

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МОСКАЛЕЦЬ Микола Вадимович

УДК 621.391

**МЕТОДИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО ДОСТУПУ У  
ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Спеціальність 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
ПОПОВСЬКИЙ Володимир Володимирович,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ГАРКУША Сергій Володимирович**  
Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський  
університет економіки і торгівлі», Центральна спілка  
споживчих товариств України «Укоопспілка»,  
проректор з наукової роботи

доктор технічних наук, професор  
**КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович**  
Державний університет телекомунікацій,  
директор навчально-наукового інституту телекомунікацій  
та інформатизації

доктор технічних наук, професор  
**СТРЕЛКОВСЬКА Ірина Вікторівна**  
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
директор навчально-наукового інституту інфокомунікацій  
та програмної інженерії

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою:  
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий “\_\_” \_\_\_\_\_ 2018 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Б. Ткачова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Протягом останніх десятиліть відзначається бурхливе зростання споживання трафіку, що надається системами мобільного зв'язку. Це зростання призвело до того, що спочатку виділені для цього зв'язку та задіяні в ньому фізичні ресурси (частотно-часові та просторово-поляризаційні) почали вичерпуватися. Для вирішення задачі подальшого зростання числа споживачів були знайдені нові види та структури сигналів, методи економії радіочастотного спектру, нові схеми множинного (багатостанційного) доступу, оператори, що працюють в Україні (Київстар, Астеліт, Vodafone та ін.) знайшли рішення колективного використання ресурсів і обладнання.

Одною з найбільш проблематичних задач підвищення ефективності мобільних систем зв'язку є обмеженість можливостей щодо множинного доступу. Проблема доступу до загального ресурсу базової станції (БС) виконується зазвичай на основі розділення частотно-часових параметрів сигналів абонентських станцій (АС). В даній роботі розглянуто задачі підвищення продуктивності процесу доступу за рахунок впровадження саме просторово-часового доступу (ПЧД), при використанні якого, крім самого доступу, вдається отримати і ряд інших корисних якостей мобільної телекомунікаційної системи.

Спроби перевести мобільні системи в інші більш високочастотні діапазони сантиметрових або міліметрових хвиль представляються поки не конструктивними, оскільки для цього будуть потрібні величезні кошти на заміну всього обладнання базових і абонентських станцій. Водночас, ще не до кінця вичерпані всі резерви фізичних ресурсів, зокрема просторово-поляризаційні. Слід зазначити, що просторові параметри, які на сьогодні задіяні в задачах рознесеного прийому систем зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами МІМО (Multiple Input Multiple Output), при побудові мікро і фемтостільників та ін., використовуються в пасивному варіанті, забезпечуючи при цьому потрібну енергетику в лініях мобільного зв'язку. Більш ефективним є активне їх використання, що розширює простір параметрів доступу.

У багатьох наукових працях, присвячених мобільним системам, здійснювались спроби активного використання просторово-поляризаційних параметрів сигналів і антен для вирішення різних задач, зокрема і просторово-часових методів доступу. Однак багато з них носять частковий, автономний, не пов'язаний із загальносистемними задачами, характер. У даній дисертації здійснено спробу інтегрувати задачі просторово-часового доступу в загальносистемну проблематику і отримано не тільки новий позитивний ефект від запропонованого просторово-часового доступу, але і продемонстровано можливість комплексності рішень, що забезпечить зростання загальносистемної ефективності й підвищить

продуктивність мобільної мережі, економію радіочастотного спектру, забезпечення високої завадостійкості, електромагнітної сумісності та, відповідно, можливості надання якісних послуг споживачам інформації.

Важливим, є те, що запропоновані методи просторово-часового доступу можливо реалізувати на наявній технічній та технологічній базі без зміни режимів зв'язку. На відміну від традиційних методів ПЧД, які базуються на методах синтезу діаграми спрямованості (ДС) і супроводі променем прийнятого сигналу, запропоноване рішення не потребує розгляду ДС, а знаходиться найкраще на поточний час сигнальне-завадове співвідношення, що задовольняє критерію оптимальності. Ідея цього методу запозичена з теорії адаптивних антенних решіток, значний вклад у розробку яких внесли відомі вчені: В. Уїдроу, Р.А. Монзінго, Я.Д. Ширман та ін.

У зв'язку з цим актуальною науково-прикладною проблемою, що розв'язується у даній дисертації, є розробка методології системних науково-технічних рішень щодо підвищення продуктивності доступу в системах мобільного зв'язку на основі використання методів адаптивної просторово-часової обробки сигналів при забезпеченні заданої якості послуг і незмінності основних алгоритмів функціонування мобільної мережі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.** 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». Матеріали дисертації використані в науково-дослідних роботах, які виконувалися в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ), у яких здобувач був виконавцем (у роботі №13-12 відповідальним виконавцем): 1. № 235-1 (ДР №0109U000662) «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами»; 2. НДР № 261-1 (ДР №0111U002627) «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління»; 3. НДР № 13-12 (ДР № 0113U006180) «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»; 4. НДР ДР №0114U000007т; 5. НДР ДР №0116U000066т.

**Мета роботи** полягає в підвищенні ефективності множинного доступу за часовими та ймовірністними показниками в перспективних системах мобільного зв'язку на основі розробки системних науково-технічних рішень, щодо впровадження методів адаптивного просторово-часового доступу.

У рамках дисертаційної роботи в ході вирішення наукової проблеми були поставлені й вирішені такі наукові задачі дослідження:

1. Аналіз стану, розвитку сучасних і перспективних систем мобільного зв'язку та ефективності задіяння основних фізичних ресурсів.

2. Пошук і обґрунтування методів підвищення продуктивності мереж мобільного зв'язку в умовах обмеження виділених частотно-часових ресурсів.

3. Аналіз застосування моделей та методів щодо впровадження просторово-часового доступу з індивідуальною адаптивною просторово-часовою обробкою викличних сигналів мобільних станцій та супровід їх впродовж сеансу зв'язку в існуючі й перспективні системи мобільного зв'язку.

4. Аналіз і вибір конфігурації антенної решітки для забезпечення ефективного просторово-часового доступу до базової станції за умов наявності взаємозв'язку між антенними елементами та наявності різних реалізаційних втрат.

5. Аналіз ефективності алгоритмів адаптивного просторово-часового доступу абонентських станцій мобільного зв'язку та розробка методу адаптивної компенсації багатопроменевості на основі процедури еквалізації.

6. Розробка методу пришвидшеного виявлення викличних сигналів абонентських станцій на основі аналізу моделей та методів виявлення та обробки сигналів.

7. Розробка моделі визначення кількості активних сигналів абонентських станцій та обґрунтування вибору методу прийому заявок з урахуванням наявності колізій.

8. Аналіз і вибір методів визначення напрямів приходу сигналів на основі оцінки характеристик спрямованості антенної решітки та вибір критеріїв її ефективності.

9. Оцінка ефективності процедур просторово-часового доступу і можливості реалізації та швидкодії обчислювальних алгоритмів.

**Об'єктом досліджень** є процес забезпечення надійного і якісного доступу в мобільних системах зв'язку в умовах високого навантаження і складної сигнально-завадової обстановки.

**Предметом досліджень** є моделі та методи багатостанційного множинного просторово-часового доступу на основі активного використання просторово-часових фізичних ресурсів систем мобільного зв'язку.

**Методи досліджень.** У ході досліджень, проведених у дисертаційній роботі, були використані: синтез і аналіз математичних моделей та методів активного використання частотно-часових та просторово-поляризаційних параметрів сигналів під час вирішення задачі підвищення продуктивності систем мобільного зв'язку; теорія та методи адаптивних антенних решіток і адаптивної просторово-часової та просторово-поляризаційної обробки сигналів під час розроб-

ки моделей та методів реалізації просторово-часового множинного доступу абонентських станцій; теорія електрозв'язку при аналізі та виборі моделей та методів виявлення сигналів для систем мобільного зв'язку; теорія оптимізації під час розробки моделі оптимального просторового розміщення фемтостільників та оцінки методів релеївської роздільної і понадроздільної здатності; теорія та методи визначення напрямів приходу сигналів при вирішенні задачі оцінки визначення напрямків приходу викличних сигналів АС; теорія випадкових процесів, оцінки та управління під час розробки моделей та методів організації просторово-часового доступу; методи радіофізики та електродинаміки під час розробки методики аналізу впливу реалізаційних обмежень щодо впровадження методів просторово-часового доступу; теорія ймовірностей і математичної статистики в ході розробки і аналізу моделі спільного використання конкурентного і просторово-часового доступу; методи імітаційного моделювання для оцінки ефективності процедур просторово-часового доступу.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано методологію науково-технічних рішень, щодо впровадження методів просторово-часового множинного доступу з адаптивною обробкою сигналів у складній сигнально-завадової обстановці у виділених частотних діапазонах в системах мобільного зв'язку, при забезпеченні відповідної якості надання послуг, новизна якої полягає як в інваріантності цих методів щодо існуючих технічних рішень, так і у вирішенні ряду загальносистемних задач, спрямованих на підвищення продуктивності мережі, забезпечення більш високої завадозахищеності, заощадженні радіочасотних ресурсів.

2. Вперше для підвищення продуктивності просторово-часового доступу в системах мобільного зв'язку на відміну від наявних аналогічних методів доступу, які використовують багатопроменеву антенну решітку, запропоновано використання методів на базі теорії адаптивних антенних решіток, що дало змогу реалізувати паралельний множинний доступ, просторово-поляризаційну селекційну обробку кожного із обслуговуваних сигналів, а також заглушення сторонніх випромінювань при незмінності основних алгоритмів функціонування мобільної мережі.

3. Вперше для перспективних систем мобільного зв'язку запропоновано метод скорочення процедури виявлення сигналів запиту виклику абонентських станцій з використанням моделі оптимального прийому  $k$  сигналів з  $m$  переданих, що на відміну від відомих методів підвищення достовірності виявлення сигналів дає змогу скоротити початкову стадію процесу виявлення викличних сигналів і дозволяє заощадити відрізок часу для досягнення сталого режиму для адаптивного алгоритму просторово-часового доступу.

4. Вперше в задачах просторово-часового доступу у мобільних системах зв'язку для оцінки вектора вагових коефіцієнтів антенної решітки запропоновано використання рекурсивних методів обробки в просторі змінних стану, що на відміну від відомих асимптотичних алгоритмів є оптимальними в динамічній, зокрема нестационарній завадово-сигнальній обстановці за показниками якості та швидкодії, що дозволило досягти сталого режиму цієї обробки на інтервалі дії викличних сигналів без змін режимів роботи мережі.

