

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Стрелковської Ірини Вікторівни на дисертацію Москальця Миколи Вадимовича «Методи просторово-часового доступу у перспективних системах мобільного зв'язку», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 - телекомунікаційні системи та мережі

**Актуальність теми дисертації.** В останні два десятиліття в телекомунікаційній сфері відбувається бурхливе зростання технологій безпроводового доступу і розвиток мереж мобільного зв'язку.

Однією з головних проблем розвитку систем мобільного зв'язку 4-го і 5-го поколінь є забезпечення якісного надання послуг при передачі даних, відео, речових повідомлень та іншої інформації мобільним користувачам в умовах значного збільшення їх кількості і гострого існуючого дефіциту каналних ресурсів мережі. Особлива актуальність даної проблеми відчутна в умовах високого навантаження, складної і мінливої діючої навколишньої електромагнітної обстановки.

Необхідність підвищення продуктивності сучасних систем мобільного зв'язку вимагає освоєння все більш високочастотних діапазонів, що дають змогу для забезпечення широких робочих смуг частот. Однак в Україні, а також і в інших країнах світу, гостро стає проблема дефіциту радіочастотного ресурсу і виникає необхідність освоєння досі незадіяних просторових і поляризаційних ресурсів, що раніше у системах мобільного зв'язку використовувались лише пасивно. Тому необхідність забезпечення максимально ефективного використання обмеженого радіочастотного ресурсу безпроводового каналу великим числом абонентів, в рамках вже виділених і освоєних спектрів частот систем мобільного зв'язку, визначає величезний практичний інтерес і актуальність досліджень.

**ХНУРЕ**  
Вхідний № 01/27-545  
" 31 " 05 20 20 р.

У зв'язку з цим одним з найбільш перспективних підходів є застосування просторово-часового доступу на базі адаптивних антенних решіток, що дозволить економити радіочастотний ресурс, збільшити дальність зв'язку в порівнянні з секторними антенами, скоротити час встановлення зв'язку, поліпшити умови електромагнітної сумісності та підвищити продуктивність роботи системи мобільного зв'язку.

В зв'язку з вищевикладеним дисертаційна робота Москальця М.В., спрямована на розв'язання важливої для науки і практики науково-прикладної проблеми, яка полягає у підвищенні ефективності множинного доступу в перспективних системах мобільного зв'язку за рахунок розробки системних науково-технічних рішень, щодо впровадження методів адаптивного просторово-часового доступу при забезпеченні заданої якості послуг та незмінності основних алгоритмів функціонування мобільної мережі, є актуальною і представляє як теоретичний, так і практичний інтерес.

Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки» та виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт (НДР):

1. «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами» (ДР №0109U000662);
2. «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (ДР №0111U002627)
3. НДР № 13-12 «Дослідження факторів впливу на результати вимірювань параметрів випромінювання РЕЗ та розробка пропозицій щодо визначення загальних погрішності та невизначеності при проведенні вимірювань засобами радіоконтролю», що виконувалась для «Українського Державного центру радіочастот» (ДР № 0113U006180);
4. НДР ДР №0114U000007т;
5. НДР ДР №0116U000066т.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

У першому розділі на основі проведеного аналізу особливостей систем мобільного зв'язку 2-4-го поколінь робиться висновок, що створення концепції систем мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G), поява яких очікується до 2020 р. будуть позбавлені основних недоліків систем попередніх поколінь у частині несумісності технологій різних стандартів і систем безпроводового доступу, працюючих у різних діапазонах частот. Наголошується, що у системах 5G очікуються нові радіоінтерфейси з малими стільниками, способи передачі та прийому, ефективні методи компенсації внутрішньосистемних завад та багатовимірні антенні системи 3D MIMO, максимально ефективно використання фізичних ресурсів і якісне їх застосування.

Таким чином, автором визначено необхідність розробки методології науково-технічних рішень щодо впровадження методів просторово-часового доступу, що в перспективі надасть великий вплив на характеристики продуктивності систем мобільного зв'язку, на різні аспекти процесів планування, економії радіочастотного спектру, протоколів доступу і в цілому на функціонування мобільних систем.

У другому розділі автором проведено аналіз різних методів збільшення продуктивності систем мобільного зв'язку, який доводить, що найбільш освоєними є частотно-часові ресурси і їх подальше освоєння у задачах передачі, прийому і обробки сигналів дозволяє отримати позитивний ефект. До числа перспективних слід віднести сигнальні методи SMT (багатотональних сигналів зі зрушенням квадратурних компонент) і CMT (косинус-модульованих багатотональних сигналів), які забезпечують високу спектральну та енергетичну ефективність і порівняно з сигналами OFDM дозволяють забезпечити підвищення продуктивності системи на 10-15%.

