УДК 621.391.8+621.396
DOI: https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3(35).91-101

С. Д. ЗІБІН, *кандидат технічних наук*
https://orcid.org/0000-0002-9426-2380

А. О. ПОПОВ, *кандидат технічних наук, доцент*
https://orcid.org/0000-0002-8560-617X

В. В. ТВЕРДОХЛІБОВ, *кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*
https://orcid.org/0000-0002-6802-9796
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МОДЕЛІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З НАЗЕМНИМИ РОБОТОТЕХНІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Розглядаються питання створення моделей функціонування багатостанційних систем передачі інформації сучасних робототехнічних комплексів в умовах впливу спеціально організованих перешкод. Розглядаються підходи до побудови просторово-енергетичних та сигнально-енергетичних моделей радіоелектронної боротьби з робототехнічних комплексів, що діють у складі групи. Результати моделей першої групи ілюструються зонами радіоелектронного подавлення. В межах моделей другої групи, результати демультиплексування та демодуляції сигналів в системах передачі інформації сучасних робототехнічних комплексів, працюючих в умовах впливу перешкод, наводяться у вигляді I-Q діаграм QPSK канальних сигналів. Вказуються можливості наведених моделей.

Ключові слова: *модель радіоелектронної боротьби, наземний робототехнічний комплекс, система передачі інформації, канальний сигнал, груповий сигнал, шумова загороджувальна перешкода, імітаційна ретрансляційна перешкода, демультиплексування, демодуляція, I-Q діаграма, співвідношення сигнал – шум, співвідношення сигнал – перешкода.*

ВСТУП

Провідні технологічно розвинуті країни, в тому числі США, Великобританія, Франція, КНР, рф, Ізраїль, Південна Корея, активно розробляють робототехнічні комплекси (РТК), які здатні з високим ступенем автономності вести бойові дії без участі людини. Так, у ЗС США планується, що до 2030 року частина безпілотних та безекіпажних засобів складе 30 % від загальної кількості складу бойових машин. За оцінками американських та російських воєнних фахівців, бойові можливості підрозділів, які мають на озброєнні РТК, зростуть у 2 – 2,5 рази [1, 2, 6].

Створення РТК воєнного призначення передбачає формування технічних вимог до найбільш важливих технологій, необхідних для створення всієї номенклатури перспективних робототехнічних засобів. Типовий зразок РТК воєнного призначення може бути представлений у вигляді сукупності функціонально пов'язаних елементів: базового носія (платформи наземного, повітряного чи морського базування); спеціалізованого обладнання корисного навантаження, яке визначає функціональне призначення зразка; засоби забезпечення та обслуговування. Таким чином можна виділити технології, критичні для розробки перерахованих елементів. Критичні технології робототехніки можна розподілити на основні, які розробляються безпосередньо для РТК, та допоміжні, які розробляються для широкої номенклатури зразків озброєння та мають перспективу використання при створенні РТК воєнного призначення [1−3].

До основних відносять такі технології: системи обробки сенсорної інформації, оцінки ситуації та планування дій; управління зброєю; дистанційного та автономного управління рухом; розпізнавання цілей, аналізу ситуацій; штучного інтелекту та навчання; людино-машинного інтерфейсу; інтелектуальних систем управління засобами в складі групи [1−3]. До числа допоміжних можна віднести технології: автоматизованого управління; створення і застосування нових матеріалів та речовин; геоінформаційні та глобального позиціонування; створення перспективних сенсорних систем та їх елементів; створення оптичних та оптико-електронних засобів. Окремі зразки ударних РТК наземного базування РФ наведені на рис. 1.

Бойове застосування робототехнічних комплексів наземного та повітряного базування майже всюди супроводжується значними складнощами, пов'язаними з протидією з боку сил і засобів розвідки, вогневого ураження та радіоелектронної боротьби технологічно розвинутого противника. Як відмічається у роботі [4], основним способом боротьби технологічно розвинутого противника з РТК наземного та повітряного базування постає застосування ним засобів радіоелектронного подавлення, оскільки витрата ракет проти малих роботизованих платформ наземного та повітряного базування призводить до швидкого вичерпання ресурсів системи вогневого ураження та фактично є неефективною. В той же час, засоби радіоелектронного подавлення (РЕП) є серйозною загрозою для малих РТК наземного та повітряного базування, які, як правило, не мають повноцінної інерціальної системи навігації, а також використовують канали управління і передачі інформації з низькою перешкодозахищеністю, при цьому алгоритми управління таких РТК не передбачають високого ступеню автономності. Створення РТК воєнного призначення неможливе без належного обґрунтування вимог стосовно їх радіоелектронного захисту. Перевірити відповідність зразка РТК цим вимогам можна шляхом проведення натурних випробувань зразка в умовах впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), а також шляхом застосування спеціально створених імітаційних моделей РЕБ з наземними РТК.

а) б) в)

г) д) е)

Рис. 1. Робототехнічні комплекси наземного базування РФ: а) РТК «Вихрь», ВНДІ «Сигнал»; б) РТК «Соратник», концерн «Калашников»; в) РТК «Нахлебник», концерн «Калашников»; г) РТК «Нерехта», завод ім. Дегтярьова; д) РТК «Платформа-М», ВАТ НДТІ «Прогрес»; е) РТК «Уран-9», ВАТ «766 УПТК»

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Технології та тенденції розвитку РТК воєнного призначення наземного та повітряного базування викладені в роботах [1−6]. Аналіз стану розвитку сучасних засобів РЕП розглянутий в роботах [7−10]. Деякі часткові підходи до оцінки впливу спеціально організованих перешкод на функціонування систем передачі інформації (СПІ) розглядаються в роботах [11−14]. Загальні питання моделювання та симуляції РЕП сучасних СПІ представлені в роботах [15−17]. Часткові питання моделювання та симуляції РЕП сучасних СПІ представлені в роботах [18−19]. Алгоритми функціонування СПІ, що застосовуються у сучасних РТК, розглянуті у роботах [19−22]. В той же час неможливо вказати джерела, які б були присвячені питанням створення моделей функціонування СПІ сучасних РТК в умовах РЕП.

