

УДК.621.39

І.В. Тітов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ КОРЕКЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛІВ ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК ІНТЕГРОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

*У статті викладені зміст та основні результати дослідження ефективності застосування методів корекції характеристик каналів цифрових антенних решіток у багатопозиційній інтегрованої інформаційній системі за множиною джерел тестових сигналів.*

**цифрова антенна решітка, корекція, квадратурна амплітудна модуляція, контрольний (тестовий) сигнал, інтегрована інформаційна система, імовірність бітової помилки**

### Вступ

**Постановка проблеми.** На сучасному етапі розвитку Збройних Сил України гостро постає питання не тільки модернізації існуючих зразків озброєння, а й створення принципово нових, що мають будуватись на основі найсучасніших досягнень науки і техніки.

Прикладом вирішення такої задачі є інтегрована інформаційна система (ІС) [1], що має вирішувати широкий спектр задач: від суто зв'язкових до всебічного інформаційного забезпечення військ. Ключовим моментом побудови такої системи є застосування цифрових антенних решіток (ЦАР), що відкриває можливості підвищення не тільки кількісних, а й якісних показників ефективності її функціонування. Для досягнення максимальної ефективності роботи такої ІС приймальні та передавальні канали ЦАР базових станцій (БС) цієї системи повинні мати ідентичні амплітудно-фазочастотні характеристики. Оскільки в реальних умовах виникає ряд факторів, які перешкоджають підтриманню ідентичності характеристик каналів ЦАР, то виникає потреба у виконанні операцій їх корекції.

Раніше були розроблені методи корекції характеристик ЦАР для ІС [2], яка складається із певної сукупності БС, що пропонувались для використання як джерела тестових сигналів. Але питання ефективності запропонованих методів корекції [2] всебічно досліджені не були.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1, 3] була обґрунтована доцільність створення ІС, яка має будуватись за багатопозиційним принципом, на основі технології програмноконфігурованих радіомодулів, та мати широкі функціональні можливості. У [2] пропонувалось використовувати як джерела тестових сигналів різні БС, що є прийнятно-передавальними позиціями ІС. При цьому, були розроблені і висвітлені у [2] методи корекції характеристик приймальних та передаваль-

них каналів ЦАР БС ІС для різних варіантів застосування БС.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є викладення змісту та основних результатів досліджень ефективності процедур (методів) корекції характеристик каналів цифрових антенних решіток для досягнення найбільшої якості роботи інтегрованої інформаційної системи.

### Виклад основного матеріалу

Взагалі дослідження ефективності методів корекції характеристик цифрових антенних решіток можна проводити на основі різних підходів. З одного боку, представляється можливе застосування статистичної теорії антен [4] і визначення при цьому середніх характеристик антени, флуктуацій її параметрів та дослідження їх залежності від статистичних параметрів решіток. З іншого боку, оскільки ІС, перш за все, призначена для забезпечення мобільних абонентів високоякісним зв'язком, більший інтерес викликає дослідження впливу корекції на можливості системи щодо передачі інформації.

Оскільки відмінною особливістю ІС є застосування цифрових методів обробки інформації, то при оцінюванні ефективності доцільно використовувати показники та критерії, що застосовуються для цифрових систем зв'язку. У телекомунікаційних системах, що використовують технологію OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – частотне ущільнення з ортогональними несучими), послідовний цифровий потік перетворюється у велику кількість паралельних субпотоків, кожен з яких передається на окремій несучій. Для модуляції несучих групового сигналу використовується квадратурна амплітудна модуляція (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Якщо ефективність цифрової системи зв'язку визначати за критерієм завадозахищеності, то необхідно оцінювати відстань  $d$  (відстань Евкліда) між найближчими точками сузір'я на комплексній площині (рис. 1).

