

СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ БЕЗПЕКИ ТА ОБОРОНИ

ISSN 2311-7249 (Print)

ISSN 2410-7336 (Online)

№ 3(27)
2016

Науковий журнал

Засновник і видавець

Національний університет оборони України
імені Івана Черняхівського
Журнал заснований у 2008 році

Адреса редакції

Національний університет оборони України
імені Івана Черняхівського
Інститут інформаційних технологій
Повітрофлотський проспект, 28,
Київ, 03049
sitnuou@ukr.net
http://www.sit.nuou.org.ua
телефон: (044)-271-09-44, (099)-319-73-51
факс: (044)-271-09-44

Журнал зареєстровано в Державній реєстраційній
службі України
(свідоцтво КВ №20490-10290ПР)

Журнал видається
українською, російською та англійською мовами

Журнал виходить 3 рази на рік

Наказом Міністерства освіти і науки України
від 29 грудня 2014 р. №1528 журнал включено до
Переліку наукових фахових видань України
в галузях "технічні науки" та "військові науки"

Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету оборони України
імені Івана Черняхівського
(протокол № 19 від 26 грудня 2016 р.)

При використанні матеріалів посилання на журнал
"Сучасні інформаційні технології
у сфері безпеки та оборони" обов'язкове

Редакція може не поділяти точку зору авторів
Відповідальність за зміст поданих матеріалів
несуть автори

Журнал індексується у наукометричних базах:
Citefactor, Google Academy, Index Copernicus,
The Journal Impact Factor,
Directory of Research Journals Indexing (DRJI)

Журнал представлений у базах даних:
Bielefeld Academic Search Engine (BASE),
Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Research Bible, WorldCat.

Журнал внесений до каталогів бібліотек:
Vernadsky National Library of Ukraine.

В номері:

Теоретичні основи створення і використання інформаційних технологій

- Блекот О.М., Нікітін А.А., Ковальський В.М.** Науково-методичний підхід щодо обґрунтування раціонального складу угруповання сил і засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій
- Бобильов В.Є., Зінченко Ю.М., Кононенко С.М., Кравчук А.А.** Підхід до навчання інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень військового призначення за допомогою імітаційної моделі бойових дій
- Богданович В.Ю., Воробійов Г.П.** Шляхи удосконалення методичних основ та інструментальних засобів підтримки процесів прийняття рішень в системі забезпечення національної безпеки
- Бондаренко Л.А., Андреев К.В., Масесов Н.А., Ефанова Е.А.** Формирование общих требований к выбору систем мониторинга телекоммуникационных сетей специального назначения
- Грозовський Р.І.** Розвідзахищеність радіотехнічних систем зі складними сигналами
- Зінченко А.О., Слюсар В.І.** Оцінка ефективності функціонування багатопозиційної системи мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки в інтересах виконання завдань зв'язку
- Каніфольський О.О., Конотопець М.М.** Графічний метод аналізу дослуду кренування
- Котова Ю.В., Недайвода Ю.П., Федулов О.В., Тищенко М.Г.** Существенные аспекты создания и прогнозирования функционирования информационно-управляющих систем
- Коцюрба В.І.** Удосконалення моделі руху заряду розминування у повітрі
- Кубляк М.Б., Кубляк Л.Б.** Модель інформаційної дії на контрагентів впливу
- Лисий М.І., Бабій Ю.О., Дармороз М.М., Поліщук В.В.** Удосконалення моделі оцінки ефективності радіотехнічного комплексу охорони сухопутного кордону
- Литвиненко О.І., Литвиненко Н.І.** Вплив атмосферної хмарності на процес обробки космічних знімків
- Малюга В.Г., Тристан А.В., Паталаха В.Г.** Удосконалена сукупність показників якості для обґрунтування структури органів управління системи управління Повітряних Сил
- Миколайчук Р.А., Грициук Ю.В., Судніков Є.О.** Використання градієнтного підходу під час адаптивного комп'ютерного тестування у навчальних курсах системи дистанційного навчання
- Ожінський В.В., Мамарев В.М., Гащенко С.С.** Аналіз технологій сучасного військового супутникового зв'язку
- Перляков А.Ю., Королюк Н.А.** Процедура логического вывода в лингвистической продукционной модели процесса принятия решений при определении параметров перехвата воздушной цели
- Прийблєв Ю.Б.** Обґрунтування та вибір методу моделювання функціональної організації системи озброєння
- Рудаков В.І., Сергієнко В.Д., Бичков А.М.** Адаптивний контроль сигналу по максимуму інформаційної цільової функції станції цифрового тропосферного зв'язку
- Станович О.В., Кротов В.Д., Бондаренко О.Є., Малих В.В.** Огляд та можливість застосування технології McWill для спеціальних користувачів
- Станович О.В., Бондаренко О.Є., Кротов В.Д., Малих В.В.** Модель мережі супутникового зв'язку на основі випадкового протоколу множинного доступу S-ALOHA
- Ткач В.О., Куцаєв В.В., Лукіна К.В., Козубіцов І.М.** Використання апаратно-програмного комплексу "інтелектуальна цифрова карта" для підвищення ефективності вогневого ураження противника
- Сучасні військово-теоретичні проблеми**
- Бацамут В.М., Головань О.М.** Методика визначення ризиків втрати контролю на зонами відповідальності військових частин, що виникають внаслідок перегрупування сил Національної гвардії України
- Георгадзе О.А.** Методика оцінювання рівня ресурсного забезпечення заходів бойової підготовки військових частин
- Майстренко О.В.** Методика визначення доцільного функціонально-організаційного об'єднання окремих функціональних елементів підсистем вогневого ураження противника
- Мозговий Р.А.** Система управління військами: деякі аспекти оцінювання ефективності функціонування
- Печорин О.М., Салій О.Я.** Особливості тактики застосування військових частин в умовах ведення гібридної війни
- Седов С.Г., Бублій В.А., Реуцький А.А., Сахно В.П.** Дослідження напрямків удосконалення броньового захисту бойових колісних машин
- Степанов Г.В., Данилюк В.Є., Тарасовская С.А., Березовський О.Н., Даценко І.І.** Оцінка протистояння ударному сжатому слою из пористого алюминия
- Улещенко О.А., Коршєць О.А.** Оцінка ураження групової повітряної цілі
- Шваляччинський В.В., Макашкін О.В.** Показники оперативності управління окремого механізованого бригадою

