

УДК 621.391

А.В. Шишацький

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, Київ

МЕТОДИКА ВИБОРУ ГІБРИДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОАНТЕННИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

У статті розроблено методику вибору гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку, що функціонують в складних умовах радіоелектронної обстановки. Зазначена методика дозволяє розширити функціональність та підвищити ефективність багатоантенних систем військового радіозв'язку, забезпечити зустрічну роботу багатоантенних засобів радіозв'язку з різними режимами роботи, здійснювати адаптивне управління параметрами систем військового радіозв'язку в залежності від типу переданої інформації та сигнально-завадової обстановки.

Ключові слова: багатоантенні системи, сигнально-завадова обстановка, швидкість передачі інформації, ймовірність бітової помилки, радіоелектронне подавлення, навмисні завади.

Вступ

В якості важливої умови реалізації глобального інформаційного простору розглядається створення трансформованої та гнучкої архітектури систем зв'язку. Головними відмінностями зазначеної архітектури від існуючої є використання систем високого рівня інтеграції, а також спряження різноманітних та різнотипних радіоелектронних систем, які повинні забезпечити вчасне доведення інформації до користувачів, оминаючи проміжні ланцюги.

З цією метою здійснюється перехід від різнотипних незалежно функціонуючих підсистем до провадження інтегрованих систем зв'язку та передачі даних як сукупності уніфікованих багатофункціональних, широкодіапазонних радіостанцій та комутаційних пристроїв, які об'єднані єдиною системою управління, що забезпечують передачу потоків різнотипної інформації (мовні сигнали, дані, графічні та відео зображення) [1-2].

В якості основних режимів роботи для перспективних засобів радіозв'язку використовуються технологія ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [3], технологія псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ) [4], технологія „багато входів – багато виходів” (MIMO – Multiple-Input Multiple-Output) [1; 2; 4] та технологія прямого розширення спектру (DSSS – англ. Direct sequence spread spectrum) [5].

За рахунок використання технології OFDM досягається висока швидкість передачі за рахунок одночасної передачі даних по всіх підканалах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути і невисокою. Основними перевагами даної технології є відносно висока стійкість щодо частотно-селективних завмирань і вузькосмугових завад, а

також висока спектральна ефективність. Спектральна щільність потужності завад при прийманні після прямого перетворення Фур'є розподіляється практично по всіх частотних підканалах, що або ускладнює, або й зовсім унеможлиблює приймання OFDM-сигналу [6]. Отже, зазначена технологія не забезпечує стійкої роботи в умовах активного радіоелектронного подавлення.

Технологія DSSS є одним з трьох основних методів розширення спектру, що використовуються на сьогоднішній день. Цей метод формування широкосмугового радіосигналу, при якому вихідний двійковий сигнал перетворюється в псевдовипадкову послідовність, що використовується для модуляції несучої. Використовується в мережах стандарту IEEE 802.11 і CDMA для примусового розширення спектра переданого імпульсу. Перевагами застосування зазначеної технології є: висока завадозахищеність, висока захищеність інформації та висока електромагнітна сумісність.

Для технології ППРЧ принцип боротьби з завадами полягає в розміщенні інформаційного сигналу з малою розмірністю в високорозмірному просторі сигналу. В таких умовах постановник завад повинен або розподіляти обмежену потужність завад по всьому простору радіосигналу, тим самим створювати малу спектральну щільність потужності завад, або використовувати всю потужність передавача завад в малому підпросторі, залишаючи частину простору радіосигналу вільною від завад [4]. Для методу ППРЧ характерними недоліками є: низька швидкість передачі інформації та відсутність механізмів боротьби з завмираннями, що призводять до появи пакетів помилок у каналі зв'язку.

Технологія MIMO є одним з методів підвищення пропускнув спроможності та завадозахищеності засобів радіозв'язку [1; 4].

В таких системах реалізується просторове мультиплексування: потік даних на передачі розбивається на два або більше потоків, кожний з яких передається одночасно з іншими за допомогою різних антен. У технології МІМО поєднані просторово-часові методи приймання з використанням адаптивних антен, методи просторово-часового кодування й просторово-часового розділення сигналів.

В роботах [3; 7] було проведено розробку методик вибору режимів роботи засобів військового радіозв'язку (ЗРЗ) в умовах впливу навмисних завад, які здійснює вибір режимів роботи та параметрів режимів ЗРЗ в складній радіоелектронній обстановці. В якості основних режимів роботи в зазначених методиках обрані технологія ППРЧ, OFDM та МІМО, проте не розглядаються гібридні режими роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку. Також, в зазначених роботах не приділено уваги прогнозуванню сигнально-завадової обстановки (СЗО).

Все вище сказане обумовлює актуальну наукову проблему адаптивного управління параметрами систем військового радіозв'язку (СРЗ) в складній радіоелектронній обстановці.

Зазначену проблему пропонується вирішувати поетапно шляхом адаптивного:

- оцінювання та прогнозування СЗО в умовах активної радіоелектронної протидії;
- управління режимами роботи засобів військового радіозв'язку в залежності від сигнально-завадової обстановки та типу інформації, що передається по каналу зв'язку;
- корегування параметрів засобів військового радіозв'язку в кожному режимі роботи під час ведення сеансу радіозв'язку.

Тому метою статті є розробка методики вибору гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку з метою підвищення завадозахищеності та ефективності використання радіочастотного ресурсу систем військового радіозв'язку.