5. Отримали подальший розвиток методи аналізу та урахування реалізаційних обмежень при синтезі процедури доступу, які викликані невизначеністю початкових даних щодо сигнально-завадової обстановки, наявністю взаємного впливу між антенними елементами, багатопроблемністю, втратами просторової когерентності сигналів. Новизна методів полягає в урахуванні апріорних даних про напрямки приходу сигналів на початковій стадії, що забезпечує скорочення інтервалу збіжності процесу адаптації алгоритмів управління адаптивної антенної решітки та необхідну якість алгоритму просторово-часовому доступу.

6. Отримав подальший розвиток метод оцінки напрямів приходу сигналів абонентських станцій на базі алгоритмів роздільної та понадроздільної здатності, новизна якого полягає в попередньому одержанні оцінок якості алгоритмів та їх порівнянні, що дало змогу здійснювати раціональний вибір алгоритму при різних сигнально-завадових умовах і конфігурації антенної решітки та використовувати отримані дані для установки початкових значень векторів вагових коефіцієнтів та для формування опорних сигналів в адаптивних алгоритмах просторово-часового доступу.

7. Вперше запропоновано метод планування просторового розміщення фемто та мікростільників мобільної мережі, що базується на теорії оптимізації упаковки 2-х та 3-х мірних об'єктів, що дало можливість подальшого масштабування структури мобільної мережі шляхом поодинокого приєднання об'єктів розміщення на основі логічного вибору з уникненням традиційних *NP*-повних задач перебору.

8. Вперше запропоновано метод комплексного використання просторово-часового і ймовірнісного конкурентного доступу, що забезпечує можливість збільшення продуктивності системи доступу в  $N$ -разів, де  $N$  добуток потенціальної наявності доступних часових і просторових каналів. Це забезпечило можливість якісного доступу, в умовах збігу напряму приходу сигналів або близького просторового розташування двох або більше абонентських станцій, при їх великій щільності, за рахунок використання методів ймовірнісного конкурентного доступу, завдяки яким вдається забезпечити вирішення колізій викличних сигналів абонентських станцій у межах однієї і тієї ж пелюстки антенної решітки при її "засліпленні".

### **Практичне значення результатів роботи.**

Практичне значення результатів роботи полягає у забезпеченні максимально повного активного використання всього фізичного частотно-часового, просторового і поляризаційного ресурсу. Комплексність виконання дає змогу не тільки підвищувати ефективність різних прикладних задач, але і раціонально використовувати виділені ресурси залежно від потреб доступу і сигнально-завадової обстановки. Важливим є те, що втілення запропонованих методів просторово-часового доступу не тільки вирішить проблему підвищення продуктивності самого доступу, але і забезпечить підвищення ряду багатьох системних показників, що включають продуктивність, заводо захищеність всієї системи мобільного зв'язку, пропускну здатність БС, поліпшить електромагнітну сумісність мережі у виділених частотних діапазонах. Впровадження методів просторово-часового доступу дозволяє продовжити економне використання традиційними, виділеними під системи мобільного зв'язку, ділянками радіочастотного спектру (890-960, 1800-2100 МГц), не потребують зміни технічних рішень існуючих систем мобільного зв'язку, організації зв'язку, зміни парку мобільних станцій, передбачається лише зміна антенно-фідерних пристроїв та управління просторово-поляризаційними параметрами антен.

Дослідження кількісних даних, пов'язаних з реалізаційними обмеженнями, до яких відносяться похибки початкових даних щодо сигнально-завадової обстановки, взаємний вплив між антенними елементами, багатопрореневість, широкосмуговість, просторова когерентність сигналів забезпечує можливість реальної оцінки якості доступу і дозволяє визначити ті межі, яких можна досягти при практичному втіленні запропонованих методів. З використанням запропонованих методів просторово-часового доступу збільшуються потенційні можливості систем мобільного зв'язку за одночасно обслуговуваними абонентськими станціями, що визначається добутком кількості частотно-часового і просторово-поляризаційного доступів.

Отримані в роботі результати були використані під час розробки методів і практичних реалізацій щодо: підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління в ході виконання НДР № 235-1 (ДР №0109U000662) «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами», НДР № 261-1 (ДР №0111U002627) «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління», НДР № 13-12 (ДР № 0113U006180) «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», НДР ДР №0114U000007т та НДР ДР №0116U000066т.

Запропоновані науково-технічні рішення, математичні моделі й методи щодо використання просторово-часового доступу, використані в навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, зокрема в дисциплінах «Системи мобільного зв'язку», «Перспективні безпроводові системи». Використання результатів підтверджується відповідними актами.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати дисертаційної роботи автором отримано самостійно і опубліковано в спеціалізованих фахових виданнях [1-49]. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто Москальцю М.В. належать такі наукові результати, зокрема: в роботі [1] автору належить модель територіального планування базових станцій систем широкосмугового безпроводового доступу IEEE 802.16e WiMAX, що забезпечує підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу; в роботі [2] автору належить розрахункова модель енергетичних параметрів сигналів в радіолініях системи IEEE 802.16e WiMAX, з урахуванням діючої сигнально-завадової обстановки; в роботі [3] автору належить аналітична модель з розрахунку рівня потужності сигналу на прийомі абонентського терміналу від співвідношення сигнал/завада в радіолініях системи IEEE 802.16e WiMAX; в роботі [4] автору належить методологія проведення експериментальних досліджень з тестування продуктивності широкосмугової безпроводової мережі IEEE 802.16e WiMAX в реальному масштабі часу; в роботі [5] автору належать вирази відгуків нелінійного кола радіотракту безпроводової системи зв'язку для різних видів нелінійних впливів, що дає можливість розрахувати коефіцієнт гармонік з більшим ступенем точності; в роботі [6] автору належить математична модель стану телекомунікаційної системи в припущенні наявності короткочасних і тривалих випадкових впливів із використанням представлення Х'юбера; в роботі [7] автору належить аналіз динамічних моделей стану пірінгових мереж яка може бути використана для відображення і організації контролю завантаження і перерозподілу ресурсів мережі; в роботі [11] автором запропонована структура телекомунікаційної системи у вигляді орієнтованого діагностичного графа і вирішена задача знаходження якісного стану мережі за принципом самодіагностування; в роботі [14] автору належить аналітична модель, що відображає структуру, функції і динаміку пірінгової мережі на основі методів теорії розкладів, що використовується для підвищення продуктивності мережі та якості надання послуг QoS, QoE; в роботі [15] автору належить аналіз методів визначення напрямку приходу сигналів в задачах просторово-часового доступу стосовно систем мобільного зв'язку; в роботі [17] автору належить аналіз методів кутової понадроздільної здатності сигналів і результати їх теоретичної граничної точності, що дає можливість зробити вибір найбільш ефектив-

ного методу визначення приходу сигналів відповідно до заданих параметрів сигнально-завадової обстановки при діючих обмеженнях; в роботі [19] автору належить аналіз застосовності найбільш популярних методів і алгоритмів синтезу адаптивних антенних решіток (ААР) для використання в ПЧД, що розрізняються як призначенням, так і критеріями ефективності функціонування стосовно систем мобільного зв'язку; в роботі [21] автору належить аналітична модель оцінки показників якості пірингової мережі з урахуванням впливу різних чинників, що впливають на динаміку відтворення при наданні послуги відео за запитом і живого потокового відео на основі використання показника відношення швидкостей скачування і завантаження, наведеного до поточного числа активних пірів; в роботі [26] автору належить математична модель управління потоком фрагментів в піринговій мережі P2P-TV при передачі відеоконтенту з використанням критерію мінімуму сумарної втрати часу на обслуговування  $N$ -фрагментів інформаційної послідовності, що дало можливість для отримання рішення, яке призводить до процедури динамічного програмування; в роботі [27] автору належить процедура відбору фрагментів відеоконтенту і мінімізацій втрат із застосуванням методу динамічного програмування з адитивним критерієм.

**Апробація** основних результатів, отриманих у рамках дисертаційних досліджень проводилась в ході доповідей на 22-х наукових, науково-практичних конференціях, форумах і симпозіумах галузевого, державного і міжнародного рівнів [28-49] у тому числі на: 13,19,20,21-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі» (м.Харків, ХНУРЕ, 2009-2017); III-й науково-практичній конференції «Наукове забезпечення службово-бойової діяльності внутрішніх військ МВС України» (м.Харків, Академія внутрішніх військ МВС України, 2011); науково-технічній конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку» (м.Харків, Академії внутрішніх військ МВС України, 2012); науково-практичній конференції «Актуальні питання розвитку, удосконалення та експлуатації озброєння та військової техніки в Національній гвардії України», (м.Харків, Національна академія Національної гвардії України, 2016); науково-практичної конференції «Применение информационных технологий в подготовке и деятельности сил охраны правопорядка» (м.Харків, Національна академія Національної гвардії України, 2017); XII-й Міжнародній IEEE конференції «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (CADSM'2013) (Поляна-Свалява-Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 2013); XXIII Міжнародній IEEE конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КрыМиКо'2013) (м.Севастополь, Севастопольський національний технічний університет, 2013); 1-3-й