Редакційна колегія

Головний редактор

полковник *Пермяков Олександр Юрійович*,
доктор технічних наук, професор

Заступник головного редактора

полковник *Савченко Віталій Анатолійович*,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Члени редколегії:

Бутвін Борис Леонідович,
доктор технічних наук, професор

генерал-полковник *Воробйов Генадій Петрович*,
кандидат військових наук

Гавлічек Пьотр, доцент

Дробаха Григорій Андрійович,
доктор військових наук, професор

Жук Сергій Якович,
доктор технічних наук, професор

Загорка Олексій Миколайович,
доктор військових наук, професор

полковник *Катеринчук Іван Степанович*,
доктор технічних наук, професор

Компанцева Лариса Феліксівна,
доктор філологічних наук, професор

Косевцов Вячеслав Олександрович,
доктор військових наук, професор

Кравченко Юрій Васильович,
доктор технічних наук, професор

полковник *Лобанов Анатолій Анатолійович*,
доктор військових наук, професор

Потій Олександр Володимирович,
доктор технічних наук, професор

Пресналл Аарон, доктор філософії

Репіло Юрій Євгенович,
доктор військових наук, професор

генерал-майор *Риспаев Асхат Науризбайович*,
кандидат військових наук

Романченко Ігор Сергійович,
доктор військових наук, професор

Рубан Ігор Вікторович,
доктор технічних наук, професор

Рябцев Вячеслав Віталійович,
кандидат технічних наук, доцент

Сбітнев Анатолій Іванович,
доктор технічних наук, професор

Семон Богдан Йосипович,
доктор технічних наук, професор

Серватюк Василь Миколайович,
доктор військових наук, професор

Солонніков Владислав Григорович,
доктор технічних наук, професор

Телелим Василь Максимович,
доктор військових наук, професор

Флурі Філіпп,
доктор філософії

Шевченко Віктор Леонідович,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Шемаев Володимир Миколайович,
доктор військових наук, професор

Шиміч Горан,
доктор філософії

Відповідальний секретар

капітан *Судніков Євген Олександрович*

УДК 355/359.07

¹Андрій Олександрович Зінченко (канд. техн. наук, доцент)²Вадим Іванович Слюсар (д-р техн. наук, професор)¹Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна
²Військова частина А4566, Київ, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОБІЛЬНИХ СТАЦІЙ ЗВ'ЯЗКУ ТА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ В ІНТЕРЕСАХ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ ЗВ'ЯЗКУ

