

СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ БЕЗПЕКИ ТА ОБОРОНИ

ISSN 2311-7249 (Print)

ISSN 2410-7336 (Online)

№ 1 (22)
2015

Науковий журнал

Засновник і видавець

Національний університет оборони України
імені Івана Черняхівського
Журнал заснований у 2008 році

Адреса редакції

Національний університет оборони України
імені Івана Черняхівського
Інститут інформаційних технологій

Повітрофлотський проспект, 28,
Київ, 03049

телефон: (044)-271-09-44, (066)-713-20-22
факс: (044)-271-09-44

Журнал зареєстровано в Державній реєстраційній службі України
(свідоцтво КВ №20490-10290ПР)

Журнал видається
українською, російською та англійською мовами

Журнал виходить 3 рази на рік

Наказом Міністерства освіти і науки України
від 29 грудня 2014 р. №1528 журнал включено до
Переліку наукових фахових видань України в галузях
“технічні науки” та “військові науки”

Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету оборони України
імені Івана Черняхівського
(протокол № 6 від 27 квітня 2015 р.)

При використанні матеріалів посилання на журнал
“Сучасні інформаційні технології
у сфері безпеки та оборони” обов'язкове

Редакція може не поділяти точку зору авторів
Відповідальність за зміст поданих матеріалів
несуть автори

Журнал індексується у наукометричних базах:
Citefactor, Google Academy, The Journal Impact Factor.

Журнал представлений у базах даних:
Bielefeld Academic Search Engine, Research Bible, WorldCat.

Журнал внесений до каталогів бібліотек:
Vernadsky National Library of Ukraine.

В номері:

Теоретичні основи створення і використання інформаційних технологій

- Биченков В.В., Світис А.І., Ушаков І.В.** Оцінювання ефективності функціонування регресійної моделі, розробленої на основі алгоритму побудови моделі складної системи з використанням комбінаторного методу з обмеженою базою аргументів при побудові рівнянь першого ступеня 5
- Боданович В.Ю., Висідалко А.Л.** Методичний підхід до формування обрису та розбудови баз даних автоматизованої системи безпекового супроводу реалізації національних інтересів 14
- Босом'я В.І., Лаврінченко В.Ф., Гудков Д.М., Мельник Я.В.** Математична модель процесу технічного обслуговування та ремонту об'єктів судових комплексів 24
- Бондаренко Л.А., Масєсов Н.А., Малых В.В., Андреев К.В.** Перспективи побудови мереж радіосвязи на основі програмно-определяемых радіосредств в интересах специальных потребителей 29
- Бунаков В.П., Головін О.О., Кісель П.І., Степаненко Ю.К.** Оптимізація діаграми спрямованості антенної решітки РЛС метрового діапазону хвиль на основі вдосконалення методики регулювання амплітуд збудження окремих її елементів 34
- Воронин А.Н., Зятдинов Ю.К., Пермяков А.Ю., Варламов И.Д.** Синтез компромисно-оптимальных траекторий мобильных объектов в конфликтной среде 40
- Грибач В.І., Бондаренко С.В.** Оцінка точності визначення серединної похибки розрахунку опорної дальності артилерійських стрільб 50
- Жураковський Б.Ю., Комарова Л.О., Копітька О.В.** Розрахунок пропускної здатності та транзитної затримки при передачі по лінійній телекомунікаційній мережі 55
- Конотопець М.М., Канифольський О.О.** Порівняння показника енергоефективності малого швидкісного поромата та легкового автомобіля 60
- Кравчук С.О.** Математична модель ймовірності переривання зв'язку в МІМО-системі з райсонівськими завмираннями і обмеженим відношенням сигнал-шум 63
- Кузавков В.В., Кононенко С.М., Судніков Є.О.** Датчики температури для контактного способу зняття діагностичної інформації в методі власного випромінювання 68
- Ленков С.В., Цицарев В.Н., Осипа В.А., Березовская Ю.В.** Моделирование технического обслуживания по состоянию резервированных радиоэлектронных систем 74
- Майстренко О.В., Репіло Ю.Є., Демидко Д.І.** Визначення області доцільних значень для показників точності та раповості вогню артилерії (ударів ракет) 79
- Міренко В.І., Пустовий С.О., Яблонський П.М.** Розрахунок показників надійності послідовно з'єднаних і резервованих елементів без відновлення для дифузійно-неомонотонного розподілу їх відмов 83
- Недайбидо Ю.П., Котова Ю.В., Федулов О.В., Тищенко М.Г.** Системологические аспекты создания сложных информационно-управляющих систем реального времени при воздействии случайных факторов 90
- Репіло Ю.Є., Ріман О.О., Демидко Д.І.** Підхід до оцінювання ефективності вогневого ураження позицій безпілотних авіаційних комплексів противника ракетними військами і артилерією 98
- Сальник С.В., Сова О.Я., Міночкін Д.А.** Аналіз методів виявлення вторгнень у мобільні радіомережі класу MANET 103
- Сінкевіч П., Гавлічек П.** Теорія та проєктування систем безпеки 112
- Слюсар В.І., Троцько О.О.** Нелінійна частотна модуляція OFDM сигналів при зв'язку з високошвидкісними літальними апаратами 118
- Факкадей О.Р.** Застосування перспективних транспортних технологій в системах військового призначення під час створення єдиного інформаційного поля 125
- Шевченко В.В.** Визначення технічного стану цифрових типових елементів заміни за допомогою електромагнітного методу діагностування 131
- Шішанов М.О., Коцюрба В.І., Дацик І.П., Сакно В.П., Деркач І.І.** Методичний підхід щодо порівняльної оцінки матеріалів корпусів панцерних спеціалізованих автомобілів 136
- Штонда Р.М., Паламарчук Н.А., Черниш Ю.О., Станович О.В.** Аналіз моделей та методів вбудовування даних у зображення 140
- Яковлев М.Ю., Прибілев Ю.Б., Гудима В.П.** Використання теорії масового обслуговування для моделювання системи відновлення та метрологічного обслуговування військових засобів виміральної техніки 144
- ### Інтерактивні моделі розвитку науково-освітнього простору у сфері безпеки та оборони
- Козубов І.М., Козубцова Л.М.** Методологічна основа організації діяльності аспірантів в Збройних Силах України: аналітико-порівняльне обґрунтування феномену 150
- Репіло Ю.Є., Тарасов С.В.** Можливість виникнення та існування корупційних загроз у системі вищої військової освіти 157
- ### Сучасні військово-теоретичні проблеми
- Бойко В.Н., Гаврилов А.Б., Рондин Ю.П., Кузнецов И.Б., Гудыма В.П.** Анализ научных исследований для обеспечения единства измерений в сфере обороны и безопасности Российской Федерации 165
- Мацитар В.В.** Анализ основных тенденций парашютно-десантной подготовки военнослужащих стран НАТО 173
- Слюсарчук О.О.** Використання сучасних інформаційних технологій під час ведення повітряної розвідки 179
- Тимошенко Р.І.** Удосконалення методичних положень розроблення сценаріїв воєнних (бойових) дій угруповання військ 182
- Чорнокнижний О.А.** Основні підходи щодо забезпечення безпеки геоінформаційних систем військового призначення 187