Міжнародній науково-практичній IEEE конференції «Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології (PIC S&T-2013-2016)» (м. Харків, ХНУРЕ, 2013–2016); 3-й Міжнародній науковій IEEE конференції «Інформація, комунікації, суспільство», (м.Славське, Національний університет «Львівська політехніка», 2014 р.); 1-й, 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС-2015, ЭМС-2016)» (м.Харків, ХНУРЕ, 2015-2016); 69-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (м.Одеса, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, 2014); X International IEEE Conference on «Antenna Theory and Techniques Proceedings» (ICATT'15) (Kharkiv, Ukraine, NURE, 2015); V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (м. Чернівці, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2016); Третій Всеукраїнській науково-технічній конференції «Информатика, управление и искусственный интеллект» (ИУИИ-2016) (м.Харків, НТУ "ХПИ", 2016); 11-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, НДІ телекомунікацій інститут телекомунікаційних систем НТУ КПП ім. Ігоря Сікорського 2017); Першій Міжнародній науково-технічній конференції «Компьютерные и информационные системы и технологии» (м.Харків, ХНУРЕ, 2017).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 49 наукових праць, у тому числі 27 статей, серед яких 15 статей у наукових фахових виданнях України [1-5,15,18-20,22-27] та 12 статей у зарубіжних виданнях [6-14,16,17,21], що викладені у різноманітних науково-метричних базах: e-library, Copernicus, Scholar та ін., 1-стаття викладена у базі Scopus. Матеріали дисертації опубліковані у 22-х тезах доповідей на наукових, науково-практичних конференціях і форумах галузевого, державного і міжнародного рівнів [28-49], з яких 7 проходили під егідою IEEE і викладені у базі IEEE Xplore і 5 у базі Scopus.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 455 сторінок, з них 350 сторінок основного тексту, 12 сторінок з рисунками і таблицями, 44 сторінки додатків. Список використаних джерел містить 280 найменувань на 28 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито зміст і стан досліджуваної проблеми, обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано наукову проблему, завдання і мету дослідження. Визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих у роботі результатів. Наведено дані про публікації автора за темою дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку мобільних систем зв'язку різних поколінь. У результаті проведеного аналізу було показано, що системи мобільного зв'язку 2G, 3G, 4G використовують несумісні технології і працюють у різних частотних діапазонах, які не можуть завоювати масовий ринок на довгостроковий період. Ці фактори призвели до створення концепції систем п'ятого покоління (5G), поява яких очікується до 2020 р. Разом із тим, розвиток мереж мобільного зв'язку здійснюється в умовах гострого дефіциту основних фізичних параметрів сигналів, що передаються: енергетичних, частотних, часових, просторово-поляризаційних, при цьому основні зусилля сучасних розробників перспективних систем мобільного зв'язку направлені на максимально ефективне використання використовуваних фізичних ресурсів, на активне залучення незадіяних просторово-поляризаційних ресурсів, економію радіочастотного спектру і якісне їх застосування.

У **другому розділі** проведено аналіз методів збільшення продуктивності систем мобільного зв'язку, серед яких були проаналізовані: організаційні заходи, застосування вискоелективної процедури обробки прийнятих сигналів на основі еквалізації, концепція когнітивного радіо, активне впровадження децентралізованих методів організації мобільного зв'язку з використанням технології P2P поверх протоколів доступу. За останні роки все більшого застосування набувають децентралізовані методи доступу, серед яких є методи пірингового доступу (P2P), особливо при наданні послуги відео за запитом і живого потокового відео. Розглянуті особливості побудови математичних моделей пірингових мереж стосовно їх структурних та функціональних характеристик.

Типовими структурними моделями пірингових мереж є накладені оверлейні мережі, побудовані по деревовидному або сітковому типу. Функціональні моделі відображають стан пірингових мереж, для чого можна використовувати усереднені ймовірнісні характеристики, що відображаються в моделях масового обслуговування. Однак адекватною моделлю, що відображує динаміку пірингових мереж, є рекурсивні процедури у просторі станів. Розглянуто вплив різних чинників, які впливають на динаміку відтворення в піринговій мережі (P2P-TV) при наданні послуги відео за запитом і живого потокового відео. Запропо-

новано математичну модель управління потоком фрагментів в піринговій мережі P2P-TV при передачі відеоконтенту з використанням критерію мінімуму сумарної втрати часу на обслуговування  $N$ -фрагментів інформаційної послідовності. Отримано рішення, що приводить до процедури динамічного програмування. В цілому проведений аналіз методів з підвищення продуктивності систем мобільного зв'язку показав, що найбільш освоєними є частотно-часові методи, але їх подальше удосконалення не дозволяє досягти значного позитивного ефекту.

У **третьому розділі** проведено аналіз ефективних методів просторового розміщення елементів мережі мобільного зв'язку. У дисертації розглянуті варіанти структурних перетворень, що дозволяють збільшувати продуктивність мережі за рахунок використання макро- і мікростільникових осередків, які ефективно застосовуються в місцях щільних кластерних груп абонентів. Показано, що використання макро- і мікростільникових структур дозволяє в 1,5-2 рази збільшити продуктивність мережі. В даному аспекті актуально постає задача розробки методики розрахунку і планування фемтостільникового зв'язку.

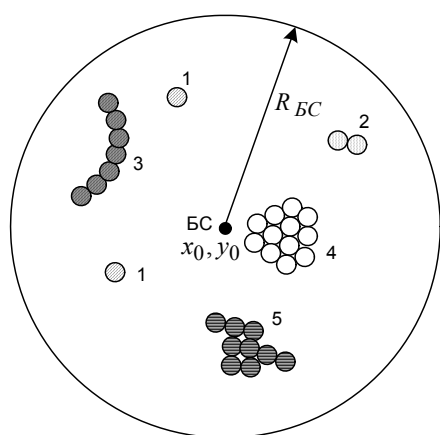


Рис.1. Приклад розміщення фемтостільників у зоні обслуговування БС з координатами  $\{x_0, y_0\}$  і радіусом  $R_{BS}$

В рамках вирішення проблеми побудови методики планування мережі з використанням фемтостільників, на сьогодні не існує загальної моделі для прогнозування поширення сигналу, особливо при реалізації фемтостільників у приміщеннях будівель. Простим вирішенням проблеми розміщення фемтостільників є прямий перебір варіантів. Однак, зі збільшенням кількості фемтостільників завдання стає  $NP$ -повним. Серед множини рішень таких задач найбільш адекватним є метод поодинокого приєднання на основі логічного вибору, що дозволяє нарощувати можливості мережі та є відносно простим. Таким чином, виникає задача розміщення в зоні обслуговування БС точок доступу фемтостільників як одиночних об'єктів, так і об'єктів, розташованих у лінію на площині або в структурі зони дії БС (рис.1). На рис.1 показано: 1- одиночне розташування; 2 - група з двох фемтостільників; 3 -лінійне розташування фемтостільників; 4 - компактна група; 5 складна структура. Координати кожної  $i$ -ї точки доступу фемтостільника  $-\{x_i, y_i\}$  або в 3-х вимірному просторі  $-\{x_i, y_i, z_i\}$ . При радіусі зони обслуговування фемтостільника  $R_{\phi}$ , координати її на площині:

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = R_{\phi}^2 \quad (1)$$

або в 3-х вимірному просторі

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 = R_{\phi_i}. \quad (2)$$

При плануванні зон обслуговування на площині (1), їх структуру представляють у вигляді кіл або шестигранних стільників. У разі (2) зона представляється колом або кулею. При плануванні фемтостільників у середині будівлі більш адекватною є геометрична фігура у вигляді куба – контур або об'єм приміщення, в якому розміщується група фемтостільників. Якщо уявити даний об'єм або площину у вигляді контейнера, то виникає задача упаковки об'єктами (фемтостільниками) – аксіально симетричними фігурами даного контейнера. Є велика кількість наближених методів упаковки контейнерів об'єктами різноманітної конфігурації: генетичні алгоритми оптимізації упаковки прямокутних об'єктів, послідовно – одиночного розміщення кіл різних радіусів, методи упаковки циліндрів на основі  $\phi$ -функцій Стояна, геометричної комбінаторики, алгеброїчні методи та ін.

З огляду на феноменологічний характер запропонованих методів зіставлення їх за ефективністю уявляється досить важким. Можна організувати їх попарне порівняння за критеріями обчислювальної складності для одних і тих же умов, за критеріями повноти покриття та ін. Проте значний рівень невизначеності щодо розподілу поля електромагнітної хвилі навряд чи дозволить отримати достовірні результати. Отже, вибір того чи іншого методу визначається контекстом розв'язуваної задачі. З використанням обраного методу одиночного приєднання об'єктів на основі логічного вибору й аналізу залишку вільного простору  $i$ -го контейнера побудовано алгоритм пошуку і видалення вкладених потенційних контейнерів (ПК) (рис.2). У цьому випадку точка об'єкта  $i$ , яка є найбільш віддаленою від початку координат контейнера, матиме координати:

$$(y_{ij}^1 + s_i^1; y_{ij}^2 + s_i^2; \dots; y_{ij}^F + s_i^F). \quad (3)$$

Необхідно розмістити всі об'єкти у заданому числі контейнерів при виконанні всіх умов коректного розміщення:

1) упаковані об'єкти не перекривають один одного:

$$(y_{ij}^f \geq y_{kj}^f + s_k^f) \vee (y_{kj}^f \geq y_{ij}^f + s_i^f), \text{ при } \forall_j \in [1; M], \forall_f \in [1; F], \forall_i, \forall_k \in [1; m], i \neq k; \quad (4)$$

2) розміщення упакованих об'єктів у межах контейнерів:

$$\forall_j \in [1; N], \forall_d \in [1; D], \forall_i \in [1; n], \text{ при } (y_{ij}^f \geq 0) \wedge (y_{ij}^f + s_i^f \leq S_j^f). \quad (5)$$

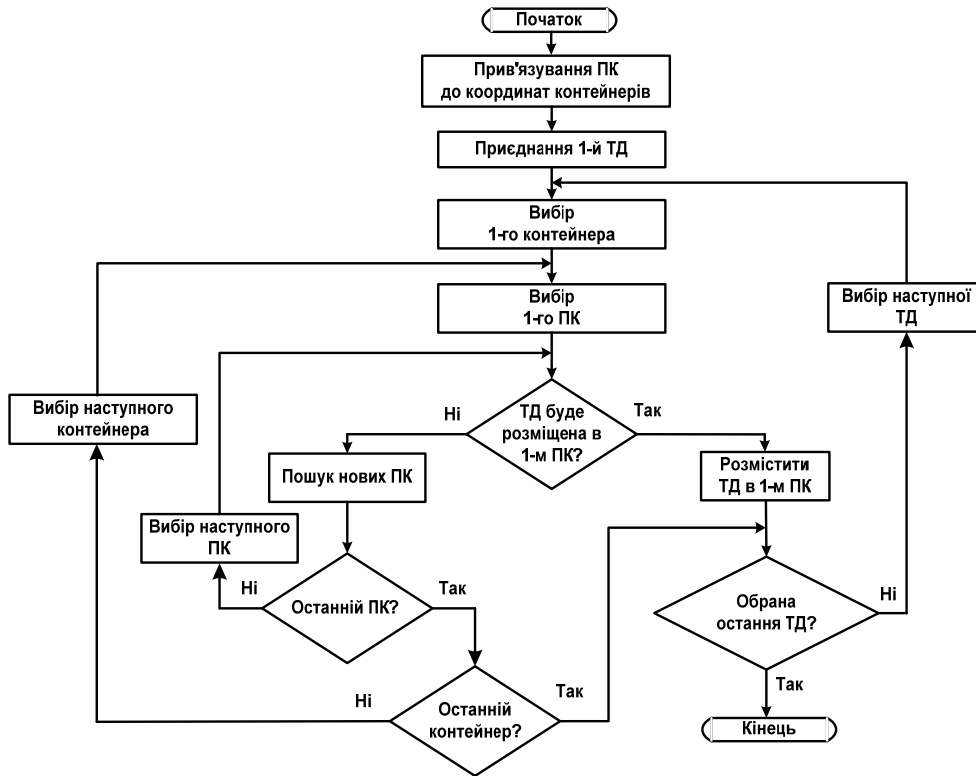


Рис.2. Алгоритм пошуку і видалення вкладених потенційних контейнерів

Процедура розміщення точок доступу у середині контейнерів (зон обслуговування) зазвичай починається з прив'язки контейнера до системи координат і вказування різних точок (вузлів), по відношенню до яких проводиться приєднання точки доступу. Положення  $k$ -го вузла у  $F$ -вимірному контейнері описується вектором