Метою роботи є, по-перше, постановка й вирішення завдання створення моделей функціонування наземних РТК в умовах впливу РЕБ противника, які є дуальними по відношенню до відповідних моделей РЕБ з наземними РТК, по-друге, перевірка адекватності розроблених моделей шляхом симуляції процесу демультиплексування/демодуляції сигналів СПІ сучасних РТК на фоні шумових загороджувальних та імітаційних перешкод.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Просторово-енергетична модель функціонування телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування в умовах ведення радіоелектронного подавлення з боку противника

Предметом розгляду цього пункту статті є особливості просторово-енергетичної моделі функціонування телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування при постановці перешкод наземними багатофункціональними засобами та комплексами радіоелектронної боротьби за умов, що постановка перешкод здійснюється винятково цифровим бортовим радіоелектронним засобам (РЕЗ) (радіоелектронним системам (РЕС)) управління та передачі інформації роботизованої платформи наземного базування наземними засобами РЕБ.

Просторово-енергетична модель функціонування телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування в умовах РЕП з боку наземних засобів РЕБ, що пропонується, передбачає такі обмеження:

1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антенних систем РЕЗ (РЕС), які подавлюються;

2) перешкода є прицільною по центральній частоті (по частотах) спектру корисного сигналу РЕЗ (РЕС), що подавляється, тобто спектр сигналу та спектральна щільність потужності перешкоди співпадають по інтервалу (інтервалах) частот;

3) координати засобу (комплексу) РЕП ($x_{РЕП}$, $y_{РЕП}$) обираються в початку координат: ($x_{РЕП}$, $y_{РЕП}$)=(0, 0), а координати РЕЗ (РЕС) ($x_{РЕЗ}$, $y_{РЕЗ}$), що здійснює передачу інформації, обираються таким чином, що $x_{РЕЗ}$=0, а $y_{РЕЗ}=d$, де d – відстань між засобом РЕП та РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації (рис. 2);

4) візуалізація зон РЕП/зон відсутності РЕП здійснюється у горизонтальній площині;

5) побудова зон РЕП/зон відсутності РЕП здійснюється для цифрових РЕЗ телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування на основі критерію забезпечення бітового співвідношення сигнал − перешкода $E_b / N_0 \le 1$;

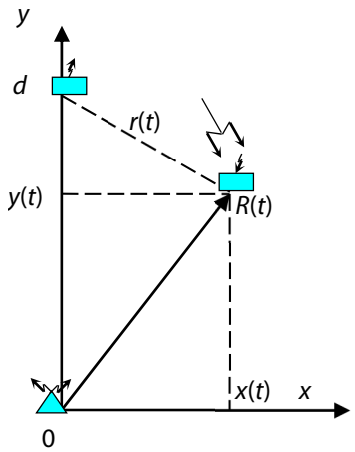


Рис. 2. Геометричні співвідношення між РЕЗ СПІ РТК та засобом РЕП

6) вихідними даними для застосування просторово-енергетичної моделі функціонування зразків засобів та комплексів радіоелектронної боротьби з РЕЗ (РЕС) зв'язку та передачі інформації роботизованої платформи наземного базування є: потужність передавача перешкод засобу РЕП P_j та потужність передавача P РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації; вид мультиплексування/модуляції сигналів; коефіцієнт використання потужності перешкоди комплексу РЕБ $k_n = 0.25$; коефіцієнт, що враховує ступінь неспівпадіння поляризації сигналів $v = 1$ (поляризація сигналів повністю співпадає); відстань d між засобом РЕП та РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації; діаграми спрямованості $G_j(\beta,\varepsilon)$, $G(\beta,\varepsilon)$ за потужністю антенних систем засобу РЕП та РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації, в азимутальній та кутомістній площинах відповідно.

Стисла характеристика просторово-енергетичної моделі функціонування телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування при постановці перешкод наземними засобами РЕП наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Складова моделі	Опис складової моделі
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує функціонування телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування при постановці перешкод наземними засобами РЕП. Телекомунікаційна система використовує М-арну ортогональну систему сигналів з QPSK модуляцією
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається з однієї наземної автоматизованої станції перешкод, яка здійснює РЕП системи передачі інформації наземного РТК
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується просторово-енергетичними співвідношеннями (6)–(9), які дозволяють побудувати зони РЕП. Обмеження, що застосовуються, наведені вище
Можливі напрями удосконалення моделі РЕБ	Оптимізація виду перешкоди в бік використання перешкод з негаусівським законом розподілення, а також імітаційних перешкод
Вимоги щодо сумісності з перспективними моделями РЕБ	Забезпечення візуалізації зон РЕП на основі співвідношень (8)–(9)

В роботі [14] показується, що для телекомунікаційної системи, яка використовує М-арну ортогональну систему сигналів при значеннях імовірності бітової помилки $\mathbf{P}_b \le 0.1$ виконується приблизне співвідношення:

$$E_b / N_0 \approx \frac{2}{\log_2 M} \ln\left(\frac{M}{4\mathbf{P}_b}\right), \qquad (1)$$

де N_0 – спектральна щільність потужності перешкоди; E_b – енергія сигналу, яка припадає на 1 біт інформації.

Графіки співвідношення сигнал-перешкода (1), що припадає на 1 біт інформації, яка передається, від значення *M*, наведені на рис. 3.

Зона, де сучасні телекомунікаційні системи, які використовують *M*-арну ортогональну систему сигналів, є непрацездатними, показана сірим фоном, що відповідає бітовому співвідношенню сигнал-перешкода SIR_b (signal-to-interference ratio):

$$\mathrm{SIR}_b = E_b / N_0 \le 1. \qquad (2)$$

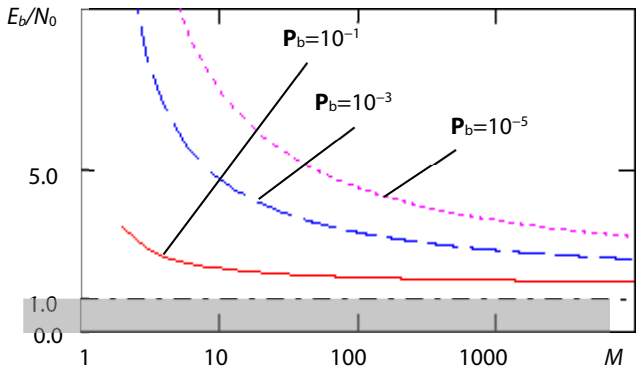


Рис. 3. Залежності співвідношення сигнал – шум від кількості ортогональних сигналів СПІ

Нагадаємо, що межа Шеннона складає величину $E_b / N_0 = \ln 2 \approx 0.69$ [20].

Розглянемо загальну схему прийому корисного групового та перешкодового сигналів в точці знаходження

роботизованої платформи наземного базування з координатами $(x(t), y(t))$, де t – параметр, що визначає параметричне завдання кривих (рис. 2). Знайдемо вираз, що визначає бітове співвідношення сигнал – перешкода (2).

