

УДК 355.424.3:623.746-519

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.043036

І. В. ГОРБАТИЙ¹, доктор техн. наук, професор,
ORCID: 0000-0001-6495-192X;

Ю. І. БУДАРЕЦЬКИЙ¹, канд. техн. наук, с.н.с., доцент,
ORCID: 0000-0002-8882-0374;

А. П. БОНДАРЄВ¹, доктор техн. наук, професор,
ORCID: 0000-0001-8495-524X;

І. В. ПЕТЛЮК²,
ORCID: 0000-0001-5099-8815,

¹ Національний університет «Львівська політехніка», Львів

² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Основним засобом ураження пускових установок супротивника у сучасному бою є артилерія. За оціночними даними на артилерію у протистоянні з Росією припадає від 70 до 80% всіх втрат, понесених сторонами конфлікту.

Ефективність стрільби артилерії забезпечує єдиний автоматизований радіолокаційний комплекс розвідки вогневих позицій (РЛК РВП) і безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Обмін інформацією між наземною і повітряною складовими частинами комплексу, передавання даних до автоматизованої системи управління вогнем відбувається каналами завадозахищеного зв'язку з використанням ретрансляторів сигналів, які розміщені на БПЛА.

Розроблені в роботі математичні моделі надали можливість теоретично і експериментально, шляхом імітаційного моделювання оцінити ефективність використання запропонованих нових та вдосконалених відомих методів синтезу апаратних засобів для забезпечення зв'язку з необхідною достовірністю передавання інформації.

Розроблено пристрої фазової та кадрової синхронізації на основі модернізованої схеми фазового автопідстроювання частоти, що зменшило час входу в синхронізм і збільшило смугу степення, суттєво підвищило якість демодуляції сигналів та завадозахищеність каналів зв'язку в умовах складної завадової обстановки. Це дало змогу реалізувати експериментальний зразок запропонованої системи завадозахищеного зв'язку.

Ключові слова: завадозахищеність; модуляція-демодуляція; артилерійська розвідка; телеметрична інформація; ретрансляція сигналів.

Вступ

Постановка проблеми. Успіх у ході сучасних бойових дій забезпечує актуальна інформація про противника, місцевість і погоду [1]. Прилади спостереження розміщують на БПЛА, а інформацію про цілі передають радіоканалом на РЛК РВП [2]. Актуальність такого поєднання визначила створення окремого роду військ — Сил безпілотних систем Збройних сил України [3].

Обмін інформацією між РЛК РВП і БПЛА відбувається каналами зв'язку з ретрансляторами сигналів, які встановлюють на борту БПЛА.

Для впевненого зв'язку в умовах природних завад та РЕБ використовують канали безпроводового завадозахищеного зв'язку. Для їх здійснення необхідна розробка нових і модернізація відомих методів синхронізації і модуляції-демодуляції, що є актуальною науково-технічною задачею.

Обмін даними з БПЛА здійснюють безпроводовими каналами, зокрема через Інтернет, що вимагає особливих заходів щодо захисту інформації [4].

З урахуванням специфіки каналу передавання даних БПЛА – НСУ потрібні малогабаритні апаратні засоби, які є швидкими і не потребують значної обчислювальної потужності та великого обсягу пам'яті.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю розв'язання протиріччя між швидкістю і завадостійкістю передавання даних в умовах обмеженості частотного та енергетичного ресурсів системи та необхідністю роботи в умовах застосування противником засобів РЕБ.

Аналіз останніх досліджень. Перспективним напрямком у розвитку систем зв'язку з БПЛА є використання частотних діапазонів вище 5 ГГц, що дає можливість передавати великий обсяг даних (наприклад, зображення з давачів випромінювання). Радіус дії радіосистеми зв'язку цього діапазону різко обмежує сильна залежність умов поширення електромагнітних хвиль від погодних умов [5].

Для протистояння системам РЕБ, зокрема виявленню частоти та перехопленню управління, необхідно зменшувати потужність передавачів, тобто забезпечити високу завадозахищеність.

Спираючись на аналіз сучасних тенденцій, було прийнято рішення розробити окремий заводозахисний модуль зв'язку, що може бути встановлено в будь-який БПЛА.