$$Y_k = \{y_k^1, y_k^2, \dots, y_k^F\}. \quad (6)$$

При проектуванні фемтостільників на площині утворюється  $j$  контейнерів, у середині яких далі відбувається упаковка. При розміщенні фемтостільників у будівлі відбувається розподіл на  $i$ -рівнів, відповідно до поверховості будівлі, на кожному з яких формується свій контейнер  $y_i^f$ ,  $f \in F$ . Положення  $i$ -го контейнера щодо початку координат представимо як  $Q(y_i^f)$ . При розміщенні точки доступу в контейнері формуються нові рівні. Запропонований метод оптимізації просторового розміщення фемтостільників дозволяє скоротити час пошуку точки установки на порядок.

**Четвертий розділ** присвячений вибору й аналізу методів виявлення викличних сигналів АС системи мобільного зв'язку. Обслуговування будь-якої АС починається з прийому БС серії викличних сигналів (ВС), і надалі БС вирішує задачу доступу АС протягом 6-8 с. після чого надається канал для передачі інформації. У досліджуваній у дисертації проблемі ПЧД необхідно за період передачі ВС забезпечити формування відповідних просторових характеристик

АР БС. Цим самим вдається зберегти незмінним існуючий алгоритм ведення зв'язку без істотних змін. При цьому виникає задача забезпечення надійності виявлення ВС і паралельно з цим за час, що залишився до передачі інформації, здійснити формування просторових характеристик приймальною АР БС. На основі проведеного аналізу багатьох літературних джерел встановлено, що найкращими алгоритмами є оптимальні статистичні виявители. Вони досить прості в реалізації, однак вимагають апріорних даних про функції розподілу ймовірностей сигналів і завад. Структура енергетичного виявителя є оптимальною при виявленні гаусівського корисного сигналу з нульовим математичним очікуванням і некорельованими відліками на тлі гаусівського білого шуму (ГБШ) з нульовим математичним очікуванням. Відомо, що вирішальною статистикою в енергетичному виявители є сума квадратів оброблюваних відліків і може бути узагальнена, якщо зводить відліки оброблюваної вибірки не в квадрат, а в довільний позитивний ступінь. У загальному вигляді задача побудови оптимального виявителя зводиться до синтезу алгоритму, що задовольняє критерію мінімуму ймовірності пропуску визивного сигналу (пропуску цілей ПЦ) при обмеженні на ймовірність помилкового виявлення (помилкових тривог ПТ), тобто:

$$P_{\text{ПЦ}} = \min_{\delta \in D_i} P(A, \sigma^2), \text{ при } P_{\text{ПТ}} = P(\gamma, \sigma^2) \leq P_0, \quad (7)$$

де  $\gamma = (\gamma(d_0|\bar{x}), \gamma(d_1|\bar{x}))$  – вирішальна вектор-функція, що належить множині вирішальних вектор-функцій  $D$ ;  $d_0$  – рішення про прийняття гіпотези  $H_0$  про відсутність сигналу;  $d_1$  – рішення про прийняття гіпотези  $H_1$  про наявність факту передачі сигналу.

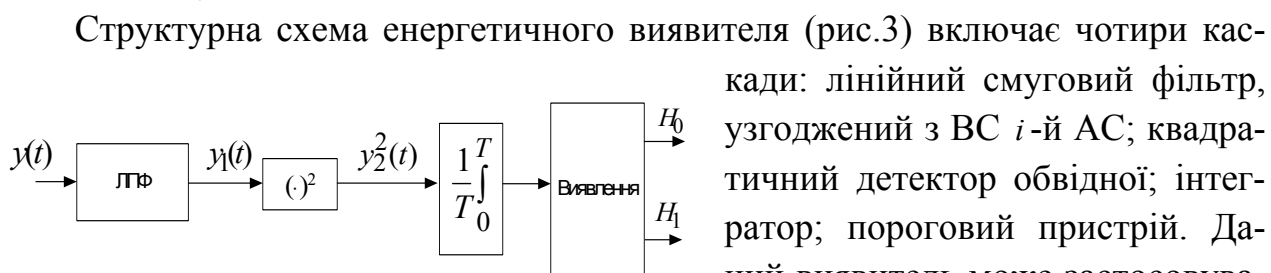


Рис.3. Структурна схема енергетичного виявителя викличних сигналів

кади: лінійний смуговий фільтр, узгоджений з ВС  $i$ -й АС; квадратичний детектор обвідної; інтегратор; пороговий пристрій. Даний виявитель може застосовуватися для виявлення будь-якого сигналу, відомого або невідомого, детермінованого або випадкового процесу.

Тому в силу своєї простоти і універсальності він застосовується в каналах із завмираннями, для виявлення детермінованих сигналів відомої структури. Для розрахунку робочих характеристик енергетичного виявителя використовуємо узагальнену  $Q$ -функція Маркума. Такий виявитель є оптимальним для умов завад типу ГБШ. Однак скористатися відомими рішеннями, які приводилися в роботах Шварца і Літтла не представляється можливим. Відмінність

поставленої задачі полягає в тому, що виявляти ВС  $x(t)$  доводиться не на тлі ГБШ, а на тлі станційних завод групи ВС інших АС і того ж ГБШ. Завадова обстановка у визивному каналі постійно змінюється узгоджено з основним трафіком і утворюється з 2-х основних компонентів:  $v(t)$  – теплового ГБШ з дисперсією в смузі прийому  $\sigma_v^2$  і  $x_\Sigma(t)$  – сукупного процесу викличних сигналів АС, що активізуються дисперсією  $\sigma_\Sigma^2 \gg \sigma_v^2$ . Такий інтегральний заводовий процес носить назву шуму Ліхтера. Густина розподілу ймовірностей такого шуму має полігаусівський характер

$$P_L(x) = \frac{1-a}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2}} \exp\left\{-\frac{x^2}{\sigma_v^2}\right\} + \frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{x^2}{\sigma^2}\right\}, \quad (8)$$

де  $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_\Sigma^2$  - дисперсія сукупного шуму;  $a = \omega\lambda$ ,  $\omega$  - середня частота появи ВС,  $\lambda$  - середня тривалість дії ВС АС.

Аналітичний вид густини ймовірності вирішальної статистики енергетичного виявителя  $P_{\chi^2}(z, n, \sigma_a^2)$  знайти досить складно. Тому на практиці користуються методами статистичного моделювання. Густина розподілу ймовірності узагальненого центрального  $\chi^2$ -розподіленого з числом ступенів свободи  $n$  і дисперсією  $\sigma_a^2 = \frac{\sigma_v^2}{(1-a)\sigma_v^2 + a\sigma^2}$  представляється у вигляді:

$$P_{\chi^2}(z, n, \sigma_a^2) = z^{\frac{n}{2}-1} \exp\left\{-\frac{z}{2\sigma_a^2} / (2\sigma_a^2)^{\frac{n}{2}} \Gamma(n/2)\right\}. \quad (9)$$

Результати розрахунку за формулою  $P_{пт}(T) = \int_0^\infty \mathcal{P}_0(z/H_0) dz$  приведені на рис.4. Реалізація отримана при  $n=50$  відліків ВС і дисперсіях  $\sigma_\Sigma^2 / \sigma_v^2 = 19$  дБ,

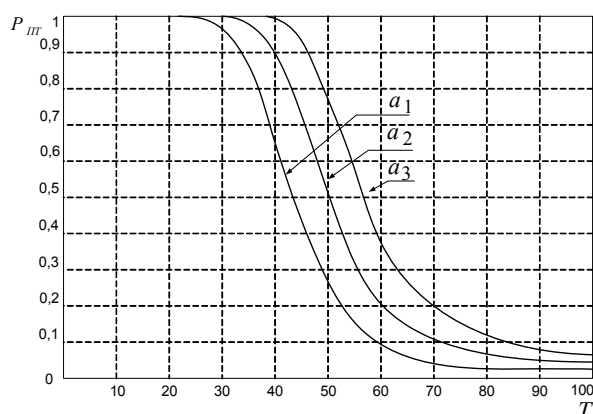


Рис.4. Залежність ймовірності помилкової тривоги від порога виявлення  $P_{пт}(T)$

$a_1 = 0,001$ ,  $a_2 = 0,005$  і  $a_3 = 0,01$ . Коефіцієнт  $a$  характеризує частку обмежень частини сукупного процесу Ліхтера. З рис. 4 слідує, що зі збільшенням кількості одночасно діючих ВС АС ймовірність помилкової тривоги  $P_{пт}$  знижується. З іншого боку, вибором порога  $T$  вдається отримати потрібне значення  $P_{пт}$ . Особливо значними є залежності якості виявлення від відношення сигнал/шум (ВСШ), де в якості шуму – шум Ліхтера. Дане відношення має ви-

гляд:

$$q = \sqrt{h^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{\sigma^2}}; \quad (10) \quad h^2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{\sigma^2}. \quad (11)$$

Тут  $S_i$  - відліки сигналу,  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + a\sigma^2$  - дисперсія шуму Ліхтера. Методом статистичного моделювання можуть бути отримані значення ймовірності правильного виявлення  $P_{ПВ}$  при фіксованій ймовірності помилкової тривоги  $P_{ПТ}$ . При організації процедури виявлення ВС важливим є не тільки досягнення максимуму правильного виявлення  $P_{ПВ}(k)$  по  $k$  - визивних сигналів, але і мінімізація числа цих сигналів. Ця задача оптимізації спрямована на забезпечення необхідного рівня обслуговування  $QoS$ , зокрема на мінімізацію затримки в наданні цього обслуговування. Поставлена задача вирішується в класичній постановці як вибір гіпотези про наявність ВС  $H_1$  проти альтернативи  $H_0$ . В силу великого розкиду рівнів сигналів і завад на входах вирішальної схеми, остаточне рішення по одиничному випадку виявлення ВС  $H_1$  не приймається. Звичайно потрібна передача декількох ВС і декілька фактів виявлення цього сигналу. Відносне рішення за певною кількістю правильного виявлення одиночних ВС, як правило приймається за правилом " $k$ " з " $m$ ", де  $m$  – заздалегідь встановлюється обсяг вибірки ВС. Результати отримуємо для типових у мобільних каналах умов релеївського розподілу ймовірностей амплітуди сигналу  $x(t)$ , що приймається на тлі білого гаусівського шуму. У цих умовах ймовірність правильного виявлення:

$$P_{ПВ} = P(1|H_1) = P(1|H_0)^{(1+h^2/2)}, \quad (12)$$

де  $h^2 = Ec/N_0$  - відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності шуму.