У якості методів боротьби з багатопроменевою автором запропоновано використання спільної схеми ітеративної еквалізації в частотній області із застосуванням швидкого перетворення Фур'є з оцінкою багатопроменевого



каналу. Запропонована схема підходить для помірно мінливих каналів з відносно високим відношенням сигнал/(завада+шум), але має обмеження на максимальну швидкість зміни каналу.

Автором проаналізовано метод децентралізованого доступу з використанням технології P2P (однорангової мережі), коли відповідно до надходження заявки від абонентської станції (АС) мережею виділяється необхідний ресурс незалежно від інших заявок, що дає можливість істотно підвищити продуктивність і надійність доступу. На основі аналізу особливостей побудови математичних моделей пірінгових мереж стосовно структурних та функціональних їх характеристик, показано, що адекватною моделлю, що відображає динаміку цих мереж, є рекурсивне подання в просторі станів.

**Третій розділ** присвячено аналізу ефективних методів просторового планування розміщення елементів мобільної мережі. Проаналізовано варіанти структурних перетворень територіального планування з використанням макро- і мікростільників, що дозволяють збільшувати продуктивність мережі за рахунок повторного використання радіочастотного ресурсу.

Запропоновано метод оптимізації просторового розміщення фемтостільників на основі теорії упаковки об'єктів шляхом одиночного приєднання об'єктів на основі логічного вибору, що є відносно простим і дозволяє нарощувати можливості по масштабованості мережі. Показано, що використання макро- і мікростільникових структур дозволяє в 1,5-2 рази збільшити продуктивність мобільної мережі.

Автор посилається на значний дефіцит радіочастотного ресурсу, який має місце на сьогодні і далі буде існувати при подальшому впровадженні систем мобільного зв'язку 4G и 5G. Вказується на наявність вільного ресурсу просторово-часових параметрів, які до сьогодні використовувались обмежено лише при реалізації багатоантенних технологій MIMO.

Автор пропонує просторовий ресурс представити у вигляді  $N$  смуг просторових частот, у межах яких паралельно і незалежно буде відбуватися передача індивідуальних викличних сигналів від абонентських станцій до базової

станції. Таким чином, активне використання просторово-часового доступу в сучасних системах мобільного зв'язку дозволяє у  $N$  раз збільшувати їх ресурсну базу, а отже і продуктивність. Вказується на те, що разом зі збільшенням продуктивності доступу вдається одержати низку інших практично-важливих властивостей, до числа яких можна віднести поліпшення електромагнітної сумісності, завадостійкості, поліпшення інших ймовірно-часових характеристик. Крім того, втілення просторово-часового доступу не потребує зміни традиційних технологій ведення зв'язку структури сигналів та інших елементів систем.

**Четвертий розділ** автор присвятив вибору і аналізу методів виявлення сигналів абонентських станцій системи мобільного зв'язку. Особливе значення дана процедура набуває при використанні просторово-часового доступу, оскільки потрібно максимально скоротити відрізок часу від початку запиту АС до надання послуг базовою станцією.

На основі аналізу властивостей параметричних і непараметричних методів виявлення сигналів: байєсівського алгоритму, алгоритму максимальної правдоподібності, знакових і знаково-рангових алгоритмів, нейронних методів та інших в якості головного методу виявлення автором пропонується метод параметричного енергетичного виявлення, заснованого на використанні  $Q$ -функцій Маркума, який є універсальним і може застосовуватися для виявлення детермінованих сигналів з відомою структурою в каналах із замираннями.

Проведено аналіз характеристик енергетичного виявлювача сигналу виклику абонентської станції на тлі шуму Ліхтера, якій представляє собою суму компонент гаусівського білого шуму і сукупності викличних сигналів інших абонентських станцій.

Методами імітаційного моделювання отримано залежності ймовірності і правильного виявлення, при фіксованій ймовірності, помилкової тривоги сигналів виклику при різних умовах порога виявлення.

Для заощадження відрізка часу процесу виявлення сигналів виклику з метою досягнення сталого режиму адаптивного алгоритму просторово-часового доступу, автором запропоновано метод скорочення процедури виявлення з використанням непараметричної процедури оптимального прийому  $k$  сигналів з  $m$  переданих, з урахуванням початкової стадії, що враховує динаміку самого процесу виклику.

