

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Яремко Олег Миколайович



УДК 621.396

**Моделі та алгоритми управління параметрами радіоканалу в системах
мобільного зв'язку з урахуванням локалізації абонентського навантаження**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, доцент

Пелішок Володимир Олексійович, Національний
університет "Львівська політехніка", професор кафедри
телекомунікацій

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор

Ложковський Анатолій Григорович, Одеська
національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, завідувач
кафедри комутаційних систем

кандидат технічних наук

Варфоломєєва Оксана Григорівна, Державний
університет телекомунікацій, доцент кафедри
телекомунікаційних систем

Захист дисертації відбудеться "26" листопада 2015 р. о 15:00 год. на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті
"Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI
корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного
університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "24" жовтня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор



А.П. Бондарєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В роботі запропоновано методи, моделі та алгоритми керування процесами радіопередавання в комірках систем мобільного зв'язку на основі оптимального вибору параметрів багатоантенних систем МІМО з метою забезпечення високої пропускної здатності каналу обміну даними між абонентським терміналом та базовою станцією шляхом урахування просторово-часової локалізації абонентського навантаження. Розв'язано задачу підвищення потужності сигналу на вході користувачького терміналу, який заходиться на краю комірки мобільної системи.

Актуальність теми. Сучасні мережі широкосмугового радіодоступу будують з використанням технологій WCDMA, LTE та WiMAX. Постійне зростання вимог до пропускної здатності каналу між абонентом та базовою станцією для надання високоякісних мультимедійних послуг є рушійною силою розвитку технологій побудови коміркових мереж. Надання мобільному абоненту високоякісного каналу обміну даними з сучасною радіо-мережею приводить до необхідності оптимального керування потужністю випромінювання базової станції. Таке керування технологічно може здійснюватись, наприклад на основі адаптації діаграми спрямованості антенної системи, або ж шляхом оптимального вибору її структури та параметрів за критерієм відношення сигнал/шум на вході приймача. У зв'язку з розвитком нових послуг та зростанням вимог до радіоінтерфейсів, виникають питання підвищення ефективності функціонування безпроводної радіо-системи. Одним з найважливіших аспектів, який відіграє важливу роль в ефективності функціонування радіоінтерфейсу є оптимальний розподіл потужності, яка випромінюється антенними системами.

Задачі оптимального управління потужністю виникли також внаслідок необхідності боротьби з міжканальними завадами, які створюють абоненти в межах однієї смуги частот. В системах із кодовим розділенням каналів, у порівнянні з системами, які використовують принцип частотного розділення, виникає проблема суттєвої різниці в рівнях потужності на вході приймачів мобільних станцій у ближній та дальній зонах комірки. У випадку недосконалості алгоритмів управління потужністю передавачів базової та мобільної станцій, обслуговування абонентів, які перебувають на межі комірки, неможливе.

В останні роки запропоновано багато підходів до керування процесами радіопередавання в мобільних мережах. Всі вони, в тій чи іншій мірі, спрямовані на усунення взаємних завад між користувачами. В ряді робіт запропоновано ефективні методи управління потужністю у висхідному каналі, які базуються на теорії ігор. Для керування потужністю в низхідному каналі запропоновано метод, який дає змогу знизити рівень міжканальної інтерференції. Однак, дані методи не є адаптивними, а тому - не достатньо ефективними за умови значної варіації абонентського навантаження в мережі в просторі та часі.

У створення і розвиток методів керування потужністю у мобільних системах вагомий внесок зробили такі вчені: В.С. Сьваткін, В.І. Слюсар, С.Г.

Бунін, В.М. Безрук, В.В. Поповський, Л.Н. Беркман, І.Н. Прудіус, М.М. Климаш, В.О. Пелішок.

У проаналізованих роботах доволі часто увага зосереджується на методах керування потужністю випромінювання базової станції системи мобільного зв'язку на основі систем МІМО, однак невирішеними залишаються питання оптимізації антенних систем з урахуванням збільшення кількості користувачів, а також адаптивного корегування діаграми спрямованості багатосекторних коміркових антенних систем. Отже, потребують удосконалення методи керування потужністю радіосигналів ШСД з урахуванням просторово-часової локалізації абонентського навантаження в межах заданих зон обслуговування мережі мобільного зв'язку.

Актуальність обраної теми підтверджується не лише великим об'ємом публікацій в науково-технічних виданнях, присвячених цьому питанню, але також і активною роботою, що проводиться в цьому напрямі в провідних компаніях-виробниках комунікаційного устаткування (Samsung, Motorola, Intel, Alcatel, Nokia, Siemens, Philips, Huawei, D-Link, Cisco, Ericsson та ін.).

Отже, розроблення моделей та алгоритмів управління параметрами радіоканалу системи мобільного зв'язку з урахуванням просторово-часової локалізації абонентського навантаження для підвищення сумарної пропускної здатності є актуально науковою задачею.

Метою дисертаційної роботи є підвищення сумарної пропускної здатності у комірках систем безпроводного ШСД шляхом оптимального проектування МІМО систем для множинного доступу з адаптацією їх діаграми спрямованості та керування потужністю передавача базової станції на основі урахування просторово-часової локалізації абонентського навантаження.

Для досягнення поставленої мети були розв'язані такі задачі:

1. Аналіз методів керування потужністю у коміркових мережах ШСД, зокрема з урахуванням ефекту багатопроменевого поширення хвиль.

2. Розроблення моделі антенної системи для максимізації її енергетичної та інформаційної ефективності.

3. Розроблення моделі керування потужністю в комірковій системі зв'язку з метою максимізації сумарної пропускної здатності.

4. Розроблення моделі адаптивного формування діаграми спрямованості антенної системи базової станції з урахуванням просторово-часової локалізації абонентського навантаження.

5. Дослідження конфігурацій багатоантенних систем з метою оптимізації їх конфігурацій із забезпеченням необхідної спектральної ефективності.

6. Практична реалізація моделей керування потужністю передавача базової станції та абонентського терміналу у вигляді методики цифрового діаграмоутворення із забезпеченням оптимальності сформованої діаграми спрямованості.

Об'єкт дослідження – процес керування потужністю передавача в низхідному та висхідному каналах системи коміркового зв'язку.

Предмет дослідження – моделі та алгоритми управління параметрами радіоканалів в широкосмугових системах коміркового зв'язку з урахуванням локалізації абонентського навантаження.

Методи дослідження. У процесі розв'язання поставлених завдань використовувалися методи оптимізації, теорії інформації, системного аналізу, матричного числення, а також математичного і імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше запропоновано модель керування потужністю у багатоантенних системах з множинним доступом, яка, на відміну від відомих враховує режим функціонування багатоантенних систем MU-MIMO, що дає змогу отримати оптимальні розподіли потужності для заданої кількості користувачів.

2. Вперше запропоновано модель антенної системи для максимізації її інформаційної ефективності, що відрізняється від відомих можливістю адаптивного формування вихідного сигналу та дає змогу оцінити ефективність приймання з антени, на якій забезпечено максимальне співвідношення С/Ш та сумування диференціально-зважених сигналів з кожного елементу антенної системи.

3. Розвинуто модель керування потужністю передавача ітераційним методом у системі мобільного зв'язку з кодовим розділенням каналів, яка, на відміну від існуючих, враховує режими функціонування антенних систем MIMO, що дає можливість визначити максимально досяжний коефіцієнт рознесення з урахуванням фіксованого коефіцієнта мультиплексування.

4. Набула подальшого розвитку модель управління розподілом потужності передавача на основі просторово-часової локалізації абонентського навантаження, яка, на відміну від відомих, враховує не лише варіацію параметрів радіоканалу, а й динаміку переміщення абонентів, та дає змогу зменшити потужність передавача базової станції із збереженням значень сигнал/шум на вході приймачів мобільних станцій.

