

УДК 621.391

А.О. Зінченко

Національний університет оборони України, Київ

## ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИЙ РЕЖИМ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНИХ СТАНЦІЙ ЗВ'ЯЗКУ ТА РАДІОЛОКАЦІЇ ЗА ПОКАЗНИКОМ ЙМОВІРНОСТІ ДОСТАВКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ

У статті розроблені аналітичні співвідношення для оцінки ефективності функціонування багатопозиційної інтегрованої системи зв'язку та радіолокації із застосуванням у кожній позиції мобільної станції зв'язку та радіолокації оснащених цифровими антенними решітками та функціонуючих у режимі мульти-МІМО за показником ймовірності доставки інформаційних повідомлень для повнозв'язної радіомережі. Результати проведеного у пакеті Mathcad математичного моделювання свідчать про зниження ймовірності похибок на декілька порядків при передачі даних за кількома паралельними маршрутами.

**Ключові слова:** цифрова антенна решітка, ефективність, інформаційна надійність, радіомережа.

### Вступ

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** Однією з тенденцій розвитку технічних радіоелектронних систем є інтеграція на єдиній платформі різних за призначенням засобів. Автором було запропоновано створення багатопозиційної інтегрованої системи мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки в інтересах інформаційного забезпечення тактичної ланки управління [1–2]. В подальшому були розроблені теоретичні основи створення таких систем, а саме моделі та методи роздільної та спільної демодуляції сигналів у багатопозиційних інтегрованих системах зв'язку та радіолокаційної розвідки (ІСЗРЛ) із застосуванням у кожній позиції мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки (МСЗРЛ) оснащених цифровими антенними решітками (ЦАР) та функціонуючих у режимі мульти-МІМО [3–4]. Проте дослідження ефективності функціонування таких інтегрованих систем у минулому не проводились. На початковому етапі розробки методичного апарату дослідження ІСЗРЛ вважається за доцільне окремо розглянути режими роботи зв'язку та радіолокація. В [5] автором було досліджено питання підвищення ефективності за показником пропускної спроможності, але такий підхід дещо обмежений та не враховує ймовірність доставки інформаційних повідомлень.

Тому **метою статті** є дослідити ефективність функціонування у багатопозиційних ІСЗРЛ із застосуванням у кожній позиції МСЗРЛ оснащених ЦАР та функціонуючих у режимі мульти-МІМО за показником ймовірності доставки інформаційних повідомлень.

### Основний матеріал

Режим мульти-МІМО для кожної МСЗРЛ передбачає створення просторових променів радіоканалів у напрямку кожного абоненту мережі. Таким чином отримуємо повнозв'язну структуру радіомережі, коли кожен з'єднаний з кожним.

В якості основного ймовірнісного показника, що характеризує функціонування повнозв'язної радіомережі, утвореної МСЗРЛ, розглянемо ймовірність доставки інформаційних повідомлень [6].

Згідно з [6], верхня межа оцінки зазначеного сподівання у радіомережі, сформованій на основі  $n > 2$  розгорнутих на позиціях МСЗРЛ, може бути розрахована за виразом:

$$P = (1 - (1 - p)^d)^n, \quad (1)$$

де  $p$  – ймовірність доставки повідомлень у кожній окремо взятій лінії передачі даних між  $i$ -ю та  $j$ -ю МСЗРЛ (вважається однаковою для усіх таких ліній зв'язку в мережі);  $d$  – так званий ранг вузла топології мережі, що визначається виразом  $d = 2N_{cb} / n$ ;  $n$  – кількість МСЗРЛ у тактичній радіомережі;  $N_{cb}$  – загальна кількість парних зв'язків між вузлами МСЗРЛ, яка на відміну від помилкової формули, що наведена у [6] (замість  $C_n^i$  необхідно було використати  $C_n^n$ ), має обчислюватися за відомим з комбінаторики виразом для кількості можливих неповторних сполучень:

$$N_{cb} = C_n^2 = \frac{n!}{2!(n-2)!} = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (2)$$

Підставивши (2) у вираз для степені  $d$ , отримаємо

$$d = \frac{2N_{cb}}{n} = \frac{2n(n-1)}{2n} = n-1.$$

Звідси, (1) перепишеться у вигляді

$$P = (1 - (1 - p)^{n-1})^n. \quad (3)$$

Застосування у складі МСЗРЛ цифрових антенних решіток дозволяє утворити на кожному з мобільних вузлів мережі одночасно кілька просторово рознесених парних ліній зв'язку для забезпечення прохо-

дження інформаційних пакетів від окремо взятої МСЗРЛ до кожної з  $n - 1$  МСЗРЛ, об'єднаних у мережу. При цьому існує можливість дублювання проходження окремо взятого інформаційного пакету паралельно багатьма шляхами передачі протягом фіксованого циклу інформаційного обміну з залученням кожної з інтегрованих у мережу МСЗРЛ.

