

## АНАЛІЗ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЕФЕКТИВНОСТІ

У статті розглянуто аналіз систем радіозв'язку за показниками ефективності. Встановлено, що сучасні складні системи радіозв'язку не завжди можуть бути вичерпно охарактеризовані одним показником. Оцінка за декількома показниками є більш повною й більш конкретною та дозволяє охарактеризувати різні властивості системи. Оптимізація системи передачі в цілому, тобто з урахуванням пристроїв кодування й декодування, здійснюється на основі теорії інформації.

Найбільш загальною оцінкою ефективності системи зв'язку є коефіцієнт використання каналу за пропускною здатністю (інформаційна ефективність). Для забезпечення заданої швидкості передачі інформації та заданої вірогідності доводиться витратити деяку потужність сигналу і займати певну смугу частот у каналі зв'язку. Яка потужність і яка смуга частот при цьому знадобиться, залежить від системи зв'язку, що використовується.

Ефективність системи передачі інформації оцінюється коефіцієнтом використання потужності сигналу (енергетичною ефективністю) і коефіцієнтом використання смуги частот каналу (частотною ефективністю). Підвищення частотної ефективності вимагає збільшення енергетичних витрат (зниження енергетичної ефективності).

При високих вимогах до вірності передачі доцільним стає застосування завадостійких кодів, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність в обмін на зниження питомої швидкості передачі інформації. Одночасна вимога високої швидкості та вірності передачі інформації в умовах обмеженого частотного і енергетичного ресурсу може бути виконана при спільному використанні багатопозиційних сигналів і потужних завадостійких кодів.

Для оцінки енергетичної ефективності систем радіозв'язку доцільно застосовувати коефіцієнт використання потужності сигналу. Переваги підвищення енергетичної ефективності очевидні: мінімізація потужності випромінювання передавача, покращення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, підвищення прихованості передачі інформації, мінімізація енергоспоживання.

**Ключові слова:** енергетична ефективність, сигнально-кодові конструкції, кодек.

### *V. Olshanskiy, V. Filipov Analysis of radio communication systems by performance indicators.*

The article deals with the analysis of radio communication systems based on performance indicators. It was established that modern complex radio communication systems cannot always be comprehensively characterized by one indicator. Evaluation by several indicators is more complete and more specific and allows to characterize various properties of the system. Optimization of the transmission system as a whole, i.e. taking into account encoding and decoding devices, is carried out on the basis of information theory.

The most general evaluation of the efficiency of the communication system is the ratio of channel utilization by bandwidth (information efficiency). To ensure a given speed of information transmission and a given probability, it is necessary to spend some signal power and occupy a certain frequency band in the communication channel. What power and what frequency band will be needed depends on the communication system used.

The efficiency of the information transmission system is evaluated by the coefficient of signal power utilization (energy efficiency) and the coefficient of channel bandwidth utilization (frequency efficiency). An increase in frequency efficiency requires an increase in energy costs (a decrease in energy efficiency).

With high requirements for fidelity of transmission, it becomes expedient to use interference-resistant codes, which allow to increase energy efficiency in exchange for reducing the specific speed of information transmission. The simultaneous requirement of high speed and fidelity of information transmission in conditions of limited frequency and energy resources can be fulfilled by the joint use of multi-position signals and powerful interference-resistant codes.

To assess the energy efficiency of radio communication systems, it is advisable to use the signal power utilization factor. The advantages of increasing energy efficiency are obvious: minimization of transmitter radiation power, improvement of electromagnetic compatibility of radio-electronic devices, increase of stealth of information transmission, minimization of energy consumption.

**Keywords:** energy efficiency, signal-code constructions, codec.

### Постановка завдання

Сучасні системи військового радіозв'язку функціонують в складних умовах, що обумовлено дефіцитом радіочастотного ресурсу, обмеженими обчислювальними ресурсами та впливом засобів радіоелектронного подавлення супротивника. На даний час для оцінки систем військового радіозв'язку розроблено безліч показників оцінки їх ефективності, проте їх застосування обумовлено рядом обмежень, яка полягає в тому, що показники, які мають високу точність, як правило, не використовуються в зв'язку з високою їх обчислювальною складністю,

а ті показники, що мають прийнятну обчислювальну складність, мають низьку точність оцінювання.

Для кількісної оцінки ефективності систем радіозв'язку необхідно мати кількісні показники ефективності. У ранніх роботах по теорії передачі інформації [1], як показник ефективності використовувалась швидкість передачі інформації. Однак така міра оцінки не є задовільною, оскільки вона враховує лише витрати часу й не враховує затрат смуги частот і потужності сигналу.

