

УДК 621.391

О.Г. Жук

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ*

## МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

*У статті розроблено методику адаптивного управління режимами роботи систем військового радіозв'язку, що функціонують в складних умовах радіоелектронної обстановки. Зазначена методика дозволяє об'єднати у єдине ціле засоби 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:** *сигнально-завадова обстановка, швидкість передачі інформації, ймовірність бітрової 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 метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [3], метод псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ) [4] та технологія „багато входів – багато виходів” (MIMO – Multiple-Input Multiple-Output) [1; 2; 4].

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 даного методу 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 [5]. Отже, зазначена технологія не забезпечує стійкої роботи в умовах активного радіоелектронного подавлення.

Для методу 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 пропускної спроможності та завадозахищеності засобів радіозв'язку [1; 4]. Ідея технології MIMO подібна до добре відомого принципу рознесеного прийому, коли в системі зв'язку створюються декілька некорельованих (незалежних) копій сигналу на прийомі.

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 MIMO поєднані просторово-часові методи приймання з використанням адаптивних антен, методи просторово-часового кодування й просторово-часового розділення сигналів.

В роботі [6] було проведено розробку методики вибору режимів роботи перспективних програмова-

них засобів військового радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад, яка здійснює вибір режимів роботи та параметрів режимів засобів військового радіозв'язку в складній радіоелектронній обстановці. В якості основних режимів роботи в зазначеній методиці обрані методи ППРЧ та OFDM, проте не приділено уваги технології МІМО. В зазначеній роботі не враховано стратегію комплексів РЕБ та методика непристосована для роботи в складі мережі військового радіозв'язку з динамічною зміною топології.

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

Зазначену проблему пропонується вирішувати поетапно шляхом адаптивного:

- управління режимами роботи засобів військового радіозв'язку в залежності від сигнально-завадової обстановки та типу інформації, що передається по каналу зв'язку;

- корегуванням параметрів засобів військового радіозв'язку в кожному режимі роботи під час ведення сеансу радіозв'язку;

- вибором раціонального маршруту передачі інформації в залежності від режиму роботи, передаваної інформації та завантаженості системи радіозв'язку.

Тому **метою статті** є розробка методики адаптивного управління режимами роботи систем військового радіозв'язку з метою підвищення завадозахищеності їх функціонування.

## 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 коригувального 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 кори-

гувального коду із заданою швидкістю ( $R = 0,5$ ). Початковий набір методів маршрутизації, що забезпечує своєчасну та достовірну передачі інформації до адресата.

**Необхідно:** визначити параметри сигналу (кількість активних піднесучих, кількість робочих частот, що будуть використовуватися при передачі повідомлень, сигнально-кодову конструкцію для кожної під несучої, робочої частоти (вид модуляції та коригувального коду) та антенного каналу, маршрут передачі інформації при яких максимізується енергетична ефективність СРЗ  $\beta_E$  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 –  $n$  ( $n=256$ ), максимально допустима ймовірність помилкового приймання сигналів  $P_{б \text{ доп}} = 10^{-2}, 10^{-1} \leq P_{б1} \leq 10^{-3}, 10^{-4} \leq P_{б2} \leq 10^{-6}$ ,

$S \leq 4, V \leq 4; 1 \leq L \leq 4$ , 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 раціональних параметрів систем військового радіозв'язку з мінімальною ймовірністю бітової помилки зводяться до типової оптимізаційної задачі.

Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} P_0 = F_1(v_i, \Delta F, M, n, R, d, P_c, N_A, \sigma, S, L, V) \rightarrow \min; \\ v_i = F_2(M, R, N_A, \Delta F, v_{\text{пер}}, d, \sigma, S, L, V) \geq v_{i \text{ доп}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $M$  – розмірність ансамблю сигналів;  $d$  – Евклідова відстань між точками сигнального сузір'я;  $\sigma$  – використовуємий режим роботи;  $N_A$  – кількість активних під несучих;  $R$  – швидкість коректувального коду ( $R = k/n$ ),  $k$  – кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною  $n$ ;  $\Delta F$  – 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 адаптивного управління режимами роботи систем військового радіозв'язку, алгоритм реалізації якої подано на рис. 1, складається з наступних етапів.