Метою роботи є розроблення системи заводозахисного зв'язку з БПЛА на основі використання вдосконалених відомих та запропонованих нових заводостійких сигнально-кодових конструкцій, вдосконалених методів приймання радіосигналів із застосуванням модифікованих нейронних мереж, удосконалених методів фазової та кадрової синхронізації.

Основна частина

За основу прийнята структура односпрямованої системи передавання даних від передавача до ретранслятора і від ретранслятора до приймача. Така система передає дані (зокрема дані відеоспостереження земної поверхні) з борта БПЛА на наземний інформаційний комплекс. Опціонально передбачено можливість створення окремого радіоканалу для передавання сигналів керування з наземного комплексу на БПЛА [6; 7].

Створено макет системи передавання даних з підвищеною швидкістю та заводостійкістю для діапазону частот від 200 МГц до 6 ГГц. Макет забезпечує передавання даних із символною швидкістю до 100 Мсим/с та бітовою швидкістю до 300 Мбіт/с. Макет забезпечує передавання даних із застосуванням шести видів квадратурної модуляції та їх комбінацій.

На основі проведених досліджень, експериментів та імітаційного моделювання запропоновано узагальнені структурні схеми передавального та приймального пристроїв, які подано на рис. 1.

Передавальний пристрій (рис. 1, а) містить мікроконтролер для отримання через порт Ethernet даних, які необхідно передати, їх попереднього оброблення й перетворення до вигляду, придатного для подальшого передавання на модуль формування цифрових сигналів, а також шифрування даних і роботи інтерфейсу користувача.

Модуль формування цифрових сигналів формує необхідні сигнали керування та формує дані у потрібному форматі для їх передавання на цифро-аналоговий перетворювач.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) формує інформаційні модулюючі сигнали.

Генератор радіочастоти формує високостабільний опорний радіосигнал заданої частоти. Стабілізацію частоти здійснено від вбудованого опорного генератора або від синтезатора частоти за допомогою модуля фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