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE SPHERE OF SECURITY AND DEFENCE

ISSN 2311-7249 (Print)

ISSN 2410-7336 (Online)

№ 1 (22)
2015

Scientific journal

Founder and Publisher

National Defence University of Ukraine
named after Ivan Cherniakhovsky
The journal was founded in 2008

Address:

National Defence University of Ukraine
named after Ivan Cherniakhovsky,
Information Technology Institute
Povitroflotskiy ave. 28, Kyiv, 03049
Telephone: (044)-271-09-44, (066)-713-20-22
Fax: (044)-271-09-44

The journal is registered
in the State Registration Service of Ukraine
(certificate KB №20490-10290ПП)

The journal is published
in Russian, Ukrainian and English

The journal is published thrice a year

According to the Document of the Ministry of
Education and Science of Ukraine
issued on December 29, 2014 (№ 1528) the journal
was included into the Ukrainian list of specialized scientific
publications in engineering sciences and military sciences

*Recommended to publication
by the Scientific Council of the National
Defence University of Ukraine
named after Ivan Cherniakhovsky
(Protocol No. 6, 27 April 2015)*

When using the materials, the reference to the journal
“Modern Information Technologies
in the Sphere of Security and Defence” is mandatory

The editorial board can have a different viewpoint
than that of the authors
The content of the materials is the authors' responsibility

The journal is indexed in the scientometric bases:
Citefactor, Google Academy, The Journal Impact Factor.

The journal is presented in the databases:
Bielefeld Academic Search Engine, Research Bible, WorldCat.

The journal is added to the libraries:
Vernadsky National Library of Ukraine.

Contents:

Theoretical Foundations of Information Technologies Creation and Use

<i>Bychenkov V.V., Sbitniev A.I., Ushakov I.V.</i> Regressive model functioning efficiency evaluation obtained using complex system model construction algorithm using limited base of arguments combined method in the construction of simple equations	5
<i>Bohdanovych V.Y., Vysidalko A.L.</i> The methodical approach to forming shape and building databases of the automated system of national interests implementation secure support	14
<i>Bohomya V.I., Lavrynenko V.F., Hudkov D.M., Melnyk Y.V.</i> The mathematical model of shipboard complexes objects maintenance process	24
<i>Bondarenko L.O., Masosov M.O., Malykh V.V., Andriev K.V.</i> The prospect of building radio networks based on software-defined radio aids on behalf of special consumers	29
<i>Bunakov V.P., Holovin O.O., Kisiel P.I., Stepanenko Y.K.</i> Optimization of the antenna array pattern radar meter band through improving control method of the excitation amplitude of its individual elements	34
<i>Voronin A.M., Ziatdinov Y.K., Permiakov O.Y., Varlamov I.D.</i> Synthesis of mobile objects compromiseable optimal trajectories in the conflict environment	40
<i>Hrabchak V.I., Bondarenko S.V.</i> Accuracy evaluation of reference range median calculation error determination of artillery shooting	50
<i>Zhurakovskiy B.Y., Komarova L.O., Kopitka O.V.</i> Carrying capacity and transit delay calculation when transmitting via the lines of telecommunication networks	55
<i>Konotopets M.M., Kanifolskiy O.O.</i> Comparison of energy efficiency index of the small speed ferry and the passenger vehicle	60
<i>Kravchuk S.O.</i> The mathematical model of the outage probability in MIMO-system with Rician fading and limited signal-to-noise relation	63
<i>Kuzavkov V.V., Kononenko S.M., Sudnikov Y.O.</i> Temperature sensors for pin method of diagnostic information retrieval in the method of own radiation	68
<i>Lenkov S.V., Tsytaryev V.M., Osypa V.O., Berezovska Y.V.</i> Modeling technical maintenance through redundant radioelectronic systems condition	74
<i>Maistrenko O.V., Repilo Y.Y., Demydko D.L.</i> Artillery (rocket) fire precision and suddenness appropriate value indexes area determination	79
<i>Mirnenko V.I., Pustoyi S.O., Yablonskiy P.M.</i> The reliability measures computation of the series connected and reserved elements without recovery for diffusion-nonmonotonic distribution of their failures	83
<i>Nedaibda Y.P., Kotova Y.V., Fedulov O.V., Tyshchenko M.H.</i> Sistemological aspects of creating real time complex information management system under influence of random factors	90
<i>Repilo Y.Y., Riman O.O., Demydko D.L.</i> The approach towards the estimation of the artillery and rocket troops “fire for effect” on enemy modern unmanned aircraft complex positions effectiveness	98
<i>Sahnyk S.V., Sova O.Y., Minochkin D.A.</i> Methods analysis of intrusion detection in MANET class mobile radio networks	103
<i>Sienskiewicz P., Gawliczek P.</i> Theory and security systems engineering	112
<i>Slitnar V.I., Trotsko O.O.</i> OFDM signals nonlinear frequency modulation during communication with high-speed aircrafts	118
<i>Fakadei O.R.</i> The advanced transport technologies application in military-oriented systems during the creation of common information field	125
<i>Shevchenko V.V.</i> The technical condition determination of digital typical replacement elements using electromagnetic diagnosis methods	131
<i>Shyshanov M.O., Kotsiuruba V.I., Datsenko I.P., Sakhno V.P., Derkach I.I.</i> Methodical approach to the comparative evaluation of armored special vehicles housing materials	136
<i>Shtonda R.M., Palamarchuk N.A., Chernysh Y.O., Stanovych O.V.</i> Models and methods analysis of embedding data into images	140
<i>Yakovlev M.Y., Pribyliev Y.B., Hudyma V.P.</i> The use of waiting theory for modeling the recovery and metrological service of military measuring equipment system	144