Щільності потоків потужності перешкодового Π_j та корисного групового Π сигналів в точці прийому з координатами $(x(t), y(t))$ визначаються співвідношеннями відповідно:

$$\Pi_j = \frac{P_j \cdot G_j(\beta,\varepsilon) \cdot k_n \cdot v}{4\pi R^2(t)}; \Pi = \frac{P \cdot G(\beta,\varepsilon)}{4\pi r^2(t)}, \quad (3)$$

де P_j – потужність передавача перешкод засобу РЕП; P – потужність передавача РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації; $R(t)$ – відстань між засобом РЕП та РЕЗ (РЕС), що здійснює прийом інформації; $r(t)$ – відстань між РЕЗ (РЕС), що здійснює прийом інформації, та РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації; $G_j(\beta,\varepsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи засобу РЕП в азимутальній та кутомістній площинах відповідно; $G(\beta,\varepsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи РЕЗ (РЕС), що здійснює прийом інформації (що подавляється), в азимутальній та кутомістній площинах відповідно; k_n – коефіцієнт використання потужності перешкоди комплексу РЕБ; v – коефіцієнт, що враховує ступінь неспівпадіння поляризації сигналів; $x(t), y(t)$ – координати РЕЗ (РЕС), що здійснює прийом інформації; t – параметр, що визначає параметричне завдання кривих.

У телекомунікаційній системі, які використовують *M*-арну ортогональну систему сигналів, груповий сигнал складається із суми *M* канальних сигналів. Співвідношення груповий сигнал – перешкода SIR_g в точці знаходження роботизованої платформи наземного базування з координатами $(x(t), y(t))$ будемо визначати формулою:

$$\mathrm{SIR}_g = \frac{\Pi \cdot T_{QPSK}}{\Pi_j / \Delta F_j} = \frac{\Pi \cdot T_{QPSK} \cdot \Delta F_j}{\Pi_j}, \quad (4)$$

де T_{QPSK} – тривалість QPSK сигналу; ΔF_j – ширина спектральної потужності шумової перешкоди, яка відповідно до умови (2) дорівнює ширині спектру ΔF групового сигналу: $\Delta F_j = \Delta F$; щільності потоків сигналів в точці прийому визначаються формулами (3).

Тоді, виходячи з формули (4), бітове співвідношення сигнал – перешкода SIR_b буде визначатися рівнянням:

$$\mathrm{SIR}_b = \frac{\mathrm{SIR}_g}{2M} = \frac{\Pi \cdot T_{QPSK} \cdot \Delta F_j}{2\Pi_j \cdot M} \approx \frac{\Pi}{2\Pi_j}. \quad (5)$$

Двійка, яка фігурує в знаменнику формули, відповідає двом бітам інформації, що передається QPSK сигналом.

Тоді, виходячи з формули (5) з урахуванням забезпечення необхідного співвідношення $E_b / N_0 = 1$, межа зон РЕП/зон відсутності РЕП визначається тотожністю подвійної щільності потоку потужності перешкодового сигналу та щільності потоку групового сигналу в точці прийому, що визначаються формулами (3):

$$\frac{2P_j \cdot G_j(\beta,\varepsilon) \cdot k_n \cdot v}{4\pi R^2(t)} = \frac{P \cdot G(\beta,\varepsilon)}{4\pi r^2(t)}, \quad (6)$$

де t – параметр, який пробігає значення на інтервалі $[0, 2\pi]$.

З тотожності (6) випливає квадратне рівняння:

$$a(t)R^2(t) + b(t)R(t) + c(t) = 0, \quad (7)$$

де $a(t) = 1 - B^2(t)$; $b(t) = 2dB^2(t)\sin(t)$;

$$c(t) = -d^2 B^2(t); \; B(t) = \sqrt{\frac{2P_j \cdot G_j(\beta,\varepsilon) \cdot k_n \cdot v}{P \cdot G(\beta,\varepsilon)}}.$$

Квадратичне рівняння (7) має два коріння, які визначають рішення:

$$R_1(t) = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{2a(t)}\left(-b(t) + \sqrt{b^2(t) - 4a(t)c(t)}\right)\right];$$

$$R_2(t) = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{2a(t)}\left(-b(t) - \sqrt{b^2(t) - 4a(t)c(t)}\right)\right]. \quad (8)$$

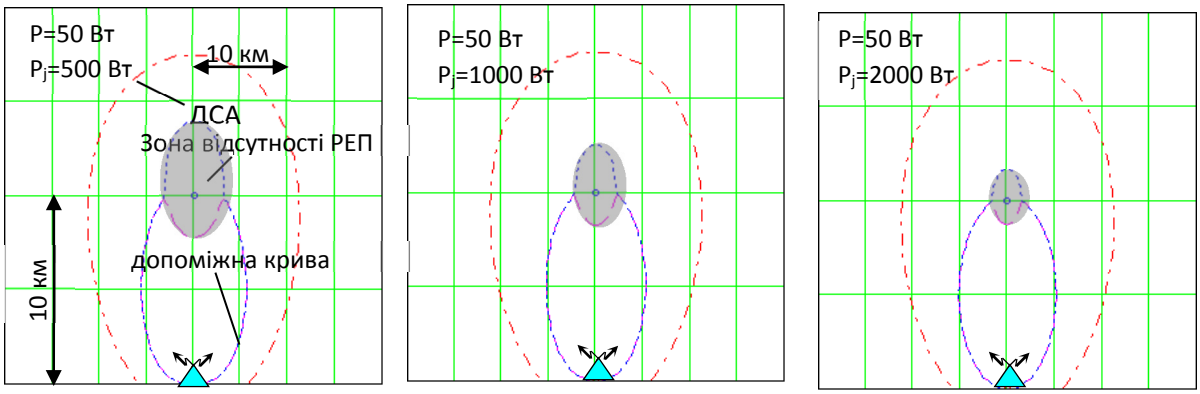
Рішення (8) рівняння (7) визначає дві криві, які характеризують зони РЕП/зони відсутності РЕП, та в параметричній формі запису мають вигляд:

$$x_1(t) = R_1(t)\cos(t), \; y_1(t) = R_1(t)\sin(t);$$

$$x_2(t) = R_2(t)\cos(t), \; y_2(t) = R_2(t)\sin(t). \quad (9)$$

Отримуємо результати застосування просторово-енергетичної моделі функціонування телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування при постановці перешкод наземними засобами РЕП при наявності прийнятих обмежень 1) – 6). При цьому базова РЕЗ (РЕС) телекомунікаційної системи роботизованої платформи наземного базування застосовує антени з коефіцієнтом підсилення 10 дБ, а засіб РЕБ застосовує рупорні передавальні антени з коефіцієнтом підсилення 14 дБ.

