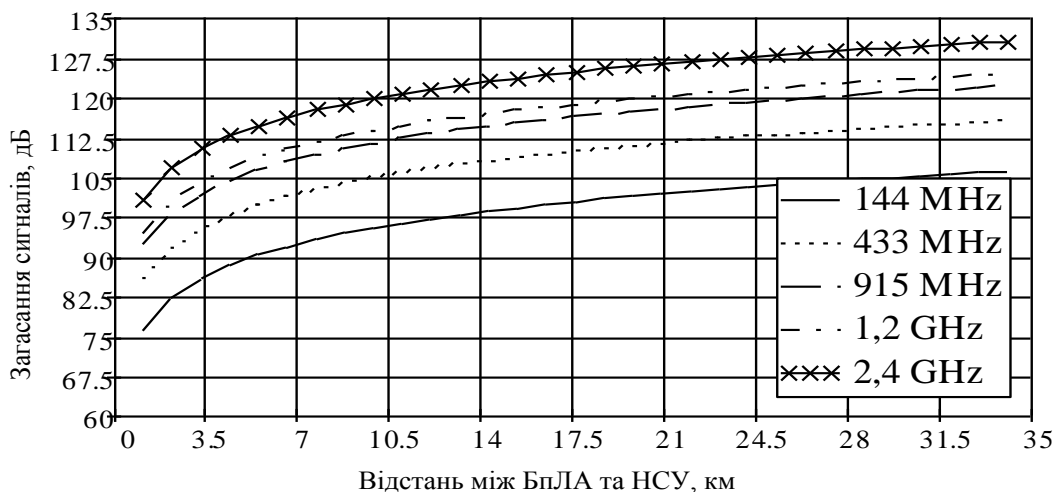


Рис. 1. Залежність втрат на різних частотах від відстані між БПЛА та НСУ

При енергетичній оцінці різних технологій та видів модуляції сигналів слід керуватися критеріями енергетичної ефективності та СЩП сигналів. Причому енергетична ефективність визначається як енергія, яку необхідно затратити на передачу одного біта

інформації з заданою достовірністю (ймовірністю бітової помилки), а СЦП визначається як зосередження потужності сигналу на один інтервал частоти, що забезпечує передачу інформації на заданих швидкостях.

Ймовірність бітової помилки (BER) в загальному випадку залежить від співвідношення сигнал/шум (E_b/N_0) [8]:

$$BER = f\left(\frac{E_b}{N_0}\right),$$

де E_b – енергія, що витрачається для передачі одного біту інформації, N_0 – спектральна щільність потужності білого шуму в каналі.

Якщо потужність передавача дорівнює P , то величина енергії, що приходить на один біт інформації дорівнює $E_b = PT_b$, де T_b – тривалість біту.

Розглянемо найбільш перспективні класи сигналів та технології модуляції, що використовуються чи можуть бути використані при побудові заводо захищеного каналу управління тактичним БпЛА.

В табл. 1 наведено залежності ймовірності бітової помилки (BER) від співвідношення E_b/N_0 , а також формули розрахунку СЦП для різних технологій та видів модуляції сигналів [9 – 11]. Амплітудні модуляції ASK та $M-ASK$ (від англ. *Amplitude Shift Keying*) являють собою найпростіші види цифрової модуляції сигналів. З виразу для оцінки СЦП ASK модульованих сигналів очевидно, що спектр сигналу має дискретну складову – несучу частоту. При двійковій модуляції сигналів ASK множина ймовірностей значень амплітуди обмежується двома значеннями. СЦП може бути суттєво збільшена при використанні більшої кількості значень амплітуди, що застосовується в багатопозиційній амплітудній модуляції ($M-ASK$). Оцінка СЦП $M-ASK$ аналогічна СЦП ASK , але бітовий інтервал T_b замінюється на символний інтервал $T_s = T_b \log_2 M$, де M – множина ймовірних значень амплітуди сигналу, $M = \log_2 k$, де k – кількість біт в одному символі. Амплітудні види модуляції сигналів мають низьку СЦП та потребують великого динамічного діапазону підсилювача потужності, що в свою чергу призводить до збільшення енергоспоживання та масо-габаритних показників приймально-передавального обладнання на борту БпЛА.

Двійкова фазова модуляція $BPSK$ (від англ. *Binary Shift Keying*) визначається за виразом, аналогічним СЦП ASK , за винятком відсутності несучої частоти в спектрі сигналу.