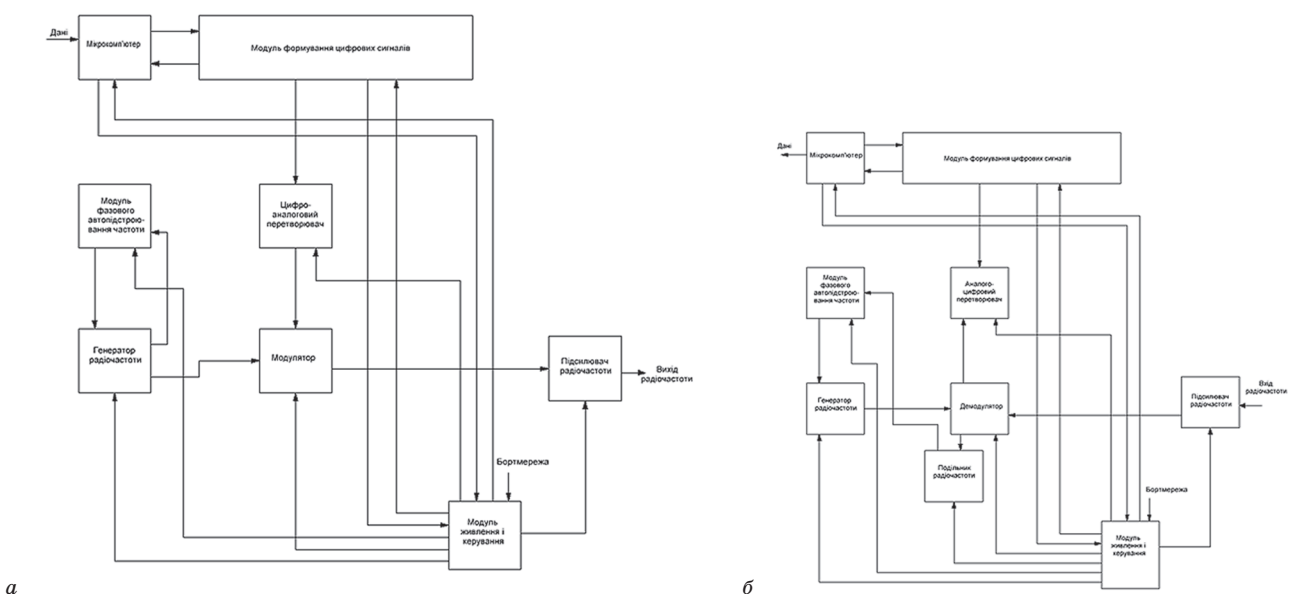


Рис. 1. Структурні схеми передавального (а) та приймального (б) пристроїв

Модулятор формує модульований сигнал із заданим видом модуляції за допомогою високостабільного опорного радіосигналу й модулюючих сигналів. З виходу модулятора цей сигнал подають на підсилювач радіочастоти й звідти на передавальну антену.

Модуль живлення і керування призначений для формування напруг живлення і сигналів керування відповідними радіочастотними модулями.

Для підвищення місткості, заводостійкості, інформаційної та енергетичної ефективності систем зв'язку, зокрема систем бездротового зв'язку, використано новий різновид амплітудно-фазової модуляції — амплітудну модуляцію багатьох складових АМБС (англ. *amplitude modulation of many com-*

ponents, АММС), згідно з яким модульований сигнал формують у вигляді суми його N гармонічних складових, що відрізняються початковими фазами φ_n . Такий сигнал має вигляд [8]:

$$u_{\text{АМБС}}(t) = \sum_{n=1}^N U_0 a_n u_{m_n} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (1)$$

де a_n — коефіцієнти пропорційності для n -их каналів модулятора, що є параметрами модулятора; $u_{m_n}(t)$ — модулюючі сигнали на n -их входах модулятора.

Використано також АМБС-сигнал, при формуванні якого складові зсунуті між собою на фазові кути $\Delta\varphi = \pi/N$. (2)

Приклади сигнальних сузір'їв доцільних для використання АМБС-сигналів наведено на рис. 2. Для формування таких сигналів застосовано АМБС модулятор, а для оброблення таких сигналів — АМБС демодулятор.

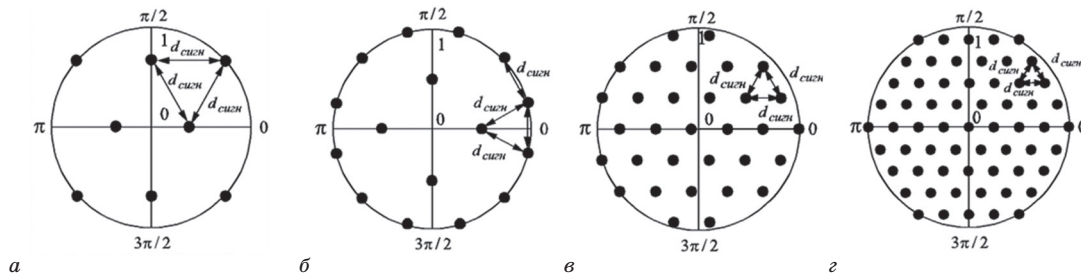


Рис. 2. Сигнальні сузір'я зі зсувом 8-АМБС:
а — 3 складові; б — 8-АМБС 6 складових; в — 32-АМБС 3 складові; г — 61-АМБС 3 складові

Установлено, що запропоновані засоби для формування й оброблення АМБС-сигналів мають такі переваги [8-11]:

- меншу кількість рівнів амплітуди модулюючих сигналів для формування АМБС-сигналів, що зменшує вплив внутрішніх завад та знижує вимоги до розрядності ЦАП, застосованих для формування модулюючих сигналів;
- меншу кількість рівнів амплітуди сигналів на виході кожного підканалу демодулятора АМБС, що зменшує вплив внутрішніх завад у демодуляторі та знижує вимоги до розрядності аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), застосованих у процесі розпізнавання символів;
- при обробленні АМБС-сигналів із сигнальними сузір'ями непрямокутної форми забезпечується вища стійкість до дрейфу нуля в підканалах демодулятора АМБС;
- можливість застосування запропонованого модулятора й демодулятора АМБС для формування й оброблення АМн-, ФМн-, АФМн-, КАМ- і АМБС-сигналів.