За критерієм максимуму якості отримано оптимальні значення виявлення параметрів  $k$  і  $m$  в змінних умовах виявлення, що визначаються вимогами до ймовірності помилкової тривоги і правильного виявлення та характеристиками первинної системи обробки спостережень.

У п'ятому розділі проведено аналіз методів оцінки напрямів приходу сигналів абонентських станцій на основі алгоритмів релеївської роздільної здатності та понадроздільної здатності.

На основі моделювання різних сценаріїв сигнально-завадової обстановки з урахуванням використання корельованих і некорельованих сигналів, різного числа антенних елементів, значень співвідношення сигнал/(завада+шум) отримані чисельні оцінки роздільної здатності методів, що реалізуються на основі вибіркової кореляційної матриці сигналів (неадаптивного формування променя (NBF), Кейлона (Capon), теплового шуму (Thermal Noise), Борджотті-Лагунаса, максимальної ентропії (MME), багатосигнальної класифікації (MUSIC)).

Представлено аналіз і отримано результати імітаційного моделювання роздільної здатності методів, які використовуються при раціональному виборі ефективного методу в задачах просторово-часового доступу відповідно до заданих параметрів сигнально-завадової обстановки при певних обмеженнях.

Автором вказується, що перед наданням послуги і проведених процедур по прийому і виявленню сигналу виклику кожної активованої АС, необхідно організувати відповідну індивідуальну просторово-поляризаційну обробку її сигналів. Для установки початкових значень векторів вагових коефіцієнтів в антенній решітці та для формування опорних сигналів в адаптивних алгорит-



мах просторово-часового доступу необхідно використовувати інформацію на основі даних оцінки напрямку приходу сигналів.

У шостому розділі представлено основний результат дисертації – запропоновано використання методів просторово-часового доступу (ПЧД) на базі теорії адаптивних антенних решіток (ААР) з використанням адаптивної просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС) і оцінкою вектора вагових коефіцієнтів у системах мобільного зв'язку з метою підвищення ефективності доступу.

Автором стверджується, що просторово-часовий доступ в мобільних системах зв'язку може бути реалізований на існуючій технічній і технологічній базі незалежно від інших використовуваних методів, що є результатом залучення додаткової ресурсної множини просторово-часових і просторово-поляризаційних параметрів. Це є, в достатній мірі, обґрунтованим положенням.

Вказується, що суть задачі просторово-часового доступу кожної з АС до ресурсів базової станції полягає у груповому використанні антенної решітки, що працює на прийом. При цьому, за допомогою вибору оптимального вектору вагових коефіцієнтів для кожної з АС формується індивідуальний розподіл структури прийнятого поля сигналу.

Проведено огляд найбільш популярних методів синтезу ААР, що відрізняються як призначенням, так і критеріями ефективності функціонування, до числа яких відносяться алгоритми МСКВ (мінімуму середнього квадратичного відхилення), МВП (мінімуму вихідної потужності сигналу), МВСЗ (максимуму відношення потужності сигналу до суми потужностей завад і шуму), кожен з яких припускає знаходження оцінки комплексного вектора вагових коефіцієнтів, які містяться на виході антенних елементів ААР.

На основі розроблених науково-технічних рішень, автором запропоновано алгоритм одночасного формування стільки варіантів розподілу, скільки на даний момент приймається сигналів АС. Кожен з цих розподілів забезпечує

максимально вдале співвідношення сигнал/(завада+шум) для прийнятого сигналу виклику АС і встановлення нульових рівнів прийому для інших АС, що дало змогу реалізувати паралельний множинний доступ, а також подавлення небажаних випромінювань при незмінності основних алгоритмів функціонування мобільної мережі.

Більш конструктивним для використання в задачах ПЧД є рекурсивні процедури реалізації ПЧОС. Це дозволяє здійснювати корекцію ВВК у реальному масштабі часу, що особливо важливо для зв'язку з рухомими АС. Допустимість аналізу ефективності рекурсивних процедур за результатами аналізу процедур на основі вибіркової оцінки ґрунтується на тому, що обидва ці завдання мають загальне формулювання постановки рішення завдання та загальні критерії ефективності.

Проведено аналіз застосовності рекурсивних процедур Уїдроу-Хоффа і Калмана-Б'юсі. Показано, що збіжність процедур Уїдроу-Хоффа становить близько 50-150 кроків дискретизації, що є неприпустимим для задач ПЧД, оскільки її потрібно завершити до часу надання послуги АС, за період від двох до п'яти секунд. Проведено аналіз застосування процедури Калмана-Б'юсі, збіжність якої становить від 7 до 12 кроків дискретизації, що для задач ПЧД є найбільш придатною.