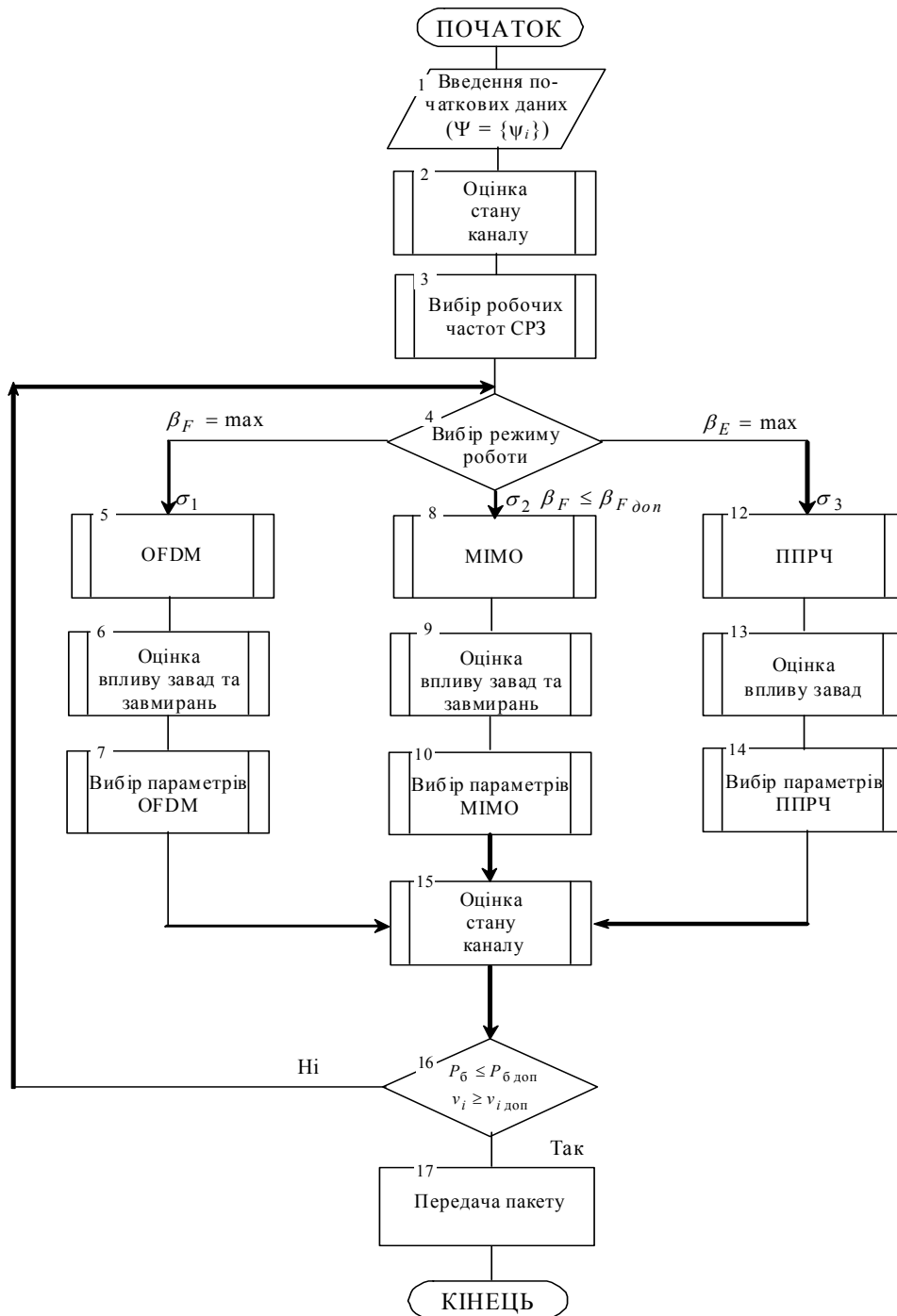


Рис. 1. Алгоритм реалізації методики адаптивного управління режимами роботи систем військового радіозв'язку

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  $P_{\text{б}}$ .