Якщо на якихось маршрутах інформаційний пакет втрачається, то дублювання його передачі іншими маршрутами дозволяє протистояти таким втратам на кінцевому пункті з урахуванням мажоритарної обробки інформації, отриманої з усіх можливих маршрутів передачі. Як наслідок таке розгалужене проходження повідомлень через усі сполучені у радіомережу МСЗРЛ забезпечує зростання ймовірності їх доставки, що проілюстровано на рис. 1. На ньому, аналогічно [6], наведено залежності загальної ймовірності доставки інформації в інтегрованій радіолокаційно-телекомунікаційній мережі від кількості МСЗРЛ та ймовірності доставки інформаційного повідомлення в окремій лінії передачі за умови ідентичності умов розповсюдження сигналів між довільно взятими для утворення пари  $i$ -ю та  $j$ -ю МСЗРЛ. Графіки отримані у пакеті Mathcad шляхом обчислення виразу (3).

Якщо умови такої ідентичності не досягаються через дію завад, вплив місцевості та різну відстань між МСЗРЛ у парах, то вираз (1) необхідно замінити на більш узагальнений:

$$P = \left( 1 - \prod_{k=1}^d (1 - p_k) \right)^n, \quad (4)$$

де  $p_k$  – ймовірність доставки повідомлень у  $k$ -й лінії передачі даних, утвореній для  $k$ -ї пари МСЗРЛ;  $d$  – ранг вузла топології мережі, або з урахуванням (3):

$$P = \left( 1 - \prod_{k=1}^{n-1} (1 - p_k) \right)^n. \quad (4)$$

Залежність інформаційної надійності передачі даних у радіомережі від кількості задіяних у обміні інформацією МСЗРЛ та інформаційної надійності в окремо взятих каналах передачі

n	3	4	5	6	7
			0,1		
$\Xi$	$3 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$
$\varepsilon$			0,01		
$\Xi$	$3 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-8}$	$6 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-12}$
$\varepsilon$			0,001		
$\Xi$	$3 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-12}$	$6 \times 10^{-15}$	$7 \times 10^{-18}$

Аналіз табл. 1 дозволяє зробити висновок, що для зниження ймовірності похибок при передачі даних у мережі МСЗРЛ з порівняно високих рівнів 0,1; 0,01 та 0,001 достатньо забезпечити одночасну передачу інформаційних пакетів відповідно по 6 та 5 паралельних маршрутах. З іншого боку такі ре-

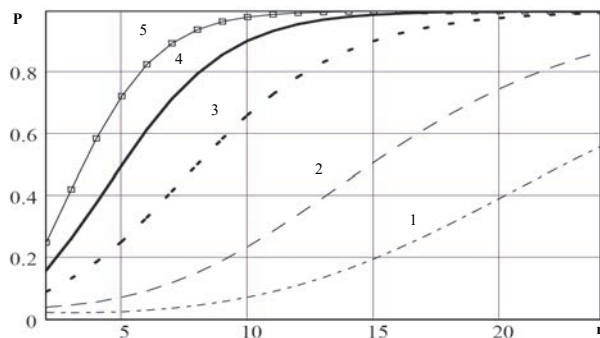


Рис. 1. Ймовірність доставки інформаційних повідомлень у радіомережі МСЗРЛ залежно від кількості МСЗРЛ для різних ймовірностей доставки повідомлень в окремо взятій лінії передачі даних:

- 1)  $p = 0,15$ ; 2)  $p = 0,2$ ; 3)  $p = 0,3$ ; 4)  $p = 0,4$ ; 5)  $p = 0,5$

Найбільш виражено синергичний ефект спрацює у відношенні такого показника, як інформаційна надійність  $\Xi$  передачі даних у радіомережі. Для отримання відповідного виразу візьмемо за основу (1) й будемо розглядати замість ймовірності доставки повідомлень у кожній окремо взятій лінії передачі даних між МСЗРЛ відповідну інформаційну надійність ліній зв'язку  $\varepsilon$ . В результаті отримаємо

$$\Xi = 1 - (1 - \varepsilon^d)^n \quad (5)$$

або з урахуванням (3)

$$\Xi = 1 - (1 - \varepsilon^{n-1})^n. \quad (6)$$

При неідентичній інформаційній надійності у каналах передачі даних справедливо

$$\Xi = \left( 1 - \prod_{k=1}^{n-1} (1 - \varepsilon_k) \right)^n. \quad (7)$$

Для ілюстрації залежності (6) від кількості задіяних у обміні інформацією МСЗРЛ та інформаційної надійності в окремо взятих каналах передачі було проведено розрахунок виразу (6) у пакеті Mathcad. Отримані результати зведені у табл. 1.