Постановка завдання

Задано: параметри засобів військового радіозв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1, n}$, де $\Psi_1 \dots \Psi_n$ – кількість (сукупність) піднесучих, кількість робочих частот для перестройки, коефіцієнт розширення спектру, потужність передавача, відношення сигнал/шум в каналі (задається для кожного підканалу окремо), робоча частота, види модуляції, мінімально необхідна швидкість передачі інформації (необхідна пропускна спроможність), смуга пропускання каналу зв'язку, кількість приймальних та передавальних антен системи МІМО, набір коригувальних кодів з відповідними параметрами: швидкість коригуваль-

ного коду, граничне значення відношення сигнал/шум в каналі, при якому коригувальний код починає давати вигоду порівняно з модуляцією без кодування. Початковий режим роботи, який забезпечує мінімально необхідну швидкість передачі інформації $v_{i \text{ доп}}$, передбачає використання усіх піднесучих та робочих частот, багатопозиційної квадратурної амплітудної маніпуляції (КАМ-М) та багатопозиційної фазової маніпуляції (ФМ-М) та коригувального коду із заданою швидкістю ($R = 0,5$). Початковий набір методів маршрутизації, що забезпечує своєчасну та достовірну передачі інформації до адресата.

Необхідно: визначити режим роботи ЗРЗ, параметри сигналу (кількість активних піднесучих, кількість робочих частот, що будуть використовуватися при передачі повідомлень, сигнально-кодову конструкцію для кожної піднесучої, робочої частоти (вид модуляції та коригувального коду) та антенного каналу, маршрут передачі інформації, при яких максимізується енергетична ефективність СРЗ R_E при виконанні обмежень на швидкість передачі інформації $v_i \geq v_{i \text{ доп}}$.

Обмеження: вид коригувального коду – згортовані коди зі швидкостями $R = \left(\frac{1}{4}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{3}{4} \right)$; вид сигналу – для методу ППРЧ ФМ-8 та КАМ-16, для методу OFDM КАМ-М та ФМ-М, розмірність маніпуляції $M = (16, 32, 64, 128, 256)$, кількість піднесучих N ($N = 256$); кількість робочих частот – n ($n=256$), максимальна допустима ймовірність помилкового приймання сигналів $P_{\text{б доп}} = 10^{-2}$, $10^{-1} \leq P_{\text{б1}} \leq 10^{-3}$, $10^{-4} \leq P_{\text{б2}} \leq 10^{-6}$, $S \leq 4$, $V \leq 4$; $1 \leq L \leq 4$, швидкість перестройки робочої частоти $v_{\text{пер}} 100 \leq v_{\text{пер}} \leq 300$. Тип завад – адитивні. Метод маршрутизації – інтелектуальний. Тип модемів – когерентні.

Допущення: стан передатної характеристики каналу зв'язку $H_{\text{заг}}$ перед передачею чергового символу відомий та не змінюється під час передачі символу; амплітудна характеристика підсилювача потужності передавача лінійна, нелінійні спотворення сигналу відсутні, потужність передавача є незмінною $P_{\text{прд}} = \text{const}$.

Виклад основного матеріалу дослідження

Завдання визначення гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку з мінімальною ймовірністю бітової помилки зводяться до типової оптимізаційної задачі.

Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} P_6 = F_1(v_i, \Delta F, M, n, R, d, P_c, N_A, \sigma, S, L, V) \rightarrow \min; \\ v_i = F_2(M, R, N_A, \Delta F, v_{\text{пер}}, d, \sigma, S, L, V) \geq v_{i \text{ доп}}, \end{cases}$$

де M – розмірність ансамблю сигналів; d – Евклідова відстань між точками сигнального сузір'я; σ – використовуємий режим роботи; N_A – кількість активних під несучих; R – швидкість коректувального коду ($R = k/n$); k – кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною n ; ΔF – ширина смуги частот каналу; P_c – потужність передавача; V – кількість приймальних антен, вид модуляції; L – кількість власних каналів системи MIMO; S – кількість передавальних антен.

Методика вибору гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку, алгоритм реалізації якої подано на рис. 1, складається з наступних етапів.

1. *Введення вихідних даних (дія 1 на схемі алгоритму).* Вводяться параметри передавальних пристроїв і каналу зв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, а також значення мінімально необхідної швидкості передачі $v_{i \text{ доп}}$ та ймовірності бітової помилки P_6 .

2. *Оцінка стану каналу зв'язку (дія 2).*

Оцінка відбувається наступним чином:

- визначається модель каналу;
- визначається алгоритм прийняття рішень на приймальній стороні (оптимальний, підпотимальний);
- визначається тип завад та завмирань сигналу.

На даному етапі використовується також методика безеталонної оцінки каналів ЗРЗ, ключовою відмінністю якої є корегування відношення сигнал/шум та ймовірності помилкового приймання на вході приймача та декодера, що дозволяє значно прискорити процес оцінювання каналів зв'язку та підвищити точність оцінювання параметрів каналу зв'язку в ході ведення сеансу радіозв'язку [8].

3. *Прогнозування СЗО (дія 3).*

На даному етапі відбувається прогнозування СЗО. Зазначена процедура відрізняється від відомих тим, що додаткового містить операції рециркуляції вхідних даних на один відлік, передискретизації вихідного процесу в логарифмічному масштабі часу, знаходження енергетичного спектру отриманого сигналу, визначенням відгуку, ентропії енергетичного спектра відповідної вибірки, що підлягає передискретизації, розрахунку максимального значення відгуків ентропії, знаходження прогнозу для реалізації максимального значення ентропії, передискретизації результату прогнозування в експоненційному масштабі часу.

Зазначена процедура має наступну послідовність дій:

1. Відбувається введення вихідних даних.

2. Виконується часове стиснення процесу, який прогнозується, що необхідне для забезпечення обробки сигналів в режимі реального часу. При цьому на кожному кроці реалізація оновлюється на один відлік. Таким чином, формується клас реалізацій, що відрізняється один від одного зсувами на один відлік. Для формування класу дискретних відліків кожна реалізація піддається операції логарифмування та дискретизації.

Далі здійснюється знаходження максимального значення ентропії в відповідності з відношенням:

$$H(f) = - \int_{-1/2}^{1/2} \ln \left[\frac{X(f)}{\int_{-1/2}^{1/2} (X(f)) df} \right] df,$$

де $X_n(f) = \frac{X(f)}{\int_{-1/2}^{1/2} (X(f)) df}$ – нормований енергетич-

ний спектр вибірки; $X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_{ss}(n) \exp(-2\pi fn)$,

$r_{ss}(n)$ – кореляційна функція процесу. Використання запропонованої процедури дозволяє отримати більш точний прогноз, чим при використанні інших відомих процедур.