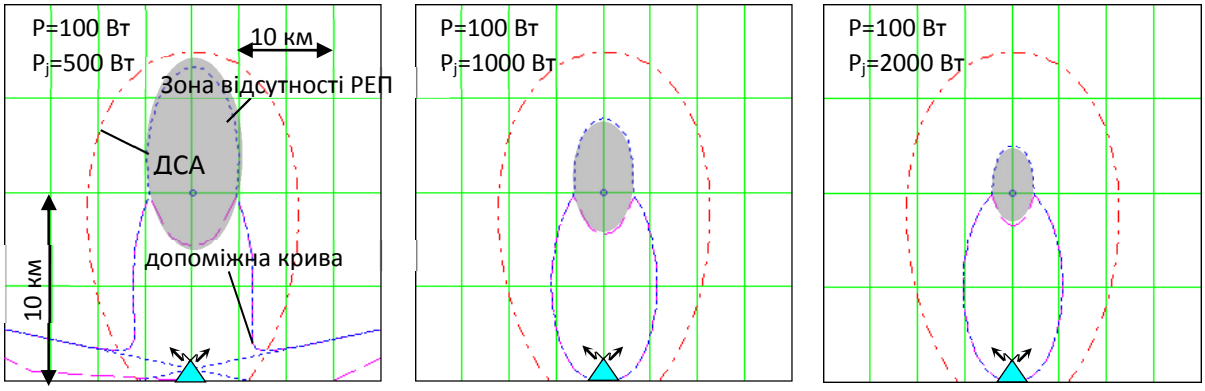
На рис. 4 а, б, в показані діаграма спрямованості антени (ДСА) передавача перешкод станції РЕБ, зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (8) і (9), побудовані для цифрових СПІ наземних РТК за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації, d=10 км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП та потужності передавача P РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно: P_j =500, 1000, 2000 Вт; *P*=50 Вт.



а) б) в)

Рис. 4. Зони РЕП/зони відсутності РЕП, P=50 Вт

На рис. 5 а, б, в показані ДСА передавача перешкод станції РЕБ, зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (6), побудовані для цифрових СПІ наземних РТК за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації, d=10 км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП та потужності передавача P РЕЗ (РЕС), що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно: P_j=500, 1000, 2000 Вт; P=100 Вт.



а) б) в)

Рис. 5. Зони РЕП/ зони відсутності РЕП, P=100 Вт

Зони відсутності РЕП, показані на рис. 4 і 5 сірим фоном, відображають ділянку місцевості, в межах якої управління наземним пунктом управління групою наземних РТК не порушається. Навпаки, поза її межами здійснюється зрив управління наземним пунктом управління групою наземних РТК. Таким чином, на основі просторово-енергетичної моделі РЕБ з наземними РТК можна, з одного боку, обґрунтовувати вимоги до енергетичних характеристик перспективних СПІ наземних РТК, які розробляються та діятимуть в умовах РЕП з боку противника, а з іншого боку, обґрунтовувати вимоги до енергетичних характеристик перспективних багатофункціональних засобів та комплексів РЕБ, які розробляються.

Сигнально-енергетична модель функціонування телекомунікаційної системи робототехнічного комплексу в складі алгоритмічно поєднаної групи роботизованих платформ наземного базування в умовах ведення радіоелектронного подавлення з боку противника

Сигнально-енергетична модель функціонування телекомунікаційної багатостанційної системи робототехнічного комплексу в складі алгоритмічно поєднаної групи роботизованих платформ наземного базування, що пропонується, передбачає такі обмеження.

1) Телекомунікаційна система управління групою роботизованих платформ наземного базування є багатостанційною СПІ з CP-MFSK-CDMA (CP – continuous phase (з безперервною фазою)).

2) Телекомунікаційна система з CP-MFSK-CDMA розрахована на управління групою роботизованих платформ наземного базування в складі до 8 платформ, при цьому на кожну платформу відведено до 6 окремих каналів передачі інформації для забезпечення управління платформою та бортовою зброєю.

3) Швидкість передачі по кожному з 48 каналів складає 160 кбіт/с.

4) Постановка перешкод здійснюється наземним засобом РЕП, при цьому використовуються шумова та ретрансляційна перешкода.

5) Факт роботи телекомунікаційної системи в заданому інтервалі частот вважається встановленим.

Стисла характеристика сигнально-енергетичної моделі функціонування телекомунікаційної багатостанційної системи робототехнічного комплексу в складі алгоритмічно поєднаної групи роботизованих платформ наземного базування в умовах ведення радіоелектронного подавлення з боку противника наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Складова моделі	**Опис складової моделі**
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує телекомунікаційну багатостанційну систему з CP-MFSK-CDMA робототехнічним комплексом в складі алгоритмічно поєднаної групи роботизованих платформ наземного базування в умовах постановки перешкод засобами РЕП наземного та/або повітряного базування
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається з довільної кількості багатофункціональних автоматизованих станцій перешкод, які здійснюють РЕП в заданій зоні
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується сигнально-енергетичними співвідношеннями (10) − (17), які дозволяють оцінювати ефективність РЕП та/або перешкодостійкість системи передачі інформації з CP-MFSK-CDMA. Обмеження, що застосовуються, наведені нижче
Можливі напрями удосконалення моделі РЕБ	Оптимізація виду перешкоди в бік використання перешкод з негаусівським законом розподілення
Вимоги щодо сумісності з перспективними моделями РЕБ	Вимоги не висуваються

Методика побудови сигнально-енергетичної моделі функціонування телекомунікаційної багатостанційної системи з CP-MFSK-CDMA робототехнічного комплексу в складі алгоритмічно поєднаної групи роботизованих платформ наземного базування в умовах ведення радіоелектронного подавлення з боку противника ґрунтується на постановці та розв'язанні задачі оцінки ефективності РЕП та/або перешкодостійкості системи передачі інформації.