У попередніх роботах авторами були розроблені аналітичні моделі та проведено математичне моделювання функціонування багатопозиційної системи інтегрованих станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки, як основи інформаційно-телекомунікаційної мережі поля бою, що буде виконувати завдання одночасно в інтересах зв'язку та протиповітряної оборони. Але авторами не було розглянуто питання оцінки ефективності її функціонування. Тому метою статті є дослідження ефективності її функціонування в інтересах виконання завдань зв'язку. За основний показник ефективності було обрано спектральну ефективність. У статті досліджено характеристики спектральної ефективності багатопозиційної системи мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки у випадку виконання завдань зв'язку. Встановлені аналітичні співвідношення спектральної ефективності для багатокористувачького варіанту роботи мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки для ідеальних умов та із застосуванням методів *Maximum-Ratio Combining* та *Zero-Forcing Receiver*, що відповідає більш реальному сценарію її функціонування. Проведене математичне моделювання свідчить про значне зростання значень спектральної ефективності, порівняно з одноантенним варіантом, у залежності від кількості антенних елементів та співвідношення сигнал/шум на вході приймача. Отримані аналітичні співвідношення та результати моделювання підтверджують ефективність запропонованої авторами системи.

Ключові слова: зв'язок; спектральна ефективність; цифрова антенна решітка; сигнал/шум.

Вступ

Постановка проблеми. В попередніх публікаціях авторами була запропонована ідея удосконалення концепції мережецентричних операцій шляхом інтеграції сенсорної та інформаційної підсистем у єдину підсистему, що у вигляді решітки буде охоплювати всю зону ведення бойових дій [1]. Основою такою решітки, на думку авторів, може слугувати багатопозиційна система інтегрованих мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки (БСМСЗРЛ) із застосуванням у кожній позиції багатогранної цифрової антенної решітки (ЦАР), сигналів OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex, мультиплексування рознесених ортогональних несучих) або N-OFDM (Non-orthogonal Frequency Division Multiplex, мультиплексування рознесених неортогональних несучих) та технології MIMO (Multiple Input – Multiple Output, багато входів – багато виходів) у її багатокористувальницькому варіанті. Підґрунтям для такої пропозиції стала спорідненість радіоархітектури радіолокаційних та бездротових технологій зв'язку. У першу чергу мова йде про сучасні методи цифрової обробки сигналів та досягнення у впровадженні ЦАР. Такий підхід не протирічить відомим законами розвитку технічних систем, сформульованими Г.С. Альтшулером та В.М. Петровим [4-6]. Вони

полягають у тому, що після вичерпання ресурсів свого розвитку одна система об'єднується з іншою, утворюючи нову, більш складну та функціонально збагачену надсистему. Перехід до надсистеми є неминучим і закономірним явищем. Він проходить через утворення бісистеми або навіть полісистеми з подальшим їхнім "частковим згортанням", при якому скорочуються допоміжні елементи, встановлюються більш тісні зв'язки між окремими системами. Інтеграція радарних та телекомунікаційних систем є проявом закону переходу до надсистеми. По суті мова йде про створення в інтересах Збройних Сил України системи мобільного зв'язку наступного покоління 5G з розширеними можливостями. Вважається за доцільне оцінити ефективність такого підходу стосовно виконання завдань зв'язку.

В якості основного показника ефективності системи зв'язку у системі управління військами доцільно вважати пропускну спроможність – об'єм повідомлень у системі управління, що своєчасно передаються (приймаються) із заданою достовірністю та скритістю. Для оцінки сучасної цифрової системи зв'язку перейдемо від кількості повідомлень за одиницю часу до пропускну спроможності у бітах/секунду та спектральної ефективності каналу зв'язку, що вимірюється у бітах за секунду на Герц (біт/с/Гц). Спектральну

ефективність оберемо основним показником ефективності.

Метою статті є дослідження спектральної ефективності запропонованої багатопозиційної системи мобільних станцій зв'язку та радіолокаційної розвідки.

Виклад основного матеріалу дослідження

Як зазначено в роботі [7], спектральна ефективність багатокористувальницької системи МІМО, загальна схема якої наведена на рис. 1, може бути визначена за виразом:

$$C_{ul,sum} = \log_2 \det(I_K + p_u H^H H), \text{ біт/с/Гц}, \quad (1)$$

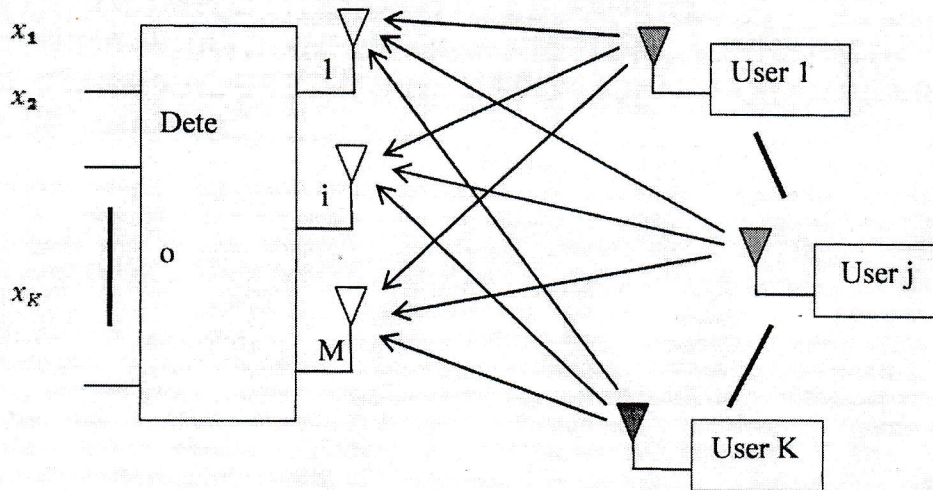


Рис. 1. Схематична модель передачі даних від кореспондентів на базову станцію за принципом Massive MIMO.

де I_K – одинична матриця, K – кількість користувачів, що передають дані на базову станцію (БС) через одиночні антени; p_u – середнє для всіх каналів прийому відношення сигнал-шум; H – матриця характеристик сумарного каналу передачі даних.

У разі сприятливих умов розповсюдження радіохвиль, тобто коли вектори характеристик каналів між користувачами та БС взаємно ортогональні, сумарна ємність режиму передачі даних від кореспондентів до БС (uplink transmission) описується більш конкретним співвідношенням [7]:

$$C_{sum} = \log_2 \det(I_K + p_u \times M \times I_K) = K \times \log_2(1 + M \times p_u), \quad (2)$$

M – кількість антенних елементів у приймальній антені БС, p_u – середнє для всіх каналів прийому відношення сигнал-шум на вході приймальної антенної решітки. При цьому вважається, що виконується умова $M \geq K$. Величину K в закордонній літературі іменують як мультиплексне підсилення (multiplexing gain), а M – підсилення антенної решітки (the array gain) [7], яке обумовлене когерентним накопиченням сигналів по апертурі цифрової антенної решітки, наприклад, при формуванні простору променів за допомогою операції дискретного (швидкого) перетворення Фур'є.

Отже, за рахунок збільшення величин K та M можливо без нарощування потужності передавачів досягти зростання ємності мережі зв'язку. При цьому може бути збільшена кількість абонентів, що одночасно працюють у спільній смузі частот,

або ж швидкість передачі при незмінній кількості користувачів. Як зазначено в [7], шляхом подвоєння кількості антен M на БС можливо зменшити на 3 дБ потужність передавачів кореспондентів при забезпеченні незмінної якості сервісу, що надається.

У разі, якщо K кореспондентів застосовують N – елементні антенні решітки, кожен з елементів яких випромінює свій інформаційний сигнал, й виконується умова $M \geq K \times N$, вираз (2) можливо переписати у вигляді:

$$C_{sum} = K \times N \times \log_2(1 + M \times p_u), \quad (3)$$

Якщо всі антенні елементи окремо взятої N -елементної антенної решітки передавального сегменту кореспондента випромінюють один і той же сигнал, то величина N буде мігрувати в аргумент логарифма, тобто вираз (3) переписеться у вигляді:

$$C_{sum} = K \times \log_2(1 + N \times M \times p_u), \quad (4)$$

Слід зауважити, що при достатньо великих значеннях відношення сигнал-шум та величини M у виразах (2), (3) в аргументі функції логарифма можливо знехтувати одиничним доданком, тобто використовувати наближену рівність:

$$\log_2(1 + M \times p_u) \approx \log_2(M \times p_u), \quad (5)$$

Для того, щоб визначити межі справедливості такого припущення та з'ясувати загальний характер залежності $\log_2(1 + M \times p_u)$ було проведено відповідні розрахунки у пакеті Mathcad. Їхні результати представлені на рис. 2. При цьому уздовж горизонтальної вісі відкладено кількість антенних елементів M у складі приймальної ЦАР

базовій станції, а по вертикалі – спектральну ефективність у бітах/с/Гц для відношення сигнал-шум 4 (C(M), суцільна червона лінія) та 8 (C1(M), штрихова синя лінія).