4. *Вибір робочих частот системи радіозв'язку (СРЗ) (дія 4).*

На підставі розроблених в роботах [9; 10] алгоритмів вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку здійснюється аналіз радіочастотного ресурсу, під час якого здійснюється визначення подавлених частотних діапазонів та стратегії комплексів радіоелектронного подавлення.

Отже, на зазначеному етапі вирішується оптимізаційна задача знаходження коефіцієнту використання спектру кожною зі сторін, а саме: комплексами радіоелектронного подавлення та засобами військового радіозв'язку, що входять до складу системи військового радіозв'язку. На зазначеному етапі використовується математичний апарат теорії антагоністичних ігор.

Ключовою відмінністю зазначеної процедури є те, що враховуються не тільки навмисні завади, що утворюються засобами радіоелектронної боротьби, але й завади, що утворюються передавачами інших засобів радіозв'язку [11].

Для вибору режиму роботи ЗРЗ, що входить до складу СРЗ, враховуючи велику кількість якісних показників, що характеризують стан СРЗ, необхідно розв'язати багатокритеріальну задачу оптимізації,

яка полягає у виборі оптимального режиму роботи в конкретній сигнально-задачовій обстановці.

Аналіз існуючих методик вибору режимів роботи показав, що в цілому вони дозволяють здійснювати необхідний вибір, але мають наступні недоліки:

відсутні аналітичні моделі визначення важливості сигнально-задачової обстановки;

враховуються лише один або невелика частина об'єктивних факторів, що впливають на вибір режиму роботи;

робота лише в умовах повної визначеності априорної інформації щодо засобів РЕБ та режимів їх функціонування.

З метою усунення викладених недоліків запропоновано застосовувати методику оптимального вибору режимів роботи шляхом врахування технічних характеристик засобів РЕБ та СРЗ. При цьому для вибору режиму роботи ЗРЗ пропонується використовувати енергетичну та частотну ефективність використання ресурсів системи. Зазначені показники ефективності є комплексними та протилежними. Границі між енергетичною та частотною ефективністю не задовольняють вимогам для зміни режиму роботи, тому для уточнення правила вибору режимів роботи засобів військового радіозв'язку пропонується ввести додатковий показник, а саме важливість радіоелектронної обстановки (РЕО).

Рішення задач, що потребують векторної оптимізації, полягає у згортці окремих критеріїв якості у загальний критерій, та вибору такого варіанту рішення задачі, якому відповідало б найкраще значення загального критерію (максимальне чи мінімальне). Згортка часткових критеріїв якості до загального здійснюється з використанням певної схеми компромісів, яка визначає конкретний принцип оптимальності.

Отже, виникає актуальна наукова задача багатокритеріальної оптимізації процесу вибору режимів роботи з урахуванням їх важливості для підвищення ефективності функціонування ЗРЗ, яку можна записати у вигляді

$$F_{\text{опт}} = \max F(\text{Im}, \beta_E, \beta_F), \quad (1)$$

де $F_{\text{опт}}$ – оптимальний режим роботи; Im – вектор коефіцієнтів важливості РЕО.

В [12–17] розглядаються підходи до вирішення задач багатокритеріальності і вибору альтернатив в техніці, застосовуючи математичний апарат теорії корисності, тому для розв'язання поставленої задачі пропонується скористатись відомими підходами.

Відповідно до [12–17] важливість показників РЕО можна розглядати як неметричний критерій корисності (НЧКК). Основною складністю при розв'язанні поставленої задачі є представлення НЧКК у кількісному вигляді з метою його подальшого введення до функції корисності (ФК).

Для представлення НЧКК у кількісному вигляді визначені неметричні часткові критерії корисності (НЧКК), які мають характеризувати режим роботи. Відповідно до [5], основними НЧКК виступають частотна ефективність ЗРЗ (β_F); енергетична ефективність ЗРЗ (β_E); ступінь використання радіочастотного ресурсу засобами РЕБ ($X_{\text{РЕБ}}$). Представимо основні НЧКК за допомогою кількісних характеристик (табл. 1).

Таблиця 1
Основні НЧКК для вибору режиму роботи ЗРЗ

НЧКК	Кількісна характеристика	Області зміни вхідних показників	Показники, що враховуються при визначенні важливості РЕО
β_E	Енергетична ефективність ЗРЗ	0,1–0,4	МІМО-OFDM
		0,41–0,79	МІМО-UWB
		0,8–1,0	МІМО-ППРЧ
β_F	Частотна ефективність	0,8–1,0	МІМО-OFDM
		0,41–0,79	МІМО-UWB
		0,1–0,4	МІМО-ППРЧ
$X_{\text{РЕБ}}$	Ступінь використання радіочастотного ресурсу засобами РЕБ	0,1–0,8	Завади в частині смуги
		0,81–1	Загороджувальні завади
k	Важливість інформації	0,1–0,4	Низький
		0,41–0,79	Середній
		0,8–1,0	Високий

У загальному випадку для кількісного представлення неметричних критеріїв використовується теорія експертного оцінювання. Головною причиною цьому є відсутність іншого загального методу перетворення неметричних критеріїв у числові значення [12–17].

Проведемо обґрунтування важливості інформації, що передається по каналу зв'язку ЗРЗ.

У табл. 2 наведені вимоги, що висуваються до інформації, що передається в каналі зв'язку ЗРЗ перспективних СРЗ.

Таким чином, в цьому процесі зміни режиму роботи під час роботи багаторежимного ЗРЗ виникає два протиріччя, які треба вирішувати в режимі реального часу:

перша задача полягає в комплексному впливі на ефективність роботи багаторежимного ЗРЗ двох суперечливих показників якості: завадостійкості та швидкості передачі інформації;

інша проблема полягає в тому, що критерій оцінки ефективності роботи радіостанції змінюється в залежності від типу повідомлення: для командних повідомлень фактор часу є вторинним внаслідок того, що вони є короткими, проте їхня достовірність є дуже важливою.