До складу приймального пристрою (рис. 1, б) входить підсилювач радіочастоти, що підсилює радіосигнал із приймальної антени й передає на вхід демодулятора.

Генератор радіочастоти формує опорний радіосигнал заданої частоти, когерентний за фазою із вхідним радіосигналом. Когерентність забезпечує модуль ФАПЧ.

Демодулятор формує демодульовані сигнали з радіосигналу за допомогою опорного радіосигналу заданої частоти й передає їх на АЦП.

АЦП призначений для формування інформаційних демодульованих сигналів для модуля формування цифрових сигналів.

Модуль формування цифрових сигналів формує необхідні сигнали керування та формує дані в потрібному форматі для їх передавання на мікроконтролер.

Мікроконтролер виконує функції попереднього оброблення прийнятих через порт Ethernet даних, а також розшифрування даних і роботу інтерфейсу користувача.

Модуль живлення і керування призначений для формування напруг живлення і сигналів керування відповідними радіочастотними модулями.

Одним з основних технічних протиріч проектування демодулятора приймача інформаційної системи є суперечливість вимог до швидкості та завадостійкості передавання даних. Звуження смуги пропускання демодулятора підвищує завадостійкість, тобто вимагає меншої потужності передавача. Але таке звуження призводить до зменшення швидкості передавання даних і звуження смуг захоплення та утримання частоти вхідного сигналу. Навпаки, розширення шумової смуги забезпечує вищу швидкість передавання і менший час перехідних процесів, але вимагає більшої потужності сигналу.

Це протиріччя було частково розв'язано шляхом структурної модифікації демодулятора на основі ФАПЧ [12], його імітаційного моделювання [13; 14] та параметричного синтезу [15]. Ідея підвищен-

ня завадостійкості зі збереженням швидкодії полягає у впровадженні вузькосмугового квадратурного фільтра перед фазовим детектором, що редукує шумові зриви синхронізації, та коригуючого фільтра верхніх частот після фазового детектора, що відновлює динамічні властивості.

Математична модель модифікованого демодулятора містить п'ять диференціальних та вісім алгебраїчних рівнянь і має вигляд

$$d\Phi(t)/dt = F(\Phi(t), \Phi S(t), P, PS, PM, N(t)). \quad (3)$$

Сукупністю змінних, які описують поточний стан пристрою і моделі, є вектор

$$\Phi(t) = \text{colon}(\Phi, \Phi 2, u1S, u1C, u2S, u2C, u3, u4, u5, y2S, y2C, y4, y5). \quad (4)$$

Компонентами цього вектору є фазові розузгодження між вхідним сигналом та сигналом оцінки, який генерує когерентний демодулятор, а також напруги у вузлах демодулятора, які пропорційні частотним розузгодженням вхідного та оцінювального сигналів.

Сам пристрій стеження за частотою описує вектор параметрів із шести компонентів:

$$P = (\Omega_U, \Omega_0, m, a, m_0, a_0). \quad (5)$$

Компонентами вектору є коефіцієнт підсилення петлі, доплерівський зсув між вхідним та оцінювальним сигналом, зумовлений швидкістю БПЛА та частотним прицілюванням, а також коефіцієнти пропорційності та смуги зрізу внутрішніх фільтрів демодулятора. У виборі оптимальних значень цих компонент власне і полягає параметричний синтез.

Вектори P_S та P_M у формулі (3) містять параметри сигналу (миттєві значення носійної частоти і доплерівського зсуву) та застосованої модуляції (індекс та частоту модуляції), а функції $\varphi_S(t)$ та $N(t)$ — змінні у часі фази сигналу та інтенсивність шуму на вході.

У роботах [13; 15] проведено аналіз модифікованого демодулятора для випадку приймання радіолокаційного відгуку. Окремі результати імітаційного моделювання для випадку приймання модульованих радіосигналів інформаційних систем наведено на рис. 3.