Interactive Models of Scientific Educational Environment Development in the Sphere of Security and Defence

<i>Kozubtsov I.M., Kozubtsova L.M.</i> The methodological foundation of the postgraduate students activity organization in the Ministry of Defence of Ukraine: analytic comparative phenomenon justification	150
<i>Repilo Y.Y., Tarasov S.V.</i> Possible threats of corruption in higher military education	157

Modern Military Theoretical Problems

<i>Boiko V.M., Gavrylov A.B., Rondin Y.P., Kuznetsov I.B., Hudyma V.P.</i> Analysis of scientific studies aimed at ensuring the uniformity of measurements in the field of defense and security of the Russian Federation	165
<i>Mashalir V.V.</i> Analysis of main tendencies of NATO countries servicemen' airborne assault training	173
<i>Slusarchuk O.O.</i> The use of modern information technologies during aerial reconnaissance	179
<i>Tymoshenko R.I.</i> The improvement of the methodological guidelines of scripting military (combat) operations excursion development	182
<i>Chornoknyzhnyi O.A.</i> General approaches to the safety of military geographic information systems	187

¹Вадим Іванович Слюсар (д-р техн. наук, професор)²Олександр Олександрович Троцько¹Військова частина А4566, Київ, Україна²Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна

НЕЛІНІЙНА ЧАСТОТНА МОДУЛЯЦІЯ OFDM СИГНАЛІВ ПРИ ЗВ'ЯЗКУ З ВИСОКОШВИДКІСНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

У статті проаналізовано вплив нелінійної частотної модуляції на забезпечення зв'язку з високошвидкісними безпілотними літальними апаратами (БПЛА) при використанні ортогональної частотно-дискретної модуляції (OFDM). Для детального дослідження спектральних спотворень проведено математичне моделювання руху БПЛА. В пакеті Mathcad синтезована серія відліків напруги по виходу аналого-цифрового перетворювача та отримані відгуки сигнальних піднесучих по виходах фільтрів швидкого перетворення Фур'є при різних швидкостях польоту БПЛА.

Ключові слова: ортогональна частотно-дискретна модуляція; безпілотний літальний апарат; девіація частоти.

Вступ

Постановка проблеми. Використання безпілотних літальних апаратів у сучасних військових операціях стало нормою сучасних бойових дій. БПЛА застосовуються всіма родами військ як над сушею, так і над морем. Зростання ролі БПЛА в сучасних і перспективних бойових діях військ пов'язане з необхідністю вирішення проблеми створення високошвидкісних завадозахищених каналів передачі даних і управління сукупністю БПЛА, що одночасно виконують бойові та забезпечуючі місії на театрі військових дій в єдиному інформаційному просторі. Аналіз відомих підходів до вирішення цієї проблеми свідчить про актуальність теоретичних досліджень, спрямованих на вдосконалення засобів зв'язку з БПЛА на основі використання сучасних технологій цифрової обробки сигналів, покликаних забезпечити ефективний інформаційний обмін в мобільних мережах динамічної топології типу VANET.

Перспективним напрямом вирішення проблем створення високошвидкісних систем зв'язку з БПЛА є використання ширококутових сигналів на основі ортогонального частотного дискретного мультиплексування (OFDM) у поєднанні з технологіями цифрових антенних решіток, МІМО. Проте реалізації потенційних можливостей такого підходу обмежені негативним впливом на пропускну спроможність каналів зв'язку ефекту Доплера, що приводить до відхилення частот несучих від максимумів амплітудно-частотних характеристик фільтрів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [1]. У результаті цього виникає неконтрольована міжсимвольна інтерференція даних, що приводить до різкого зниження швидкості їх передачі. При зв'язку з високошвидкісними БПЛА проблема доплерівських зсувів піднесучих OFDM сигналів

посилюється також спотворенням сигнальних відгуків по виходах частотних фільтрів, обумовленим виникненням нелінійної девіації частот піднесучих.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні підвищення швидкості руху БПЛА є загальною тенденцією розвитку даного виду озброєння і військової техніки. Пов'язано це з необхідністю швидшого виявлення наземних цілей при виконанні розвідувальних завдань на великій території, скороченням часу реакції при реалізації за допомогою БПЛА ударних місій, прагненням понизити уразливість БПЛА від дії вогневих засобів ППО супротивника, не лише завдяки скороченню часу виконуваної місії, але і за рахунок ускладнення умов для виявлення БПЛА і наведення на нього засобів поразки.

Високі відносні швидкості переміщення БПЛА можуть мати місце і у разі бойового застосування низькошвидкісних повітряних платформ, якщо прийом їх сигналів здійснюється, наприклад, на борту повітряного командного пункту або базового літака-розвідника. Такий варіант використання БПЛА описаний в патенті України на корисну модель № 34701 [2]. Згідно з цим способом повітряної розвідки базовий літак-розвідник скидає кілька БПЛА, без заходу в зону дії ППО супротивника (рис. 1). Вказані БПЛА проводять розвідку в глибині території супротивника і передають отримані дані по радіоканалах на борт базового літака. При цьому в результаті руху пункту прийому даних з високою швидкістю відносна швидкість польоту БПЛА може досягати великих значень, особливо у разі переміщення БПЛА і базового літака на зустрічних курсах.

Мета статті: аналіз спектральних спотворень OFDM сигналів при зв'язку з високошвидкісними безпілотними літальними апаратами.