Практичне значення отриманих результатів

1. Встановлено, що зі зростанням кількості приймальних антен ефективність підсумовування диференційно зважених сигналів зростає у порівнянні з вибором однієї приймальної антени з множини MIMO. Для 4-х приймальних антен ПДЗС забезпечує у 2 рази більше відношення сигнал/шум, ніж вибір окремої антени з множини.

2. Оптимальний розподіл потужності радіопокриття у системі з кодовим розділенням каналів WCDMA у випадку одночасного обслуговування двох користувачів досягається із максимізацією пропускної здатності на рівні 2,56 Мбіт/с лише за дві модельні ітерації. Здійснення більшої кількості ітерацій не змінює отриманого значення пропускної здатності.

3. Встановлено, що вигреш у співвідношенні сигнал/шум за рахунок використання багатоантенних систем у випадку БПХ становить до 2,8дБ. Отже, зона обслуговування може бути збільшена, або ж досягається вища якість обслуговування.

4. Запропонована модель керування розподілом потужності радіопокриття із урахуванням локалізації абонентського навантаження забезпечує зниження потужності передавача базової станції у середньому на 30% із збереженням значень сигнал/шум на входах приймачів мобільних станцій.

5. У випадку конфігурації МІМО 4x8 з обмеженням імовірності втрат на рівні 10% відсотків за рахунок використання квазіоптимальних (інкрементного, декрементного) та оптимального алгоритмів синтезу антенної системи досягається підвищення спектральної ефективності на 22%.

6. Розроблено алгоритм керування параметрами адаптивної антенної системи з урахуванням умов оптимальності сформованої діаграми спрямованості.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, які проводяться для студентів Національного університету "Львівська політехніка" за напрямом "Телекомунікації" та спеціальністю "Інформаційні мережі зв'язку", зокрема "Радіомережі зв'язку", "Технології мереж мобільного зв'язку" та "Системи мобільного зв'язку", "Антенно-фідерні пристрої систем зв'язку".

Основні результати дисертаційної роботи використано:

- у ПП "Цифрові технології" для керування потужністю у експериментальній системі мобільного зв'язку третього покоління;
- у ТЗОВ "Телекомунікаційна компанія" для максимізації інформаційної ефективності при обслуговуванні мобільних абонентів 3G;
- у Львівській філії ПАТ "Укртелеком" для керування потужністю передавача БС ітераційним методом у системі мобільного зв'язку з кодовим розділенням каналів.

Апробація результатів роботи. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, викладені та всебічно обговорені на 12-ти міжнародних науково-технічних конференціях, наукових семінарах та симпозіумах: International Conference of Antenna Theory and Techniques (Львів, 2009 р.), CADSM'2013 (Поляна-Свалява, 2013р.); Міжнародний науково-технічний симпозіум «Нові технології в телекомунікаціях» (с. Вишків Долинського району Івано-Франківської області, 2012, 2013 рр.); 4-й Міжнародний радіоелектронний форум "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" МРФ-2011 (м. Харків, 2011 р.); 11 МНТК «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET'2012 (Львів-Славське, 2012 р.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології COMINFO'2012 (Лівадія, 2012); MEMSTECN'2013 (Львів, 2013 р.); науково-практичних та науково-методичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (м. Львів, 2007, 2008, 2012, 2014 рр.). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на розширеному засіданні кафедри телекомунікацій Національного університету "Львівська політехніка".

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у цій дисертаційній роботі, опубліковано 24 наукові праці, серед них – розділ у колективній монографії, 3 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 7 статей у фахових виданнях МОН України, 13 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Особистий внесок здобувача. Всі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботах [1, 2, 3, 4, 8, 9, 10] – постановка задач досліджень та розробка методів дослідження, [5, 6, 11] – методика дослідження, [7] – методичні основи ефективного розвитку широкосмугових систем мобільного зв'язку.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг роботи складає 140 сторінок друкарського тексту, із них 6 сторінок вступу, 122 сторінки основного тексту, 66 рисунків, 6 таблиць на 5 сторінках, список використаних джерел із 85 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність тематики дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну, практичне значення, подано дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та публікації, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У **першому розділі "Аналіз моделей та алгоритмів керування параметрами радіоканалу в мережах мобільного зв'язку з багатопробеневи́м поширенням хвиль"** досліджено моделі та алгоритми оптимізації параметрів радіоканалу мереж мобільного зв'язку. Визначено, що керування потужністю передавача як базової, так і мобільної станції є одним із ключових аспектів при наданні послуг у мережах мобільного зв'язку.

Процедура керування потужністю в системах GSM дає можливість динамічно підлаштовувати потужність сигналу, який передається в радіоканалі, з урахуванням відстані між передавачем та приймачем. Управління здійснюється за допомогою зміни рівня сигналу, як зі сторони рухомої станції, так і зі сторони базової станції, таким чином, щоб рівень потужності сигналу для активного з'єднання в заданий момент часу відповідав умовам забезпечення необхідної якості сигналу, тобто певного рівня помилок в каналі.

Точне і швидке керування потужністю є, можливо, найбільш важливим аспектом у WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), особливо у висхідному каналі. Без нього одна рухома станція з підвищеним рівнем потужності може заблокувати всю комірку. У випадку керування потужністю по замкнутому контуру у висхідному каналі, базова станція проводить періодичні оцінки прийнятого відношення сигнал/шум (SIR). Якщо виміряне SIR вище за необхідне, то базова станція дає команду рухомій станції знизити потужність, у іншому випадку – збільшити потужність. За допомогою

керування потужністю по замкнутому контуру здійснюється регулювання необхідного SIR на базовій станції відповідно до потреб окремого радіоканалу і з постійною якістю обслуговування, яка, зазвичай, визначається з певною ймовірністю появи коефіцієнта бітових помилок (BER) або коефіцієнта фреймових помилок (FER).

Алгоритм керування потужністю в системі WiMAX базується на мінімізації загального рівня випроміненої енергії при забезпеченні необхідного рівня SIR. Таке управління дає можливість збільшити тривалість роботи батареї MS і забезпечити безперебійне з'єднання.

При роботі системи в умовах багатопроменевого каналу виникають швидкі і повільні завмирання потужності. Швидкі завмирання виникають при переміщенні MS на відстань, порівнювану з довжиною хвилі щодо BTS і відбивачів. Повільні завмирання виникають при переміщенні MS на відстані, багато більші довжини хвилі. Для коректного керування потужністю необхідно оцінювати потужність сигналу, який зазнав впливу повільних завмирань і, відповідно, з цією оцінкою формувати команди керування. Оцінку потужності сигналу, який зазнав впливу повільних завмирань, проводять усереднюючи значення потужності на інтервалі часу T . Величина інтервалу T залежить від параметрів каналу розповсюдження радіохвиль.

З проведеного аналізу випливає необхідність підвищення ефективності методів керування потужністю в безпроводних мережах з урахуванням просторово-часової локалізації абонентського навантаження, оскільки в мережах на основі кодового розділення каналів особливого значення набуває адаптація параметрів випромінювання антени базової станції з метою забезпечення необхідного рівня пропускну здатності для абонентів незалежно від їх розташування.

У другому розділі "**Моделі управління потужністю в радіоканалах систем мобільного зв'язку зі змінними характеристиками**" запропоновано моделі оптимального розподілу потужності в радіопокритті, яка досягається підсумовуванням потужностей системи CDMA, що використовує фіксовані детерміновані послідовності сигнатур, в умовах завмирань. Задачу оптимального розподілу представлено як одночасний ітераційний розподіл потужностей всіх користувачів, що, в загальному випадку, не має аналітичного розв'язку.