СЦП квадратурної фазової модуляції $QPSK$ (від англ. *Quadrature Phase Shift Keying*) в 2 рази перевищує СЦП модуляції сигналів $BPSK$. Вид модуляції сигналів $QPSK$ та її підвиди найчастіше використовуються для побудови каналів управління БпЛА [2, 4].

Амплітудно-фазова модуляція QAM (від англ. *Quadrature Amplitude Modulation*) являє собою багатопозиційний вид модуляції, при якій відбувається одночасна зміна двох параметрів несучого коливання (амплітуди й фази).

В частотній модуляції FSK (від англ. *Frequency Shift Keying*) носієм інформації є зміна номіналу несучої частоти. Технологія мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів $OFDM$ застосовує велику кількість близько розміщених ортогональних піднесучих, які в свою чергу модулюються за допомогою QAM , $QPSK$ або $BPSK$. Слід зазначити, що перевагами даної технології модуляції сигналів є висока спектральна ефективність за рахунок перекриття спектрів піднесучих, можливість роботи в умовах багатопроменевості за рахунок наявності захисних інтервалів, можливість використання різних видів модуляції на різних піднесучих. Недоліками технології $OFDM$ є високі енергетичні затрати при реалізації приймально-передавальних пристроїв та висока чутливість до доплерівського зсуву частоти, що майже унеможливує використання даної технології для побудови каналу управління тактичним БпЛА.

Технологія модуляції сигналів $LORA$ відноситься до класу шумоподібних сигналів та базується на розширенні спектру та варіації лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) або CSS (від англ. *Chirp Spread Spectrum*) при якій дані кодуються широкосмуговими імпульсами та відноситься до внутрішньоімпульсних частотно-модульованих сигналів з лінійним законом

зміни миттєвої частоти (ВЛЧМ). Частота CSS радіосигналу може як збільшуватись (*up-chirp*), так і зменшуватись (*down-chirp*) відносно центральної (несучої) частоти.

Таблиця 1

Оцінка енергетичних показників для різних технологій та видів модуляції сигналів

Вид (технологія модуляції)	Енергетичний показник	Оцінка енергетичного показника
ASK	BER	$Q\left(\sqrt{E_b/N_0}\right)$
	СЦП	$\frac{A^2 T_b}{4} \left\{ \frac{\sin(\pi f - f_c T_b)}{\pi f - f_c T_b} \right\}^2 \left[1 + \frac{1}{T_b} \sigma(f - f_c) \right]$
M-ASK	BER	$\frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{\log_2 M E_b}{(M-1)^2 N_0}}\right)$
	СЦП	$\frac{A^2 T_s}{4} \left\{ \frac{\sin(\pi f - f_c T_s)}{\pi f - f_c T_s} \right\}^2 \left[1 + \frac{1}{T_s} \sigma(f - f_c) \right]$
BPSK	BER	$Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)$
	СЦП	$A^2 T_b \left(\frac{\sin(\pi f - f_c T_b)}{\pi f - f_c T_b} \right)^2$
QPSK	BER	$Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)$
	СЦП	$2A^2 T_b \left(\frac{\sin(\pi f - f_c 2T_b)}{\pi f - f_c 2T_b} \right)^2$
QAM	BER	$\frac{2P_0 - P_0^2}{\log_2 M}$, де $P_0 = \frac{2\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3\log_2 M E_b}{M-1 N_0}}\right)$
	СЦП	$A^2 T_b \sigma^2 \left(\frac{\sin \pi f T_b \log_2 M}{\pi f T_b \log_2 M} \right)^2$
FSK	BER	$Q\left(\sqrt{\left[1 - \frac{\sin(2\pi n)}{2\pi n}\right] \frac{E_b}{N_0}}\right)$
	СЦП	$\left(\frac{\cos \pi f T_b}{1 - (4fT_b)^2} \right)^2$
OFDM	BER	$2Q\left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right]$
	СЦП	$A^2 T \sigma^2 \sum_{k=0}^{N-1} \left H_a\left(f - \frac{1}{T}\left(k - \frac{N-1}{2}\right)\right) \right ^2$
LORA	BER	$Q\left(\frac{\log_{12}(SF) E_b}{\sqrt{2} N_0}\right)$
	СЦП	$\frac{1}{T_s^2 M^2} \sum_{-\infty}^{\infty} \left \sum_0^{M-1} n \frac{B}{M} \right ^2$

Позначення, що використані в табл. 1: $Q(x)$ – інтеграл помилок, M – кратність модуляції (показник коефіцієнту розширення спектру), m – індекс модуляції, SF – коефіцієнт розширення спектру, A – амплітуда сигналу, f_c – несуча частота, T_b – тривалість біту, k – кількість біт в одному символі, T_s – символний інтервал, B – ширина діапазону, n – коефіцієнт довжини символу T_s , N – кількість несучих, H_a – функція амплітуди, T – тривалість імпульсу.