2. Оцінка стану каналу зв'язку (дія 2). Оцінка відбувається наступним чином:  
 – визначається модель каналу;  
 – визначається алгоритм прийняття рішень на приймальній стороні (оптимальний, підпотимальний);

– визначення типу завод та завмирань сигналу.

3. Вибір робочих частот системи радіозв'язку (СРЗ) (дія 3).

На підставі розроблених в роботах [7–8] 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.

4. Вибір раціонального маршруту передачі інформації.

Використовуючи результати, які були отримані в [9], здійснюється побудова раціонального маршруту доставки повідомлення з урахуванням радіоелектронної обстановки, типу та топології системи радіозв'язку, а також типу та важливості передаваної інформації.

5. Здійснення вибору режиму роботи засобу радіозв'язку (дія 4–12).

Система військового радіозв'язку є складною ієрархічною структурою. Кількість параметрів, що характеризує зазначену систему, перевищує необхідний час для проведення аналізу. Отже, необхідно розв'язати багатокритеріальну задачу оптимізації для вибору режиму роботи ЗРЗ, що функціонує у складі СРЗ.

Аналіз існуючого науково-методичного апарату вибору режимів роботи ЗРЗ показав, що в цілому вони дозволяють здійснювати необхідний вибір але мають наступні недоліки:

відсутність аналітичної моделі визначення важливості різних параметрів, що характеризують сигнально-заводову обстановку в каналі зв'язку ЗРЗ;

врахування лише одного або невеликої частини об'єктивних факторів, що впливають на якість каналу зв'язку;

використання методик лише в умовах повної визначеності апріорної інформації щодо сигнально-заводової обстановки в каналі зв'язку;

неможливість динамічної зміни обраних параметрів при зміні умов обстановки.

Отже, виникає багатокритеріальна оптимізація процесу вибору режиму роботи з урахуванням важливості інформації, що передається.

Відповідно до [17; 18] важливість показників можна розглядати як неметричний критерій корисності (НЧК). Основною складністю при розв'язанні поставленої задачі є представлення НЧК у кількісному вигляді з метою його подальшого введення до функції корисності (ФК).

Для представлення НЧК у кількісному вигляді визначені неметричні часткові критерії корисності (НЧКК), які мають характеризувати важливість сигнально-заводової обстановки (СЗО). Відповідно [17; 18], основними НЧКК виступають ступінь пріоритетності передаваної інформації ( $X_{\text{пріор}}$ ); енер-

гетична ефективність ЗРЗ ( $\beta_E$ ); частотна ефективність ЗРЗ ( $\beta_F$ ).

У загальному випадку для кількісного представлення неметричних критеріїв використовується теорія експертного оцінювання. Головною причиною використання теорії експертного оцінювання є відсутність іншого загального методу перетворення неметричних критеріїв у числові значення [17; 18].

Позначимо  $Q(X_{\text{пріор}}, \beta_E, \beta_F)$ , як функцію корисності НЧКК.

$X_{\text{пріор}}, \beta_E, \beta_F$  – незалежні системи величин.

Тоді функції корисності НЧКК можна представити системою виразів

$$\begin{cases} \psi_{\text{пріор}} = Q(X_{\text{пріор}})f(X_{\text{пріор}}), \\ \psi_E = Q(\beta_E)f(\beta_E), \\ \psi_F = Q(\beta_F)f(\beta_F), \end{cases} \quad (2)$$

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

У свою чергу функція корисності СЗО матиме вигляд

$$\psi = Q(X_{\text{пріор}}, X_{\text{інф}}, X_{\text{опер}})f(X_{\text{пріор}}, X_{\text{інф}}, X_{\text{опер}}) \quad (3)$$

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

$$f(X_{\text{пріор}}) = f(\beta_E) = f(\beta_F) = 1. \quad (4)$$

Аналіз обмеження (4) 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 що будь-яка перевага одного із показників виразу (2) за неметричним критерієм призведе до домінування функції корисності відповідного показника.