Таблиця 1

зультати свідчать про можливість суттєвого зниження вимог до інформаційної надійності парціальних каналів зв'язку, що висуваються на етапі проектування, а також про значне зростання завадостійкості мережі МСЗРЛ у телекомунікаційному режимі функціонування.

Наведені розрахунки чисельних значень ймовірнісних показників ефективності телекомунікаційного режиму за потреби можуть бути суттєво збільшені, якщо залучити для дублювання інформаційних повідомлень різні частотні канали передачі, утворені M піднесучими OFDM (ортогональна частотна дискретна модуляція) або N-OFDM (не ортогональна частотна дискретна модуляція) сигналів, а також паралельно задіяти для трансферу фіксованої за змістом інформації різні MIMO канали передачі даних.

## ВИСНОВКИ

Розроблені аналітичні співвідношення для оцінки ефективності функціонування багатопозиційної інтегрованої системи зв'язку та радіолокації із застосуванням у кожній позиції мобільної станції зв'язку та радіолокації оснащених цифровими антенними решітками та функціонуючих у режимі мультикористувальницького MIMO за показником ймовірності доставки інформаційних повідомлень.

Результати математичного моделювання свідчать, що для зниження ймовірності похибок на декілька порядків при передачі даних у мережі мобільних станцій зв'язку та радіолокації достатньо забезпечити одночасну передачу інформаційних пакетів відповідно по 6 та 5 паралельних маршрутах.

Це відповідає режиму роботи мультикористувальницького MIMO для кожної із мобільних станцій зв'язку та радіолокації із складу радіомережі. Напрямок подальших досліджень вважається розроблення методичного апарату комплексної оцінки ефективності функціонування інтегрованих систем зв'язку та радіолокації.

## Список літератури

1. Слюсар В.І. Інтегрована система зв'язку та радіолокаційної розвідки на основі технології MIMO /

В.І. Слюсар, А.О. Зінченко // III-я всеукраїнська науково-технічна конференція "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ", 13-14 квітня 2010 р. – Львів: Академія Сухопутних військ імені Петра Сагайдачного, 2010. – С. 150.

2. Слюсар В.І. Технологія MIMO як основа інтегрованої системи зв'язку та радіолокаційної розвідки / В.І. Слюсар, А.О. Зінченко // Шоста наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил "Новітні технології для захисту повітряного простору", 14-15 квітня 2010 р. – Х: Харківський університет Повітряних Сил, 2010. – С. 108-109.

3. Зінченко А.О. Багатопозиційна інтегрована система зв'язку і радіолокації на основі конформних антенних решіток у режимі мульти-MIMO / А.О. Зінченко // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – №10. – С. 51-59.

4. Зінченко А.О. Метод селекції радіоімпульсів на фоні N-OFDM сигналів / А.О. Зінченко // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України. – 2013. – №1(47). – С. 29-32.

5. Зінченко А.О. Оцінка ефективності функціонування багатопозиційної системи мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки в інтересах виконання завдань зв'язку / А.О. Зінченко, В.І. Слюсар // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2016. – № 3 (27). – С. 108-114.

6. Царев А.Б. Система управління группой БЛА на базе полносвязной радиосети / А.Б. Царев, Э.В. Волкова // Вестник ЯрГУ. Серия "Естественные и технические науки". – 2013. – № 1. – С. 80-82.

Надійшла до редколегії 21.10.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О.М. Воробйов, Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ.

## ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫЙ РЕЖИМ СЕТИ МОБИЛЬНЫХ СТАНЦИЙ СВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ОЖИДАНИЕ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СООБЩЕНИЙ

А.О. Зинченко

В статье разработаны аналитические соотношения для оценки эффективности функционирования многопозиционной интегрированной системы связи и радиолокации с применением в каждой позиции мобильной станции связи и радиолокации оснащенных цифровыми антенными решетками и функционирующих в режиме мульти-MIMO по показателю вероятности доставки информационных сообщений для полносвязной радиосети. Результаты проведенного в пакете Mathcad математического моделирования свидетельствуют о снижении вероятности ошибок на несколько порядков при передаче данных по нескольким параллельным маршрутам.

**Ключевые слова:** цифровая антенная решетка, эффективность, информационная надежность, радиосеть.

## TELECOM NETWORK MODE MOBILE STATIONS AND RADAR SYSTEMS AT THE INDICATOR WAITING FOR THE DELIVERY OF INFORMATION MESSAGES

A.O. Zinchenko

The author has developed an analytical relation for evaluating the performance of multiple integrated communication systems and radar with application to each position of a mobile station in communication and radar systems equipped with digital antenna arrays and operating under multi-MIMO at the indicator waiting for the delivery of information messages for fully connected radio network. The results of the Mathcad mathematical modeling indicate a decrease in the error probability by several orders of magnitude when transmitting data over multiple parallel routes.

**Keywords:** digital antenna array, efficiency, information reliability, radio network.