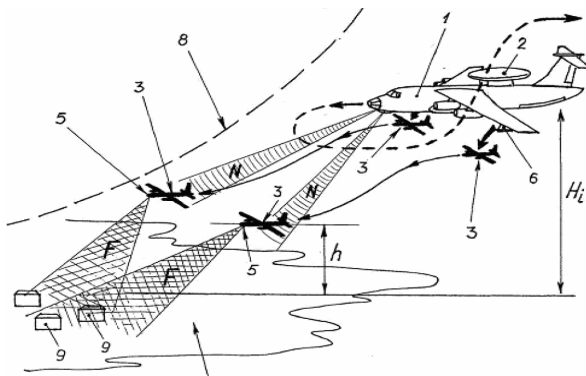


Рис. 1. Спосіб повітряної розвідки з використанням БПЛА [2].

При високих кутових швидкостях обертання лінії візування, що зв'язує в умовах прямої видимості приймальний і передавальний об'єкти, високоточній частотній селекції як OFDM сигналів перешкоджає девіація частоти, викликана обертанням лінії візування за час накопичення сигналів при синтезі частотних фільтрів.

Особливо проблема ускладнюється при

$$U_{s_{rec}} = a_{rec} \cdot \cos\left(\omega\Delta t(s-1) - \omega_0 \frac{R_s}{c} + \varphi_{rec}\right) = a_{rec} \cdot \cos\left(\omega\Delta t(s-1) - 2\pi \frac{R_s}{\lambda_0} + \varphi_{rec}\right), \quad (1)$$

де

$$R_s = \sqrt{R_0^2 - 2VR_0(s-1)\Delta t \cos \epsilon_0 + V^2\Delta t^2(s-1)^2};$$

R_0 – значення похилої дальності до БПЛА на момент початку накопичення відліків пілот-сигналу; V – модуль вектора швидкості БПЛА; ϵ_0 – кут місця БПЛА на момент початку синтезу частотних фільтрів за допомогою процедури

забезпеченні зв'язку з високошвидкісними безпілотними літальними апаратами. Тому при використанні OFDM сигналів в цьому випадку виникає необхідність врахування не лише доплерівських зсувів їх частоти, але і паразитної частотної модуляції, обумовленої вказаним ефектом.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для детальнішого дослідження спектральних спотворень OFDM сигналів БПЛА, що виникають в результаті їх накопичення, доцільно провести математичне моделювання. При цьому рух БПЛА вважатимемо рівномірними і прямолінійними. З усіх проекцій вектора швидкості інтерес представляє лише його горизонтально орієнтована компонента, поєднана з вертикальною площиною, що проходить через умовну лінію "наземна станція – БПЛА" (рис. 2, [1]). У модель напруги прийнятих сигналів для кожного s -го відліку АЦП аналогічно [1] необхідно включити поточне значення похилої дальності до БПЛА:

швидкого перетворення Фур'є (ШПФ); a_{rec} , φ_{rec} – амплітуда і фаза прийнятого пілот-сигнала; Δt – період дискретизації АЦП; s – його порядковий номер; ω – радіальна частота заповнення пілот-сигнала на момент аналого-цифрового перетворення; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – радіальна частота несучої пілот-сигнала; λ_0 – її довжина хвилі; c – швидкість світла.

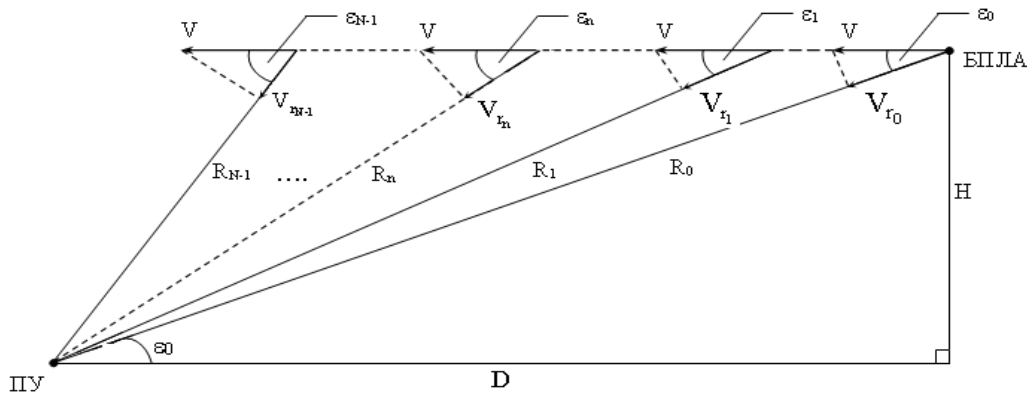


Рис. 2. Модель прямолінійного рівномірного руху БПЛА (ГУ – пункт управління).

Вираз (1) відрізняється від приведеної в [1] моделі відбитого сигналу радіолокації відсутністю множення на 2 доданку $\omega_0 \frac{R_s}{c}$, що пояснюється одноразовим проходженням сигналу трасою поширення. При комплексному представленні напруги сигналів їх квадратурні складові можуть бути записані у виді:

$$U_{s_{rec}}^c = a_{rec} \cdot \cos\left(\omega\Delta t(s-1) - \omega_0 \frac{R_s}{c} + \varphi_{rec}\right);$$

$$U_{s_{rec}}^s = a_{rec} \cdot \sin\left(\omega\Delta t(s-1) - \omega_0 \frac{R_s}{c} + \varphi_{rec}\right). \quad (2)$$

З аналізу величини R_s можна зробити висновок, що для впливу її змін на процес обробки сигналів визначальною є не велика швидкість руху БПЛА, а швидкість зміни кута місця ϵ . Тому область проявів ефектів, що розглядаються тут, може бути розширена на клас БПЛА, що здійснюють баражування з польотом по ламаних траєкторіях. Наприклад, при русі БПЛА по

траєкторії, що описується поліномом другого порядку, у вираз для поточної дальності слід підставити співвідношення:

$$R_s = R_0 + \dot{R}(s-1) + \ddot{R} \frac{(s-1)^2}{2}, \quad (3)$$

де \dot{R} , \ddot{R} – перша і друга похідні від поточної похилої дальності до БПЛА (вважаються відомими або підлягають оцінюванню).