З метою підвищення ефективності антенної решітки запропонована процедура дискретизації вагових коефіцієнтів. Представлена аналітична оцінка середнього коефіцієнту втрат при дискретизації квадратурних складових нормованих вагових коефіцієнтів в ААР.

Запропоновано вираз для розрахунку необхідної розрядності дискретизатора і визначено необхідну розрядність вагових коефіцієнтів ААР в залежності від відношення сумарної потужності завад до потужності внутрішнього шуму на вході смугового фільтра виходячи з допустимої величини зменшення середнього вихідного відношення сигнал/(завада+шум).

У цьому розділі проводиться аналіз впливу реалізаційних обмежень на ефективність методів просторово-часової обробки в антенній решітці при



реалізації методів ПЧД. Запропоновано методику для якісного і кількісного оцінювання впливу суми дестабілізуючих факторів, а, саме, помилки при встановленні вихідних даних щодо сигнально-завадової обстановки, взаємного впливу між антенними елементами, багатопроменевості й широкосмугової сигналів, характеристик алгоритмів обробки сигналів, ступеня просторової когерентності сигналів та завад, що приймають участь у технології ПЧД при використанні ААР на основі залежності показника відношення сигнал/(завада+шум) від рівня взаємодії направляючого вектора корисного сигналу і векторів напрямку завадових сигналів (коефіцієнта просторової кореляції). Отримана кількісна оцінка зниження відносно нормалізованого показника відношення сигнал/(завада+шум) від коефіцієнта просторової кореляції. Проведено аналіз граничних значень коефіцієнта просторової кореляції і показані умови впливу коефіцієнта просторової кореляції на швидкість збіжності процесу адаптації алгоритмів управління ААР. Запропонований автором метод оцінки впливу реалізаційних обмежень пропонується використовувати при наявності двох і більше завад.

Проведено детальний аналіз просторово-часової обробки при різному відношенні флуктуаційної та регулярної складових квадратурних компонент і показано, що за таких умов більш високу ефективність мають алгоритми МСКВ та МВП. Автором пропонується використання рекурсивного алгоритму Калмана-Б'юсі, який в умовах флуктуації ефективніший за алгоритм Уїдрю-Хоффа на 7-10 дБ.

В восьмому розділі автор показав, що метод ПЧД цілком сумісний з вже існуючим протоколом доступу стандарту безпроводового мобільного зв'язку IEEE 802.16 і є прозорим при формуванні необхідної якості сервісів QoS на основі докладного аналізу механізмів контролю доступу і механізмів запиту смуги пропускання.

При реалізації ПЧД, коли роздільна здатність методів оцінки напрямку приходу не задовольняє умовам просторового розділу сигналів АС, тобто

2 або більше сигналів АС потрапляють в одну й ту ж смугу просторових частот виникає поява ефекту “засліплення” антенної решітки.

Для вирішення даної колізії автор пропонує метод комплексного використання просторово-часового і ймовірносного конкурентного доступу. Показано, що в межах однієї смуги просторових частот можна використати  $N$  частотно-часових сигналів на базі ймовірносного конкурентного алгоритму ВЕВ (Binary Exponential Backoff – метод подвійної експоненціальної відстрочки), завдяки чого в потенціалі можна одержати  $N_{чч} \times N_{пч}$  каналів доступу. Розроблено ймовірнісну модель комплексного множинного доступу на основі показника корисного використання каналу і проведено аналіз його ймовірностно-часових характеристик.

Для вирішення більшості задач в дисертації автор використовує ймовірнісні методи, що значно поширюють їх узагальнення, методи математичної статистики, теорію виявлення, методи радіофізики та електродинаміки, теорію та методи адаптивних антенних решіток і адаптивної просторово-часової та просторово-поляризаційної обробки сигналів, теорію випадкових процесів, оцінки та управління, оптимальні методи оцінки та методи аналізу власних структур, методи імітаційного моделювання.

Слід відмітити коректність використаних методів, їх доцільність використання, достатню ступінь обґрунтованості нових наукових результатів, адекватність висновків і рекомендацій.

У кожному з розділів послідовно викладені результати досліджень. Отримані в роботі автором наукові результати не суперечать сучасним фізичним уявленням про процеси в системах мобільного зв'язку.

**Достовірність отриманих результатів** підтверджується коректністю математичних викладок та математичного апарату, відповідністю теоретичних даних щодо ефективності алгоритмів множинного доступу з експериментальними даними, отриманими за допомогою машинного експерименту та імітаційного моделювання, що підтвердили теоретичні передумови.

Дисертація пройшла апробацію на міжнародних та всеукраїнських конференціях і знайшла схвалення та добру оцінку фахівців.