У теорії завадостійкості оптимізація приймальної частини цифрової системи передачі інформації здійснюється на основі критерію мінімуму ймовірності помилки (критерію ідеального спостерігача) [2]. Однак, на підставі методів теорії завадостійкості вдається оптимізувати достатньо повно лише алгоритми обробки сигналу при прийманні. Вирішити ж завдання вибору оптимального закону модуляції, і особливо оптимального кодування, на базі цієї теорії не вдається. Критерій мінімуму ймовірності помилки є досить повним для систем без кодування. У цих системах оптимізація фактично зводиться до оптимізації модему. У системах з кодуванням завдання істотно ускладнюється. Тут у формуванні і обробці сигналу важлива роль приділяється кодерам. Основним показником якості таких систем стає швидкість передачі, при якій забезпечується задана ймовірність помилки.

#### **Аналіз публікацій за темою дослідження**

Відомо, що сучасні принципи організації зв'язку і технічні характеристики засобів радіозв'язку підрозділів зв'язку Збройних сил України не дозволяють цілком задовольнити потреби управління військами в умовах сучасного бою. Системи радіозв'язку складаються з великої номенклатури обладнання (антеннофідерні пристрої, маршрутизатори, шлюзи, комутатори, сервери і т. ін.). Особливістю обладнання сучасних систем радіозв'язку є цифровий спосіб оброблення інформації та комутації.

Кількісною мірою якості системи радіозв'язку, як складної системи, є критерій ефективності. Критерій ефективності повинен відповідати функціональному призначенню системи, мати чіткий фізичний зміст, давати однозначну кількісну оцінку, бути простим, урахувати основні параметри системи. Складна система може бути описана сукупністю показників якості, кожен з них характеризує одну з властивостей системи. Узагальнений критерій ефективності, що враховує всю сукупність показників якості, є складним, і формальні методи синтезу систем за таким критерієм ще недостатньо розроблені. Тому на практиці порівняння систем роблять за одним найбільш істотним приватним критерієм ефективності, а на інші накладаються обмеження. Застосування сукупності приватних критеріїв ефективності дозволяє аналізувати різні сторони роботи системи і формулювати конкретні вимоги до її елементів, що важливо для практики.

У той же час передача інформації в різних системах з однаковою якістю ще не дає підстави для судження про те, гарні вони чи погані. Для системи зв'язку, як для будь-якої складної системи, варто враховувати ряд інших її показників, що характеризують: потужність сигналу, займану смугу частот, відношення сигнал/шум і т. ін. Система зв'язку повинна забезпечувати передачу інформації з максимальною правильністю при обмеженнях на потужність, смугу частот, вартість устаткування. Засоби зв'язку, які дозволяють одержати більш високі показники правильності передачі інформації при однакових витратах, будуть більш ефективними [11].

Тому, сучасні складні системи зв'язку не завжди можуть бути вичерпно охарактеризовані одним показником. Оцінка за декількома показниками є більш повною і більш конкретною та дозволяє охарактеризувати різні властивості системи. Оптимізація системи передачі в цілому, тобто з урахуванням пристроїв кодування й декодування, здійснюється на основі теорії інформації, основи якої розроблені К. Шенноном [3; 7].

**Метою статті** є аналіз систем радіозв'язку за показниками ефективності.

#### **Виклад основного матеріалу**

Під ефективністю системи зв'язку розуміється її здатність забезпечити передачу інформації найбільш достовірним способом.

При виборі комплексного показника ефективності системи виходять із того, що він повинен мати прямий зв'язок з її цільовим призначенням, об'єктивно характеризувати основні властивості, бути чутливим до зміни визначальних параметрів системи та поряд з цим повинен бути досить простим, щоб їм можна було скористатися. Проблема полягає в тому, що не всі цілі системи можна адекватно відобразити у кількісній формі. Тим не менш, вирішення питань вибору найбільш доцільних варіантів системи зв'язку зрештою зводиться до вирішення завдань оптимізації цих систем за вибраними критеріями якості.

Найбільш загальною оцінкою ефективності системи зв'язку є коефіцієнт використання каналу за пропускною здатністю (інформаційна ефективність), який дорівнює відношенню швидкості передачі інформації до пропускної здатності:

$$\eta = \frac{v_i}{C}. \quad (1)$$

Інформаційна ефективність  $\eta$  завжди менше одиниці, що ближче  $\eta$  до одиниці, то досконаліша система.

Для забезпечення заданої швидкості передачі інформації та заданої вірогідності доводиться витратити деяку потужність сигналу і займати певну смугу частот у каналі зв'язку. Яка потужність і яка смуга частот при цьому знадобиться, залежить від системи зв'язку, що використовується. Зацікавлює порівняти між собою різні системи зв'язку за ступенем ефективності використання ними основних ресурсів каналу: пропускної здатності, потужності сигналу і займаній смугі частот.