Результати розрахунку залежності  $P_{ПВ}(k;m)$  від параметрів  $m$  і  $k$  при  $P_{ПТ} = 10^{-7}$  і постійних значеннях  $h^2$  представлені графіками на рис. 5 і 6.

Таким чином, для алгоритмів виявлення  $k$  з  $m$  в змінних умовах виявлення існують оптимальні за критерієм максимуму якості виявлення параметри  $k$  і  $m$ . Їх значення визначаються вимогами до ймовірності помилкової тривоги і правильного виявлення і характеристиками первинної системи обробки спостережень. Запропонована процедура оптимізації виявлення ВС за правилом  $k$  з  $m$  не враховує динаміку самого процесу виклику. Так, зазначена процедура однаково ефективна, якщо на інтервалі вибірки  $m$  при рівному співвідношенні нулів і одиниць  $P_{ПВ}$  залишається незмінним при всіх випадках розташування 0 або 1 на цьому інтервалі. Разом з тим випадок, коли послідовність рішень на даному інтервалі починається з нулів, наприклад 0,0,0,0 ... .1,1, ..  $m$  принципово відрізняється від послідовності 1,1,1,1 ... 00.

При послідовному моніторингу ВС, що виявляються на  $i$ -циклах врахування початкової стадії має принципове значення. Сама процедура будується таким чином, що в разі невиявлення ВС на відповідних  $i$ -циклах відбувається скидання початкових даних і процедура переходить на наступний інтервал.

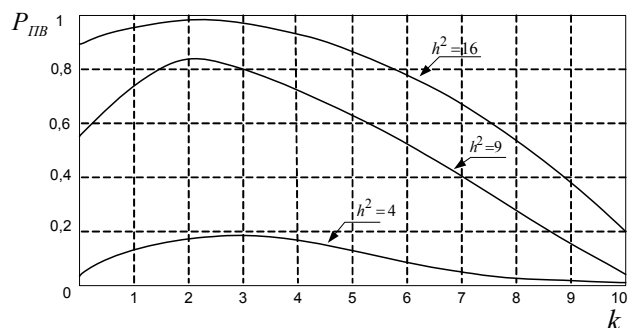


Рис.5. Графіки залежності ймовірності  $P_{ПВ}$  від розміру повторної вибірки виявлених ВС при різному співвідношенні сигнал/шум

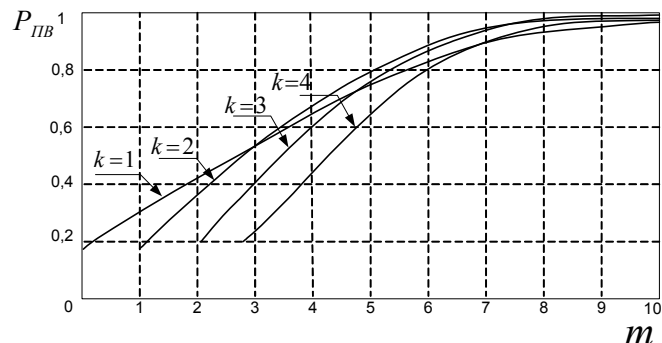


Рис.6. Графіки залежності ймовірності  $P_{ПВ}$  від розміру успішних результатів повторної вибірки виявлених ВС

Часто вважають, що при послідовному виявленні ВС АС застосовується критерій «3 з 3-х», тобто ВС вважається виявленим, якщо даний сигнал був виявлений в 3-х циклах передачі, наступних один за одним поспіль. У той же час правилом скидання статистики вважається невиявлення ВС на основі критерію «2 пропуску поспіль». Такий процес, коли відбувається виявлення і супровід сигналів, що послідовно виявляються, можна розглядати як траєкторний моніторинг. Процес виявлення та супроводження траєкторії представлений на рис.7 графом, де відображені переходи з одного стану в інший.

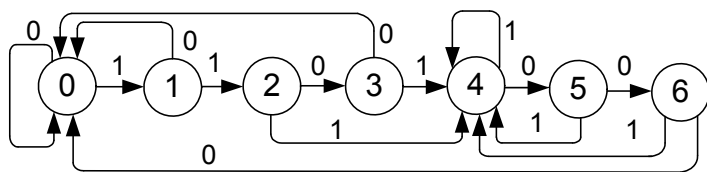


Рис.7. Граф переходних станів для критерію 3 з 4-х з обов'язковою 2-ю відміткою

з обов'язковою другою відміткою і критерію скидання з супроводу «3 пропуску поспіль». Для критеріїв, представлених графом на рис. 12, ймовірність виявлення і супроводу траєкторії в сталому режимі має вигляд (14). При цьому, якщо  $1-p \ll 1$ , то  $P_{ПВ} \approx 1-3(1-p)^3$

Загальне рішення для виявлення траєкторії за критерієм  $m$  з  $n$  представлено у вигляді (13). Якщо  $1-p \ll 1$ , то  $P_{ПВ} \approx 1-n(1-p)^m$ . На рис. 12 представлений граф переходів при реалізації критерію завантаження траєкторії «3» із «4-х»

$$P_{ПВ} = 1 - \frac{(1-p)^{m-1}(1-p^n)}{(1-p)^{m-1} + [1 - (1-p)^{m-1}]p^{n-1}}, \quad (13)$$

$$P_{ПВ} = 1 - \frac{(1-p)^3[(1+p) + p^2(2-p)]}{(1-p)^3(1+p) + p^2(2-p)}. \quad (14)$$

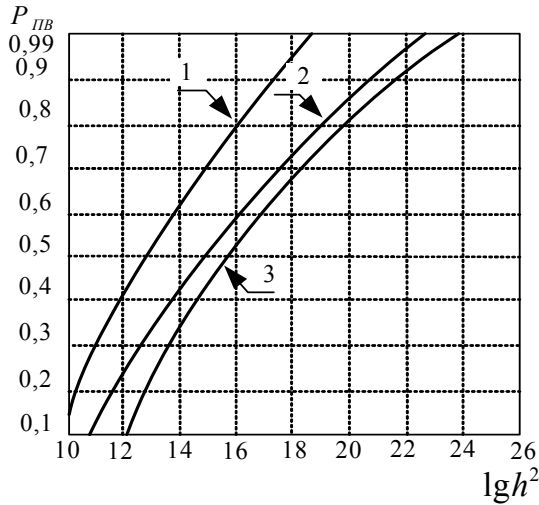


Рис.8. Графіки залежності ймовірності правильного виявлення від співвідношення сигнал/шум

На рис. 8 представлені залежності сталої ймовірності виявлення і супроводу траєкторії від відношення сигнал-шум при  $P_\epsilon = 0$ ,  $P_{ПТ} = 10^{-6}$ . Критерії: 1 – «3 з 4-х з обов'язковою другою відміткою» і «3 пропуску поспіль»; 2 – «3 з 3-х» і «2 пропуску поспіль»; 3 – «4 з 4-х» і «2 пропуску поспіль».

У нескладних умовах можна отримати більш високу ймовірність, якщо використовувати критерій «3 з 4-х з обов'язковою другою відміткою». У складних заводових умовах необхідно використовувати критерій виявлення траєкторій «4 з 4-х», який має певні переваги перед

іншими критеріями, однак ймовірність виявлення ВС і супроводу траєкторій виявляється нижче, ніж при використанні інших критеріїв.

У **п'ятому розділі** проведено аналіз і вибір методів визначення напрямку приходу сигналів абонентів мобільної мережі. Розглянуто два класи методів оцінки просторово спектру, що засновані на використанні явища релєївської роздільної здатності та понадроздільної здатності (ПРЗ). В рамках досліджуваної проблеми, у даній роботі проведено оцінку теоретичної граничної роздільної здатності ряду кореляційних методів визначення напрямку приходу сигналу (неадаптивного формування променя (NBF), Кейпона (Capon), теплового шуму (Thermal Noise), Борджотті-Лагунаса, максимальної ентропії (ММЕ) і багатосигнальної класифікації (MUSIC)) для 4-х, 8-ми, 10-ти і 50-ти елементної антеної решітки на основі імітаційного моделювання.

На рис.9 представлені результати моделювання оцінок роздільної здатності кореляційних методів від ВСШ 10 і 35 дБ для 4-х джерел випромінювання з кутами приходу:  $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 30^\circ$  і фазою:  $\pi/4, \pi/3, \pi/2$  і  $\pi$ . Кількість елементів АР – 10, відстань між АЕ  $d = \lambda/2$ .

На підставі проведеного дослідження, зроблено висновок, що глобально оптимального методу на основі просторово-часової вибірки не існує. Привабливість тих чи інших методів значною мірою залежить від наявності та обсягу апріорної інформації щодо досліджуваних процесів, від способу оцінки результатів векторів відгуку АР і способу її використання стосовно діючої сигнально-

завадової обстановки, конфігурації AP і її геометричних параметрів та ін. Результати моделювання показали, що роздільна здатність даних методів дозволяє їх використання в задачах просторово-часового доступу при строго обмежених умовах.