Таблиця 2

Вимоги, що висуваються до передачі інформації у перспективних системах передачі інформації

Тип інформації	Пропускна спроможність	P_6	Пріоритет	Затримка при передачі інформації
Низькошвидкісний голосовий потік	8–32 кбіт/с	10^{-2}	Високий	< 250 мс
Аварійний виклик	8–32 кбіт/с	10^{-4}	Високий	250 мс – 5 сек
Короткі текстові повідомлення	10 кБ	10^{-3}	Низький	> 10 сек
Тактичний чат	100 кБ	10^{-3}	Середній	5 мс – 10 сек
Критичні повідомлення команд та управління	10 кБ	10^{-3}	Високий	250 мс – 5 сек
Передача файлів	10 МБ	10^{-6}	Середній	>1 хв.
Відео в режимі реального часу	>384кбіт/с	10^{-6}	Середній	(< 250 мс)

Масиви великого розміру, що містять данні фотознімків, потребують багато часу на передачу, тому для них більш важливим є досягнення великої швидкості передачі, а викривлення окремих пікселів є припустимими.

Для першої проблеми характерним є те, що покращення одного з показників ефективності роботи ЗРЗ (наприклад, завадостійкості), що частіше за все відбувається шляхом введення інформаційної надлишковості повідомлень, призводить до погіршення швидкості передачі.

В зв'язку з цим складність комплексного критерію ефективності роботи багаторежимного ЗРЗ полягає в тому, що він має враховувати не тільки певний вигравш у покращенні одного показника, але й втрати від погіршення іншого показника.

Таким чином, в нашому випадку оцінки частотного та часового ресурсів співпадають. Для порівняння ефективності різних ЗРЗ та режимів їхньої роботи часто використовують два відомих показники якості функціонування ЗРЗ: спектральну (або частотну) ефективність β_F та енергетичну ефективність β_E .

Тоді комплексний критерій ефективності роботи ЗРЗ при багаторежимній роботі повинен враховувати обидва фактори: взаємний вплив показників один на одного, а також зміну критерію в залежності від типу повідомлення T_{Π} .

Тоді можна записати, що для оцінки ефективності програмованих ЗРЗ з використанням комбінованих режимів роботи в нашому випадку треба враховувати режим функціонування r ЗРЗ, тип повідомлення T_{Π} спектральну ефективність β_F та енергетичну ефективність β_E , тобто

$$E = f(\beta_E, \beta_F, T_{\Pi}).$$

Спектральна ефективність оцінюється смугою частот, необхідною для передачі інформації з певною швидкістю, тобто за своєю суттю визначає пропускну спроможність системи. Енергетична ефективність ЗРЗ характеризується потужністю, необхідною для передачі інформації із заданою достовірністю, таким чином забезпечує потрібний рівень завадостійкості багаторежимної радіостанції. Для розрахунку сумарної ефективності програмованих ЗРЗ при багаторежимній роботі використання абсолютних значень показників β_F та β_E внаслідок їх різної розмірності буде викликати складності, тому будемо застосовувати їх питомі (відносні) значення $\Delta\beta_F$ та $\Delta\beta_E$. Тоді приріст ефективності ΔE дорівнюватиме сумі приростів обох показників, що оцінюють відповідний фактор. Для врахування під час розрахунків величини ΔE типу повідомлень слід ввести до формули розрахунків коефіцієнти важливості для різних типів повідомлень κ_1 для спектральної ефективності та κ_2 для енергетичної ефективності.

В такому випадку будемо використовувати показники енергетичної та спектральної ефективності для комплексної оцінки ефективності багаторежимних ЗРЗ шляхом розрахунку сумарного критерію ефективності ΔE як середньозваженої суми приростів окремих показників якості роботи $\Delta\beta_F$ та $\Delta\beta_E$. З врахуванням всього вищенаведеного, комплексний критерій ефективності ΔE функціонування можна надати в такому вигляді

$$\Delta E = \sum_i (\kappa_{i1} \Delta\beta_F + \kappa_{i2} \Delta\beta_E),$$

де i – номер типу повідомлення.

Сутність другої проблеми, як показано вище, полягає в тому, що для передачі різних типів повідомлень суттєво важливими є й різні показники, які до того ж за своєю суттю є суперечливими, як було показано в [18]. Для визначення типів повідомлень,

що циркулюють у тактичній мережі зв'язку, врахуємо дослідження [2; 19], де, зокрема, наведені вимоги, які висуваються до передачі інформації у перспективних системах передачі інформації, вони показані у табл. 1.

Вказані данні дозволяють скласти відповідну таблицю коефіцієнтів важливості k_{i1} та k_{i2} спектральної $\Delta\beta_F$ та енергетичної $\Delta\beta_E$ ефективності відповідно для різних типів повідомлень T_{pi} , отриману експертним шляхом, при цьому врахуємо, що сума вагових коефіцієнтів k_{i1} та k_{i2} дорівнює одиниці, як це показано в табл. 3.

Під час виконання зазначеної дії здійснюється вибір режиму роботи програмованих ЗРЗ.

Таблиця 3
Значення коефіцієнтів важливості для різних типів повідомлень

№ з/п	Тип інформації	Значення коефіцієнтів важливості	
		k_{i1}	k_{i2}
1	Низькошвидкісний голосовий потік	0,3	0,7
2	Аварійний виклик	0,2	0,8
3	Короткі текстові повідомлення	0,2	0,8
4	Тактичний чат	0,7	0,3
5	Критичні повідомлення команд та управління	0,1	0,9
6	Передача файлів	0,8	0,2
7	Відео в режимі реального часу	0,9	0,1

Позначимо $Q(\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf})$, як функцію корисності НЧКК. $\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf}$ незалежні системи величин. Тоді функції корисності НЧКК можна представити системою виразів

$$\begin{cases} \psi_E = Q(\beta_E)f(\beta_E); \\ \psi_F = Q(\beta_F)f(\beta_F); \\ \psi_{PEB} = Q(X_{PEB})f(X_{PEB}); \\ \psi_{inf} = Q(k_{inf})f(k_{inf}), \end{cases} \quad (2)$$

де $f(\beta_E), f(\beta_F), f(X_{PEB}), f(k_{inf})$ – функції залежності корисності від метричних критеріїв.