Мета її розв'язання полягає у виборі потужностей передавання для користувачів в залежності від вектору станів каналу $\bar{p}_i(h), i = 1, \dots, K$, отже для збільшення ергодичної пропускну здатності системи в залежності від середніх значень потужності передавання всіх користувачів. Задача формулюється наступним чином:

$$\begin{aligned} \max_{\{p_i(h)\}} E_h \left[\lg \left| I_N + \sigma^{-2} \sum_{i=1}^K h_i p_i(h) s_i s_i^T \right| \right] \\ E_h [p_i(h)] = \bar{p}_i, p_i(h) \geq 0, i = 1, \dots, K, \end{aligned} \quad (1)$$

де p_i – рівень потужності i -го користувача, s_i - послідовності сигнатур у i -му каналі, h_i - імпульсна реакція i -го каналу, I_N - одинична матриця, σ^2 - дисперсія білого гаусівського шуму.

Ергодична сумарна пропускна здатність виражається з цільової функції (1) наступним чином:

$$C_{sum} = C_k + \bar{C}_k, \quad (2)$$

де

$$C_k = \frac{1}{2} E_h \left[\lg \left(1 + h_k p_k(h) s_k^T A_k^{-1} s_k \right) \right] \quad (3)$$

відображає частку k -го користувача в сумарній пропускній здатності, при фіксованій потужності передавання всіх інших користувачів по всіх станах каналу, а

$$\bar{C}_k = \frac{1}{2} E_h \left[\lg \left| I_N + \sigma^{-2} \sum_{i \neq k} h_i p_i(h) s_i s_i^T \right| \right] \quad (4)$$

відображає сумарну пропускну здатність користувачів, які залишились, при виході k -го користувача із системи. У (3) A_k визначається як:

$$A_k = \sigma^2 I_N + \sum_{i \neq k} h_i p_i(h) s_i s_i^T \quad (5)$$

Слід зазначити, що цільова функція (1), є увігнутою функцією потужностей, більше того, за умови, що матриці $\{s_i s_i^T\}_{i=1}^K$ лінійно незалежні, вона буде строго увігнутою. Крім того, набір обмежень в (1) є опуклим. Отже, розв'язок задачі оптимізації у (1) має єдиний глобальний мінімум - коли $\{s_i s_i^T\}_{i=1}^K$ лінійно незалежні, тобто всі локальні екстремуми дають однакові значення цільової функції. Співставимо множники Лагранжа λ_k з обмеженнями-рівняннями та μ_k з обмеженнями-нерівностями. Оптимальний розподіл потужності задовольняє розширені умови Караша-Кана-Такера зі змішаними обмеженнями, які після визначення похідних та застосування додаткової умови $p_k \mu_k = 0$, спрощуються до наступного виразу:

$$\frac{h_k s_k^T A_k^{-1} s_k}{1 + p_k(h) h_k s_k^T A_k^{-1} s_k} \leq \lambda_k, k = 1, \dots, K, \forall h \in R^K \quad (6)$$

Рівність (6) виконується тільки тоді, коли $p_k > 0$. Враховуючи, що $p_k \geq 0$ для всіх k , з (6) випливає, що метод оптимального розподілу потужності задовольняє виразу:

$$p_k(h) = \left(\frac{1}{\lambda_k} - \frac{1}{h_k s_k^T A_k^{-1} s_k} \right), k = 1, \dots, K \quad (7)$$

для будь-якого каналу h .

В роботі розроблено алгоритм, що дає змогу розрахувати оптимальні потужності передавання за повної множини станів каналу. Алгоритм здійснює ітеративне доповнення потужностей всіх користувачів, розглядаючи на кожному кроці сигнали всіх інших користувачів в якості квазібілого шуму.

Показано, що ітеративний метод зводиться до глобального оптимального розв'язку, і глобальний оптимум є унікальним, якщо набір послідовностей сигнатур є таким, що матриці $\{s_i s_i^T\}_{i=1}^K$ лінійно незалежні.

Показано, що схема оптимального розподілу потужностей у конкретному векторі МАС, забезпечує здійснення одночасного передавання за певних станів каналу щонайменше двома користувачами, і набір таких станів каналу має ненульову ймовірність за певних послідовностей сигнатур. Насправді, усі K користувачів у системі здійснюють одночасну передачу з ненульовою ймовірністю тоді і лише тоді, коли $\{s_i s_i^T\}_{i=1}^K$ лінійно незалежні. Безпосереднім наслідком цього є те, що, у випадку лінійної незалежності послідовності сигнатур $\{s_i\}_{i=1}^K$, всі користувачі здійснюють одночасну передачу в область стану каналу з ненульовою ймовірністю. Цю умову одночасної передачі у роботі розширено для всіх користувачів з довільної підмножини. Доведено, що у системі матриця якої містить \mathbf{S} послідовностей сигнатур, кількість користувачів, які одночасно здійснюють передавання з ненульовою ймовірністю, не може бути більшою ніж $\min\{K, M(M+1)/2\}$. Отже, запропоновано модель ітераційного управління потужністю в системі CDMA для різної кількості користувачів.

Розроблено модель процесу вибору антен для системи MIMO, що дає змогу максимізувати інформаційну ефективність використання каналу за умови функціонування антенної системи в режимах, які наведені на рис. 1.

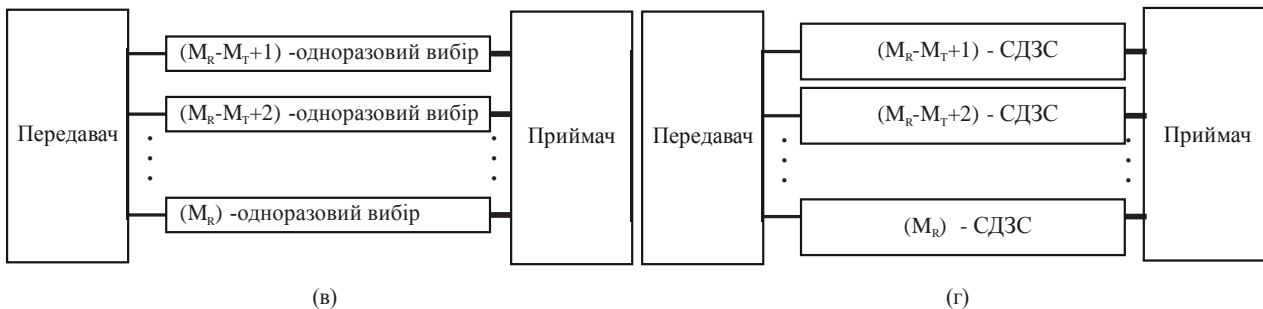


Рис. 1. Принцип вибору структури та режиму функціонування: а) SIMO з ПДЗС, б) SIMO з одноразовим вибором, в) MIMO з одноразовим вибором, г) MIMO з ПДЗС

У третьому розділі "Моделювання та дослідження характеристик радіоканалів в мережах мобільного зв'язку" проведено дослідження впливу конфігурації антен в системі MIMO на пропускну здатність безпроводного каналу зв'язку. Проведено вибір підмножини антен передавачів і приймачів, що забезпечує показник ефективності рознесеного прийому повної системи, тобто використання всіх наявних передавальних/приймальних антен. Подальшого

розвитку набули методи рознесення і мультиплексування в системі МІМО. Вибір каналу передавання в системі МІМО здійснюється на основі запропонованого алгоритму, блок-схема якого представлена на рис. 2.