Ефективність системи передачі інформації оцінюється коефіцієнтом використання потужності сигналу  $\beta_E$  (енергетичною ефективністю)

$$\beta_E = \frac{v_i}{P_c/G_0} \quad (2)$$

і коефіцієнтом використання смуги частот каналу  $\beta_F$  (частотною ефективністю) [6; 8]

$$\beta_F = \frac{v_i}{\Delta F}, \quad (3)$$

де  $G_0$  – спектральна щільність потужності шуму;

$P_c$  – потужність сигналу;

$\Delta F$  – смуга пропускання каналу зв'язку.

Граничні можливості системи передачі інформації можна оцінити за допомогою виразу для пропускної здатності Гаусівського безперервного каналу зв'язку зі смугою частот  $\Delta F$ , з урахуванням формули Шеннона:

$$C = \Delta F \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_s} \right) = \Delta F \log_2 (\rho + 1), \quad (4)$$

де  $\rho = P_c/P_s$  відношення потужності сигнал та завада в смузі  $\Delta F$  отримуємо наступні вирази:

$$\eta = \frac{\beta_F}{\log \left( \frac{\beta_F}{\beta_E + 1} \right)}, \quad \beta_F = \rho \beta_E. \quad (5)$$

При відповідних способах передачі і прийому величина  $\eta$  може бути скільки завгодно близька до одиниці, при цьому помилка може бути скільки завгодно малою. У цьому випадку маємо граничну залежність між  $\beta_E$  та  $\beta_F$  у вигляді:

$$\beta_E = \frac{\beta_F}{2^{\beta_F} - 1} \quad (6)$$

Наочно ця залежність представляється у вигляді кривої на  $\beta_E$  та  $\beta_F$  площині (рис. 1), вона відбиває найкращий обмін між  $\beta_E$  та  $\beta_F$  у безперервному каналі.

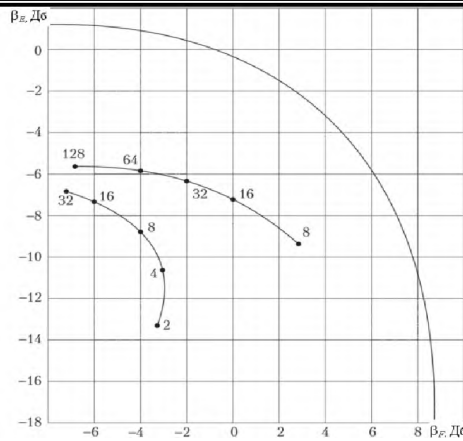


Рис. 1. Криві енергетичної та частотної ефективності

З аналізу співвідношення (6) та межі Шеннона показує, що підвищення частотної ефективності (тобто зниження витрат смуги  $1/\beta_F$ ) вимагає збільшення енергетичних витрат (зниження енергетичної ефективності).

Частотна ефективність  $\beta_F$  змінюється в межах від 0 до  $2 \text{ біт} \cdot \text{с}^{-1}/\text{Гц}$  для двійкових сигналів (межа Найквіста), до  $2 \log_2 M \text{ біт} \cdot \text{с}^{-1}/\text{Гц}$  для  $M$ -позиційних сигналів (де  $M$  – обсяг сигнального ансамблю). Енергетична ефективність обмежена зверху величиною

$$\beta_{F_{\max}} = \lim_{\beta_F} \beta_E = \lim_{\beta_F} \frac{\beta_F}{2^{\beta_F} - 1} = \frac{1}{\ln 2} \quad (7)$$

Застосування методів багатопозиційної маніпуляції підвищує питому швидкість передачі  $\beta_F$ . При цьому збільшення  $M$  призводить до зменшення відстані між найближчими сигнальними точками ансамблю ( $d_{\min}$ ) [10], що веде до зниження енергетичної ефективності.

При високих вимогах до вірності передачі доцільним стає застосування завадостійких кодів, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність в обмін на зниження питомої швидкості передачі інформації. Одночасна вимога високої швидкості та вірності передачі інформації в умовах обмеженого частотного і енергетичного ресурсу може бути виконана при спільному використанні багатопозиційних сигналів і потужних завадостійких кодів.

Створення систем передачі, у яких досягаються близькі до граничного показники ефективності, вимагає спільного узгодження кодека і модему з урахуванням статистичних властивостей безперервного каналу. Це означає, що кодування і модуляцію необхідно розглядати як єдиний процес формування сигналу, а демодуляцію і декодування – як процес оптимального в цілому прийому сигнально-кодового блоку. Спільна оптимізація модемів і кодеків дозволяє істотно знизити втрати інформації, а комбінування різних ансамблів сигналів і завадостійких кодів породжує безліч варіантів побудови таких систем.