У свою чергу функція корисності режиму роботи ЗРЗ матиме вигляд

$$\psi = Q(\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf})f(\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf}). \quad (3)$$

Для дослідження впливу неметричних критеріїв введемо обмеження, сутність якого полягає в тому, що вплив метричних критеріїв є рівноцінним, тобто (немає залежності від метричних критеріїв):

$$f(\beta_E) = f(\beta_F) = f(X_{PEB}) = f(k_{inf}) = 1. \quad (4)$$

Аналіз обмеження показує, що показники між собою рівноцінні за метричним критерієм. В свою чергу функції залежності корисності від неметричних критеріїв змінюються за лінійним законом і визначаються нижнім і верхнім значенням прийнятих оцінок. Здійснивши операцію нормування за максимальним значенням, виходячи із прийнятої шкали (табл. 1) будь-яка перевага одного із показників виразу (3) за неметричним критерієм призведе до домінування функції корисності відповідного показника.

Враховуючи (4), вираз (3) буде представлений, як

$$\psi = Q(\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf}). \quad (5)$$

З метою вибору раціонального виду функції корисності $Q(\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf})$ зручно представити $\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf}$ у вигляді нечітких множин [12–17], а оцінки НЧКК (табл. 1), як їх елементи відповідно. Тоді $Q(\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf})$ можна ототожнити з функцією належності набору вхідних значень показників основних НЧКК $x_E, x_F, x_{PEB}, x_{inf}$ до нечітких множин $\beta_E, \beta_F, X_{PEB}, k_{inf}$, відповідно. Таким чином, задачу визначення важливості РЕО можна сформулювати як задачу прийняття рішення щодо важливості РЕО, а результат процесу прийняття рішення можна представити у вигляді:

$$Im = Q(x_E, x_F, x_{PEB}, x_{inf}), \quad (6)$$

де $x_E, x_F, x_{PEB}, x_{inf}$ – набір вхідних значень показників основних НЧКК; Im – рішення щодо ступеню використання радіочастотного ресурсу.

Задача прийняття рішення щодо режиму роботи ЗРЗ полягає в тому, щоб на основі інформації про вектор вхідних показників $(x_E, x_F, x_{PEB}, x_{inf})$ визначити результат Im . Необхідною умовою формального розв'язання поставленої задачі є наявність залежності (6). Для встановлення такої залежності необхідно розглядати вхідні показники (НЧКК) і вихідне рішення як лінгвістичні змінні, що задані на універсальних множинах (табл. 1) [12–17].

Для оцінювання таких лінгвістичних змінних пропонується використовувати якісні терми, що складають терм-множину [12–17; 20]:

$$\begin{aligned} \beta_E &= \{Н, С, В\} \text{ – терм-множина змінної } x_E; \\ \beta_F &= \{Н, С, В\} \text{ – терм-множина змінної } x_F; \\ X_{PEB} &= \{Н, В\} \text{ – терм-множина змінної } x_{PEB}; \\ Im &= \{Н, С, В\} \text{ – терм-множина змінної } Im; \\ k_{inf} &= \{Н, С, В\} \text{ – терм-множина змінної } k_{inf}; \end{aligned}$$

де Н, С, В – відповідно “низький”, “середній”, та “високий”; Im – множина змінних, що характеризують

ступінь використання радіочастотного ресурсу засобами РЕБ.

$$\beta_E = [1, 3], \beta_F = [1, 3], X_{РЕБ} = [1, 2],$$

$$I_m = [1, 3], k_{инф} = [1, 3]. \quad (7)$$

Для оцінювання значень лінгвістичних змінних $x_E, x_F, x_{РЕБ}, x_{инф}$, відповідно (7) будемо використовувати наступну шкалу якісних термів (табл. 1).

Використовуючи математичний апарат теорії нечітких множин базу знань перетворено в логічні рівняння.

$$\mu^{Im_j}(\beta_E, \beta_F, X_{РЕБ}, k_{инф}) =$$

$$= \max_J \left\{ \min_i \left[\mu^J(x_{i(E)}), \mu^J(x_{i(F)}), \mu^J(x_{i(РЕБ)}), \mu^J(x_{i(инф)}) \right] \right\}, \quad (8)$$

де μ – функції належності відповідних лінгвістичних змінних $x_E, x_F, x_{РЕБ}, I_m, x_{инф}$ множинам $\beta_E, \beta_F, X_{РЕБ}, k_{инф}, I_m$. $J \in \{H, C, B\}$; $x_{i(E)} \in [1, 2, 3]$; $x_{i(F)} \in [1, 2, 3]$; $x_{i(РЕБ)} \in [1, 2, 3]$; $I_{m_i} \in [1, 2, 3]$, $x_{i(инф)} \in [1, 2, 3]$.

З аналізу числових результатів експерименту (табл. 1) можна зробити висновок, що прийняття рішення щодо режиму роботи ЗРЗ визначається виразом:

$$\frac{x_E + x_F + k_{инф}}{3} \cdot X_{РЕБ} = I_m. \quad (9)$$

Мінімальне значення, що може приймати вираз (9), становить $I_m = 1$, тоді максимальне $I_m = 3$ (табл. 4).

У відповідності з [12–17; 20] визначимо ФН до термів-множин важливості режиму роботи ЗРЗ.