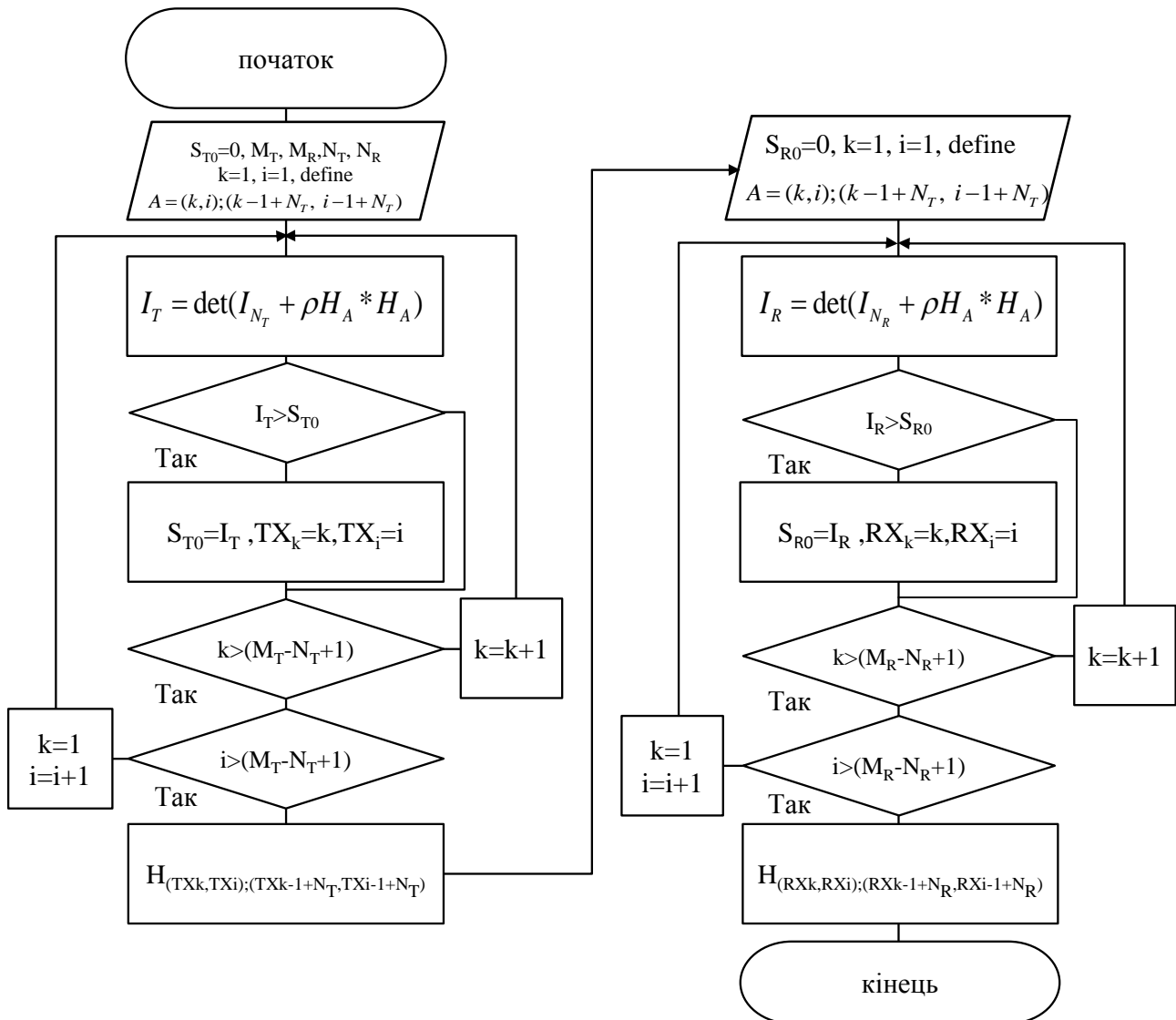


Рис. 2. Блок-схема алгоритму вибору антенної системи з повної множини МІМО

На першому етапі, N_T передавальних антен вибираються при збереженні всіх M_R приймальних антен. На другому етапі, обирається N_R приймальних антен, з фіксованою підмножиною N_T передавальних антен. Вибір на обох етапах базується за критерієм максимальної пропускної здатності системи.

Запропоновано два алгоритми зменшення складності задачі вибору антенної системи: інкрементний та декрементний (рис 3, а, б).

На основі ітераційного методу розподілу потужності передавачів отримано залежності відносного рівня потужності передавання від векторів стану каналів для двох користувачів. На рис. 4 а, б розглянуто випадок скалярного Гаусівського каналу, а на рис. 4 в, г – векторного Гаусівського каналу.

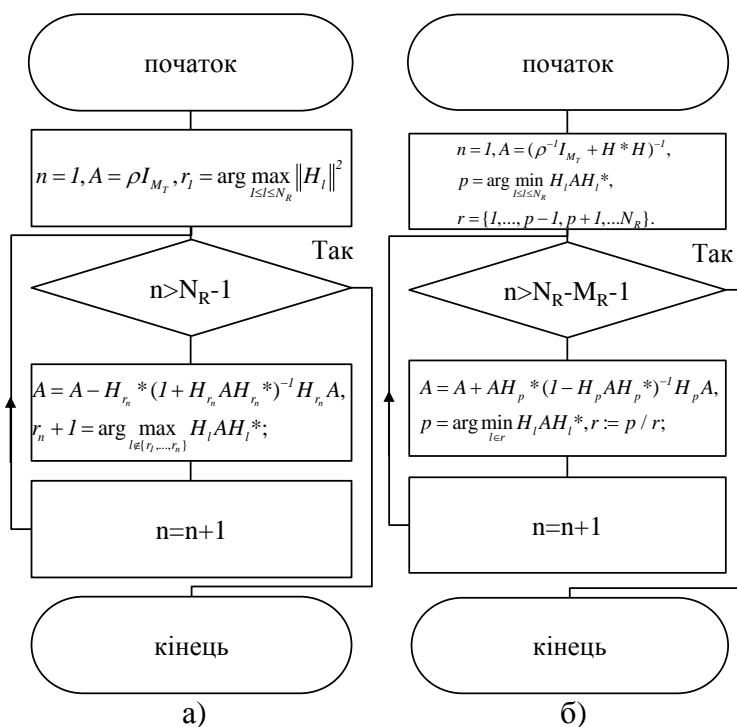


Рис. 3. Блок-схема алгоритму пониження складності задачі вибору антенної системи: інкрементний (а) та декрементний (б).