Комбінування різних ансамблів  $M$ -позиційних сигналів, завадостійких і маніпуляційних кодів породжує безліч конструкцій. Однак тільки узгоджені варіанти цих конструкцій забезпечують підвищення частотно-енергетичної ефективності систем передачі інформації. Такі варіанти називають сигнально-кодovими конструкціями (СКК) [7; 9].

Введення поняття СКК відображує підхід до модуляції і кодування як процесу об'єднання сигналів і кодів у єдину енергетично- і частотно-ефективну конструкцію та пов'язані з цим специфічні проблеми, які не розглядають у звичайних варіантах "кодек-модем". Ідея побудови СКК полягає в збільшенні мінімальної евклідової відстані між дозволеними кодованими сигнальними послідовностями з використанням надлишковості кодування. При цьому асимптотичний енергетичний виграш кодування (ЕВК) визначається формулою:

$$\beta_{\text{кк}} = 20 \lg \frac{d_E}{d_{E_{\min}}}, \quad (8)$$

де

$$d_E = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

вільна евклідова відстань між дозволеними кодовими блоками  $x_i$  і  $y_i$ ;

$d_{E \min}$  – мінімальна евклідова відстань між різними послідовностями в системі без кодування з однаковою середньою або піковою потужністю.

Для одержання більших величин ЕВК при побудові СКК необхідно підбирати коди, які максимізують вільну евклідову відстань.

Застосування завадостійкого кодування не повинне викликати розширення смуги частот або зменшення швидкості передачі повідомлень. Збільшення кількості позицій використовуваних сигналів дозволяє вирішити цю проблему.

Для військових систем радіозв'язку, де, як правило, інформаційне навантаження на напрямках зв'язку є відомим, більш актуальною є задача підвищення енергетичної ефективності при обмеженнях на пропускну спроможність, смугу пропускання та достовірність. Для оцінки енергетичної ефективності систем і засобів радіозв'язку доцільно застосовувати коефіцієнт використання потужності сигналу  $\beta_E$ . Переваги підвищення енергетичної ефективності очевидні: мінімізація потужності випромінювання передавача, покращення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, підвищення прихованості передачі інформації, мінімізація енергоспоживання.

### Висновки

У статті проведений аналіз систем радіозв'язку за показниками ефективності, який показує, що сучасні складні системи радіозв'язку не завжди можуть бути вичерпно охарактеризовані одним показником. Оцінка за декількома показниками є більш повною й більш конкретною та дозволяє охарактеризувати різні властивості системи.

Для оцінки ефективності систем радіозв'язку доцільно застосувати коефіцієнт використання потужності сигналу  $\beta_E$ . Величина  $\beta_E$  залежить від виду сигналу, виду та інтенсивності завади.

*Напрямок подальших досліджень* є розробка математичної моделі спотворення сигналу при впливі навмисних завад.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Москва: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Кувшинов О. В., Лівенцев С. П., Лежнюк О. П., Міночкін А. І., Могилевич Д. І. Теорія електричного зв'язку: підруч. Київ: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2008. Ч. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації. 286 с.
3. Борисов В. И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Москва: Радио и связь, 2000. 384 с.
4. Шишацький А. В. Розвиток інтегрованих систем зв'язку та передачі даних для потреб Збройних Сил / А. В. Шишацький, О. М. Башкиров, О. М. Костина // Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2015. № 1 (5). С. 35–40.
5. Толюпа С. В. Аналіз методів оцінки багатопроменевого каналу зв'язку / С. В. Толюпа, Т. Г. Гурський, О. І. Восколович // Збірник наукових праць „Вісник ДУІКТ”. 2011. Вип. 2. С. 21–27.
6. Воронин А. М. Многокритериальный синтез динамических систем. Київ: Наукова думка, 1992. 160 с.
7. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. Москва: Радио и связь, 1984. 288 с.
8. Герасимов Б. М. Человеческие системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта / Б. М. Герасимов, В. А. Тарасов, И. В. Токарев. Київ: Наукова думка, 1993. 181 с.
9. Берштейн Л. С. Нечеткие модели принятия решений: дедукция, индукция, аналогия: монография / Л. С. Берштейн, А. В. Боженюк. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. 110 с.
10. Борисов А. Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьева. Москва: Радио и связь, 1989. 304 с.
11. Бондаренко І. М. Системи радіозв'язку: навч. посіб. Харків: ХІ ВПС, 2003. Кн. 2, ч. 1: Радіолінії зв'язку. 162 с.