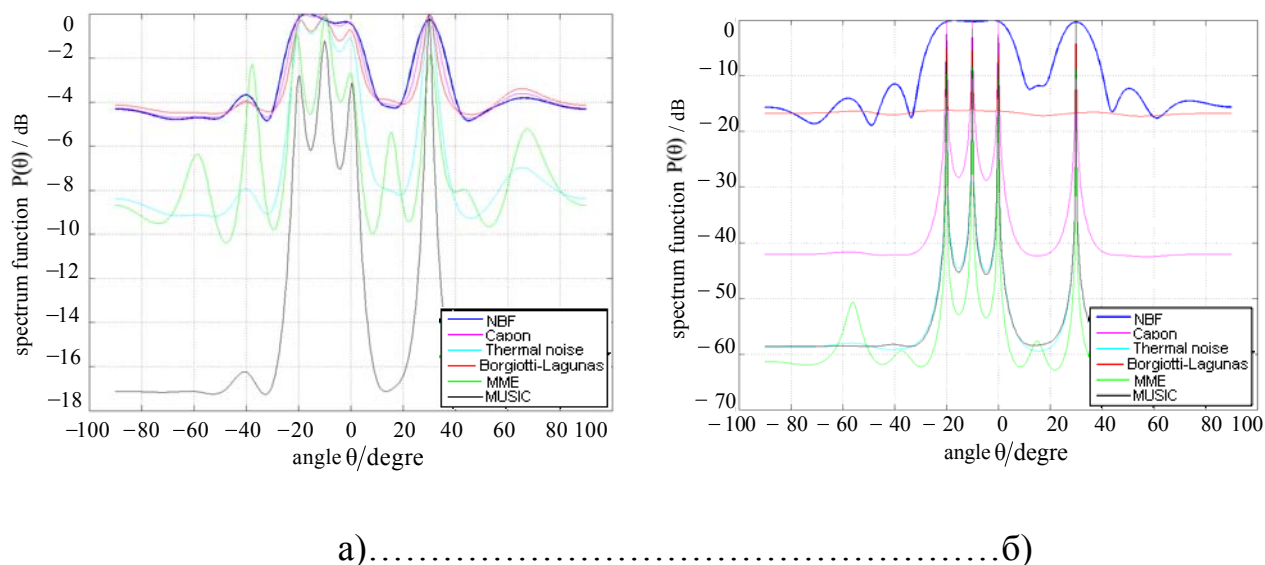


Рис.9. Графіки залежності роздільної здатності кореляційних методів від кута напрямку приходу 4-х сигналів при ВСШ: а)10 дБ; б)35 дБ

Для аналізу потенційної межі області понадроздільної здатності введемо цільову функцію як функцію матриць відношення сигнал/шум ( $\dot{R}_{SN}$ ) і сигнал/завада ( $\dot{R}_{SI}$ ) значень  $\theta$  аналізованих джерел випромінювання:

$$\dot{F}(\dot{R}_{SN}, \dot{R}_{SI}, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [\dot{V}_0(\theta_i) - \dot{W}^+(\theta, \dot{R}_{SN}, \dot{R}_{SI}) \dot{V}(\theta_i)] \times [\dot{V}_0(\theta_i) - \dot{W}^+(\theta, \dot{R}_{SN}, \dot{R}_{SI}) \dot{V}(\theta_i)]^* \quad (15)$$

де  $\dot{F}$  - функція втрат. Встановлюючи значення кутових координат  $\theta$  за допомогою методів оцінки напрямку сигналів, можна для матриць ( $\dot{R}_{SN}, \dot{R}_{SI}$ ) знайти області значень, при яких цільова функція (15) має мінімуми або задовольняє умови роздільного спостереження джерел. При виконанні критерію мінімуму середнього квадратичного відхилення (МСКВ) у напрямку  $i$ -го джерела випромінювання результуюча діаграма спрямованості цифрової антени повинна містити мінімум, тобто

$$\dot{V}_{\Sigma}(\theta_i, \dot{R}_{SN}, \dot{R}_{SI}) = \dot{V}_0(\theta_i) - \dot{W}^+(\theta, \dot{R}_{SN}, \dot{R}_{SI}) \dot{V}_0(\theta_i) \rightarrow \min \quad (16)$$

Цільова функція (17) являє собою квадрат значень результуючих діаграм спрямованості (18) в напрямках АС. Глибина провалу результуючої діграми спрямованості повинна дорівнювати відношенню сигнал/шум на початку оцінювання. У якості порогових значень цільової функції слід використовувати залежність глибини заглушення окремого джерела від його рівня над власним шумом. Порогова глибина заглушення сигналу кожної АС залежить тільки від

його рівня над шумами і незалежить від відношення сигнал/шум інших АС. Для  $N$  джерел їх заглушення буде можливо при виконанні умови

$$\dot{F}(\dot{R}_{SN\_N}, \dot{R}_{SI\_N}) \leq L(\dot{R}_{SN\_N}, \dot{R}_{SI\_N}), \quad (17)$$

де  $L(\dot{R}_{SN\_N}, \dot{R}_{SI\_N})$  – сумарна багатовимірна порогова функція, що встановлює залежність між матрицями відношень сигнал/шум, сигнал/завада і необхідної глибини одночасного заглушення сигналів всіх інших АС. На рис.10 представ-

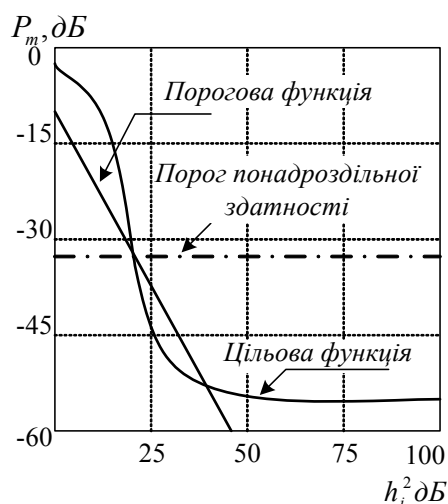


Рис.10. Співвідношення порогової і цільової функції при понадроздільній здатності

лені графік цільової  $\dot{F}(\dot{R}_{SN\_N}, \dot{R}_{SI\_N})$  і порогової  $L(\dot{R}_{SN\_N}, \dot{R}_{SI\_N})$  функцій 2-х сигналів, коли порогова функція перевищує рівень самих сигналів на 14дБ, при відношенні сигнал/шум одного з сигналів  $h_2^2 = 30$  дБ.

Очевидно, понадроздільна здатність має місце там, де порогова функція знаходиться вище спадної цільової функції. Як можна бачити з графіка на рис.10, межа області понадроздільної здатності з урахуванням підсилення сигналів АР складає 34 дБ. Такий рівень сигналів потрібний для понадроздільної здатності джерел, якщо кутова відстань між ними складає 0,1 діаграми спрямованості основної пелюстки АР і в лініях мобільного зв'язку досягти не завжди вдається.

Більш універсальним, проте менш точним є метод релєвської роздільної здатності сигналів, що визначає мінімальну відстань на рівні 0,7 двох пелюсток ДС, при яких ще можна розрізнити сигнали АС.

У шостому розділі представлено основний результат дисертації, пов'язаний з вибором методу і алгоритму просторово-часового доступу з використанням адаптивної ПЧОС на базі ААР з оцінкою вектора вагових коефіцієнтів (ВВК), що включені в прийомні антенні елементи (АЕ) і аналізу його ефективності для різних ситуацій. Це дало змогу реалізувати паралельний множинний доступ, просторово-поляризаційну селекцію кожного із обслуговуваних сигналів, а також придушення можливих небажаних сторонніх випромінювань. Розглядається індивідуальна обробка сигналів, коли для кожного сигналу, що приймається, створений амплітудно-фазовий розподіл (АФР), який формує індивідуальний ВВК (рис.11). Із схеми на рис.11, можна бачити, що замість одного виходу  $y(t)$  маємо  $N$  виходів за числом паралельно оброблювальних сигналів, і задача індивідуального формування ВВК узгоджується з класичним алгоритмом ПЧОС. При такому методі ПЧОС всі сигнали інших АС, що працю-

ють в даному частотному каналі, є завадами для прийому сигналів даної конкретної АС, що обробляється відповідним ВВК (рис.12).

У якості опорного сигналу у кожному із каналів може бути використана структура еталонного сигналу, наявна у кожному із просторових сигналів – синхросигнал, пілот сигнал та ін. Або можуть бути використані для цієї мети отримані оцінки напрямку приходу кожного із сигналів.

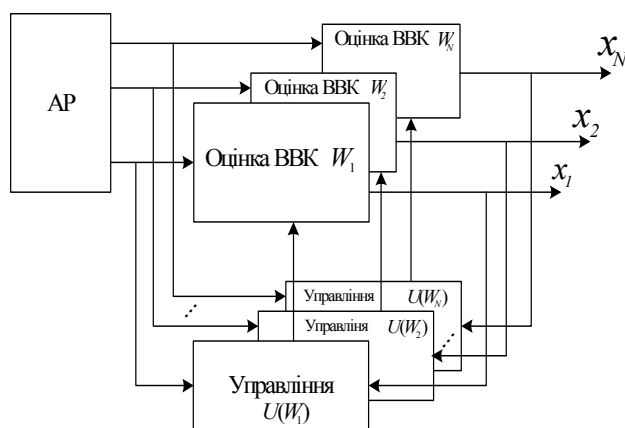


Рис.11 – Структурна схема ПЧД при оптимальному прийомі  $N$ -сигналів АС з знаходженням індивідуальних значень оцінки ВВК  $i$ -го сигналу АС

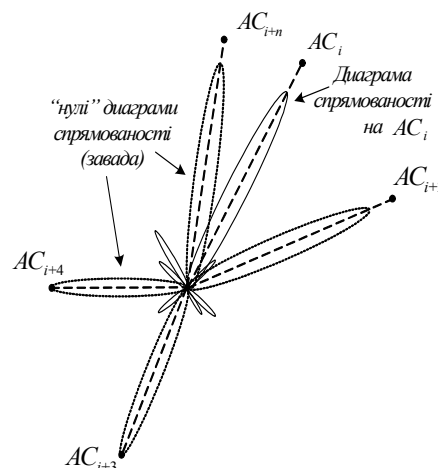


Рис.12 – Варіант розподілу рівнів прийому АР при обробці сигналів від  $i$ -ї АС

Алгоритм ПЧОС який функціонує за критерієм МСКВ, ґрунтується на процедурі порівняння прийнятої після зважування реалізації  $W^T(t)X(t)$  з еталонним сигналом  $y_e$ , тобто отриманні нев'язки  $v(t)$ :

$$v(t) = W^T X(t) - y_e(t), \quad (18)$$

Квадрат цієї нев'язки і її математичне очікування:

$$v^2(t) = W^T X(t) X^T(t) W(t) - 2y_e W^T(t) X(t) + y_e^2; \quad (19)$$

$$M[v^2(t)] = W^T(t) R_{xx} W(t) - 2W^T(t) r_{xy} + \overline{y_e^2(t)}, \quad (20)$$

де  $r_{xy} = (x_1(t)y_e(t); x_2(t)y_e(t); \dots; x_N(t)y_e(t))$  – вектор коваріації між вектором прийнятих сигналів і еталонним сигналом;  $R_{xx}$  – кореляційна матриця сигналів, прийнятих ААР,  $R_{xx} = \overline{X(t)X^T(t)}$ .