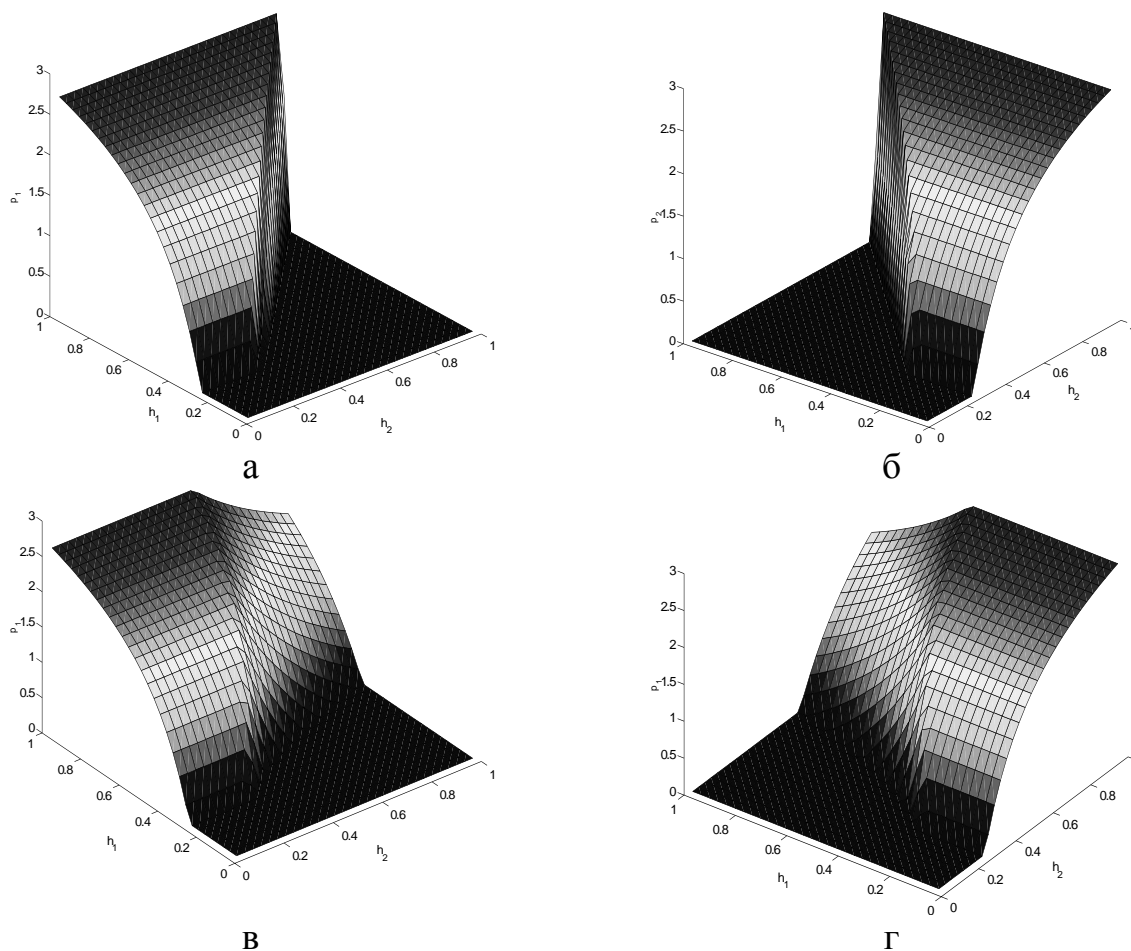


Рис. 4. Результати керування потужністю для двох абонентських терміналів ітераційним методом: скалярний Гаусівський канал (а, б), векторний Гаусівський канал (в, г)

У четвертому розділі "Практична реалізація системи керування параметрами радіоканалу на основі складних антенних систем" проведено дослідження показників якості зв'язку після реалізації алгоритму вибору каналу передавання у системі MIMO.

Результати моделювання показано на рис. 5. для різних алгоритмів вибору приймальних антен за різної потужності множин приймальних і передавальних антен.

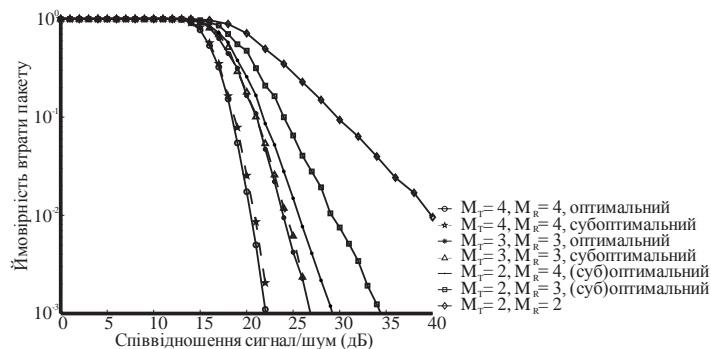


Рис. 5. FER на приймальних антенах за швидкості передавання 108 Мбіт/с, 1000 біт/пакет, $N_T = N_R = 2$

На підставі урахування просторово-часової локалізації абонентського навантаження у процесі керування потужністю в системі мобільного зв'язку отримано умови формування оптимальної діаграми спрямованості адаптивної антени, яка враховує розташування груп абонентських терміналів(рис. 6).

Якщо в MIMO-MAC системі передавачі мають систему визначення якості каналу в формі коваріантного зворотного зв'язку, то ранг передавальної коваріантної блочної матриці всіх користувачів визначається з умови:

$$P\lambda_{k2}^{\Sigma} \leq \frac{1 - E\left[\frac{1}{1 + P\lambda_{k1}^{\Sigma} z_k^H A_k^{-1} z_k}\right]}{n_R - K + \sum_{l=1}^K E\left[\frac{1}{1 + P\lambda_{l1}^{\Sigma} z_l^H A_l^{-1} z_l}\right]} \quad k = 1, \dots, K \quad (8)$$

де $A = I_{n_R} + P \sum_{l=1}^K \lambda_{l1}^{\Sigma} z_l z_l^H$, $A_k = -P \lambda_{k1}^{\Sigma} z_k z_k^H$, λ_{ki} є i -тим найбільшим власним значенням коваріантної матриці каналу користувача k ; z_l – вектор-стовпець розмірністю $n_R \times 1$, E – оператор ергодичної суми

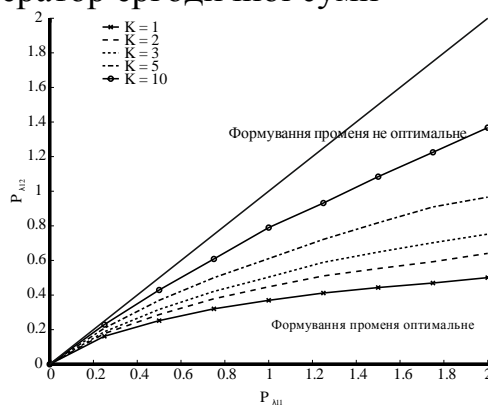


Рис. 6. Залежність між другим за значенням λ_{l2}^{Σ} та найбільшим λ_{l1}^{Σ} власними значеннями коваріантної матриці каналу за різної кількості користувачів

Отримані залежності дають змогу оцінити характеристики процесу адаптивного формування діаграми спрямованості антенної системи базової станції на основі співвідношень між власними значеннями коваріантної матриці каналу.

На даний час спостерігається швидке зростання трафіку у мобільних мережах від різноманітних кінцевих пристроїв. Послідовне підвищення якості потребує 1000-кратного збільшення пропускної здатності безпроводної мережі в межах наступного десятиліття. Впроваджені сьогодні методи безпроводного доступу не можуть забезпечити таке значне поліпшення сервісу. Вирішити задачу збільшення пропускної здатності можна за рахунок використання спектру частот вище 6 ГГц для масивів MIMO, що приведе до отримання додаткової смуги пропускання 250 МГц. Тим не менш, навіть за рахунок цієї додаткової смуги пропускання, загальна пропускна здатність зросте щонайбільше у 10 разів. Іншим варіантом вирішення задачі є просторове ущільнення мережі шляхом додавання невеликих комірок (піко- та фемтокомірок) в області макрокомірок. Мікрокомірки, які використовують ту ж спектральну смугу, можуть збільшити пропускну здатність мережі мобільного зв'язку від 10 до 100 разів залежно від кількості мікрокомірок і обраного методу повторного використання частот. Масив MIMO забезпечує вищу енергоефективність, коли кількість малих комірок є незначною, а мережа малих комірок є кращою за умови, коли кількість мікрокомірок велика. Тим не менш, досягти глобального оптимуму між співвідношенням масивів MIMO і мікрокомірок складно через значну динаміку мережі (рис. 7).