Канальний сигнал $s_k(t)$ у багатостанційній системі передачі інформації з CP-MFSK-CDMA-QPSK формується відповідно до співвідношень [20, (9.4.4)], [21, (12.64)], які ми запишемо в більш компактній формі запису:

$$s_k(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[c_k^I \cdot M_k^I(t) + c_k^Q \cdot M_k^Q(t)\right],\ t \in T^s, \quad (10)$$

$$M_k^I(t) = \cos\left(2\pi\left(M_0 - M_{[t/T_{ch}],k}\right)t/T_{ch} + \pi/4\right);$$

$$M_k^Q(t) = \sin\left(2\pi\left(M_0 - M_{[t/T_{ch}],k}\right)t/T_{ch} + \pi/4\right), \quad (11)$$

де $T^s = [0, T_s]$ – інтервал визначення символу QPSK сигналу; T_s – тривалість символу QPSK сигналу; $M_k^I(t)$, $M_k^Q(t)$ – функції, що модулюють синфазний й квадратурний потоки QPSK сигналу відповідно; c_k^I, c_k^Q – символи повідомлень синфазного $c^I = [c_0^I, ..., c_{N_{ch}-1}^I]^T$ й квадратурного $c^Q = [c_0^Q, ..., c_{N_{ch}-1}^Q]^T$ потоків QPSK сигналу, які передаються *k*-м канальним сигналом $s_k(t)$; $[x]$ – ціла частина числа *x*; T_{ch} – тривалість елементарного сигналу, $T_{ch} = T/N$; M_0 − вихідне число періодів коливань сигналу, що приходяться на тривалість T_{ch}; M – матриця змінюваного числа періодів коливань порядку *N*: $M = \left\|M_{i,k}\right\|$; $M_{i,k}$ – елемент матриці; *i, k* – індекси рядка й стовпця елемента матриці відповідно; $M_0, M_{i,k} \in \mathbf{N}$, $\mathbf{N}$ – множина натуральних чисел, причому матриця змінюваного числа періодів коливань формується на основі співвідношення:

$$M = \text{submatrix}(M'; 2, N+1, 2, N+1), \quad (12)$$

де операція $\text{submatrix}(*)$ передбачає витяг підматриці з вихідної в зазначеному діапазоні значень рядків і стовпців відповідно; елементи $M'_{i',k'}$ допоміжної матриці $M' = \left\|M'_{i',k'}\right\|$ визначаються результатом, взятим по модулю *b*:

$$M'_{i',k'} = \text{mod}_b(i' \cdot k' + a), \quad (13)$$

$\text{mod}_y(x)$ – функція одержання залишку при діленні числа *x* на y; $i' = 1, ..., N+1$, $k' = 1, ..., N+1$; $a, b = \text{const}$, $a, b \in \mathbf{N}$; $\mathbf{N}$ – множина натуральних чисел.

Груповий CP-MFSK-CDMA-QPSK сигнал $s_g(t)$ являє собою суму модульованих канальних сигналів $s_k(t)$:

$$s_g(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t), \quad (14)$$

кожний з яких визначається формулою (10).

Нехай радіочастотний груповий сигнал $s_{g,RF}(t)$, який визначається сигналом (14):

$$s_{g,RF}(t) = s_g(t)\exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_0)],$$

випромінюється в простір на несучій частоті f_0, а на прийомній стороні адитивно взаємодіє з перешкодою $n(t)$, що формується станцією РЕП:

$$x(t) = s_{g,RF}(t) + n(t), \qquad (15)$$

при цьому перешкода $n(t)$ може бути комплексним квазібілим гаусівським шумом зі спектральною щільністю потужності $N(f) = N_0 \cdot [1(f) - 1(f - f_{\max})]$ (де N_0=const, $f_{\max}$=const, $1(f)$ – одинична ступінчата функція Хевісайду), або імітаційною перешкодою, яка формується шляхом ретрансляції затриманої на час τ копії радіочастотного групового сигналу $n(t) = As_{g,RF}(t-\tau)$, де $A = \text{const}$.

Тоді оцінками $\hat{c}_k^I$, $\hat{c}_k^Q$ символів c_k^I, c_k^I повідомлень синфазного $c^I = [c_0^I, ..., c_{N_{ch}-1}^I]^T$ й квадратурного $c^Q = [c_0^Q, ..., c_{N_{ch}-1}^Q]^T$ потоків QPSK сигналу, отриманих у рамках алгоритму демодуляції сигналів є знакові функції від скалярних добутків фрагментів спостережуваного випадкового процесу $x(t)$ (15) функцій, що модулюють $M_k^I(t)$ й $M_k^Q(t)$ (11):

$$\hat{c}_k^I = \text{sign}(\text{Re}(A_k)), \hat{c}_{i,k}^Q = \text{sign}(\text{Re}(B_{i,k})); \qquad (16)$$

$$A_k = 2\sqrt{2}\left(x(t)\exp[-j(2\pi f_0 t + \varphi_0)], M_k^I(t)\right)/T_s;$$

$$B_k = 2\sqrt{2}\left(x(t)\exp[-j(2\pi f_0 t + \varphi_0)], M_k^Q(t)\right)/T_s. \qquad (17)$$

Розглянемо результати застосування алгоритму (16) і (17) при адитивній взаємодії сигналу $s_{g,RF}(t)$ та загороджувальної або імітаційної перешкоди $n(t)$, отримані шляхом статистичного моделювання. Статистичне моделювання здійснювалося при наступних умовах-обмеженнях.

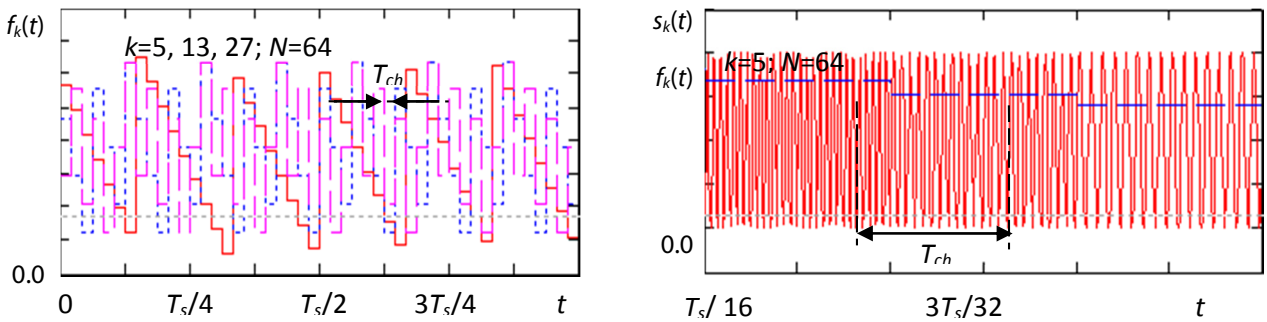
1) Тривалість символу T_s QPSK сигналу рівна T_s =12288 (12,228 мкс); число елементарних сигналів N_{ch}, переданих за тривалість символу QPSK сигналу рівна N_{ch}=64; тривалість елементарного сигналу $T_{ch} = T_s / N_{ch}$ рівна T_{ch} =256 (0,256 мкс); число N ортогональних функцій із системи $\{\psi_k^{MFSK}(t)\}$, $k = 0, ..., N-1$, які визначаються співвідношенням (11), $N = N_{ch}$ =64.