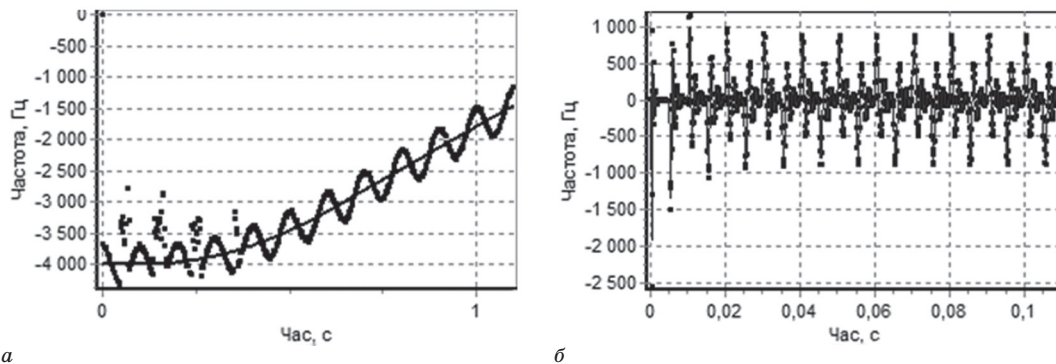


Рис. 3. Моделювання пристрою стеження як детектора сигналів із кутовою модуляцією

Процес стеження за сигналом зі змінною носійною частотою (тонка лінія) та одночасною фазовою модуляцією гармонічним сигналом показано на рис. 3, а. Оціночний сигнал (потовщена лінія) показує можливість одночасного стеження за носієм та виділення модулюючого сигналу зі зривами стеження на початку сеансу. Аналогічні результати для випадку фазової маніпуляції подано на рис. 3, б. Масштаб на рис. 3 обрано для наочності і демонстрації можливостей імітаційної моделі, яка була використана для параметричного синтезу проекрованої системи зв'язку вже із фактичними параметрами цієї системи.

Застосування імітаційної моделі для аналізу схеми стеження за носійною (СНН) приймача сигналу GPS показало, що модифікований демодулятор входить у зв'язок у десять разів швидше, ніж класичний.

Розглянемо особливості пакету кадрової синхронізації та імітаційне моделювання його шумових властивостей.

Базова конфігурація проекрованої системи прийнята односторонньою, тобто без зворотного зв'язку, то процес входження у сеанс зв'язку вимагає передавання службової сигналізації. Розробниками передбачено, що службова сигналізація містить пакети частотно-фазової, символної та кадрової синхронізації.

Пакет кадрової синхронізації є багаторазово переданим відрізком m -послідовності із вузькою функцією автокореляції. Довжина відрізка становить 512 біт, тобто символів «0» та «1», які по чергові змінюють один одного. За використання складного сигнального сузір'я це мають бути точки сузір'я, розташовані діаметрально протилежно відносно центру сузір'я. Відрізок m -послідовності не становить таємниці і має бути відомий усім передавачам і приймачам системи. Прийнято використання

m -послідовності на базі 10-розрядного регістру зсуву (максимальна довжина 1024 біти) із породжуючим поліномом $G1 = 1 + x^3 + x^{10}$.

Функцію автокореляції такого відрізка послідовності представлено на рис. 4, а.

При передаванні сигналів через радіоканал завади та теплові шуми впливають як на виникнення бітових помилок у інформаційних кадрах, так і на якість та саму можливість процедур синхронізації. Проведено моделювання процесу кадрової синхронізації, тобто розрахунку та виявлення піків взаємкореляційної функції, за умов дії адитивної гауссівської завади різної інтенсивності. Результати такого моделювання для відношень спектральної густини шуму до енергії передавання біта (N/E_b) від 0 до 1,2 наведено на рис. 4.

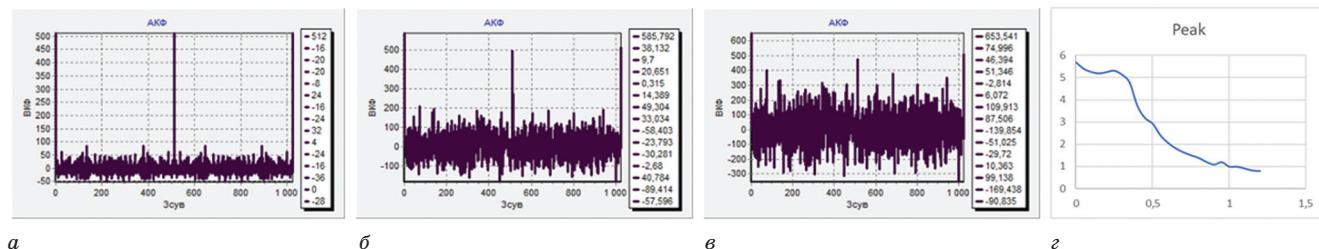


Рис. 4. Функція автокореляції 512 m -послідовності для різної інтенсивності шуму (а, б, в) та відношення рівнів основного та паразитних викидів (г)