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

$$\psi = Q(X_{\text{пріор}}, \beta_E, \beta_F). \quad (5)$$

З метою вибору раціонального виду функції корисності  $Q(X_{\text{пріор}}, \beta_E, \beta_F)$  зручно представити  $X_{\text{пріор}}, \beta_E, \beta_F$  у вигляді нечітких множин [17; 18], а оцінки НЧКК як їх елементи відповідно.

Тоді  $Q(X_{\text{пріор}}, \beta_E, \beta_F)$  можна ототожнити з функцією належності набору вхідних значень показників основних НЧКК  $x_{\text{пріор}}, x_E, x_F$  до нечітких множин  $X_{\text{пріор}}, X_E, X_F$ , відповідно. Таким чином, задачу визначення важливості СЗО можна сформулювати як задачу прийняття рішення щодо важливо-

сті СЗО, а результат процесу прийняття рішення можна представити у вигляді:

$$Im = Q(x_{\text{пріор}}, x_E, x_F), \quad (6)$$

де  $x_{\text{пріор}}, x_{\text{інф}}, x_{\text{опер}}$  – набір вхідних значень показників основних НЧКК;

$Im$  – рішення щодо визначення важливості СЗО.

Задача прийняття рішення щодо визначення важливості СЗО полягає в тому, щоб на основі інформації про вектор вхідних показників ( $x_{\text{пріор}}, x_{\text{інф}}, x_{\text{опер}}$ ) 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.

Для оцінювання таких лінгвістичних змінних пропонується використовувати якісні терми, що складають терм-множину [19–22]:

$$X_E = [0,1] \text{ множина змінної } X_E;$$

$$X_F = [0,1] \text{ множина змінної } X_F;$$

$$X_{\text{пріор}} = [0,1], \text{ множина змінної } x_{\text{пріор}};$$

$Im = [0,1]$  множина змінних, що характеризують складність СЗО.

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

У табл. 1 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 багаторежимної радіостанції виникає два протиріччя, які треба вирішувати в режимі реального часу:

перша задача полягає в комплексному впливі на ефективність роботи багаторежимної радіостанції 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 1

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

Тип інформації	Пропускна спроможність	$P_0$	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 багаторежимної радіостанції полягає в тому, що він має враховувати не тільки певний вииграш у покращенні одного показника, але й втрати від погіршення іншого показника.

Як вже вказувалося, для аналізу ефективності функціонування ЗРЗ важливо оцінити застосування енергетичного, частотного та часового ресурсів, проте раніше для перспективної багаторежимної радіостанції вже був обраний режим OFDM, для якого багатоканальність передачі призводить до збільшення сумарної швидкості передачі, тобто зменшення часу передачі.

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  $\beta_F$  та енергетичну ефективність  $\beta_E$ .

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

Тоді можна записати, що для оцінки ефективності програмованих засобів військового радіозв'язку з використанням комбінованого режиму роботи в нашому випадку треба враховувати режим функціонування  $\Gamma$  радіостанції, тип повідомлення  $T_{\Pi}$  спектральну ефективність  $\beta_F$  та енергетичну ефективність  $\beta_E$ , 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 засобу зв'язку характеризується потужністю, необхідною для передачі інформації із заданою достовірністю, таким чином забезпечує потрібний рівень завадостійкості багаторежимної радіостанції. Для розрахунку сумарної ефективності програмованих засобів військового радіозв'язку при багаторежимній роботі використання абсолютних значень показників  $\beta_F$  та  $\beta_E$  внаслідок їх різної розмірності буде викликати складності, тому будемо застосовувати їх питомі (відносні) значення  $\Delta\beta_F$  та  $\Delta\beta_E$ . Тоді приріст ефективності  $\Delta E$  дорівнюватиме сумі приростів обох показників, що оцінюють відповідний фактор. Для врахування під час розрахунків величини  $\Delta E$  типу повідомлень слід ввести до формули розрахунків коефіцієнти важливості для різних типів повідомлень  $\kappa_1$  для спектральної ефективності та  $\kappa_2$  для енергетичної ефективності.