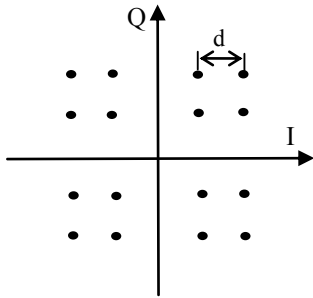


Рис. 1. Сигнальне сузір'я для QAM-16

Згідно з [5], завадостійкість тим вище, чим більше відстань  $d$ . Для пари сусідніх сигнальних векторів  $m$  та  $n$  відстань Евкліда визначається так [6]:

$$d_{mn} = \sqrt{\frac{1}{2}E[(A_{mc} - A_{nc})^2 + (A_{ms} - A_{ns})^2]}$$

де  $E$  – енергія імпульса;  $A_{m(n)c}$  і  $A_{m(n)s}$  – інформаційні амплітуди косинусної та синусної складових векторів  $m$  та  $n$ .

Одним з найбільш розповсюджених критеріїв якості в цифрових системах зв'язку вважається відносна кількість біт, що прийняті помилково. Іноді цей критерій називають інтенсивністю (або імовірністю) бітових помилок (Bit Error Rate, BER) [6]. Для квадратурної амплітудної модуляції BER розраховується за виразом [6]:

$$P = \frac{1}{\log_2(M)} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{2(M-1) N_0}} \right) \right] \right] \right\}$$

де  $M$  – кількість позицій у QAM-сигналі;  $\operatorname{erf}$  – функція помилок інтеграл імовірності,

$$\operatorname{erf}(x) = x \int_0^x e^{-x^2} dx; E_b - \text{енергія, що приходить}$$

на один біт;  $N_0$  – спектральна щільність потужності шуму.

Інший підхід припускає, що для правильної демодуляції сигналів з імовірністю 0,9999 інтервал між сусідніми рівнями амплітуд сигналів  $\delta_{A_i}$  не повинен бути менше, ніж 8 середньоквадратичних помилок (СКП) їх оцінок ( $\sigma_{A_i}$ ) [7]. Внаслідок цього, граничне значення амплітудної та фазової неідентичності каналів ЦАР при заданому відношенні сигнал-шум (ВСШ) визначається перебором можливих неідентичностей до моменту порушення умови:

$$\delta_{A_i} \geq 8 \cdot \sigma_{A_i}$$

Дослідження ефективності методів корекції характеристик каналів ЦАР проводилось за допомогою спеціалізованих пакетів Mathcad та MATLAB.

На рис. 2 проілюстровані допустимі області застосування різних QAM-алгоритмів у випадку застосування 8-канальної ЦАР з імовірністю правиль-

ного декодування 0,999936 при ВСШ у разях  $q=10$ , значенні амплітудної неідентичності 5% та відсутності корекції. По вертикалі відкладене нормоване значення СКП вимірювання амплітуди, по горизонталі – фазова неідентичність каналів, у відсотках, – умовне позначення області QPSK, – QAM-16, – QAM-64, – QAM-256. Область застосування алгоритму QAM-256 включає до себе області QAM-64, QAM-16 та QAM-4; область застосування алгоритму QAM-64 включає до себе області QAM-16 та QAM-4; область застосування алгоритму QAM-16 включає до себе область QAM-4.

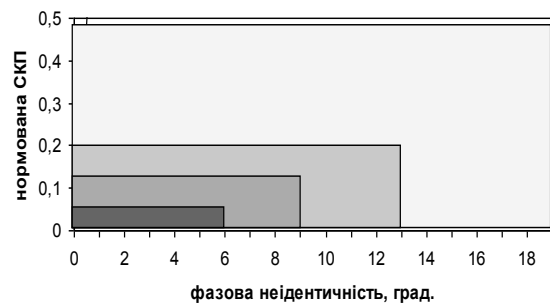


Рис. 2. Области застосування QAM-алгоритмів при відсутності корекції

На рис. 3 проілюстровані допустимі області застосування різних QAM-алгоритмів для аналогічних умов при застосуванні корекції по одному джерелу контрольного сигналу.