Мінімум нев'язки знаходиться з виразу (19). В даному випадку він буде єдиним, оскільки функція (19) є квадратичною відносно  $W(t)$ , а матриця  $R_{xx}$  – позитивно визначена. Прирівнюючи градієнт (19) до нуля, знайдемо мінімальне її значення:

$$dv^2/dW(t) = \nabla_{\omega}(\overline{v^2(t)}) = 2R_{xx}W(t) - 2r_{xy} = 0. \quad (21)$$

$$\hat{W}_{opt} = R_{xx}^{-1}r_{xy}. \quad (22)$$

де  $R_{xx} = R_c + R_n + R_{uu}$  а  $R_c, R_n, R_{uu}$  – кореляційні матриці сигналу, завади і шуму відповідно;  $r_{xy}$  – матриця взаємної кореляції між векторами прийнятого і еталонного сигналів.

Вираз (22) є рішенням векторно-матричного рівняння Вінера – Хопфа. При цьому оптимальна ДС ААР може бути обчислена за формулою

$$F(\theta) = (\hat{W}_{opt}(t), f^*(\theta)), \quad (23)$$

де  $\hat{W}_{opt}(t)$  – представлено в комплексному вигляді;  $f^T(\theta) = (f_1(\theta), f_2(\theta)e^{i\phi_{i01}}, \dots, f_N(\theta)e^{i\phi_{N01}})$ ;  $f_i(\theta)$  – ненормовані ДС приймальних елементів ААР;  $\phi_{i01}$  – фази обвідної хвилі одиничної амплітуди відлік яких ведеться від фази сигналу з виходу 1-го елемента (при  $\phi_{i01} = 0$ ), що зафіксовані на виходах приймальних елементів за рахунок просторових відмінностей.

Рівняння (22) можна представити і в іншому вигляді, якщо припустити, що еталонний сигнал  $\bar{y}_e^2 = s(t)$ . Тоді з урахуванням вихідного співвідношення АР  $y(t) = W^T(t)X(t)$  отримаємо

$$\hat{W}_{opt}(t) = sR_{xx}^{-1}V, \quad (24)$$

де  $V^T = (1, e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_{N-1}})$  – вектор фазових набігів, відлік яких ведеться від 1-го елемента ААР, що входить у вираз (23).

З урахуванням рівності  $r_{xy} = E\{x(t), y_{\Theta}(t)\} = sV(t)$  отримаємо

$$\hat{W}_{opt}(t) = sR_{xx}^{-1}V(t), \quad (25)$$

За допомогою даного критерію розроблено процедури, що мають рекурентну форму, зокрема процедури стохастичної апроксимації, лінійної або нелінійної фільтрації, процедури Калмана – Б'юсі, в тому числі методи рекурентного обернення кореляційної матриці. Важливою властивістю ААР є інваріантність деяких критеріїв функціонування по відношенню до сумарної ДС. Це має велике практичне значення, пов'язане з можливістю довільного, в тому числі й випадкового, розташування антенних елементів. Серед усього різноманіття рішень можна виділити два основних напрямки, що історично першими з'явилися. Асимптотичні рішення, пов'язані з іменами Ширмана, Хоуелса, Епплбаума, Уїдрой і ін., які передбачають наявність гіпотези ергодичності сигнально-завадової ситуації. Інший напрямок заснований на припущенні марківської апроксимації прийнятої реалізації і динаміки змін ВВК. Відмова від ергодичності дозволяє ефективно вирішувати нестационарні задачі з використанням ґрунтовно розробленого апарату рекурентної лінійної або нелінійної фільтрації. Рекурентні методи засновані на послідовній

ітераційній процедурі знаходження рішення для ВВК у напрямку, протилежному градієнту функції показника якості  $\Delta(k)$ . У загальному випадку дискретний з кроком  $k$  градієнтний алгоритм має вигляд

$$W(k) = W(k-1) - \mu \nabla(k), \quad (26)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт (крокова постійна), що враховує швидкість пошуку екстремуму.

Алгоритм (26) показує, що значення ВВК на  $k$ -му кроці дорівнює значенню ВВК на попередньому  $(k-1)$ -му кроці з адаптивною добавкою  $\mu \nabla(k)$ , що залежна від нев'язки різниці  $y_s(k) - y(k)$ .

Процедура (26) при значенні  $\Delta t = (t_{k+1} - t_k) \rightarrow 0$  переходить у безперервну, яка може бути представлена у вигляді диференціального рівняння

$$dW(t)/dt = \mu \nabla(t). \quad (27)$$

Цей же алгоритм при безперервній процедурі набуває вигляду диференціального рівняння Уїдроу – Хоффа:

$$d\hat{W}(t)/dt = 2\mu[y_s(t) - y(t)]X(t) = 2\mu v(t)X(t). \quad (28)$$

На рис.13. представлено структуру управління ВВК  $N$ -елементної ААР з використанням рекурсивною процедури Уїдроу.

Для вирішення задачі ПЧОС рівняння Уїдроу – Хоффа (28) є недоречним через великий час збіжності. Водночас вибір крокової постійної  $\mu$  не вбачається конструктивним, бо це призводить до збільшення помилок.

Більш адекватною, що враховує динамічність сигнальної обстановки, є марківська модель ВВК, що визначається із стохастичного диференціального рівняння:

$$d\hat{w}_i/dt = -a_i(t)\hat{w}_i(t) + \sum_{j=1}^N K_{ij}(t)F'_j(\hat{w}_i, t), \quad (29)$$

де  $F'_j(\hat{w}_i, t) = dF_j(\hat{w}_i, t)/d\hat{w}_i$  –  $N$ -мірний вектор-стовпчик, отриманий через похідні з часу спостереження від функції правдоподібності

$$F(w_i, t) = \frac{1}{V_H} [2y_s(t)y(w_i, t) - y^2(w_i, t)], \quad (30)$$

$K_{ij}(t)$  – дисперсія помилки оцінки, що описується рівнянням Риккати:

$$dK(t)/dt = B(t)V_H B^T(t) + K(t)A(t) + A^T(t)K(t) - K(t)F''(\hat{w}_i, t)K(t), \quad (31)$$

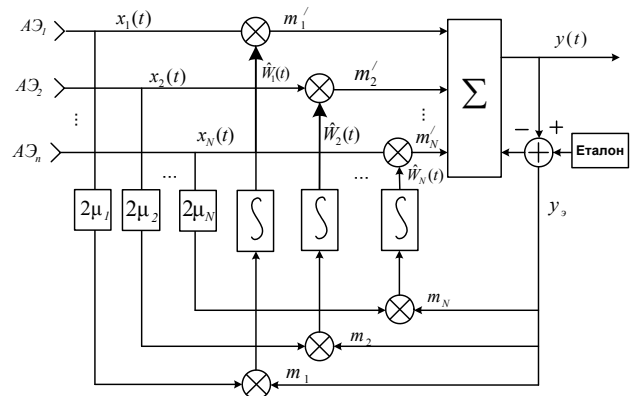


Рис.13 Структурна схема управління ВВК ААР, що синтезована за алгоритмом Уїдроу

де  $F''(\hat{w}_i, t) = d^2 F(\hat{w}_i, t) / d\hat{w}_i^{(i)} d\hat{w}_i^{(i)}$  – квадратна  $N \times N$  – матриця;  $A(t)$  – діагональна

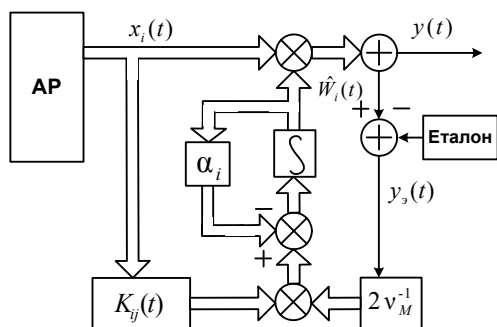


Рис.14. Структурна схема алгоритма оцінки ВВК АР

матриця з елементами  $a_i(t)$ ;  $V_H$  – спеткральна густина потужності шуму спостереження.

З урахуванням цього рівняння оцінки ВВК (29) набуває вигляду

$$\begin{aligned} d\hat{w}_i(t)/dt &= -a_i(t)\hat{w}_i(t) + \sum_{j=1}^N 2K_{ij}(t)V_H^{-1}[y_{\Sigma}(t) - y(t)]x_i(t) = \\ &= -a_i(t)\hat{w}_i(t) + 2V_H^{-1}v(t) \sum_{j=1}^N K_{ij}(t)x_i(t). \end{aligned} \quad (32)$$

або у векторній формі

$$d\hat{W}(t)/dt = A(t)\hat{W}(t) + 2V_H^{-1}v(t)K_{ij}(t)X(t). \quad (33)$$

Рівнянню (33) відповідає структурна схема алгоритму оцінки ВВК ААР, яка подана на рис.14 або фільтр Калмана – Б'юсі.

Порівняно з алгоритмом Уїдроу – Хоффа водночас у алгоритму (33) замість коефіцієнту  $2\mu_i$  використовується коефіцієнту у вигляді суми функцій –  $2V_H^{-1} \sum_{j=1}^N K_{ij}(t)$ . Це, з

одного боку, дозволяє за допомогою величини  $V_H^{-1}$  враховувати різні значення рівнів шумів у каналах спостереження, а з іншого за допомогою функцій  $K_{ij}(t)$  відмічати наявність міжканальних зв'язків за рахунок інших  $i \neq j$  (при  $i, j = \overline{1, N}$ ) каналів і приймальних елементів АР.

Проведено порівняльний аналіз алгоритма Уїдроу – Хоффа та алгоритма Калмана – Б'юсі. Графіки залежності ВСЗШ від часу надано на рис.15. Крива 1 відповідає випадку використання алгоритму Уїдроу – Хоффа. Крива 2 – алгоритму Калмана – Б'юсі. В той же час, як показує аналіз процедури Калмана – Б'юсі поряд з оптимальністю для складної сигнально-завадової обстановки вона характеризується максимально коротким часом збіжності до сталого стану, тобто його збіжність забезпечується на інтервалі часу, що відведений для дії сигналів виклику і становить від 3-х до 10 кроків дискретизації.