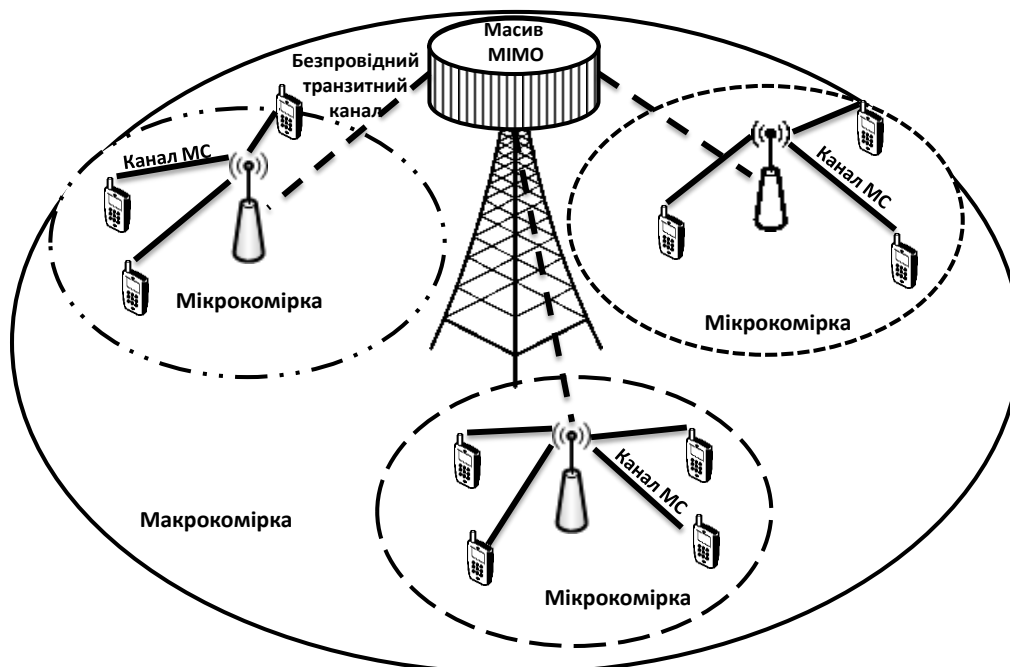


Рис. 7. Архітектура гетерогенної мережі

Оскільки всі дані обробляються в хмарному контролері і потім передаються в маленькі комірки, то на ефективність мережі в значній мірі впливає архітектура транзитної мережі. З іншого боку, висока мобільність користувачів, призводить до частої зміни характеристик безпроводного каналу, що зменшує загальну продуктивність SoftRAN. Ця проблема може бути

вирішена шляхом впровадження масиву МІМО як для забезпечення транзитного з'єднання мікрокомірок та для обслуговування окремих користувачів одночасно. Запропонована архітектура представлена на рис. 8.

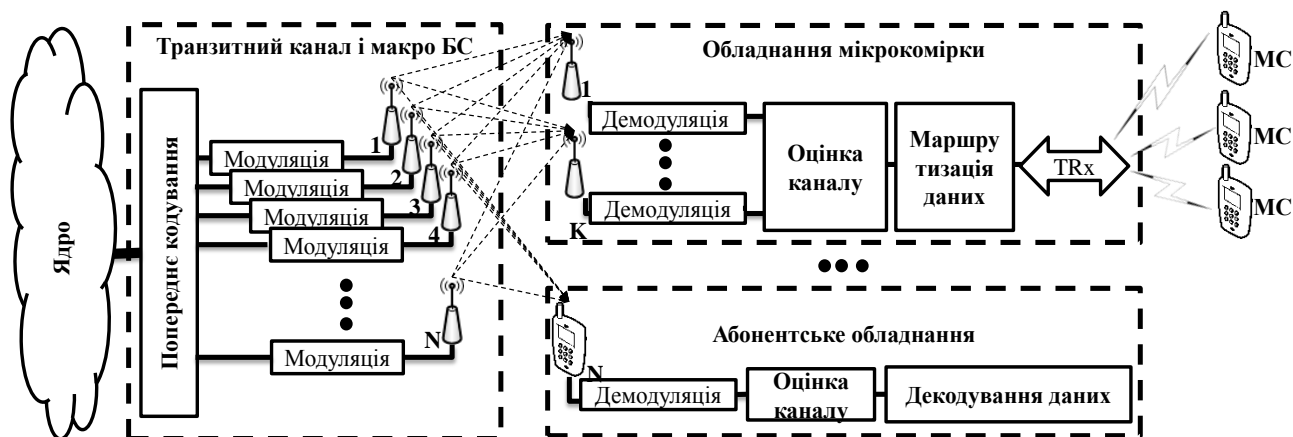


Рис. 8. Функціональна схема впровадження масиву МІМО в C-RAN

Запропонована архітектура дає змогу підвищити якість сприйняття послуг (QoE) для кінцевих користувачів з високою мобільністю, усуваючи часті хендовери між мікрокомірками.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано наукову задачу управління параметрами радіоканалу системи мобільного зв'язку з урахуванням просторово-часової локалізації абонентського навантаження для підвищення її сумарної пропускної здатності.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз методів керування потужністю у коміркових мережах мобільного зв'язку. Встановлено, що основною проблемою у цьому процесі для мобільних систем з кодовим розділенням каналів є забезпечення необхідного рівня відношення сигнал/шум на вході приймача абонентського терміналу, який знаходиться на межі комірки.

2. Запропоновано модель антенної системи для максимізації її енергетичної та інформаційної ефективності, яка дає змогу оцінити два альтернативні способи формування вихідного сигналу багатоантенної системи, а саме: приймання з антени, на якій забезпечено максимальне співвідношення С/Ш та підсумовування диференціально-зважених сигналів з кожного елементу антенної системи. Результати застосування моделі свідчать про те, що зі зростанням кількості приймальних антен ефективність підсумовування диференційно зважених сигналів зростає у порівнянні з вибором однієї приймальної антени з множини МІМО. Для 4-х приймальних антен ПДЗС забезпечує у 2 рази більше відношення сигнал/шум, ніж вибір окремої антени з множини.

3. Запропоновано модель оцінки режимів функціонування антенних систем МІМО, яка дає змогу визначити максимально досяжний коефіцієнт рознесення з урахуванням фіксованого коефіцієнта мультиплексування. З урахуванням результатів її роботи розроблено модель керування потужністю передавання

ітераційним методом у системі мобільного зв'язку з кодовим розділенням каналів WCDMA. Результати показують, що оптимальний розподіл потужності в системі досягається із максимізацією пропускної здатності на рівні 2,56 Мбіт/с за дві модельні ітерації. Здійснення більшої кількості ітерацій не змінює отриманого значення пропускної здатності у системі з двома користувачами. Проведено дослідження факторів, що впливають на радіус зони обслуговування в системі коміркового зв'язку з кодовим розділенням каналів. Визначено граничні значення співвідношення сигнал/шум, що визначають зону обслуговування за висхідним каналом. Встановлено, що вигравш у співвідношенні сигнал/шум за рахунок використання багатоантенних систем у випадку БПХ становить 2,8дБ. Отже, зона обслуговування може бути збільшена, або ж досягається вища якість обслуговування.

4. Розроблено модель просторово-часової локалізації абонентського навантаження з метою адаптивного управління потужністю в умовах не лише постійної варіації параметрів радіоканалу, а й значної мобільності абонентів. Оптимізація розподілу потужності у комірці досягається шляхом цифрового діаграмоутворення, яке враховує просторово-часову локалізацію абонентського навантаження. Запропонована модель керування радіопокриттям, що, на відміну від відомих, враховує локалізацію абонентського навантаження, за рахунок чого потужність передавача базової станції може бути знижена у середньому на 30% із збереженням значення сигнал/шум на входах приймачів мобільних станцій.