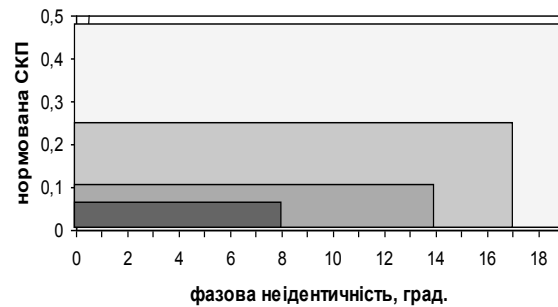


Рис. 3. Области застосування QAM-алгоритмів при застосуванні корекції

При порівнянні рис. 2 та 3 видно, що в разі застосування корекції міжканальних неідентичностей області використання QAM-алгоритмів дещо збільшуються. Так, при відсутності корекції та у разі, коли значення амплітудної неідентичності складає 5%, а фазової – 13 град., для безпомилкового декодування з імовірністю 0,999936 можливо застосування тільки QAM-4. У разі ж застосування корекції, за тих самих умов, завдяки зниженню значення СКП вимірювання амплітуди, можливий перехід до QAM-16, що має вдвічі більшу спектральну ефективність. При цьому збільшується обсяг інформації,

що передається (за рахунок підвищення інформаційної швидкості).

Значення інформаційної швидкості  $V$  – швидкості передавання даних для алгоритму QAM визначається таким співвідношенням:

$$V = N \cdot f_{\text{симв}},$$

де  $N$  – розмірність модуляційного символу;  $f_{\text{симв}}$  – символна швидкість.

Таким чином, при використанні символної швидкості 136 кбод, перехід від QAM-4 до QAM-16 дозволяє отримати інформаційну швидкість 544 кбіт/с, замість 272 кбіт/с.

Для розрахунків та побудови залежностей імовірностей бітових помилок від відношення сигнал-шум використовувалось графічне середовище BERTool, що входить до комплексу поставки третьої версії пакета розширення Communications Toolbox продуктів сімейства MATLAB.

Середа BERTool розраховує та будує графіки BER для заданого набору ВСШ на біт теоретичним та напіваналітичним методами. При теоретичному методі графіки будуються за вбудованими аналітичними виразами, а при напіваналітичному використовується сполучення моделювання та аналітичного розрахунку.

Для проведення експерименту в середовищі MATLAB була створена модель OFDM системи. У ході дослідження моделювався канал розповсюдження із адитивним білим гаусовським шумом. На рис. 4 представлена залежність BER від ВСШ на біт при використанні трьох джерел контрольних сигналів, амплітудній неідентичності 6% та фазовій 8 град. для модуляції QAM – 16 у випадку, коли корекція не застосовується (крива 1) та при використанні процедур корекції (крива 2).

Як видно з рис. 4, для досягнення значення BER, наприклад,  $10^{-6}$  при застосуванні корекції необхідне ВСШ зменшується на 3 дБ.

Таким чином, застосування процедур корекції дозволяє отримати так званий “енергетичний вигравш” (у

даному випадку для  $BER = 10^{-6} - 3$  дБ). З іншого боку, для одного конкретного значення ВСШ застосування корекції дозволяє отримати більшу величину BER у порівнянні з випадком її відсутності. Це ілюструє рис. 5, на якому представлені співвідношення імовірностей бітових помилок для випадків застосування корекції та її відсутності для різних значень ВСШ при QAM-16.

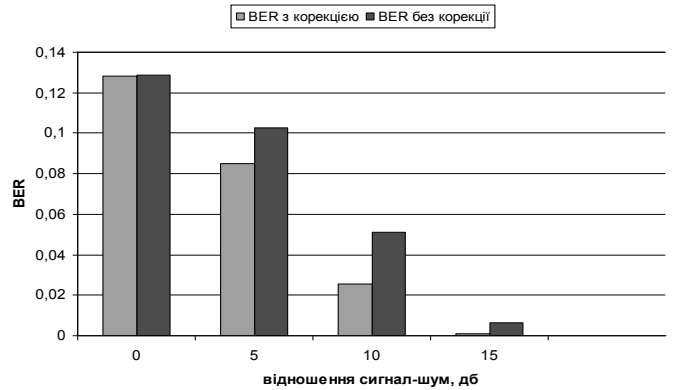


Рис. 5. Співвідношення BER для випадків застосування корекції та без неї

Як видно з рис. 5, для значень ВСШ від 5 до 15 дБ, проведення корекції по трьох джерелах корекції дає збільшення імовірності бітової помилки від 0,004 до 0,025.