Таблиця 4

Числові результати експерименту розрахунку важливості режиму роботи ЗРЗ

Числове значення важливості ЗРЗ I_m	Лінгвістичне значення важливості ЗРЗ I_m
3	Висока
2	Середня
1	Низька

Для цього приведемо інтервали вимірів кожної змінної до одного універсального інтервалу $[0, 2]$ за допомогою співвідношення:

$$\mu^j(I_{m_j}) = \tilde{\mu}^j(u), u = 2 \frac{I_{m_j} - I_m}{I_m - I_m}, j = H, C, B. \quad (10)$$

Аналітична модель функції належності представлена виразом [17]:

$$\mu^j(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u - b}{c}\right)^2}, \quad (11)$$

де параметри b і c задано табл. 5

Таблиця 5

Параметри аналітичної моделі

Терм	H	C	B
b	1	2	4
c	0,923	0,923	0,923

Визначення режиму роботи ЗРЗ зводиться до наступних кроків:

1. За допомогою табл. 1–3 визначається енергетична ефективність, частотна ефективність, ступінь використання радіочастотного ресурсу засобами РЕБ та важливість інформації, що передається.

2. За допомогою (9) розраховуються значення важливості відповідного режиму роботи.

3. Використовуючи табл. 4 визначається лінгвістичне значення важливості режиму роботи ЗРЗ.

5. Оцінка впливу навмисних завад та завмирань сигналу для режимів (дія 7; 10; 17).

Використовуючи результати математичного моделювання функціонування програмованих ЗРЗ що наведені наприклад в роботах [6; 21–23], а також за допомогою відомих математичних моделей, здійснюється аналіз деструктивного впливу навмисних завад та завмирань сигналу на процес функціонування ЗРЗ з МІМО-OFDM, МІМО-UWB та МІМО-ППРЧ. Визначаються заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними завадами та завмираннями сигналу.

6. Вибір параметрів сигналу для обраного режиму (дія 8; 11; 15).

Після проведення оцінки впливу навмисних завад та завмирань сигналу для кожного з режимів, проводиться вибір раціональних значень параметрів сигналу, де за допомогою проведеного математичного моделювання здійснюється початкове введення параметрів ЗРЗ та каналу зв'язку, відбувається вибір раціональних значень параметрів для кожного з режимів, як це зазначено в роботах [24–27].

7. Здійснення аналізу стану каналу зв'язку (дія 16).

За допомогою розробленої в [8] методики здійснюється оцінювання стану каналу зв'язку ЗРЗ, на підставі чого відбувається прийняття рішення щодо відповідності характеристик каналу зв'язку вимогам, що висуваються до його якості.

8. Перевірка виконання вимог з завадозахищеності для кожного з режимів (дія 17).

У разі відповідності стану каналу зв'язку параметрам, що задовольняють тому типу інформації, яка передається по каналу зв'язку, здійснюється передача пакету, якщо ні, здійснюється передача пакету та передається інформація про теперішній стан каналу зв'язку для корегування вибору режиму роботи ЗРЗ, що дозволить зменшити час прийняття рішення щодо доцільності використання режиму роботи.

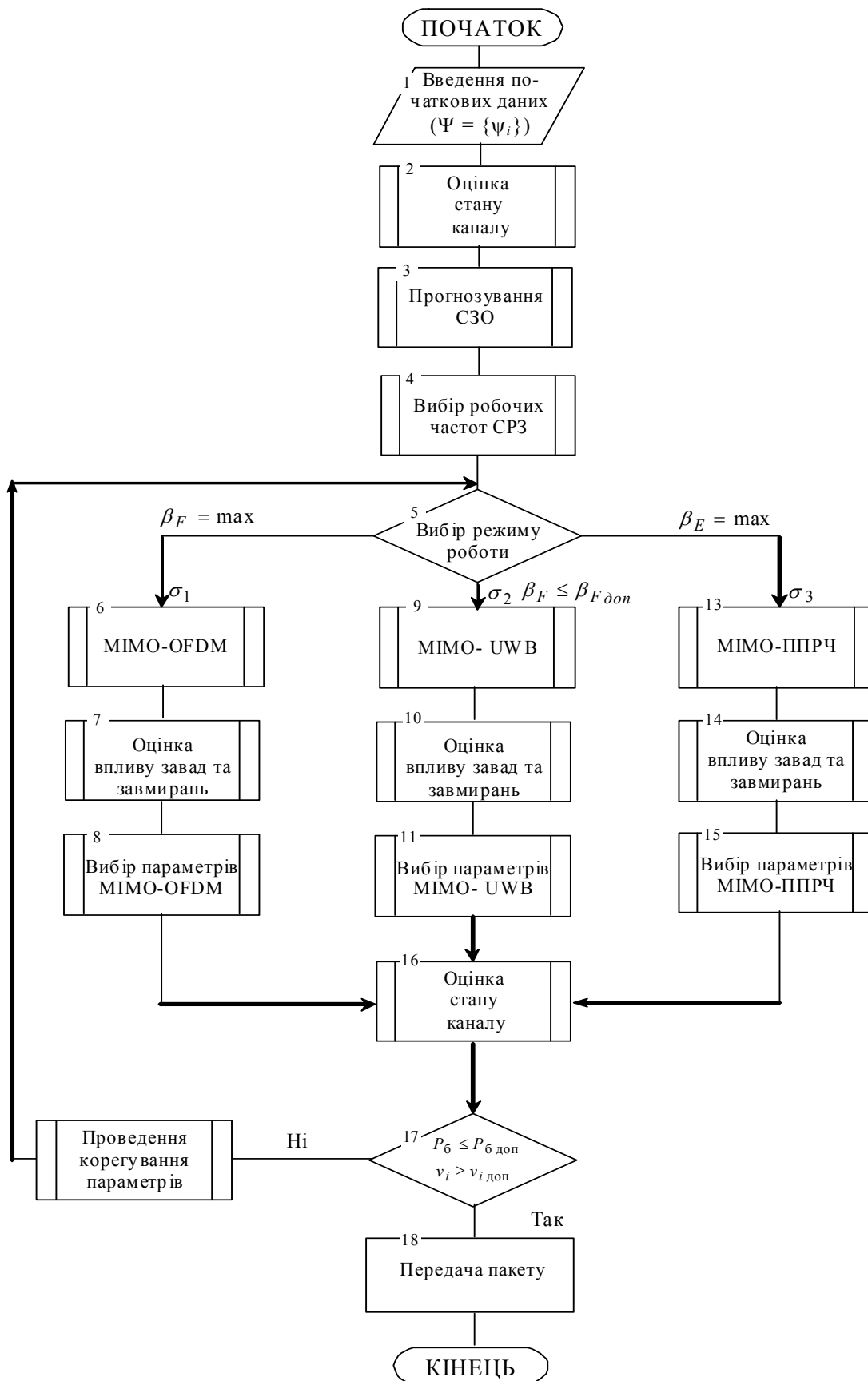


Рис. 1. Алгоритм реалізації методики вибору гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку

Розглянемо практичну значимість розробленої методики. Автором спільно з іншими науковцями було розроблено комплекс патентів України на корисні моделі, в яких детально описано структурні схеми засобів радіозв'язку, що дозволяють працювати в декількох режимах роботи та проводити корегування параметрів режимів в ході ведення сеансу радіозв'язку [28–32].

Висновки

1. В ході дослідження розроблено методику вибору гібридних режимів роботи багатоантенних систем військового радіозв'язку, що функціонують в складних умовах радіоелектронної обстановки. Зазначена методика дозволяє розширити функціональність та підвищити ефективність багатоантенних систем військового радіозв'язку, забезпечити зустрічну роботу багатоантенних засобів радіозв'язку з різними режимами роботи, здійснювати адаптивне управління параметрами систем військового радіозв'язку в залежності від типу переданої інформації та сигнально-завадової обстановки.

Зазначена методика дозволяє вирішити проблему конвергенції різнотипних засобів військового радіозв'язку в єдину систему складову, та дозволяє підвищити ефективність засобів радіозв'язку при дії навмисних завад та частотно-селективних завад за рахунок формування раціонального маршруту передачі інформації та зміни режимів роботи ЗРЗ із застосуванням адаптивних алгоритмів формування і обробки сигналів.

Використання розробленої методики дозволить підвищити завадозахищеність системи радіозв'язку на 30-35% у порівнянні з відомими.

Таким чином проведені дослідження мають як теоретичне так і практичне значення та у сукупності дозволяють поставленій меті.

Напрямок подальших досліджень є удосконалення методології адаптивного управління параметрами систем військового радіозв'язку.

Список літератури

1. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи / В.А. Романюк // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63-65.
2. Шишацький А.В. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил / А.В. Шишацький, О.М. Башкиров, О.М. Костина // Науково-технічний журнал "Озброєння та військова техніка". – К.: ЦНДІ ОВТ ЗС України. – 2015. – № 1(5). – С. 35-40.
3. Жук О.Г. Методика адаптивного управління режимами роботи систем військового радіозв'язку / О.Г. Жук // Системи обробки інформації. – Х.: ХНУПС, 2017. – Вип. 3(149). – С. 106-114.
4. Кувишинов О.В. Напрямки вдосконалення технології OFDM при впливі навмисних завад / О.В. Кувишинов, Л.Л. Бортнік, О.Г. Жук // Збірник наукових праць ВІКНУ. – 2011. – Вип. 30. – С. 121-126.

5. Основи теорії телекомунікацій: підручник / [О.В. Корнейко, О.В. Кувишинов, О.П. Лежнюк та ін.]; за заг. ред. М.Ю. Льченка. – К.: Вид-во «Політехніка», 2010. – 786 с. : іл.

6. Шишацький А.В. Математична модель спотворення сигналу в системах радіозв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням при впливі навмисних завад / А.В. Шишацький, В.В. Лютов, М.В. Борознюк, І.Ю. Рубцов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 3(140). – С. 181-186.

7. Шишацький А.В. Методика управління режимами роботи програмованих засобів радіозв'язку / А.В. Шишацький, О.Г. Жук, Р.М. Животовський // Збірник наукових праць "Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України". – Харків: ХУПС. – 2016. – № 2(23). – С. 135-137.

8. Шишацький А.В. Удосконалена методика оцінювання параметрів сигналів з цифровими видами модуляції / А.В. Шишацький, О.Г. Жук, В.В. Лютов, Р.М. Животовський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 4(25). – С. 117-121.

9. Шишацький А.В. Алгоритм вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад / А.В. Шишацький, В.В. Ольшанський, Р.М. Животовський // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 2(46). – С. 62-66.

10. Шишацький А.В. Методика вибору резервних робочих частот в системах радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти / А.В. Шишацький, О.В. Кувишинов // Дванадцята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 13-14 квітня 2016 року. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2016. – С. 214.

11. Шишацький А.В. Методика вибору робочих частот в складній електромагнітній обстановці / А.В. Шишацький // Системи управління, навігації та зв'язку: Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – 2017. – №1(41). – С. 146-149.

12. Воронин А.М. Многокритериальный синтез динамических систем / А.М. Воронин. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.

13. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике / Т.Р. Брахман. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.

14. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: Пер. с англ. – М., 1976. – С. 172-215.

15. Берштейн Л.С. Нечеткие модели принятия решений: дедукция, индукция, аналогия: Монография / Л.С. Берштейн, А.В. Боженюк. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 110 с.

16. Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.

17. Герасимов Б.М. Человекомашинные системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта / Б.М. Герасимов, В.А. Тарасов, И.В. Токарев. – К.: Наукова думка, 1993. – 181 с.

18. Romanenko I.O. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems / I.O. Romanenko, A.V. Shishatskiy, R.M. Zhyvotovskiy, S.M. Petruk // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1(26). – С. 97-100.

19. Романенко І.О. Математична модель розподілу навантаження в телекомунікаційних мережах спеціального призначення / І.О. Романенко, Р.М. Животовський, С.М. Петрук, А.В. Шишацький, О.О. Волошин // Системи

обробки інформації. – Х.: ХНУПС, 2017. – Вип. 3(149). – С. 61-71.