Для оцінки значень R_0 , \dot{R} , \ddot{R} може використовуватися вибірка з N оцінок дальності,

$$\begin{cases} \frac{\ddot{R}}{2} \sum_{s=1}^N (s-1)^2 + \dot{R} \sum_{s=1}^N (s-1) + R_0 N - \sum_{s=1}^N R_s = 0; \\ \frac{\ddot{R}}{2} \sum_{s=1}^N (s-1)^3 + \dot{R} \sum_{s=1}^N (s-1)^2 + R_0 \sum_{s=1}^N (s-1) - \sum_{s=1}^N (s-1) R_s = 0; \\ \frac{\ddot{R}}{2} \sum_{s=1}^N (s-1)^4 + \dot{R} \sum_{s=1}^N (s-1)^3 + R_0 \sum_{s=1}^N (s-1)^2 - \sum_{s=1}^N (s-1)^2 R_s = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Шукані оцінки траєкторних параметрів R_0 , \dot{R} , \ddot{R} можуть бути отримані через визначники приведені вище системи рівнянь [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\ddot{R}}{2} &= \frac{\begin{vmatrix} \sum_{s=1}^N R_s & \sum_{s=1}^N (s-1) & N \\ \sum_{s=1}^N (s-1) R_s & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1) \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^2 R_s & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \end{vmatrix}}{D}, \\ \dot{R} &= \frac{\begin{vmatrix} \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N R_s & N \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1) R_s & \sum_{s=1}^N (s-1) \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^4 & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 R_s & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \end{vmatrix}}{D}, \\ R_0 &= \frac{\begin{vmatrix} \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1) & \sum_{s=1}^N R_s \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1) R_s \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^4 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 R_s \end{vmatrix}}{D}, \\ D &= \begin{vmatrix} \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1) & N \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1) \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^4 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \end{vmatrix}. \quad (6) \end{aligned}$$

отримана на етапі входження у зв'язок і оброблена за методом найменших квадратів. Згідно [3], відповідна функція нев'язок може бути сформована у виді:

$$L = \sum_{s=1}^N \left\{ R_s - \frac{\ddot{R}}{2} (s-1)^2 - \dot{R} (s-1) - R_0 \right\}^2. \quad (4)$$

Система рівнянь для розрахунку коефіцієнтів апроксимуючого полінома, отримана диференціюванням функції нев'язок, після нескладних перетворень запишеться таким чином:

Працездатність описаного методу спільного оцінювання значень R_0 , \dot{R} , \ddot{R} була підтверджена за результатами супроводу цілей, отриманими в ході державних випробувань РЛС П-18МУ, П-18МА, П-19МА та ін. Для цього як початкові дані використовувалися запрогольовані вибірки вимірюваних значень дальностей цілей, які потім підставлялися в програму, написану в пакеті MathCAD, що розраховувала значення вказаних визначників. При цьому малі значення оцінок величини \ddot{R} використовувалася як критерій прямолінійного польоту літальних апаратів. В цілому використання співвідношення для поточної дальності у вигляді квадратичного полінома є загальнішим підходом, що охоплює випадки як прямолінійного, так і криволінійного руху БПЛА.

Точність розглянутого методу спільного оцінювання параметрів R_0 , \dot{R} , \ddot{R} пропорційна кількості оброблюваних оцінок дальності N і може бути охарактеризована нижніми межами Крамера-Рао. Для їх отримання слід сформулювати інформаційну матрицю Фішера, що нескладно зробити, виконавши подвійне диференціювання функції нев'язок по невідомим параметрах. В результаті отримуємо інформаційну матрицю, елементи якої аналогічні елементам головного визначника D розглянутої вище системи рівнянь:

$$I = \frac{1}{2\sigma_R^2} \begin{vmatrix} N & \sum_{s=1}^N (s-1) & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \\ \sum_{s=1}^N (s-1) & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^4 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

де σ_R^2 – дисперсія оцінок дальності у вимірювальній вибірці (вважається постійною на інтервалі оцінювання).

Шукані нижні межі Крамера-Рао для дисперсій оцінок R_0 , \dot{R} , \ddot{R} запишуться у вигляді:

$$\sigma_{\frac{\dot{R}}{2}}^2 \geq 2\sigma_R^2 \left| \begin{matrix} N & \sum_{s=1}^N (s-1) \\ \sum_{s=1}^N (s-1) & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \end{matrix} \right|^{-1},$$

$$\sigma_{\dot{R}}^2 \geq 2\sigma_R^2 \left| \begin{matrix} N & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1)^4 \end{matrix} \right|^{-1},$$

$$\sigma_{R_0}^2 \geq 2\sigma_R^2 \left| \begin{matrix} \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^4 \end{matrix} \right|^{-1},$$

де

$$|I| = \left| \begin{matrix} N & \sum_{s=1}^N (s-1) & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 \\ \sum_{s=1}^N (s-1) & \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 \\ \sum_{s=1}^N (s-1)^2 & \sum_{s=1}^N (s-1)^3 & \sum_{s=1}^N (s-1)^4 \end{matrix} \right|. \quad (7)$$

Графіки залежностей відповідних середньоквадратичних відхилень (СКВ) від кількості використовуваних оцінок дальності для $\sigma_R=1$ приведені на рис. 3. Значення СКВ відкладені уздовж вертикальної осі, а кількість відліків у вибірці – уздовж горизонтальної осі. Верхня суцільна лінія відповідає СКВ R_0 , пунктирна – СКВ \dot{R} , а нижня штрихова – СКВ оцінки прискорення \ddot{R} .

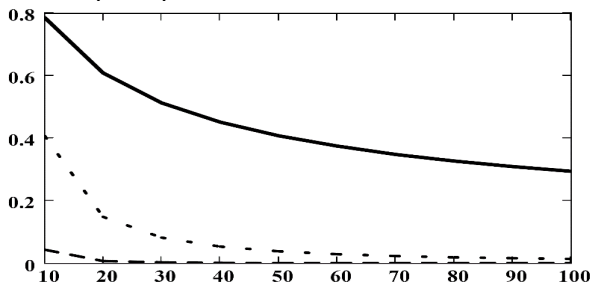


Рис. 3. Залежності СКВ оцінок R_0 , \dot{R} , \ddot{R} від кількості відліків у вибірці

Спираючись на модель (2), для прямолінійного і рівномірного руху БПЛА, в пакеті Mathcad була синтезована серія з 4096 відліків напруги по

виходу АЦП, відповідна ситуації перевищення БПЛА над прийнятною антеною наземного пункту управління на 5000 м, початковій горизонтальній дальності до БПЛА – 5000 м. Час накопичення сигнальних відліків дорівнював 0,08 с. Довжина хвилі випромінювання була задана рівній 3 см з дискретом рознесення піднесучих по довжині хвилі, рівним 0,005 см.