5. Запропоновано модель керування потужністю у багатоантенних системах з множинним доступом, що дає змогу отримати оптимальні розподіли потужності для заданої кількості користувачів. Розроблено алгоритми проектування структури багатоантенної системи в режимі множинного доступу шляхом інкрементного та декрементного вибору її елементів. Доведено, що декрементний вибір є більш складним, оскільки враховує внески всіх антен у результуюче відношення сигнал/шум, а інкрементний вибір враховує лише окремі внески антен, що додаються до системи. Результати моделювання показують, що у випадку конфігурації MIMO 4x8 з обмеженням імовірності втрат на рівні 10% за рахунок використання квазіоптимальних та оптимального алгоритмів синтезу антенної системи досягається підвищення її спектральної ефективності на 22%.

6. Розроблено методику розрахунку характеристик радіоканалу в мережах мобільного зв'язку із застосуванням антенних систем. Розроблено алгоритм керування параметрами адаптивної антенної системи з урахуванням умов оптимальності сформованої діаграми спрямованості. Отримано залежності, які дають змогу визначити оптимальні області значень потужності випромінювання адаптивної антени з урахуванням множинного доступу до середовища для різної кількості приймальних антен.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стрихалюк Б.М., Яремко О.Н., Максимюк Т.А. Повышение энергетической и спектральной эффективности радиоканала сети LTE //

Наукоёмкие технологии в инфокоммуникациях: Обработка и защита информации [коллективная монография] / под. ред. В.М. Безрука, В.В. Баранника / – Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники. 2013. – С. 375-384.

2. В. Stryhalyuk. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal / В. Stryhalyuk, О. Yaremko, Т. Maksymyuk, О. Melnyk. // An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes – 2012. Vol.1 No. 3. P.49-54.

3. О. Yaremko. The optimal power control method in multiuser cellular networks / О. Yaremko, В. Stryhalyuk, Т. Maksymyuk, О. Lavriv, D. Kozhurov // An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes – 2013 Vol. 2 No 1. P. 63-67

4. Пелішок В.О. Використання системи МАТЛАВ при вивченні антенно-фідерних пристроїв. / Пелішок В.О., Яремко О.М., Михайленіч П.М. // Моделювання та інформаційні технології. Зб наук. пр. ІПМЕ НАН України, вип. 42 К.: 2007. С. 177-181

5. Яремко О.М. Детектування у МІМО-системах багатопотокових структур частотного виділення. / Збірник наукових праць інституту проблем моделювання в енергетиці, випуск №49, Київ, 2008. с. 253-257 .

6. В.Пелішок. Вплив модуляції на ймовірність появи бітових помилок в безпроводних системах. / В.Пелішок, О.Яремко, Н.Плесканка. // Комп'ютерні технології друкарства. Зб. наук. праць – Вип.21 – Львів:УАД – 2009 – с. 155-165

7. О.М. Яремко, Р.І. Галас, Р.А. Бурачок. Дослідження рознесеного приймання в багатоантенних системах телекомунікаційних мереж. / О.М. Яремко, Р.І. Галас, Р.А. Бурачок // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип. 54. Київ: 2009. – С. 218 – 223.

8. Климаш М.М. Просторове рознесення на приймальній стороні в безпроводних системах та його моделювання. / Климаш М.М., Пелішок В.О., Яремко О.М. //Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник НУ “Львівська політехніка”, №645. – Львів: 2009. – С.192-197

9. Яремко О.М. «Дослідження та моделювання адаптивних антенних систем для мереж мобільного зв'язку стандарту 4G» / Яремко О.М., Думич С.С., Рожанківський А.О. //Радіоелектроніка та телекомунікації. Вісник НУ “Львівська політехніка”, №705. – Львів: 2011. – С.158-160

10. Яремко О.М., Максимюк Т.А., Бак Р.І. Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній мережі при варіації абонентського навантаження. / Яремко О.М., Максимюк Т.А., Бак Р.І. // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип. 66. Київ: 2012. - С. 137-143.

11. В.О. Пелішок. Прямолінійні антенні решітки та їх комбіновані діаграми спрямованості. / В. О. Пелішок, О. М. Яремко. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Зб. наук. праць – Вип.796 – Львів – 2014 – с. 54-59

12. Пелішок В.О. Моделювання, дослідження ADSL модемів та аналізатори їх функціонування. / Пелішок В.О., Михайленич П.М., Яремко О.М. // Науково-практична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій - 2007". Матеріали конференції 2007 р. С. 22–23

13. Михайленич П.М. Розробка графічного інтерфейсу для дослідження функцій Уолша. / Михайленич П.М., Мохаммад Хасан Алі Самур, Яремко О.М. // Науково-практична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій - 2008". Матеріали конференції 2008. С.228-229

14. Klimash M.M. Research of multiantenna systems of telecommunication Networks / Klimash M.M., Pelishok V.O., Yaremko O.M. // Interactional Conference of Antenna Theory and Techniques, 6-9 October, 2009, Lviv, Ukraine pp. 363-365

15. Яремко О.М. Підвищення ефективності радіоінтерфейсу безпровідних систем наступного покоління. / Яремко О.М., Максимюк Т.А., Кричко Д.І. // 4-й Міжнародний радіоелектронний форум "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" Матеріали конференції "Телекомунікаційні системи і технології" ТСТ-2011 - с.261-265.

16. Яремко О.М. Метод підвищення спектральної ефективності систем з OFDM. / Яремко О.М., Максимюк Т.А. // V Міжнародний науково-технічний симпозиум "Нові технології в телекомунікаціях", ДУІКТ, Вишків, 2012– с. 58-61

17. O.Yaremko. Efficiency Increase of Information Services in 3G and 4G Networks, Using MIMO-Systems. Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proc. Int. Conf TCSET'2012. - Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic, 2012. - pp. 249-250.

18. Яремко О.М. Ітераційний метод керування потужністю у безпровідних системах з нестационарним каналом зв'язку. / Яремко О.М., Максимюк Т.А., Рожанківський А.-Т.О. // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології /COMINFO'2012-Livadia – с. 73 - 75

19. Яремко О.М. Методика планування конвергентних мультисервісних мереж мобільного зв'язку та їх інтеграція в існуючі телекомунікаційні мережі. Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”. Матеріали конференції 1-4 листопада 2012 р. – Львів, 2012. – с. 81 - 84

20. Pelishok V. Combined directional patterns and their application to antenna analysis/ Pelishok V., Yaremko O., Pelishok M. // Proceedings of international conference CADSM'2013. February 19-23 Polyana-Svalyava. – 2013 – p. 287

21. Yaremko O. Power control method in multiuser cellular networks./ Yaremko O., Maksymyuk T.// Proceedings of international conference CADSM'2013. February 19-23 Polyana-Svalyava. – 2013 – p. 386-387

22. Яремко О.М. Модель адаптивного керування діаграмою спрямованості при варіації навантаження в мобільній мережі. VI Міжнародний науково-технічний симпозиум "Нові технології в телекомунікаціях", ДУІКТ, Вишків, 2013 – с. 76-79

23. Яремко О.М. Моделивання та дослідження системи МІМО у режимі рознесення та мультиплексування/ Яремко О.М., Думич С.С.// Науково-практична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій - 2008". Матеріали конференції 2008. С.186-191

24. Klymash M. Model of power dispensing in multiuser cellular network / Klymash M., Yaremko O., Minho Jo, Maksymyuk T. // Proc. of the IX Intern. Conf. on The Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2013). Polyana, Ukraine, April 16-20, 2013: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. - P. 180.

Анотація

Яремко Олег Миколайович. Моделі та алгоритми управління параметрами радіоканалу в системах мобільного зв'язку з урахуванням локалізації абонентського навантаження. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню моделей та алгоритмів керування потужністю в мобільних мережах на основі оптимальних багатоантенних систем з адаптацією їх діаграми спрямованості до просторово-часової локалізації абонентського навантаження.