В такому випадку будемо використовувати показники енергетичної та спектральної ефективності для комплексної оцінки ефективності багаторежимних засобів військового радіозв'язку шляхом розрахунку сумарного критерію ефективності  $\Delta E$  як середньозваженої суми приростів окремих показників якості роботи  $\Delta\beta_F$  та  $\Delta\beta_E$ . З врахуванням всього вищенаведеного, комплексний критерій ефективності  $\Delta E$  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 розділі 3. Для визначення типів повідомлень, що циркулюють у тактичній мережі зв'язку, врахуємо дослідження [5–9], 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  $\kappa_{i1}$  та  $\kappa_{i2}$  спектральної  $\Delta\beta_F$  та енергетичної  $\Delta\beta_E$  ефективності відповідно для різних типів повідомлень  $T_{\Pi i}$ , отриману експертним шляхом, при цьому врахуємо, що сума вагових коефіцієнтів  $\kappa_{i1}$  та  $\kappa_{i2}$  дорівнює одиниці, як це показано в табл. 2.

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

Детально розглянемо та обґрунтуємо правило вибору режиму роботи для засобів військового радіозв'язку.

Для каналів з адитивним білим гаусівським шумом ймовірність бітової помилки  $P_6$  залежить від відношення сигнал/шум  $Q_0^2$  на прийомі.

Таблиця 2  
Значення коефіцієнтів важливості для різних типів повідомлень

№ п/п	Тип інформації	Значення коефіцієнтів важливості	
		$\kappa_{i1}$	$\kappa_{i2}$
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

В середовищі поширення потужність сигналу змінюється з відстанню або з часом випадковим чином – в результаті екранування та/або багатопроменевого поширення. Тому в каналі з завмираннями відношення сигнал/шум  $Q_0^2$  є випадковою величиною.

Ймовірність бітової помилки  $P_6$  можна охарактеризувати за допомогою 3-х показників:

– ймовірність переривання зв'язку  $P_{\text{пер}}$ , що визначається як ймовірність того, що відношення сигнал/шум  $Q_0^2$  стане менше заданого значення, що відповідає мінімальній допустимій ймовірності бітової помилки;

– середня ймовірність біткової помилки  $P_{б\text{сер}}$ , що усереднена по розподіленню від відношення сигнал/шум  $Q_0^2$ ;

– комбінація середньої ймовірності біткової помилки  $P_{б\text{сер}}$  та ймовірності перерви радіозв'язку, що визначається як середня ймовірність біткової помилки, яка може бути досягнута на протязі деякого часу, або в деякому просторі.

В роботі розглядаються найбільш складні завмирання, що описуються законом Релея (у яких відсутня регулярна складова сигналу (з постійними параметрами)).

Фаза завмираючого сигналу  $\Theta_{\text{фл}}$  розподілена за рівномірним законом в інтервалі  $[0, 2\pi]$  [4; 5].