20. Гаценко С.С. Методика оцінювання оперативної обстановки в автоматизованих системах управління військами в умовах невизначеності / С.С. Гаценко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1(26). – С. 101-105.

21. Шишацький А.В. Оцінка впливу навмисних завад на системи радіозв'язку з псевдовипадковою перестроювальною робочою частотою / А.В. Шишацький, В.В. Лютов, М.В. Зірка, Н.П. Кадет // Проблеми інформатизації та управління. – К.: НАУ, 2015. – № 4(52). – С. 37-44.

22. Жук О.Г. Метод обробки сигналів в системі МІМО / О.Г. Жук, І.В. Борисов, О.В. Борисов // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації НТУУ „КПІ”. – 2012. – №2. – С. 14-17.

23. Восколович О.І. Математична модель системи МІМО з розширенням спектру сигналів методом псевдовипадкової перестройки робочої частоти в умовах впливу навмисних завад та релєєвських завмирань / О.І. Восколович // Тези VII наукової конференції ДУІКТ, 2010. – С. 43-44.

24. Восколович О.І. Методика управління параметрами радіозасобів МІМО з псевдовипадковою перестроювальною робочою частотою / О.І. Восколович // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2011. – Вип. 2. – С. 21-27.

25. Животовський Р.М. Методика вибору раціональних значень параметрів сигналу для безпілотних авіаційних комплексів з прогнозуванням стану каналів управління та передачі даних / Р.М. Животовський // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНПУ ім. Ю. Кондратюка. – 2016. – № 1(37). – С. 120-125.

26. Шишацький А.В. Методика формування сигнально-кодових конструкцій OFDM-сигналу в умовах впливу навмисних завад та селективних завмирань / А.В. Шишацький // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 7(132). – С. 71-77.

27. Шишацький А.В. Удосконалена методика вибору сигнально-кодових конструкцій для систем радіозв'язку з псевдовипадковою перестроювальною робочою частотою в умовах впливу навмисних завад / А.В. Шишацький, В.В. Олшанський // VIII Науково-практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення з урахуванням досві-

ду АТО”: тези доповідей, 29 жовтня 2015 року. – К.: ВІТІ, 2015. – С. 221-222.

28. Патент України на корисну модель №105370. МПК Н04В 1/54(2006.01), Н04В 3/60 (2006.01). Програмована радіостанція [Текст] / Шишацький А.В., Кувшинов О.В., Жук О.Г., Клімович С.О., Комаров В.О., Куровська Т.Ю., Білько Н.Ю. – Заявл. 28.10.2015 року, патент опубл. 10.03.2016, Бюл. №5.

29. Патент України на корисну модель №107000. МПК Н04В 1/54(2006.01), Н04В 3/60(2006.01). Система з псевдовипадковою перестроювальною робочою частотою [Текст] / Шишацький А.В., Кувшинов О.В., Голуб В.А., Ковбасюк О.В., Кадет Н.П., Борисов І.В., Беляков Р.О. – Заявл. 25.12.2015 року, патент опубл. 10.05.2016 року, Бюл. №9.

30. Патент України на корисну модель №96530. МПК Н04В 1/00(2015.01), Н04В 3/00(2006.01). Пристрій прийому та передачі OFDM-сигналів підвищеної стійкості [Текст] / Шишацький А.В., Лютов В.В., Кувшинов О.В., Комаров В.О., Куровська Т.Ю., Прокопенко Є.М. – Заявл. 18.08.2014 року, патент опубл. 10.02.2015 року, Бюл. №3.

31. Патент України на корисну модель №107001. МПК Н04В 1/38(2015.01), Н04В 3/60(2006.01). Програмована радіостанція з прогнозуванням завадової обстановки [Текст] / Шишацький А.В., Кувшинов О.В., Голуб В.А., Романюк В.А., Беляков Р.О., Сальнікова О.Ф., Гурський Т.Г. – Заявл. 25.12.2015 року, патент опубл. 10.05.2016 року, Бюл. №9.

32. Патент України на корисну модель №106859. МПК Н04В 1/70(2016.01), Н04В 70/00. Програмована радіостанція [Текст] / Шишацький А.В., Кувшинов О.В., Жук О.Г., Голуб В.А., Куровська Т.Ю., Башкиров О.М., Лютов В.В. – Заявл. 11.11.2015 року, патент опубл. 10.05.2016 року, Бюл. №9.

Надійшла до редколегії 18.04.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.В. Кувшинов, Управління нормативно-методичного забезпечення та моніторингу володіння, використання та розпорядження нерухомого майна і земель, Київ.

МЕТОДИКА ВЫБОРА ГИБРИДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГОАНТЕННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОЙ РАДИОСВЯЗИ

А.В. Шишацкий

В статье разработана методика выбора гибридных режимов работы многоантенных систем военной радиосвязи, функционирующих в сложных условиях радиоэлектронной обстановки. Указанная методика позволяет расширить функциональность и повысить эффективность многоантенных систем военной радиосвязи, обеспечить встречную работу многоантенных средств радиосвязи с различными режимами работы, осуществлять адаптивное управление параметрами систем военной радиосвязи в зависимости от типа передаваемой информации и сигнально-помеховой обстановки.

Ключевые слова: многоантенные системы, сигнально-помеховая обстановка, скорость передачи информации, вероятность битовой ошибки, радиоэлектронное подавление, умышленные помехи.

METHOD OF SELECTING HYBRID MODES OF WORKING MULTIANTENNA MILITARY RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS

A. Shyshatskyi

In the article has been developed method of the selection hybrid operating modes for multi-antenna military radio communication systems, operating in difficult electronic environment conditions. This technique allows to expand the functionality and efficiency of multi-antenna systems of military radio communication, to ensure the counter work of multi-antenna radio communication devices with different operating modes, to adaptively control the parameters of military radio communication systems, depending of the type of information transmitted and the signal-interference situation.

Keywords: multi-antenna systems, signal-interference environment, information transfer rate, bit error probability, electronic suppression, deliberate interference.