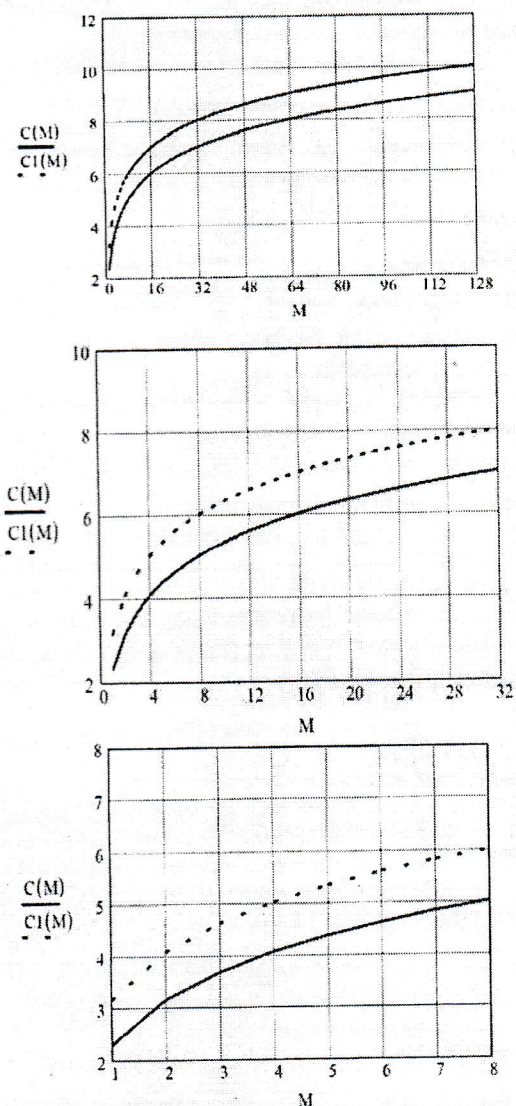


Рис. 2. Залежність спектральної ефективності інтегрованої системи радіолокації та зв'язку у телекомунікаційному режимі від кількості антенних елементів M на базовій станції.

Як видно з рис. 2, для більших відношень сигнал-шум лінія спектральної ефективності проходить вище. Суттєво, що в межах ліній C(M) та C1(M) і їм подібним можливо виділити дві характерних ділянки – вираженого нелінійного зростання спектральної ефективності та приблизно лінійного сегменту. Для зазначених відношень сигнал-шум нелінійна ділянка обмежується приблизно 16 антенними елементами у складі ЦАР. Однак, фактично незалежно від зазначених ділянок, подвоєння кількості антен на БС дозволяє збільшити спектральну ефективність на 1 біт/с/Гц. Наприклад, для графіка C(M) зростання кількості антенних елементів M від 4 до 8 призводить до збільшення спектральної ефективності з 4 до 5

біт/с/Гц. Аналогічно для C1(M) для тих же значень величини M спостерігається зростання спектральної ефективності з 5 до 6 біт/с/Гц.

Нарощування розмірності антенної решітки у 4 рази, наприклад, з 8 до 32 елементів дозволяє отримати вигравш на 2 біт/с/Гц (див. лінію C1(M)). Нарешті, збільшення кількості антенних елементів у 8 раз призводить до підвищення спектральної ефективності приблизно на 3 біт/с/Гц. Для проведених розрахунків такий вигравш спостерігається при переході уздовж червоної лінії C(M) від абсциси M=16 до M=128 зі зростанням ординати з 6 до 9 біт/с/Гц та аналогічно для C1(M) зі зміною ординати від 7 до 10 біт/с/Гц.

Таким чином, аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати емпіричну залежність для прогнозу оцінки вигравшу у спектральній ефективності ΔC_{sum} при фіксованому відношенні сигнал-шум і нарощуванні кількості антенних елементів в приймальній антенній решітці БС зв'язку та радіолокації в δM раз у вигляді:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(\delta M), \text{ біт/с/Гц.} \quad (6)$$

Аналогічно описується вигравш при збільшенні відношення сигнал-шум для фіксованої кількості антенних елементів приймальної ЦАР у δp_u раз:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(\delta p_u), \text{ біт/с/Гц.} \quad (7)$$

При одночасному зростанні розмірності приймальної ЦАР та відношення сигнал-шум з (6) та (7) отримуємо:

$$\Delta C_{\text{sum}} = \log_2(\delta M) + \log_2(\delta p_u), \text{ біт/с/Гц.} \quad (8)$$

Наприклад, для того, щоб досягти збільшення спектральної ефективності на 10 біт/с/Гц необхідно у 32 рази підняти відношення сигнал-шум та у стільки ж разів наростити розмірність антенної решітки.

Окрім абсолютних значень вигравшу інтерес представляє також аналіз відносного вигравшу у спектральній ефективності при збільшенні кількості антенних елементів у порівнянні з одиночною антеною на базовій станції. Для цього залежності, які наведені на рис. 2, були віднормовані на величину $\log_2(1+p_u)$, що відповідає значенню M=1. Результати такого нормування наведено на рис. 3.