2) Значення постійних, що фігурують у формулах (11) і (13) обрані рівними: M_0=53; a=1, b=49.

3) Перешкода $n(t)$ є: а) квазібілим гаусівським шумом зі спектральною щільністю потужності $N(f) = N_0 \cdot [1(f) - 1(f - f_{\max})]$, (де N_0=const, $f_{\max}$=128/T_{ch}; $1(f)$ – одинична ступінчата функція Хевісайду), відношення сигнал – перешкода E_b / I =10; 1, де E_b – енергія сигналу переданої інформації, що припадає на біт; б) імітаційною перешкодою, яка формується шляхом ретрансляції, затриманої на час τ копії радіочастотного групового сигналу $n(t) = As_{g,RF}(t-\tau)$, де $A = 0.5, \sqrt{2}, 1$; $\tau > T_s$.

4) Співвідношення сигнал – шум в обох випадках складало величину E_b / N_0 =100.

На рис. 6а показані фрагменти залежностей частот $f_k(t)$ ортогональних функцій системи $\{\psi_k^{MFSK}(t)\}$, $k = 0, ..., N-1$, $N = N_{ch}$ =64: $f_5(t)$ (суцільною лінією), $f_{13}(t)$ (пунктиром), $f_{27}(t)$ (штриховою лінією). Як можна бачити з рисунка, тривалість елементарного сигналу рівна $T_{ch} = T_s / 64$. На рис. 6б показані фрагмент канального QPSK сигналу $s_k(t)$, $k = 5$ (суцільною лінією), а також йому відповідний фрагмент залежності частоти $f_k(t)$ ортогональної функції $\psi_k^{MFSK}(t)$, $k = 5$ (пунктирною лінією).



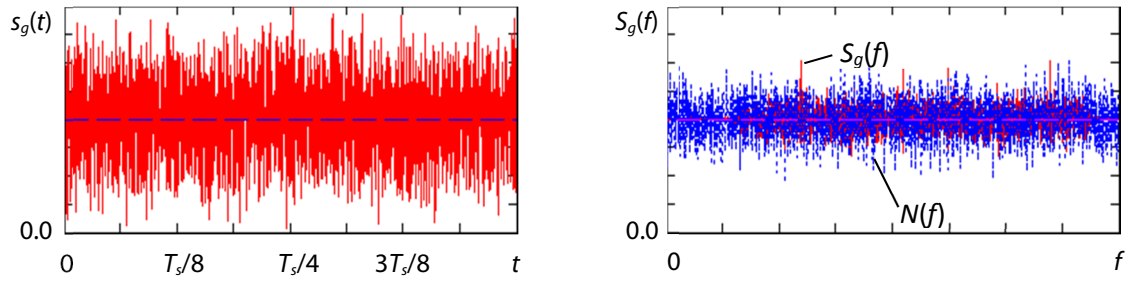
а) б)

Рис. 6. Фрагменти: а) залежності частот $f_k(t)$, б) канального QPSK сигналу

На рис. 7а показана реалізація групового сигналу $s_g(t)$, обумовленого сумою (14), а на рис. 7б показані спектри $N(f)$, $S_g(f)$ реалізацій сигналу перешкоди $n(t)$ та групового сигналу $s_g(t)$ при співвідношенні E_b / I =10. Як можна бачити з рис. 7б, при даному співвідношенні сигнал – шум СПІ з CP-MFSK-CDMA, коли груповий сигнал практично неможливо виявити на фоні шуму, СПІ залишається працездатною

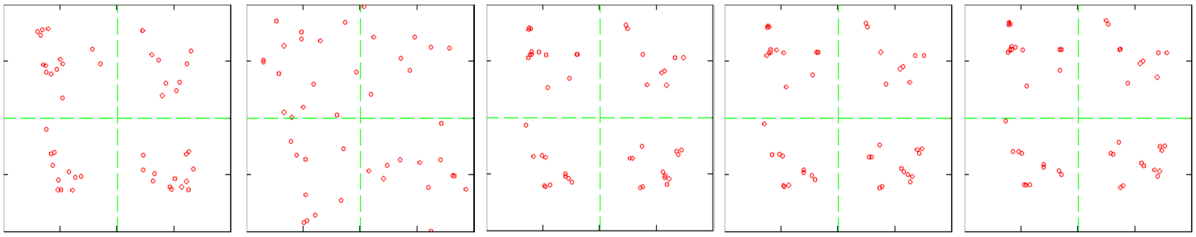
(рис. 8а), при цьому виявити такий сигнал засобами радіоелектронної розвідки практично не можливо.

На рис. 8 а, б показані I-Q діаграми результатів демодуляції CP-MFSK-CDMA канальних сигналів $\{s_k(t)\}$, $k=1,...,N$, N=64 отриманих у рамках алгоритму демодуляції сигналів (16) і (17) при впливі шумової загороджувальної перешкоди та відношенні сигнал − перешкода E_b / I =10; 1 відповідно. Як можна бачити з рисунків, при впливі перешкоди із співвідношенням сигнал − перешкода E_b / I =1, СПІ втрачає можливість виконувати свої функції.



а) б)

Рис. 7. Реалізації: а) групового сигналу $s_g(t)$, б) спектрів сигналів



а) б) в) г) д)

Рис. 8. I-Q діаграми результатів демодуляції канальних сигналів $\{s_k(t)\}$, отриманих у рамках алгоритму (16), (17)

На рис. 8 в, г, д показані I-Q діаграми результатів демодуляції CP-MFSK-CDMA канальних сигналів $\{s_k(t)\}$, $k=1,...,N$, N=64, отриманих у рамках алгоритму демодуляції сигналів (16) і (17) при впливі імітаційної перешкоди та відношенні потужностей сигнал − перешкода 4.0, 2.0, 1.0 відповідно. Як можна бачити з рисунків, в усіх випадках впливу імітаційної перешкоди СПІ не втрачає можливості виконувати свої функції, тобто СПІ з CP-MFSK-CDMA на відміну від СПІ інших типів є значно більш стійкою до перешкоджаючого впливу з боку засобів РЕП.