Розрахуємо ймовірність перерви зв'язку для релєвських завмирань [4; 5]:

$$P_{\text{пер}} = \int_0^{Q_{\text{мін}}^2} \frac{1}{Q_{\text{сер}}^2} e^{-\frac{Q_{\text{мін}}^2}{Q_{\text{сер}}^2}} dQ_{\text{сер}}^2 = \left(1 - e^{-Q_{\text{мін}}^2}\right) / Q_{\text{мін}}^2 \quad (7)$$

Звідси отримуємо, що необхідне середнє значення відношення сигнал/шум  $Q_{\text{сер}}^2$ , що забезпечує задану ймовірність перерви зв'язку, описується виразом:

$$Q_{\text{сер}}^2 = \frac{Q_{\text{мін}}^2}{-\ln(1 - P_{\text{пер}})} \quad (8)$$

В децибелах це означає, що значення  $10 \log Q_{\text{сер}}^2$  повинно перевищувати задане мінімальне значення  $10 \log Q_{\text{мін}}^2$  на величину

$$F_d = -10 \log \left[ -\ln(1 - P_{\text{пер}}) \right], \quad (9)$$

щоб підтримати прийнятні якісні показники на протязі більш ніж  $100 \cdot (1 - P_{\text{пер}})$  відсотків часу. Величину  $F_d$ , як правило, називають запасом на завмирання [4].

Отже, на підставі виразів (7–9) в якості першої умови зміни режиму роботи ППРЧ до OFDM візьмемо ймовірність перерви зв'язку  $P_{\text{пер}}$ . Значення енергетичного запасу на завмирання  $F_d$  для сигналів типу ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8 та КАМ-16 наведені в роботах [5; 10].

Відомо, що залежність між енергетичною та частотною ефективністю ЗРЗ рівна 1,44 рази.

В якості правила переходу від режиму OFDM до МІМО будемо вважати зменшення частотної ефективності засобу радіозв'язку до допустимої, а з ППРЧ на МІМО підвищення частотної ефективності ЗРЗ.

В якості першого режиму роботи  $\sigma_1$  програмованих ЗРЗ будемо вважати режим роботи з OFDM, а

в якості другого  $\sigma_2$  - МІМО, в якості третього  $\sigma_3$  - ППРЧ.

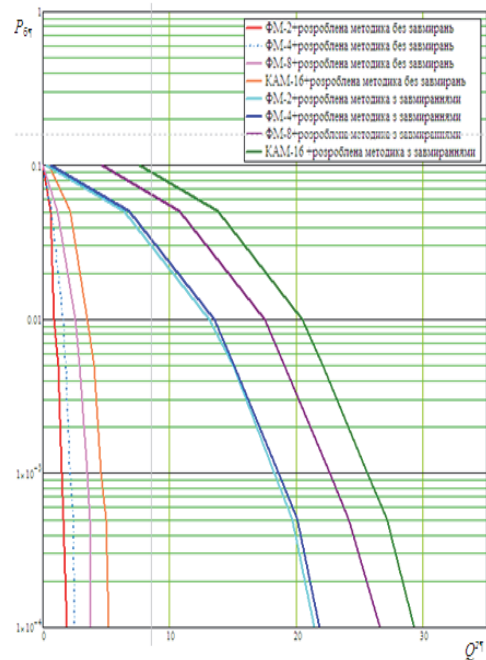


Рис. 2. Енергетичний запас на завмирання  $F_d$  для сигналів типу ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8 та КАМ-16 для підтримання ймовірності біткової помилки  $10^{-4}$

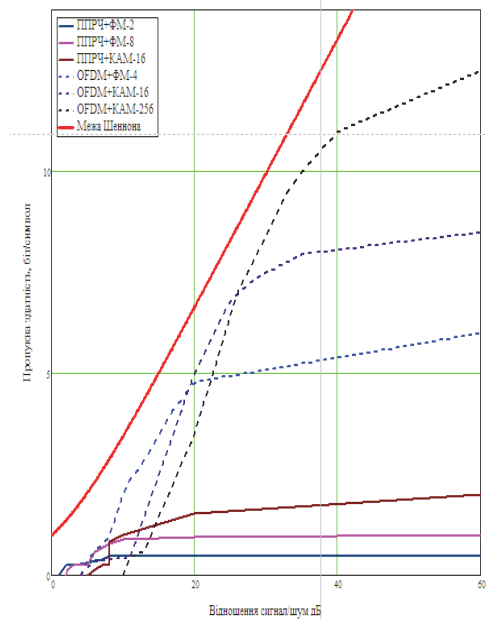


Рис. 3. Вибір режиму роботи та типу СКК в залежності від швидкості передачі

Умовно розділимо на групи вимоги до: ймовірності біткової помилки  $10^{-1} \leq P_{б1} \leq 10^{-3}$  та  $10^{-4} \leq P_{б2} \leq 10^{-6}$ ; швидкості передачі  $v_1 = 8\text{--}32$  кбіт/с та  $v_2 > 384$  кбіт/с.