На рис. 4 суцільною лінією наведені відгуки 4 сигнальних піднесучих по виходах ШПФ-фільтрів для випадку відсутності нелінійної частотної модуляції. Пунктирною лінією показаний результуючий відгук ШПФ-фільтрів за наявності обертання умовної лінії візування БПЛА, обумовленого його рухом із швидкістю 150 м/с.

Як видно на рис. 4, при швидкісному русі БПЛА спостерігається зсув частотних відгуків, а також неконтрольоване спотворення їх по амплітуді, що призводить до міжсимвольної інтерференції та змушує знижувати швидкість передачі даних до мінімуму. Проте при використанні методів врахування ефекту Доплера [4, 5], цей зсув по частоті може бути врахований в обробці.

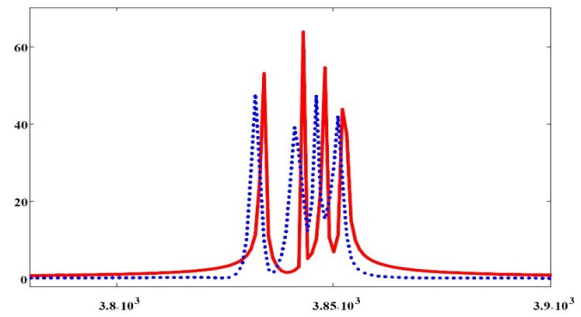


Рис. 4. Відгуки сигнальних піднесучих по виходах ШПФ-фільтрів при швидкості БПЛА $V=150$ м/с

Надалі, у міру збільшення швидкості БПЛА до 180 м/с відбувається розширення спектру кожної з піднесучих й розщеплення їх максимумів (рис. 5), що призводить до повної неможливості демодуляції переданого повідомлення та його абсолютної втрати.

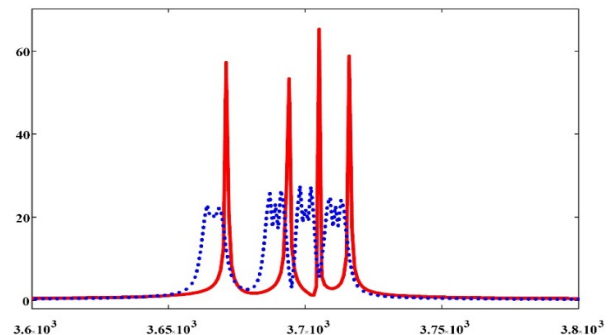


Рис.5. Відгуки сигнальних піднесучих по виходах ШПФ-фільтрів при швидкості БПЛА $V=180$ м/с

З підвищенням швидкості прямолінійного і рівномірного польоту БПЛА до 220 м/с в даному випадку відбувається розширення відгуків

фільтрів уздовж частотної осі настільки, що спектральні відгуки окремих піднесучих зливаються в монолітний "конгломерат" (рис. 6).

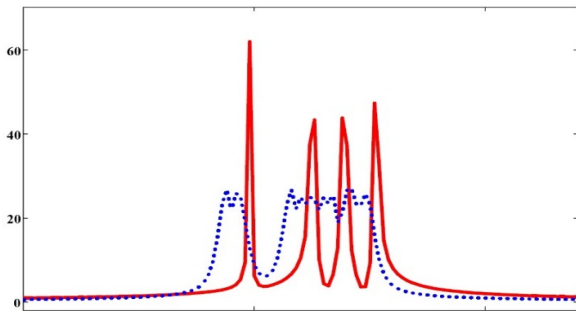


Рис. 6. Відгуки сигнальних піднесучих по виходах ШПФ-фільтрів при швидкості БПЛА $V=220$ м/с

Ефект хаотичної деградації адитивної спектральної картини при збільшенні швидкості до 400 м/с істотно посилюється (рис. 7) з супутнім зниженням рівнів відгуків.

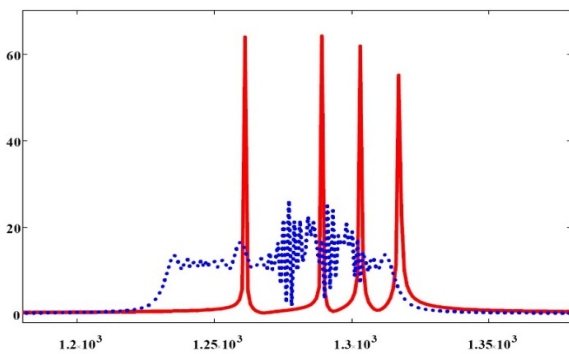


Рис. 7. Відгуки сигнальних піднесучих по виходах ШПФ-фільтрів при швидкості БПЛА $V=400$ м/с

Понизити вплив доплерівського зрушення частоти можна декількома способами. Найпростіше вирішити це завдання, використовуючи невисокі швидкості польоту БПЛА. Проте, як відмічалось вище, підвищення швидкості руху БПЛА є загальною тенденцією розвитку цього виду озброєнь і військової техніки.

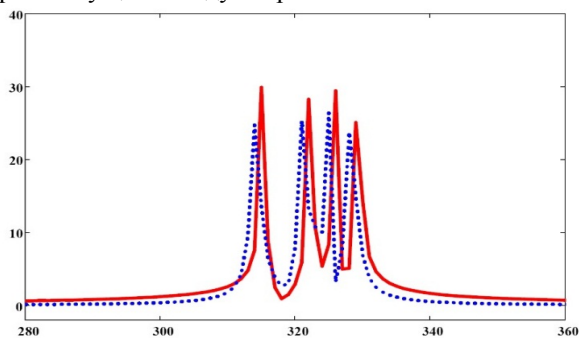


Рис. 8. $V=400$ м/с, час накопичення 0,02 с.