Як видно, при менших відношеннях сигнал-шум приріст у спектральній ефективності у разі збільшення кількості антенних елементів у складі ЦАР на базовій станції є більш помітним (на усіх графіках червона суцільна лінія, що відповідає відношенню сигнал-шум 4, проходить вище, ніж синя штрихова лінія). При кількості антенних елементів M=32 відносний вигравш у спектральній ефективності, обумовлений різницею у відношенні сигнал-шум становить 0,5 біт/с/Гц і зростає зі збільшенням кількості антенних елементів.

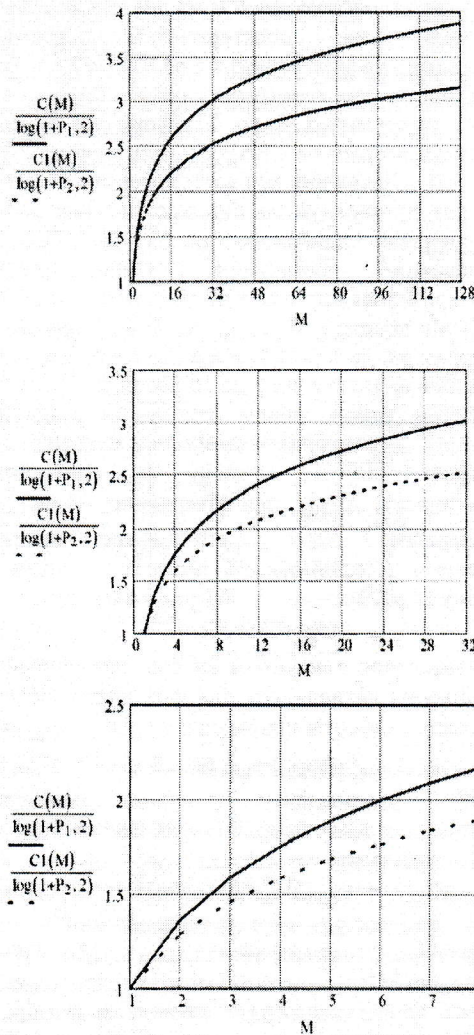


Рис. 4. Відносний виграш у спектральній ефективності інтегрованої системи радіолокації та зв'язку у телекомунікаційному режимі залежно від кількості антенних елементів M на базовій станції.

Розглянуті залежності для виграшу у спектральній ефективності по суті характеризують верхню його межу і відповідають сприятливим, а точніше сказати, ідеальним умовам прийому сигналів на базовій станції. Реальні показники слід очікувати дещо нижчими. Щоб оцінити можливі втрати розглянемо два крайні випадки, що мають місце при застосуванні спрощених підходів до обробки сигналів MIMO. Це методи Maximum-Ratio Combining (MRC) та Zero-Forcing Receiver (ZF) [8].

В рамках методу Maximum-Ratio Combining (MRC) базова станція максимізує відношення сигнал-шум для кожного з потоків даних, ігноруючи ефект багатокористувальницької інтерференції. Як наслідок для детектування сигналу, переданого k -м кореспондентом, прийнятий сигнальний вектор має бути помножений на комплексно сполучений вектор характеристики каналу h_k :

$$\tilde{y}_k = h_k^H y = \sqrt{p_u} \|h_k\|^2 x_k + \sqrt{p_u} \sum_{i \neq k} h_k^H h_i x_i + h_k^H n, \quad (9)$$

де: $y = \sqrt{p_u} \sum_{k=1}^K h_k x_k + n$ або $y = \sqrt{p_u} Hx + n$.

В наведених співвідношеннях величина $\sqrt{p_u} x_k$ означає напругу сигналу, переданого k -м користувачем, за припущення, що середня потужність випромінювання кожного користувача становить p_u , $x = [x_1 \dots x_K]^T$.