Розділимо значення частотної ефективності ЗРЗ  $\beta_F$  на дві групи  $\beta_{F1}$  та  $\beta_{F2}$ , при цьому  $\beta_{F1} > 0 > 0,5$ ;  $\beta_{F2} > 0 > 1$ .

4. *Оцінка впливу навмисних завад та завмирань сигналу для режиму OFDM (дія 6).*

Використовуючи результати математичного моделювання функціонування програмованих засобів військового радіозв'язку (ЗРЗ) з OFDM, що наведені в роботі [5], а також за допомогою відомих математичних моделей, здійснюється аналіз деструктивного впливу навмисних завад та завмирань сигналу на процес функціонування ЗРЗ з OFDM. Визначаються заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними завадами та завмираннями сигналу, та визначаються попередні параметри ЗРЗ з OFDM та каналу зв'язку.

5 *Оцінка впливу навмисних для режиму МІМО (дія 9).*

Використовуючи результати математичного моделювання функціонування програмованих ЗРЗ з ППРЧ, що наведені в роботі [10], відомих математичних моделей здійснюється аналіз деструктивного впливу навмисних завад на процес функціонування ЗРЗ з ППРЧ. Визначаються заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними завадами, здійснюється прогнозування стратегії постановника завад та визначаються попередні параметри ЗРЗ з ППРЧ та каналу зв'язку.

5 *Оцінка впливу навмисних для режиму ППРЧ (дія 13).*

Використовуючи результати математичного моделювання функціонування програмованих ЗРЗ з ППРЧ, що наведені в роботі [10] відомих математичних моделей здійснюється аналіз деструктивного впливу навмисних завад на процес функціонування ЗРЗ з ППРЧ. Визначаються заходи, спрямовані на боротьбу з навмисними завадами, здійснюється прогнозування стратегії постановника завад та визначаються попередні параметри ЗРЗ з ППРЧ та каналу зв'язку.

6. *Вибір параметрів сигналу для режиму OFDM (дія 8).*

Після проведення оцінки впливу навмисних завад та завмирань сигналу для режиму OFDM, проводиться вибір раціональних значень параметрів сигналу, де за допомогою проведеного математичного моделювання (дія 7), здійснюється початкове введення параметрів ЗРЗ та каналу зв'язку, відбувається вибір раціональних значень параметрів для режиму OFDM, за розробленою в роботі [11] методикою вибору раціональних значень параметрів сигналу для ЗРЗ з OFDM в умовах впливу навмисних завад та завмирань сигналу.

7. *Вибір параметрів сигналу для режиму ППРЧ (дія 11).*

Після проведення оцінки впливу навмисних завад для режиму ППРЧ, проводиться вибір раціональних значень параметрів сигналу, де за допомогою проведеного математичного моделювання (дія 10) здійснюється початкове введення параметрів ЗРЗ та каналу зв'язку, а також відбувається вибір раціональних значень параметрів для режиму, за розробле-

ної в роботі [12] методики формування раціональних значень параметрів сигналу для ЗРЗ з ППРЧ.

8. *Здійснення аналізу стану каналу зв'язку (дія 12).*

За допомогою методів аналізу стану каналів зв'язку, запропонованих у роботах [13–15] здійснюється оцінювання стану каналу зв'язку, на підставі якого здійснюється прийняття рішення щодо відповідності характеристик каналу зв'язку вимогам, що висуваються до його якості.