Для кількісної оцінки граничних умов можливості синхронізації побудований графік залежності відношення рівнів основного та побічних (паразитних) викидів АКФ від інтенсивності шуму, який зображено на рисунку 4г. Для рівнів шуму (N/E_b) до 0,5 відношення рівнів основного і паразитних піків є досить високим для впевненого призначення порогу розпізнавання та забезпечення необхідної якості синхронізації.

Наступна специфіка приймача полягає в тому, що беручи до уваги особливості використовуваного в схемі приймача мікроконтролера, в тому числі підтримку операційних систем на основі ядра Linux, можливим стає використання платформи програмно-визначеного радіо GNU Radio.

Програмно-визначене оброблення радіосигналів дало змогу використовувати адаптивні або нейронні алгоритми для покращення достовірності розпізнавання сигналів в складних радіокомунікаційних умовах. Прийнятий сигнал після попереднього підсилення подають на 12-бітний вбудований в мікроконтролер АЦП та надалі обробляють у мікроконтролері при частоті дискретизації до 200 кГц. Це дало змогу використати нейронні алгоритми оброблення радіосигналів і зменшити імовірність символної помилки в складних радіокомунікаційних умовах (відношення сигнал/шум менше 0 дБ). Запропоновано використовувати нейронну мережу з одновимірною згортковою архітектурою. Використання операцій згортки дало змогу виявляти та ідентифікувати закономірності зміни параметрів сигналів незалежно від того, в які саме моменти часу ці закономірності проявляються. Використання рекурентних або повнозв'язних шарів дало змогу узагальнити виявлені явні та абстрактні закономірності в загальному контексті та отримати на виході кінцеву бітову інформаційну послідовність [16].

Розроблені програми імітаційного моделювання дали змогу відпрацювати основні технічні показники макету, а лабораторні дослідження його експериментального зразка підтвердили можливість забезпечення заданих технічних характеристик.

Висновки

Розроблені нові та вдосконалені відомі методи генерування і оброблення сигналів та запропонована структура системи завадозахищеного зв'язку дадуть змогу збільшити дальність зв'язку між БПЛА й наземним комплексом порівняно із традиційними підходами до забезпечення зв'язку при досягненні необхідної достовірності передавання інформації.

Удосконалені та запропоновані для використання методи фазової синхронізації забезпечать підвищення якості синхронізації в умовах складної завадової обстановки.

Запропоновано використовувати нейронну мережу з одновимірною згортковою архітектурою для оброблення сигналів при малих відношеннях сигнал/шум. Використання операцій згортки дає змогу виявляти та ідентифікувати закономірності зміни параметрів сигналів незалежно від того, в які саме моменти часу ці закономірності проявляються. Використання рекурентних або повнозв'язних шарів дає змогу узагальнювати виявлені явні та абстрактні закономірності в загальному контексті та отримувати на виході кінцеву бітову інформаційну послідовність.