Величина $h_k \in C^{M \times 1}$ – це вектор характеристики каналу, що утворений між k -м користувачем та базовою станцією, $n \in C^{M \times 1}$ – вектор адитивного шуму, розподіленого за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням; $H = [h_1 \dots h_K]$ – матриця характеристик каналу

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1K} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MK} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Відношення сигнал/(завада+шум) для k -го потоку даних запишеться у вигляді [8]:

$$SNR_{MRC,k} = \frac{p_u \|h_k\|^4}{p_u \sum_{i \neq k} |h_k^H h_i|^2 + \|h_k\|^2} \quad (11)$$

Швидкість передачі даних k -м кореспондентом (user) оцінюється як [8]

$$R_k^{MRC} = \log_2 \left(1 + \frac{p_u \|h_k\|^4}{p_u \sum_{i \neq k} |h_k^H h_i|^2 + \|h_k\|^2} \right) \quad (12)$$

Спектральна ефективність MRC визначається виразом [8]:

$$R^{MRC} = K \cdot R_k^{MRC} = K \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p_u \|h_k\|^4}{p_u \sum_{i \neq k} |h_k^H h_i|^2 + \|h_k\|^2} \right) \quad (13)$$

На відміну від MRC в методі Zero-Forcing Receiver (ZF) враховується міжканальна (міжкористувальницька) інтерференція, але при цьому нехтують наявністю шумів, вважаючи відношення сигнал-шум достатньо значним [8]. Зазначена міжканальна інтерференція нівелюється за рахунок проєкції сигналів кожного з інформаційних потоків на ортогональний простір міжканальних завад. Це досягається за рахунок перемноження прийнятого вектору сигнальної суміші на псевдообернену матрицю характеристик каналу H [8]:

$$\tilde{y} = (H^H H)^{-1} H^H y = \sqrt{p_u} x + (H^H H)^{-1} H^H n \quad (14)$$

Відношення сигнал/(завада+шум) для k -го потоку даних запишеться у вигляді [8]:

$$\text{SINR}_{zf,k} = \frac{P_u}{\left[\left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} \right)^{-1} \right]_{kk}}, \quad (15)$$

Швидкість передачі для k -го передавача, що може бути теоретично досягнута в рамках метода ZF, опишеться виразом [8]:

$$R_k^{ZF} = \log_2 \left(1 + \frac{P_u}{\left[\left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} \right)^{-1} \right]_{kk}} \right) \quad (16)$$

Звідси, як зазначено в [8], спектральна ефективність метода ZF становить:

$$R^{ZF} = K \cdot R_k^{ZF} = K \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_u}{\left[\left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} \right)^{-1} \right]_{kk}} \right) \quad (17)$$

Як видно, порівняно з MRC метод ZF має більшу обчислювальну складність через потребу розрахунку псевдооберненої матриці й може застосовуватися лише в межах сценарію обмежених потужностей шумів. Однак, за даними [8], ZF має більшу спектральну ефективність, ніж MRC. Тому для оцінки *нижньої межі* пропускної здатності пропонуваної системи слід скористатися залежностями, що відповідають методу MRC.

Для ілюстрації величини та співвідношення залежностей спектральних ефективностей, що мають місце при використанні методів MRC та ZF, доцільно послатися на наведений в [7] рис. 5. На ньому представлені зазначені залежності, що відповідають формулі Шеннона (2), методам ZF, MRC та методу найменших квадратів (MMSE).

Як видно з наведених графіків, втрати у реальних значеннях спектральної ефективності при застосуванні метода MRC при значній кількості антенних елементів можуть сягати майже третини, що в абсолютному вираженні становить

Література

1. Слюсар В. І. Багатопозиційна інтегрована система зв'язку і радіолокації із застосуванням методу децимації відліків аналогово-цифрових перетворювачів. / В. І. Слюсар, А. О. Зінченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2014. - № 4(32). – С. 65–71.
2. Альтшуллер Г. С. Творчество как точная наука. Теория решения изобретательских задач. - М.: Сов. радио, 1979. - 184 с.
3. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. - Новосибирск: Наука, 1986. - 209 с.
4. Петров В. Основы теории решения

8-9 біт/с/Гц. У випадку метода ZF при кількості антенних елементів, більше 40, втрати у спектральній ефективності є незначними і становлять близько 2 біт/с/Гц. Таким чином, при великих відношеннях сигнал/шум, на які орієнтований метод ZF, використання ідеалізованих розрахунків за формулою Шеннона є цілком виправданим.

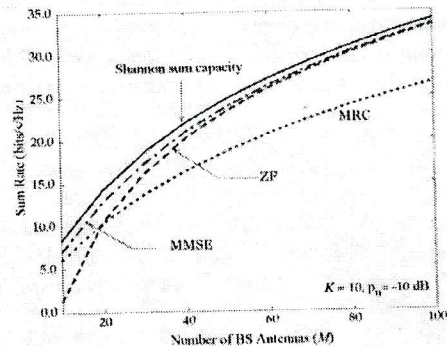


Рис. 5. Спектральна ефективність, що відповідає формул Шеннона, методам ZF, MRC та MMSE.