## Висновки

Застосування методів корекції характеристик каналів ЦАР в інтегрованій інформаційній системі дозволяє знизити вимоги до їх ідентичності на етапі виготовлення, а в процесі експлуатації застосовувати методи QAM-модуляції із більшою спектральною ефективністю, що збільшує пропускну здатність каналу зв'язку в залежності від кількості каналів ЦАР та інших чинників у 2-3 рази.

При використанні процедур корекції за множиною джерел контрольних сигналів з'являється можливість отримання енергетичного вигравшу, при якому для досягнення необхідної імовірності бітової помилки зменшується ВСШ.

Хоча застосування корекції і дозволяє переходити до виду QAM-модуляції із більшою спектральною ефективністю, але в кожній ситуації необхідно відшукувати компроміс між застосуванням високоефективного (у спектральному відношенні) методу QAM та необхідним рівнем завадозахищеності.

Подальші дослідження слід спрямувати на вивчення властивостей процедур корекції при застосуванні тестових сигналів із різними частотами.

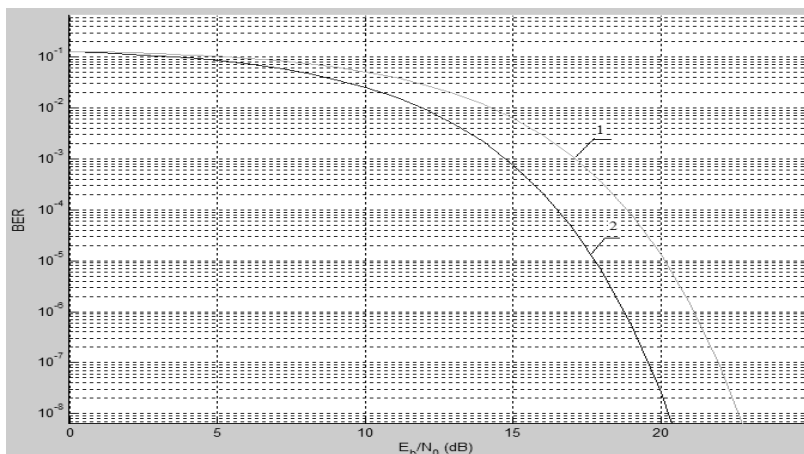


Рис. 4. Залежність BER від ВСШ для QAM-16 у випадках: 1 – без корекції; 2 – з корекцією по трьох джерелах

## Список літератури

1. Патент України № 56922 А, МПК<sup>7</sup> G01S13/02. Спосіб виявлення повітряних цілей за допомогою системи стільникового зв'язку // В.І. Слюсар, І.В. Тітов – № 2002119018; заявлено 12.11.2002; опубл. 15.05.2003, Бюл. № 5, 2003.

2. Slyusar V.I., Titov I.V. Correction of smart antennas receiving channels characteristics for 4G mobil communications// Proc. ICATT, 2003. – VOL. 1. – Sevastopol, 9-12 September 2003. – P. 374-375.

3. Тітов І.В. Перспективна система мобільного зв'язку оперативно-тактичної ланки управління з розширеними функціональними можливостями // Тези доповідей Першої науково-технічної конференції Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2005. – С. 31-32.

4. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.

5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – С.-Пб.: Питер, 2002. – 608 с.

6. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

7. Гуриев М.А. Теория вероятностей и элементы математической статистики. – М.: Воениздат, 1980. – 400 с.

Надійшла до редколегії 15.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.І. Слюсар, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки, Київ.