Список використаної літератури

1. Кривошеев А. М., Приходько А. І., Петренко В. М. *Основи артилерійської розвідки: навч. посіб.* Суми: Сумський державний університет, 2014. 393 с.
2. Щерба А. *Результати моделювання щодо ефективності інтегрованої системи артилерійської розвідки / Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 14-15 травня 2015 року).* Львів: АСВ, 2015. 314 с.
3. *Указ президента України №51/2024 від 6 лютого 2024 року «Про нарощування спроможностей сил оборони».* Інформаційний ресурс. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625>
4. Корсунский А. С., Маттис А. В., Масленникова Т. Н. *О некоторых аспектах защиты информации в беспилотных и роботизированных средствах военного назначения* // *Морские информационно-управляющие системы.* 2012. № 1. С. 16–23.
5. Хоменко Ж. М. *Особенности систем зв'язку БПЛА.* / *Тези доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2021 (ІКТ-2021)», Житомир, 01-03 квітня 2021 р. Житомир: Житомирська політехніка, 2021. 205 с.*
6. Горбатий І. В. *Системи дистанційного зондування Землі з космосу: монографія.* Львів: СПОЛОМ, 2011. 612 с.
7. Горбатий І. В., Горбатий В. І. *Сучасні тенденції розвитку систем дистанційного зондування Землі // Моделювання та інформаційні технології.* 2008. Вип. 49. С. 275–284.
8. Gorbatyy I. V. *Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power / Automatic Control and Computer Sciences.* 2014. Vol. 48, Issue 1. P. 47–55.
9. Горбатий І. В., Бондарев А. П. *Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи: навч. посібник.* Львів: Вид-во «Львівська політехніка», 2016. 336 с.
10. Горбатий І. В. *Радіочастотний 4-канальний фазоповертач у діапазоні 0-360° з цифровим керуванням для телекомунікаційних систем з амплітудною модуляцією багатьох складових // Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка.* 2022. Т. 65, № 5. С. 297–308.
11. Горбатий І. В., Цимбалюк І. Р., Бобало Ю. Я. *Дослідження впливу нестабільності або неточності встановлення параметрів модулятора та демодулятора на ймовірність помилки при прийманні даних // Infocommunication Technologies and Electronic Engineering - Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія.* 2023. Vol. 3, № 1. P. 123–131.
12. *Патент України на винахід № 66435. Н03L7/00 / Бондарев А. П., Мартинів М. С. Пристрій фазової автопідстройки частоти. Заявка № 4869869 від 01.10.90; Опубл.: бюл. 2004. №5. 4 с.*
13. *Дослідження траєкторних вимірювачів сантиметрового та міліметрового діапазонів / Ю. А. Бобало, А. П. Бондарев, Ю. І. Будерецький [та ін.] // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Нац. ун-т «Львівська політехніка».* 2023. №3(2). С. 150–157.
14. Бондарев А. П., Будерецький Ю. І., Олійник М. Я. *Дослідження та моделювання стежних траєкторних вимірювачів // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Нац. ун-т «Львівська політехніка».* 2021. №1(1). 2021. С. 105–111.
15. Бондарев А. П., Будерецький Ю. І., Олійник М. Я. *Багатопараметрична модель пристрою стеження за частотою та інтерфейс програми для її аналізу // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. Нац. ун-т «Львівська політехніка».* 2021. №1(2). 2021. С. 114–122.
16. Tsybaliuk I., Horbatyi I. *Approach to processing radio signals with amplitude modulation of many components using one-dimensional convolutional neural network // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2023. Vol. 6, iss. 9 (126). P. 14–22.

I. Horbatyi, Yu. Budaretskyi, A. Bondariev, I. Petluk

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF THE SECURITY COMMUNICATION SYSTEM WITH UNMANNED AIRCRAFT

Artillery is the main means of defeating enemy launchers in modern combat. According to estimates, artillery in the confrontation with Russia accounts for 70 to 80% of all losses suffered by the parties to the conflict.

The effectiveness of artillery fire is ensured by a single automated radar complex for reconnaissance of firing positions and unmanned aerial vehicles (UAVs).

The exchange of information between the ground and air components of the complex, the transmission of data to the automated fire control system takes place through interference-protected communication channels using signal repeaters placed on the UAV.

The mathematical models developed in the work made it possible theoretically and experimentally, through simulation modeling, to evaluate the effectiveness of using the proposed new and improved known methods of synthesis of hardware to ensure communication with the necessary reliability of information transmission.

Phase and frame synchronization devices were developed on the basis of a modernized phase auto-frequency adjustment scheme, which reduced the time of entering into synchronism and increased the tracking band, significantly increased the quality of signal demodulation and the immunity of communication channels in conditions of complex interference conditions. This made it possible to implement an experimental sample of the proposed anti-interference communication system.

Keywords: interference-immunity; modulation-demodulation; artillery reconnaissance; telemetry information; relaying signals.