На рис. 2 зображено результати розрахунків ймовірностей бітової помилки (BER).

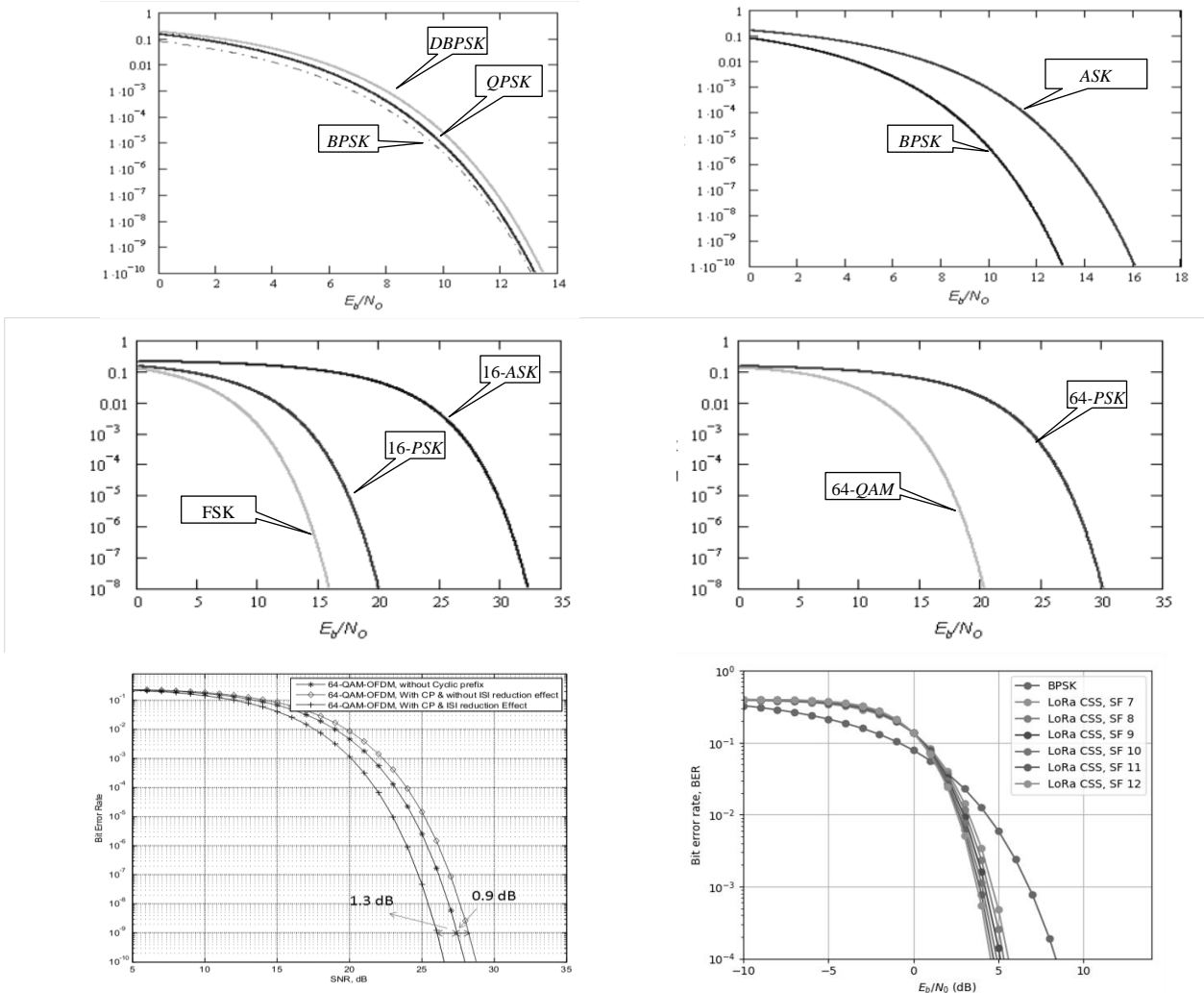


Рис. 2. Результати розрахунків ймовірності бітової помилки

Результати розрахунків енергетичної ефективності при заданій ймовірності бітової помилки та СЦПІ наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння видів та технологій модуляції за енергетичними показниками