9. *Перевірка виконання вимог з завадозахищеності для кожного з режимів (дія 13).*

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 коригування вибору режиму роботи, що дозволить зменшити час прийняття рішення, щодо доцільності використання режиму роботи.

## **Висновки**

1. Розроблено методику адаптивного управління режимами роботи систем військового радіозв'язку, сутність якої полягає у виборі режиму роботи засобу військового радіозв'язку, що функціонує у складі системи військового радіозв'язку відповідно до сигнально-завадової обстановки, вимог, що висуваються до передаваної інформації. Корегування параметрів режиму роботи ЗРЗ відбувається під час ведення сеансу радіозв'язку, під час якого відбувається адаптивне управління маршрутом передачі інформації.

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 завмирань 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.

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

## **Список літератури**

1. Романюк В.А. *Направлення розвитку тактичних мереж зв'язку / 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 ОБТ ЗС України, 2015. – № 1(5). – С. 35-40.*



3. Кувшинов О.В. Напрямки вдосконалення технології OFDM при впливі навмисних завад / О.В. Кувшинов, Л.Л. Бортник, О.Г. Жук // Збірник наукових праць ВІКНУ. 2011. – Вип. 30. – С. 121-126.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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. – С. 62-66.

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

9. Романюк В.А. Адаптивная маршрутизация в мобильных радиосетях / В.А. Романюк // Зв'язок. – 2002. – №3. – С. 21-25.

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

11. 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.

12. Шишацький А.В. Удосконалена методика вибору сигнально-кодових конструкцій для систем радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти в умо-

вах впливу навмисних завад / А.В.Шишацький, В.В. Ольшанський // VIII Науково-практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення з урахуванням досвіду АТО”, тези доповідей, 29 жовтня 2015 року. – К.: ВІПІ: – 2015. – С. 221-222.

13. Шишацький А.В. Аналіз існуючих методів оцінки стану каналу зв'язку / А.В. Шишацький, В.В. Лютов // VI Науково-технічна конференція “Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки”: тези доповідей, 15-19 грудня 2015 року. – К.: ЦНДІ ОБВЗС України, 2015. – С. 398.

14. Толюпа С.В. Аналіз методів оцінки багатопроменового каналу зв'язку / С.В. Толюпа, Т.Г. Гурський, О.І. Восколович // Збірник наукових праць „Вісник ДУ-ІКТ”. – 2011. – Вип. 2. – С. 21-27.

15. Кувшинов О.В. Метод ітеративної оцінки стану каналів системи МІМО / О.В. Кувшинов, О.І. Восколович // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: КНУ, 2011. – Вип. № 26. – С. 33-36.

16. 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.

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

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

19. 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.

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

21. 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.

22. 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.

Надійшла до редколегії 14.03.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. О.В. Кувшинов, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ.

## МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕННЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Г. Жук

В статье разработана методика адаптивного управления режимами работы систем военной радиосвязи, функционирующих в сложных условиях радиоэлектронной обстановки. Указанная методика позволяет объединить в единое целое средства радиосвязи с различными режимами работы, осуществлять адаптивное управление параметрами систем радиосвязи военного назначения в зависимости от типа передаваемой информации и сигнально-помеховой обстановки.

**Ключевые слова:** сигнально-помеховая обстановка, скорость передачи информации, вероятность битовой ошибки, радиоэлектронное подавление, преднамеренные помехи.

## METHODS OF ADAPTIVE CONTROL MODES OF WORKING RADIOCOMMUNICATION MILITARY SYSTEMS

A. Zhuk

In article developed method of adaptive control modes of working radiocommunication military systems, which work in the difficult conditions of the radioelectronic environment. Method allows to combine together radio equipment with different modes of working, to make adaptive control parameters of military radio systems, depending of the type of transmitted information and signal- interference situation.

**Keywords:** signal-interference atmosphere, speed of information transmission, probability of bit error, jamming, intentional interference.