Інший шлях зменшення впливу доплерівського ефекту полягає в скороченні часу накопичення сигналів шляхом зменшення кількості використовуваних для синтезу частотних фільтрів сигнальних відліків. Приміром, на рис. 8 приведені відгуки частотних фільтрів для

вказаного вище набору піднесучих, отримані за результатами моделювання стосовно швидкості руху БПЛА 400 м/с і скороченому в 4 рази в порівнянні з рис. 7 часу накопичення (0,02 с). При цьому, щоб зберегти незмінною частоту дискретизації АЦП, кількість відліків, що накопичуються у вибірці, задавалася рівною 1024. Як видно, по своєму якісному виду спектральна картина стала близькою до ситуації, коли швидкість БПЛА дорівнює 150 м/с, а час накопичення складає 0,08 с (рис. 4). Природно, з урахуванням зміни фазових співвідношень піднесучих, викликаного нелінійним доплерівським ефектом, повного збігу зовнішнього вигляду ілюстрацій на рис. 4 і 8 досягти не вдалося.

Слід зазначити, що при вказаному скороченні часу накопичення відповідно зменшується і кількість піднесучих, використовуваних для передачі інформації, оскільки кількість відліків, задіяних в операції ШПФ при формуванні частотних фільтрів, стає менше. Це призводить до зниження пропускної спроможності лінії зв'язку.

Між тим, необхідність у збільшенні часу накопичення при здійсненні передачі даних з борту БПЛА обумовлена прагненням підвищити відношення сигнал-шум, що досягається в результаті когерентного підсумовування сигнальних відліків. Це важливо, передусім, з урахуванням необхідності стійкої передачі даних при великих віддаленнях БПЛА від наземного пункту управління і підвищення скритності каналів зв'язку з БПЛА від засобів розвідки супротивника.

Як відмічено, наприклад, в [6], сучасні засоби радіотехнічної розвідки (РТР), якщо не прийняти додаткових контрзаходів, здатні забезпечити визначення координат випромінюючих радіоелектронних засобів за декілька десятків секунд з точністю до 50 м на дальностях до 100 км, завдяки спільній обробці результатів радіоперехоплення сигналів в ефірі з рознесених приймальних пунктів. Звичайно, рух БПЛА, особливо з високою швидкістю, ускладнює завдання точного визначення його місця розташування засобами РТР супротивника, проте при великій інтенсивності випромінюваних бортовим комплексом зв'язку сигналів завдання пеленгації БПЛА і його наземної інфраструктури управління істотно спрощується.

Саме тому на початковому етапі ретрансляції даних для маневрених наземних підрозділів доцільно використовувати сигнали малої потужності, а потім послідовно нарощувати угрупування БПЛА-ретрансляторів і регулювати потужність їх випромінювання залежно від віддалення мобільних підрозділів сил швидкого реагування і наявності перешкод каналам зв'язку БПЛА. Як ефективну альтернативу вказаному підходу можна запропонувати здійснювати регулювання потужності сигналів зв'язку БПЛА за допомогою зміни часу їх накопичення на

приймальному пункті. Це дозволить зберегти незмінними показники розвідзахищеності БПЛА, заощадити енергоресурс бортових джерел живлення, а також скоротити нарощуване угрупування БПЛА-ретрансляторів завдяки збільшенню дальності зв'язку, що забезпечується при когерентному накопиченні сигналів.

Важливо звернути увагу, що мінімізація часу накопичення сигналів на початковому етапі ретрансляції даних з борту БПЛА дозволить понизити вплив нелінійного доплерівського ефекту при великих кутах місця лінії візування БПЛА, вірогідність збільшення значень яких вища при малих дальностях до БПЛА з урахуванням специфіки польоту ретрансляторів на великих висотах. По мірі ж збільшення відстані від БПЛА до пункту управління кут місця лінії візування має стійку тенденцію до зменшення за величиною, що створює передумови для можливого нарощування часу накопичення сигналів завдяки зниженню проявів нелінійного ефекту Доплера.

Приведені аргументи свідчать на користь того, що великі часи накопичення сигналів будуть затребувані тактикою ефективного бойового застосування БПЛА. Тому завдання синтезу методів демодуляції OFDM (N - OFDM) сигналів в умовах неминучої в цьому випадку дії нелінійного

доплерівського ефекту є актуальним.

Висновки й перспективи подальших досліджень

У процесі зв'язку з високошвидкісними літальними апаратами, в тому числі безпілотними (БПЛА), при значних кутових швидкостях обертання умовної лінії візування, що зв'язує приймальний і передавальний об'єкти, високоточної демодуляції OFDM сигналів перешкоджає девіація частоти, обумовлена обертанням лінії візування за час накопичення сигналів при цифровому синтезі частотних фільтрів.

Проведене моделювання показало що при заданих параметрах методи демодуляції OFDM сигналів втрачають свою дієздатність уже при швидкості 180 м/с. Понизити вплив доплерівського зсуву частоти можна зменшенням швидкості БПЛА або скороченням часу накопичення сигналу, але ці способи ідуть у розріз з основними напрямками розвитку цього виду озброєння. Таким чином, дане питання залишається актуальним і в ході подальших досліджень будуть розроблені методи демодуляції OFDM сигналів, прийнятих від високошвидкісних об'єктів.