Запропонована модель керування розподілом потужності радіопокриття із урахуванням локалізації абонентського навантаження забезпечує зниження потужності передавача базової станції у середньому на 30% із збереженням значень сигнал/шум на входах приймачів мобільних станцій.

Проведено дослідження факторів, що впливають на радіус зони обслуговування в системі коміркового зв'язку з кодовим розділенням каналів. Встановлено, що вигреш у співвідношенні сигнал/шум за рахунок використання багатоантенних систем у випадку БПХ становить до 2,8дБ. Отже, зона обслуговування може бути збільшена, або ж досягається вища якість обслуговування.

Запропоновано модель керування потужністю у системі з використанням багатоантенних систем і підтриманням множинного доступу. Отримано оптимальні розподіли потужності у системі з декількома користувачами. Розроблено алгоритми проектування структури багатоантенної системи в режимі множинного доступу шляхом інкрементного та декрементного вибору її елементів. Доведено, що декрементний вибір є більш складним, оскільки враховує внески всіх антен у результуюче відношення сигнал/шум, а інкрементний вибір враховує лише окремі внески антен, що додаються до системи.

Розроблено методику розрахунку характеристик радіоканалу в мережах мобільного зв'язку із застосуванням складних антенних систем. Розроблено алгоритм керування параметрами адаптивної антенної системи з урахуванням умови оптимальності сформованої діаграми спрямованості. Отримано

залежності, які дають змогу отримати оптимальні області значень потужності випромінювання адаптивної антени з урахуванням множинного доступу до середовища для різної кількості приймальних антен.

Ключові слова: керування потужністю, багатоантенна система, адаптивна діаграма спрямованості, локалізація абонентського навантаження.

Аннотация

Яремко Олег Николаевич. Модели и алгоритмы управления параметрами радиоканала в системах мобильной связи с учетом локализации абонентской нагрузки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет "Львівська політехніка" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертационная работа посвящена разработке моделей и алгоритмов управления мощностью в мобильных сетях на основе оптимальных многоантенных систем с адаптацией их диаграммы направленности к пространственно-временной локализации абонентской нагрузки.

Предложенная модель управления распределением мощности радиопокрытия с учетом локализации абонентской нагрузки обеспечивает понижение мощности передатчика базовой станции в среднем на 30% с сохранением соотношения сигнал/шум на входах приемников мобильных станций.

Проведено исследование факторов, влияющих на радиус зоны обслуживания в системе сотовой связи с кодовым разделением каналов. Установлено, что выигрыш в соотношении сигнал / шум за счет использования многоантенных систем в случае БПХ составляет до 2,8дБ. Следовательно, зона покрытия может быть увеличена или же достигается более высокое качество обслуживания.

Предложена модель управления мощностью в системе с использованием многоантенных систем и множественным доступом. Получены оптимальные распределения мощности в системе с несколькими пользователями. Разработаны алгоритмы проектирования структуры многоантенной системы в режиме множественного доступа путем инкрементного и декрементного отбора ее элементов. Доказано, что декрементный отбор является более сложным, поскольку учитывает влияние всех антенн на результирующее отношение сигнал / шум, а инкрементный отбор учитывает лишь влияние отдельных антенн, введенных в систему.

Разработана методика расчета характеристик радиоканала в сетях мобильной связи с применением сложных антенных систем. Разработан алгоритм управления параметрами адаптивной антенной системы с учетом условия оптимальности сформированной диаграммы направленности. Получены зависимости, позволяющие получить оптимальные области значений мощности излучения адаптивной антенны с учетом множественного доступа к среде для различного количества приемных антенн.

Ключевые слова: управления мощностью, многоантенная система, адаптивная диаграмма направленности, локализация абонентской нагрузки.

Annotation

Oleg Yaremko. Models and algorithms of radio channel parameters management considering subscribers traffic localization. – Manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry of education and science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to the development of transmitted power control methods and algorithms in mobile networks based on optimal multi-antenna systems with beamforming considering spatial and temporal localization of the user traffic.

The model for control of radio coverage power allocation is proposed considering the localization of the subscriber load. It allows reducing base station transmitted power by an average of 30% with preservation of the signal-to-noise ratio at the receiver input of mobile stations.

The study of the factors affecting the service area radius in the cellular communication system with CDMA was performed. It is found that the gain in the signal / noise ratio (SNR) is around the 2,8dB by using a multi-antenna systems with BPH. Hence, the service area may be increased or a high quality of service could be achieved.

A model of a system power control using a multi-antenna systems multiuser access was proposed. The optimal system power distribution between multiple users was obtained. The algorithms were proposed of incremental and decremental selection of multi-antenna system elements for its structure design in case of multiuser access. It was proved that the decremental selection is more complicated than incremental one, since it considers all the antennas contributions into resulting signal-to-noise ratio, while incremental selection takes into account only the individual contributions of antennas that may be attached to the system.

The method of calculating the characteristics of the radio channel in mobile communication networks using complex antenna systems was developed. An algorithm was developed considering optimal conditions of the antenna pattern for controlling its parameters. The relations were obtained considering a multiuser access for varying number of receiving antennas that allow obtaining the optimal ranges of the adaptive antenna radiation power.

Key words: power control, MIMO system, adaptive beamforming, localization of user's traffic.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

2G	друге покоління систем мобільного зв'язку
3G	третє покоління систем мобільного зв'язку
4G	четверте покоління систем мобільного зв'язку
BS	(Base Station) базова станція
CDMA	(Code Division Multiple Access) множинний доступ з кодовим розділенням каналів
CSI	(Channel State Information) інформація про якість каналу
FDD	(Frequency-Division Duplexing) дуплексний режим з частотним розділенням
FDMA	(Frequency Division Multiple Access) множинний доступ з частотним розділенням каналів
MAC	(Media Access Control) контроль доступу до середовища
MIMO	(Multiple Input Multiple Output) система з багатьма входами та багатьма виходами
MISO	(Multiple Input, Single Output) система з багатьма входами та одним виходом
MMSE	(Mini Mental State Examination) приймач за мінімальною середньоквадратичною похибкою
MRC	(Maximal-Ratio Combining) підсумовування дифереціально зважених сигналів (ПДЗС)
MS	Mobile Station
MUSIC	(Multiple Signal Classification) класифікація множинних сигналів
OFDM	(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів
OFDMA	(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів
SDMA	(Space-Division Multiple Access) множинний доступ з просторовим розділенням каналів
SIMO	(Single Input, Multiple Output) система з одним входом та багатьма виходами
SINR	(Signal to Interference Plus Noise Ratio) співвідношення сигнал/завада/шум
SISO	(Single Input, Single Output) система з одним входом та одним виходом
SNR	(Signal-to-Noise Ratio) співвідношення сигнал/шум
STC	(Space-Time Coding) просторово-часове кодування
TDD	(Test-Driven Development) дуплексний режим з часовим розділенням
TDMA	(Time Division Multiple Access) множинний доступ з часовим розділенням каналів
WCDMA	(Wideband Code Division Multiple Access) широкопasmовий множинний доступ із кодовим розподілом каналів
AAP	(Adaptive Antenna Array) адаптивна антенна решітка
AP	(Antenna Array) антенна решітка
ДН	(Antenna Pattern) діаграма направленості
ФАР	фазовані антенні решітки
ЦАР	цифрові антенні решітки
ЦДУ	цифрове діаграмоутворення

Здано в набір 19.10.2015. Підписано до друку 23.10.2015.
Формат 60x90 1/16. Зам. № 3006.
Тираж 150 прим. Обсяг 0,9 друк. арк.
Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні ПП «Арк-сервіс».
79005, м. Львів, вул. Драгоманова, 16.