Висновки й перспективи подальших досліджень

В статті було проведено дослідження ефективності виконання завдань зв'язку багатопозиційною системою зв'язку та радіолокаційної розвідки. За основний показник ефективності було обрано спектральну ефективність. Наведені аналітичні співвідношення та проведено математичне моделювання свідчать про значний приріст спектральної ефективності та пропускної спроможності для цифрової антенної решітки у багатористувальницькому режимі роботи порівняно з варіантом наявності лише одного антенного елемента.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНЫХ СТАНЦИЙ СВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ В ИНТЕРЕСАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ СВЯЗИ

¹Андрей Александрович Зинченко (канд. техн. наук, доцент)

²Вадим Иванович Слюсар (д-р техн. наук, профессор)

¹Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

²Военская часть А4566, Киев, Украина

Структура рукопису

Відповідно до постанови ВАК України від 15.01.2003 № 7-05/1 текст статті повинен мати таку структуру: **постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор; формулювання мети статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.**

Текст статті розбивається на відповідні розділи з підзаголовками, які виділені напівжирним шрифтом.

Робочі мови – українська, російська, англійська.

На останньому аркуші статті після списку літератури наводяться: назва статті, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь та вчене звання автора (співавторів), назва організації, у якій працює автор (співавтори), анотація та ключові слова українською, російською та англійською мовами (крім основної мови статті) за нижченаведеним зразком (10 кегль (8 для наукового ступеня, звання, посади), міжрядковий інтервал – 1,0, вирівнювання – по центру). Обсяг анотації – 100-250 слів, англійською – 150-250 слів.

НАЗВАННЯ СТАТТІ

¹Анатолій Анатолієвич Іванов (д-р техн. наук, професор)
²Іван Іванович Петров (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри)

¹Університет..., Київ, Україна
²Інститут..., Київ, Україна

Перевод текста аннотации и ключевых слов

ARTICLE TITLE

¹Anatolii A. Ivanov (Doctor of Technical Sciences, Professor)
²Ivan I. Petrov (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

¹University..., Kyiv, Ukraine
²Institute..., Kyiv, Ukraine

Translation of the abstract and keywords

Після цього наводиться список літератури англійською мовою за зразком (9 кегль):

References

1. Pukhov G.E. (1990). Differential spectrums and models. [Dyferentsiini spektry ta modeli], Kyiv, Naukova Dumka, 184 p. 2. Mikheenko L.A., Nechiporuk S.A. (2011). Energy model of digital camcorder. [Enerhetychna model tsyvrovoi videokamery], Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, No. 1, pp. 150–157. 3. Voskresenskaya E.V. (2003). Legal regulation of valuation activities: dissertation. [Pravovoe regulirovanie otsenochnoi deyatel'nosti: dis. kand. yurid. nauk]. St. Petersburg, 187 p. 4. Bezrodnaya V.F. (2004). Features of

civil society development in the process of political modernization of Ukraine: Author's thesis. [Osobennosti formirovaniya grazhdanskogo obshchestva v protsesse politicheskoi modernizatsii Ukrainy: avtoref. dis. kand. polit. nauk], Odessa, 16 p. 5. Serdyuk T.V., Self-regulation in Ukraine: advantages and disadvantages in the current economic conditions. [Samoregulirovanie v Ukraine: preimushchestva i nedostatki v sovremennykh ekonomicheskikh usloviyakh], available at: <http://economy.kpi.ua/ru/node/343>.

A.A. Ivanov: iv@u.ua I.I. Petrov: petr@u.ua

Корисні посилання для здійснення транслітерації:

<http://translit.kh.ua/?passport> – автоматична транслітерація з української мови
<http://translate.meta.ua/ua/translit/> – автоматична транслітерація з російської мови

Після цього наводяться відомості про рецензента та контактна інформація авторів.

Рецензент: д-р техн. наук, професор О. Ю. Пермяков, начальник інституту, Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ.

Автор: **Анатолій Анатолійович Іванов**
Роб. тел. – 333-33-33, дом. тел. – 777-77-77, E-mail – kim@ic.ua.

Подання матеріалів

Обсяг рукопису – від 3 до 10 аркушів українською, російською або англійською мовами.

Для публікації необхідно представити статтю у електронній формі з роздрукованим екземпляр, підписаним всіма авторами статті.

Комп'ютерна верстка: С.О. Судніков

Оформлення обкладинки: С.О. Судніков

Засновник і видавець Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського.

Св-во КВ № 20490-10290ПР. Адреса редакції: 03049, м. Київ, Повітрофлотський пр-т, 28. Тел. (044) 271-09-44.

Підписано до друку 26.12.2016. Формат 60×84 ¼. Ум. друк. а. 23,75. Тираж 100 прим.

Надруковано у друкарні Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.