Вид модуляції	E_b/N_0 (дБ) для $BER = 10^{-6}$	СЦПІ $\{0, T\}$ (дБ)
ASK	14	14
16-ASK	32	19
BPSK	11	21
QPSK	12,5	28
64-QAM	21	27
FSK	15	24
OFDM (64-QAM на піднесучих)	24	25
LORA (SF=10)	9	35

Видно, що технологія модуляції *LORA* має кращі енергетичні показники серед усіх розглянутих технологій та видів модуляції сигналів. Тому для побудови каналу управління тактичним БпЛА в умовах завад як природного, так і штучного походження, найбільш доцільним є застосування саме *LORA* модуляції. Однак висока завадозахищеність *LORA* досягається за рахунок зменшення швидкості передачі даних в каналі в залежності від обраного коефіцієнту розширення спектру *SF* (3-30 кбіт/с) [12, 13]. Тому актуальним завданням є удосконалення протоколу *LORA* для забезпечення вимог щодо швидкості інформаційного обміну між НСУ та БпЛАК.

Висновки. Таким чином, в роботі проведено порівняльний аналіз сучасних технологій та видів модуляції сигналів, що потенційно можуть бути використані при побудові каналу управління тактичним БпЛА. У результаті аналізу встановлено, що найвищі енергетичні показники має технологія модуляції сигналів *LORA*.

Але, в свою чергу, вибір даної технології модуляції сигналів призводить до значного зменшення швидкості обміну телеметричної інформації між тактичним БпЛА на НСУ, тому напрямком подальших досліджень є створення методики підвищення швидкості передачі даних в каналі управління тактичними БпЛА за рахунок керування параметрами ВЛЧМ сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sukhrob Atoev. An efficient SC-FDM modulation technique for a UAV communication link. Електронний ресурс: <https://www.mdpi.com/journal/electronics>.
2. Design Considerations for Military Data Link Architecture in Enabling Integration of Intelligent Unmanned Air Vehicles (UAVs) with Navy Units. Електронний ресурс: <https://www.researchgate.net/publication/323839640>.
3. Донченко А.А., Чиров Д.С. Обоснование требований к системе связи беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности. Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2015. – Том 9. – №12. – с. 12 – 16.
4. Полюнкин А.В. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами. Известия ТулГУ. Технические науки, – 2013. – Вып. 7. Ч. 2. – с. 98-106.
5. Боев Н. М. Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов. Радиопизика, радиотехника, связь. ТРУДЫ МФТИ, – 2014. – Том 6, № 2. – с. 162 – 166.
6. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами. Вестник СГАУ, – 2012. – с. 86 – 91.
7. Рекомендация МСЭ-R P.1546-2. Електронний ресурс: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-2-200508-S!!PDF-R.pdf.
8. Шелковина К.А., Лебедев О.Г. Сравнительный анализ методов цифровой модуляции в стандартах цифрового радиовещания/ К.А. Шелковина, О.Г. Лебедев // Обработка информации в складних технічних системах. – Харьков: ХНУРЭ, 2014.
9. Xiong Fuqin, Digital Modulation Techniques. Artech House Publishers, 2006.
10. Mauri Kangas, Power Spectral Densities of Digitally Modulated Signals, Post-Graduate Course in Radio Communications, 2001.
11. Marco; Elzanaty, Ahmed Mohamed, On the LoRa Modulation for IoT: Waveform Properties and Spectral Analysis, IEEE Internet of Things Journal, 2019.
12. Восколович О.І. Технологія низькошвидкісної передачі даних *LORA* / О.І. Восколович, І.В. Панченко, І.О. Чурілов // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск № 2. – Київ: ВІТІ, 2017.
13. Панченко І.В. Способи підвищення швидкості передачі даних в бездротових сенсорних мережах з використанням *LORA* / І.В. Панченко, О.І. Восколович, Д.Г. Колтовсков // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск № 3. – Київ: ВІТІ, 2018.