Література

1. Слюсар В.И. Частотная селекция высокоскоростных групповых целей при длительном накоплении эхосигналов / В. И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2000. – Том 43, № 8. – С. 43–46.
2. Патент України на корисну модель № 34701. МПК (2006): B64C 31/00, H04B 5/00. Спосіб ведення повітряної розвідки за допомогою пілотованих літаків-розвідників // Тимошенко Р. І., Слепов Л. І., Якобінчук О. В., Куровська Т. Ю., Комаров В. О., Гордієвський О. Т. – Дата подання заявки 04.01.2008. – Патент опубліковано 26.08.2008, бюл. № 16, 2008.
3. Методика проведення державних випробувань комплексу уніфікованих модулів прийому, обробки та відображення радіолокаційної інформації (УМПОВРІ) для автоматизації процесу управління бойовими діями підрозділів військ протиповітряної оборони Сухопутних військ Збройних Сил України // Програма Державних випробувань Комплексу уніфікованих модулів прийому, обробки та відображення радіолокаційної інформації для автоматизації процесу управління бойовими діями підрозділів військ протиповітряної оборони Сухопутних

- військ Збройних Сил України. – К. : ЦНДІ ОБТ ЗС України. – 2005. – 40 с.
4. Слюсар В. И. Метод учета нелинейной частотной модуляции OFDM сигналов при связи с гиперзвуковыми аппаратами / В. И. Слюсар, А. А. Троцко // XII Международная молодежная научно-практическая конференция “Человек и космос” (7–9 апреля 2010 года). – Днепропетровск : Национальный центр аэрокосмического образования молодежи им. А. М. Макарова. – 2010. – С. 194.
 5. Слюсар В.И. Метод упреждающей компенсации эффекта Доплера при передаче OFDM сигналов / В. И. Слюсар, А. А. Троцко // Сб. Трудов 10-й Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (18–22 мая 2009 г.). – 2009. – Том 1. – С. 209.
 6. Антонюк В.П. Методи підвищення ефективності пасивних радіотехнічних систем контролю джерел електромагнітного випромінювання: дис. канд. техн. наук: 05.12.17. / Антонюк Володимир Павлович. – Львів : Національний університет “Львівська політехніка”, 2010. – 181 с.

НЕЛИНЕЙНАЯ ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ OFDM СИГНАЛОВ ПРИ СВЯЗИ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

¹Вадим Иванович Слюсар (д-р техн. наук, профессор)

²Александр Александрович Троцко

¹Воинская часть А4566, Киев, Украина

²Военный институт телекоммуникаций и информатизации Государственного университета телекоммуникаций, Киев, Украина

В статье проанализировано влияние нелинейной частотной модуляции на обеспечение связи с высокоскоростными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) при использовании ортогональной частотно-дискретной модуляции (OFDM). Для детального исследования спектральных искажений проведено математическое моделирование движения БПЛА. В пакете Mathcad

синтезирована серия отсчетов напряжений по выходу аналого-цифрового преобразователя и получены отклики сигнальных поднесущих по выходам фильтров быстрого преобразования Фурье при разных скоростях полета БПЛА.

Ключевые слова: ортогональная частотно-дискретная модуляция; беспилотный летательный аппарат (БПЛА); девиация частоты.

OFDM SIGNALS NONLINEAR FREQUENCY MODULATION DURING COMMUNICATION WITH HIGH-SPEED AIRCRAFTS

¹Vadym I. Sliusar (Doctor of Technical Sciences, Professor)

²Oleksandr O. Trotsko

¹Military Unit A4566, Kyiv, Ukraine

²Military Institute of Telecommunications and Informatization of State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine

In the article influence of nonlinear frequency modulation on providing of connection with high-speed unmanned aerial vehicles (UAV) at the use of ortogonal frequency discrete modulation (OFDM) is analyzed. For the detailed research of spectral distortions the mathematical design of UAV motion is conducted. In the package Mathcad the series of samples in an output voltage analog-to-digital converter is synthesized and signal subcarriers feedbacks on filter outputs of fast Fourier transform at different UAV flight speeds are received.

Keywords: orthogonal frequency discrete modulation (OFDM); unmanned aerial vehicles (UAV); frequency deviation.

References

1. Sliusar V.I. (2000), Frequency selection of high-speed multiple targets with long-term accumulation of echoes. [Chastotnaya selektsiya vyisokoskorostnykh gruppovykh tseley pri dlitelnom nakoplenii eho-signalov], Izvestiya vuzov. Ser. Radioelektronika, Part 43, Vol 8, pp. 43–46.
2. Tymoshenko R.I., Slyepov L.I., Yakobinchuk O.V., Kurovskaja T.S., Komarov V.O., Hordiyevskyy O.T. (2008), Method of aerial reconnaissance using manned spy planes. [Sposib vedennja povitrjanoji rozvidky za dopomoghoju pilotovanykh litakiv-rozvidnykiv], Ukraine patent for utility model № 34701.
3. Methods of state testing of standardized modules kit for receiving, processing and displaying radar data for management process automation of units combat actions of the Air Defence Forces of Ukraine Armed Forces (2005), [Metodyka provedennia derzhavnykh vyprobuvan komplektu unifikovanykh moduliv pryjomu, obrobky ta vidobrazhennia radiolokatsiinoi informatsii dlia avtomatyzatsii protsesu upravlinnia boiovymy diiamy pidrozdiliv viisk protypovitrianoi oborony Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy], CNDI OVT ZS Ukrainy, Kyiv, 40 p.
4. Sliusar V.I., Trotsko A.A. (2010), Method of accounting for non-linear

frequency modulation of OFDM signals when communicating with hypersonic. [Metod ucheta nelineynoy chastotnoy moduljatsii OFDM signalov pri svyazi s giperzvukovymi apparatami.], XII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Chelovek i kosmos”, Natsionalnyi tsentr aerokosmicheskogo obrazovaniya molodezhi im. A.M. Makarova, Dnepropetrovsk, 194 p.
5. Sliusar V.I., Trotsko A.A. (2009) Method of proactive compensation of the Doppler effect when transmission of OFDM signals. [Metod uprezhdaushey kompensatsii efekta Dopplera pri peredache OFDM signalov.], Cb. Trudov 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Sovremennye informatsionnye i elektronnye tehnologii”, Odessa, Tom 1, 209 p.
6. Antoniuk V.P. (2010) Methods of improving efficiency of passive control radio systems of electromagnetic radiation sources. [Metody pidvyshchennia efektyvnosti pasyvnykh radiotekhnichnykh system kontroliu dzherel elektromahnitnoho vyprominiuvannia], dyss. kand. tekhn. nauk: 05.12.17., Antoniuk Volodymyr Pavlovyh., Natsionalnyi universytet “Lvivska politekhnika”, Lviv, 181 p

Отримано 20.03.2015 року