Отже, результати наукових положень, висновки і рекомендації дисертаційної роботи є новими, обґрунтованими та достовірними.

**Наукове значення.** Дисертація має важливе наукове значення, яке полягає в тому, що на основі втілених методів просторово-часового доступу з використанням адаптивних антен у мобільні телекомунікаційні системи значно покращуються якісні характеристики доступу в умовах високого навантаження і складної сигнально-завадової обстановки.

Крім того, завдяки активному використанню просторово-часового ресурсу вдасться розширити у разі фізичний ресурс, що надасть можливість реалізувати повторне використання робочих частот і значну економію радіочастотного спектра, що особливо важливо при майбутніх розробках у напрямку перспективних систем мобільного зв'язку.

**Практична значимість** дисертаційного дослідження полягає в тому, що отримані результати роботи при їх втіленні забезпечують можливість підвищення ефективності множинного багатостанційного доступу за часовими та ймовірнісними показниками, що в цілому позначиться на загальносистемній продуктивності мережі мобільного зв'язку.

Важливим також є те, що запропоновані методи просторово-часового доступу вдало поєднуються з вже існуючими технологіями, з іншими, частотно-часовими, кодовими, різними організаційними методами, вдало доповнюючи їх, що розширює потенціал якості прийому сигналів за рахунок розширення простору прийняття рішень.

Застосування цих методів дає можливість залишити незмінними параметри корисних сигналів, вимоги до каналів зв'язку, режими ведення зв'язку, без розширення виділеної смуги частот.



Результати роботи використані при підготовці відповідних навчальних дисциплін на кафедрі інфокомунікаційної інженерії ХНУРЕ.

#### **Повнота викладення здобувачем основних результатів.**

За матеріалами дисертації здобувачем опубліковано 49 праць. Зокрема, 27 статей, з яких 15 опубліковано у фахових наукових виданнях України, 12 статей опубліковано у міжнародних виданнях, 1 стаття у базі Scopus, 22 тези доповідей на наукових, науково-практичних всеукраїнських і міжнародних конференціях, з яких 7 проходили під егідою IEEE, 5 – у наукометричній базі Scopus.

Слід вважати викладення здобувачем основних результатів повним.

#### **Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату.**

Дисертація відповідає спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Дисертація написана грамотно, з використанням сучасної наукової термінології, оформлена акуратно, хоча є окремі описки та помилки. Автореферат відображає основний зміст дисертації.

Оформлення дисертаційної роботи та автореферату в цілому відповідає вимогам до оформлення дисертації та автореферату МОН України.

#### **Зауваження і недоліки роботи**

Дисертація має ряд недоліків, до числа яких слід віднести:

1. Певною альтернативою або початковим кроком для втілення просторово-часового методу є технологія MIMO високої розмірності. На жаль, автор приділяє мало уваги методам просторово-часового кодування.

2. У якості методу ймовірнісного конкурентного доступу автор використав випадковий метод доступу подвійної експоненційної відстрочки BEB

(Binary Exponential Backoff). в той же час деревовидні алгоритми, які на наш Впогляд є більш ефективні, в роботі не досліджено.

3. Автор вказує на те, що перспективним є просторово-поляризаційний ресурс, разом з тим дослідженню активного використання параметрів поляризації фізичного ресурсу проведено недостатньо.

4. При аналізі відомих технологій еквалізації сигналів та методів оцінки каналу спостерігається переваження теоретичними викладками, які певною мірою, є відомими і на які можна було б посилатися (п.2.3).

### Висновки:

1. Дисертаційна робота Москальця М.В. на тему «Методи просторово-часового доступу у перспективних системах мобільного зв'язку» є завершеною науковою роботою, в якій поставлена і розв'язана актуальна науково-прикладна проблема, яка полягає у підвищенні продуктивності множинного доступу систем мобільного зв'язку на основі розробки методології науково-технічних рішень по впровадженню методів просторово-часового доступу при одночасному забезпеченні відповідної якості послуг і незмінності основних режимів функціонування мобільної мережі.

2. Дисертація Москальця М.В. відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України згідно "Порядку присудження наукових ступенів", які пред'являються до докторських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент  
 доктор технічних наук, професор,  
 директор Навчально-наукового  
 інституту Інфокомунікацій та про-  
 грамної інженерії Одеської  
 національної академії зв'язку  
 ім. О.С. Попова



Підпис завіряю:  
 Ученний секретар  
 О.Н. З. М. О.С. Попова  
 Руда Г.В.

*Г* І.В. Стрелковська