Таким чином, на основі сигнально-енергетичної моделі РЕБ з наземними РТК можна, з одного боку, обґрунтовувати вимоги до видів модуляції/демодуляції, мультиплексування/демультиплексування, а також енергетичних та частотно-часових характеристик перспективних СПІ наземних РТК, які розробляються та діятимуть в умовах РЕП з боку противника, а з іншого боку, обґрунтовувати вимоги до енергетичних характеристик перспективних багатофункціональних засобів та комплексів РЕБ, які розробляються.

ВИСНОВКИ

1. Отримані моделі функціонування СПІ сучасних РТК в умовах РЕП дозволяють: здійснювати симуляцію роботи СПІ РТК, що досліджується, на ЕОМ; оцінювати ефективність роботи СПІ РТК в умовах впливу перешкод; контролювати сигнально-енергетичні співвідношення між корисними сигналами та перешкодовими сигналами; обґрунтовувати основні вимоги до СПІ РТК з питань радіоелектронного захисту; обирати оптимальні варіанти СПІ РТК воєнного призначення; обґрунтовувати основні вимоги до засобів РЕП сучасних СПІ РТК; обирати оптимальні види перешкод для здійснення РЕП сучасних СПІ РТК.

2. Отримані моделі функціонування СПІ сучасних РТК в умовах РЕП є основою для обґрунтування основних вимог до засобів радіоелектронної боротьби з сучасними роботизованими системами наземного базування тактичної ланки управління.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие военных технологий XXI века: проблемы, планирование, реализация. Тверь: Купол. 2009. 624 с.
2. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития. Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73—132.
3. Гусляков О.М., Довгополий А.С., Чепков І.Б. Критичні технології для створення наземних робототехнічних комплексів важкого та середнього класів.

Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2020. № 1(25). С. 24—34. https:// doi.org/ 1034169/2414-0651.2020.1(25).24-34.
4. Верба В.С., Меркулов В.И., Харьков В.П. Оптимальное групповое управление беспилотными летательными аппаратами в сетецентрической системе. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 11. С. 48—53.
5. Купріненко О.М. Проблеми створення наземних роботизованих комплексів для потреб ЗС України. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2021. № 4(32). С. 26—34.
6. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY 2017−2042. US Department of Defense. 2018.
7. McDermott, R.N. (2017). Russia's Electronic Warfare Capabilities to 2025: Challenging NATO in Electromagnetic Spectrum. Tech. Report. Intern. Centre for Defence and Security. Tallin. 48 p.
8. Кузьменко Т.П., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Оцінка технічного рівня сучасних зразків ОВТ радіоелектронної боротьби сухопутних військ ЗС РФ. Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2013. № 4(51). С. 166—180.
9. Бичков А.М., Зібін С.Д., Попов А.О., Сергієнко В.Д. Аналіз сучасного стану розвитку багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2017. № 1(28). С. 135—143.
10. Красильщиков Р.В. Системы борьбы с необитаемыми аппаратами – асимметричный ответ на угрозы XXI века. СПб: Инфо-да. 2013. 106 с.
11. Балыбин В.А., Донсков Ю.Е., Линник И.В. Радиоподавление современных систем радиосвязи. Военная мысль. 2006. № 8. С. 27—30.
12. Лучук Е.В. Оцінка ефективності радіоподавлення сучасних засобів радіозв'язку АСУ військами. Воєнно-техн. зб. акад. СВ. 2010. № 2. С. 73—77.
13. Журавський Ю.В. Оцінювання ефективності радіоподавлення систем радіозв'язку в умовах невизначеності координат приймачів. Системи обробки інформації. 2009. № 2(76). С. 45—47.
14. Налапко О.Л., Попов А.О., Твердохлібов В.В., Шишацький А.В. Оцінка ефективності телекомунікаційних мереж тактичної ланки управління, що функціонують в умовах радіоелектронного подавлення. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2020. № 2(26). С. 104—111. https://doi.org/1034169/2414-0651. 2020. 2(26).104-111.
15. Welch, M. & Pywell, M. Electronic Warfare Test and Evaluation. NATO Research and Technology Organization. 2012. 314 p.
16. Li, M., Koutsopoulos, I. & Poovendran, R. (2007). Optimal jamming attacks and network defence policies in wireless sensor networks. IEEE InfoCOM. IEEE. Pp. 1307—1315.
17. Lu, Z., Wang, W. & Wang, C. (2014). Modeling, evaluation and detection of jamming attacks in time-critical wireless application. IEEE Trans. on Mobile Computing. Vol. 13, 8. Pp. 1746—1759.
18. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Розробка моделей радіоелектронної боротьби з РЛС управління зброєю ЗРК. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2021. № 3(31). С. 67—79. https://doi.org/1034169/ 2414-0651.2021.3(31).67-79.
19. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Моделі радіоелектронної боротьби з багатоканальними (багатостанційними) системами передачі інформації. Озброєння та військова техніка. 2021. № 4(32). С. 76—87. https://doi. org/1034169/2414-0651.2021.4(32).76-87.
20. Sklar, B. (2001). Digital communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall. Upper Saddle River. NJ. 1079 p.
21. Zhang, K.Q.T. (2016). Wireless Communications: Principles. Theory and Methodology. Wiley and Sons. 448 p.
22. Vitetta, G.M., Taylor, D.P., Colavolpe, G., Pancaldi, F. & Martin, P.A. (2013). Wireless Communications: Algorithmic Techniques. Wiley and Sons. 744 p.

REFERENCES

1. Burenok, V.M., Ivlev, A.A. & Korchak, V.Yu. (2009). "Razvitie voennykh technologii XXI veka: problemy, planirovanie, realizatsiia" [Development of military technologies of XXI century: problems, planning, realization], «Kupol» Publishing LLC. Tver. 624 p.
2. Makarenko, S.I. (2016). "Robototehnicheskie kompleksy voennogo naznacheniia – sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia" [Military UGV: the state of the art and development perspectives], Control systems, communication systems and security. Vol. 2. Pp. 73—132.
3. Gusliakov, O.M., Dovgopolyi, A.S. & Chepkov, I.B. (2020). "Krytychni tehnologii dlia stvorennia nazemnyh robototehnyh kompleksiv vazhkoho ta serednyoho klasiv" [Critical technologies for creating UGV of heavy and middle classes], Weapons and Military Equipment. № 1 (25). Pp. 24—34. https://doi. org/1034169/2414-0651.2020. 1 (25). 24-34.
4. Verba, V.S., Merkulov, V.I., & Harkov, V.P. (2013). "Optimalnoe gruppovoe upravlenie bezpilotnymi letatelnymi apparatami v setetsentricheskoi sisteme" [Optimal group control for UAV in network-centric system], Informational-measurement and control systems. Vol. 11. Pp. 48—53.
5. Kuprinenko, O.M. (2021). "Problemy stvorennia nazemnyh robotyzovanyh kompleksiv dlia potreb ZS Ukrainy" [Problems of developing UGV for the needs of the Armed Forces of Ukraine], Weapons and Military Equipment. № 4(32). Pp. 26—34.
6. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY 2017−2042. US Department of Defense. 2018.
7. McDermott, R.N. (2017). Russia's Electronic Warfare Capabilities to 2025: Challenging NATO in Electromagnetic Spectrum. Tech. Report. Intern. Centre for Defence and Security. Tallin. 48 p.
8. Kuzmenko, T.P., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2013). "Otsinka tehnichnogo rivnia suchasnyh zrazkiv OVT radioelektronnoi borotby suhoputnykh viisk ZS rf" [Estimating technology level of recent EW systems of Army of russian federation Armed Forces], Proc. of

CRI of Armament and Military Technique. № 4 (51). Pp. 166—180.
9. Bychkov, A.M., Zibin, S.D., Popov, A.A. & Sergienko, V.D. (2017). "Analiz suchasnogo stanu rozvytku bagatofunktsionalnykh zasobiv ta kompleksiv radioelektronnoi borotby" [Analysis of state-of-the-art of multifunctional EW systems development], Modern information technologies in Sphere of Security and Defence. №1 (28). Pp. 135—143.
10. Krasilschikov, R.V. (2013). "Sistemy borby s neobitaemymi apparatami – asimetrichnyi otvet na ugrozy XXI veka" [Anti-unmanned vehicles warfare system – asymmetric response for XXI century threats], SPb: Info-da, 106 p.
11. Balybin, V.A., Donskov, Yu.Ye. & Linnik, I.V. (2006). "Radiopodavlenie sovremennykh system radiosviazi" [Modern communication systems jamming], Military Thought. № 8. Pp. 27—30.
12. Luchuk, E.V. (2010). "Otsinka effektivnosti radiopodavleniia suchasnyh zasobiv radiozviazku ASU viiskamy" [Estimating efficiency of jamming of modern communication systems of CCCS]. Voennotehnichnyi zb. Akad. SV. № 2. Pp. 73—77.
13. Zhuravskiy, Yu.V. (2009). "Otsiniuvannia efektyvnosti radiopodavlennia system radiozviazku v umovah nevyznachennosti koordynat pryimachiv" [Estimating efficiency of jamming of communication systems under uncertainties conditions of receivers coordinates], Sistemy obrobky informatsii. № 2 (76). Pp. 45—47.
14. Nalapko, O.L., Popov, A.A., Tverdohlebov, V.V. & Shishatsky, A.V. (2020). "Otsinka efektyvnosti telekomunikatsiinykh merezh taktychnoi lanky upravlinnia scho funktsionyiut v umovah radioelektronnogo podavlennia" [Estimating efficiency of tactical telecommunication network operating under jamming conditions], Weapons and Military Equipment. № 2 (26). Pp. 104—111.
15. Welch, M. & Pywell, M. Electronic Warfare Test and Evaluation. NATO Research and Technology Organization. 2012. 314 p.
16. Li, M., Koutsopoulos, I., & Poovendran, R. (2007). Optimal jamming attacks and network defence policies in wireless sensor networks. IEEE InfoCOM. IEEE. Pp. 1307—1315.
17. Lu, Z., Wang, W. & Wang, C. (2014). Modeling, evaluation and detection of jamming attacks in time-critical wireless application. IEEE Trans. on Mobile Computing. Vol. 13, 8. Pp. 1746—1759.
18. Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2021). "Rozrobka modelei radioelektronnoi borotby z RLS upravlinnia zbroeiu ZRK" [Modeling of electronic counter measures against fire control radar of air defense system], Weapons and Military Equipment. № 3 (31). Pp. 67—79. https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3(31).67-79.
19. Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2021). "Modeli radioelektronnoi borotby z bagatokanalnymy (bagatostantsiinymy) systemamy peredachi informatsii" [Modeling of electronic counter measures against multichannel (multi-station) information transmitting systems], Weapons and Military Equipment. № 4 (32). Pp. 76—87. https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4(32).76-87.
20. Sklar, B. (2001). Digital communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall. Upper Saddle River. NJ. 1079 p.
21. Zhang, K.Q.T. (2016). Wireless Communications: Principles. Theory and Methodology. Wiley and Sons. 448 p.
22. Vitetta, G.M., Taylor, D.P., Colavolpe, G., Pancaldi, F. & Martin, P.A. (2013). Wireless Communications: Algorithmic Techniques. Wiley and Sons. 744 p.

Zibin S., Popov A., Tverdochlibov V.

MODELS OF ELECTRONIC WARFARE WITH LAND UNMANNED COMPLEXES

We consider simulation of functioning of multi-station information transmitting systems with CP-MFSK-CDM(A)-QPSK designed for UGVs control that operate under jamming conditions. We discuss the basis of forming both channel and group signals in the aforementioned information transmitting systems. Algorithms defining demultiplexing and demodulation of signals in UGV information transmitting system operating under Electronic Counter Measures conditions are investigated. We demonstrate intermediate results of forming, receiving and processing the signals in UGV information transmitting system, in particular, fragments of orthogonal functions on which base channel signals are formed; fragments of channel signals; and also spectra of realizations of group and jamming signals in the inputs of receiving sets of UGV information transmitting systems. The results of signal demultiplexing and demodulation in UGV information transmitting systems operating under jamming conditions are shown in the form of I-Q diagrams of QPSK channel signals. We demonstrate possibilities of simulation models developed for UGV multi-station information transmitting systems operating under jamming conditions. It is shown that the most acceptable variant of military purpose UGV multi-station information transmitting system is CP-MFSK-CDM(A) system that is robust with respect to noise barrage and imitating repeat-back jamming.

***Keywords**: Electronic Counter Measures simulation, UGV, information transmitting system, channel signal, group signal, noise barrage jamming, imitating repeat-back jamming, demultiplexing, demodulation, I-Q diagram, signal-to-noise ratio, signal-to-interference ratio.*

Відомості про авторів:
Зібін Сергій Данилович
кандидат технічних наук
науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9426-2380

Попов Андрій Олексійович
кандидат технічних наук
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8560-617X

Твердохлібов Володимир Віталійович
кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6802-9796

Popov Andrey
Candidate of Technical Sciences
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8560-617X

Tverdochlebov Vladimir
Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Chief of Scientific Research Management of Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6802-9796

Information about the authors:
Zibin Sergey
Candidate of Technical Sciences
Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-9426-2380