Дані результати аналогічні отриманим у завданнях для ААР і можуть бути поширені й на просторово-поляризаційні задачі. При цьому рівняння (33) від-

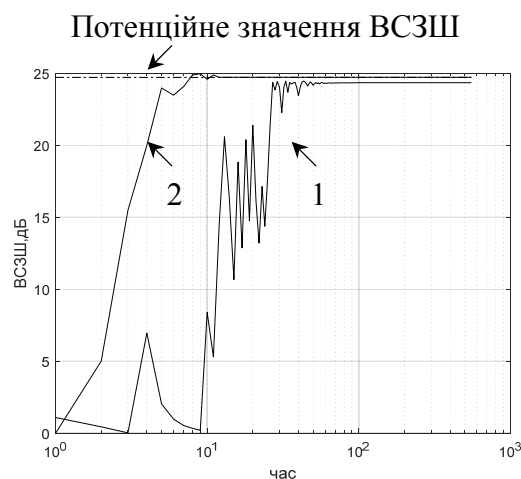


Рис.15. Залежність ВСЗШ на виході 8-ми елементної ААР від часу для алгоритма Уїдроу – Хоффа (крива 1) та Калмана-Б'юсі (крива 2)

повідляє алгоритму ПЧОС і завад з плоским фазовим фронтом і точечним просторовим спектром. Рівняння (33) пропонуємо у спрощеному вигляді. Оскільки тут  $A=0$ , то перший доданок у правій частині (33) зникає, що дозволяє рівняння оцінки у векторній формі записати у вигляді

$$d\hat{W}(t)/dt = 2V_H^{-1}v(t)K_{ij}(t)X(t). \quad (34)$$

Рівняння (34) являє собою безперервний варіант відомої процедури Уїдроу-Хоффа (28). Отже, синтезовані алгоритми можна розглядати як узагальнення процедури для більш складної статистичної ситуації і загальних частково поляризованих полів.

Таким чином, до початку сеансу зв'язку процедура перейде в сталий режим, тобто буде сформований ВВК, що забезпечить оптимальні вимоги для доступу до сигналу конкретної АС, ідентифікованої конкретним еталонним сигналом, у якості якого може бути оцінка напрямку приходу або будь-який службовий відомий сигнал (рис.15).

Особливістю алгоритмів ПЧД реалізованого за алгоритмом (33) являється те, що одночасно з формуванням найкращого амплітудно-фазового розподілу для кожного конкретного сигналу АС здійснюється на кожному з виходів  $y_i(t)$  заглушення всіх інших сигналів, чим забезпечується максимальне можливе значення відношення сигнал/шум для кожного з сигналів.

Залежно від кількості АЕ визначаються значення ВСШ на виході кожного із суматорів.

Анализ ефективності ПЧОС проведено за наступними двома показниками:

$$\eta_0(t) = \frac{W^T(t)R_{ss}W(t)/W^T(t)R_{rr}W(t)}{W^T(0)R_{ss}W(0)/W^T(0)R_{rr}W(0)}, \quad (35); \quad \eta_i(t) = \frac{W^T(t)R_{ss}^{(i)}W(t)/W^T(t)R_{rs}^{(i)}W(t)}{W^T(0)R_{ss}^{(i)}W(0)/W^T(0)R_{rs}^{(i)}W(0)}. \quad (36)$$

де  $W(t)$  – значення ВВК після адаптації;  $W(0)$  – значення ВВК до адаптації;  $R_{SS} = E\{S_n(t)S_n^T(t)\}$  – кореляційна матриця сигналів;  $S_n(t) = [S_{n1}(t), S_{n2}(t), \dots, S_{nL}(t)]$  – сумарний вектор напруг сигналів на виході елементів АР;  $R_{SS}^{(i)} = E\{S^{(i)}(t)S^{(i)T}(t)\}$  – кореляційна матриця  $i$ -го сигналу;  $R_{rs}^{(i)} = E\{[P(t) + S^{(-i)}(t)][P(t) + S^{(-i)}(t)]^T\}$  – кореляційна матриця завад и всіх сигналів крім  $i$ -го;  $i = \overline{1, I_c}$ .

Показник (35) є загальноприйнятим при аналізі ефективності просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС), який характеризує ступінь заглушення завад (коефіцієнт завадозахисту) при використанні методів ПЧОС. Показник (36) є коефіцієнтом завадозахисту для кожного з сигналів і дозволяє оцінити ослаблення корисних сигналів при застосуванні ПЧОС. Розглянемо спочатку значення показників ефективності з виразів (35), (36) при впливі однієї ( $J=1$ ) зосередженої вузькосмугової завади  $n(t)$  і шуму  $v(t)$ . Чисельні значення коефіцієнтів

$\eta_0(t)$  і  $\eta_i(t)$  отримаємо для різних рівнів сигналів і завад, а також кутів приходу. Напрямок приходу сигналу виберемо  $\theta_s = 0$ . На рис.16-17 представлені графіки залежностей коефіцієнтів  $\eta_0(t)$  і  $\eta_i(t)$  від значення різниці кута напрямків приходу сигналу і завади  $\Delta\theta^0$  для різної кількості антенних елементів  $N$ . З аналізу залежностей можна зробити висновок, що зі збільшенням числа  $N$  значення коефіцієнтів  $\eta_0(t)$  і  $\eta_i(t)$  суттєво зростають. При цьому теоретично можуть бути отримані значні перевищення рівнів заглушення завад по відношенню до сигналу при різних напрямках їх приходу  $\theta_s$  і  $\theta_s$ , що досягають 50 дБ і більше (рис.17).

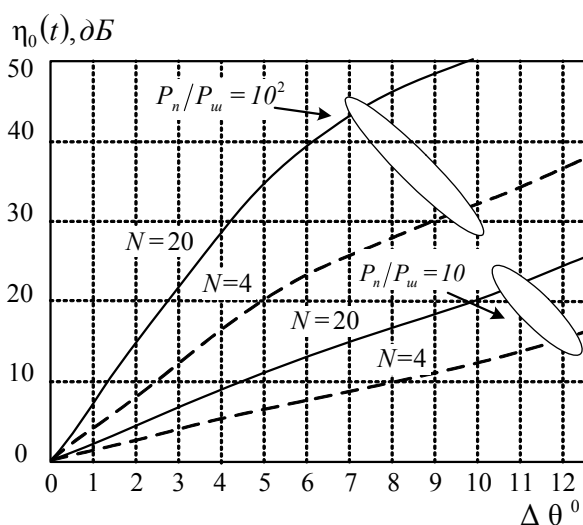


Рис.16. Графіки залежностей коефіцієнта завадозахисту  $\eta_0(t)$  від значення відмінності кута приходу сигналу і завади  $\Delta\theta^0$

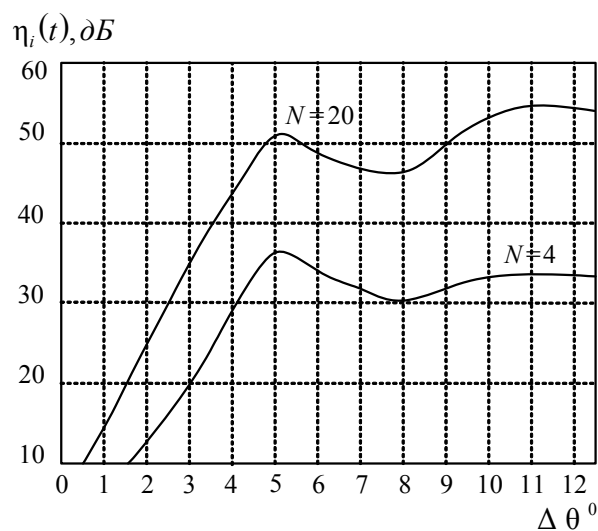


Рис.17. Графіки залежностей коефіцієнта завадозахисту  $\eta_i(t)$  від значення відмінності кута приходу сигналу і завади  $\Delta\theta^0$

Однак при будь-якому числі характерно зниження всіх обраних коефіцієнтів ефективності з наближенням напрямку приходу завади  $\theta_s$  до сигналу  $\theta_s$  (при  $(\theta_s - \theta_s) \rightarrow 0$ ), що можна інтерпретувати як «засліплення» ААР. Із збільшенням рівня завад у порівнянні з шумом  $P_s/P_u = 10$  дБ і  $P_s/P_u = 100$  (рис.16) показник  $\eta(t)$  зростає, що пояснюється точністю оцінки значень  $\hat{W}_i(t)$ . В даному випадку обробка сприяє зменшенню відносного рівня завади на виході ААР, хоча абсолютне значення її, що є одним із компонентів шуму спостереження  $V_n$ , збільшується за рахунок зростання дисперсії помилки оцінки  $K_{ij}(t)$ .

Разом із тим слід зазначити, що із збільшенням числа оброблюваних при доступі сигналів АС, знижується різничний сигнал відношення сигнал/шум, що дозволяє зробити висновок про те, що для задач ПЧД є обмеження за якістю прийнятих сигналів при збільшенні їх кількості.

На рис. 17 представлені графіки  $\eta(t)$  для випадку впливу двох завад  $n^{(1)}(t)$  і  $n^{(2)}(t)$  залежно від зміни напрямку приходу однієї з них при фіксованому напрямку іншої ( $\theta_s = 5^\circ$ ). Графіки, наведені на рис. 17, відрізняються від зображених на рис. 16 тим, що при збігу напрямків приходу завад ( $\theta_1 = \theta_2 = 5^\circ$ ) відзначається збільшення ефективності ААР на 10-15 дБ. У даному випадку вплив декількох завад, що приходять з одного і того ж напрямку, сприймається як вплив однієї завади з сумарною потужністю  $P_{з\_сум} = P_{з1} + P_{з2}$ . Тобто вплив декількох завад, що приходять з різних напрямків ( $\theta_{з1} \neq \theta_{з2}$ ), призводить до великих втрат порівняно з випадком впливу однієї завади сумарної потужності.

Проаналізовано ефективність розглянутих задач для різних значень кута  $\varphi$ , що є половиною центрального кута сфери Пуанкаре і з'єднує точки, що відповідають значенням поляризації сигналу і завади.

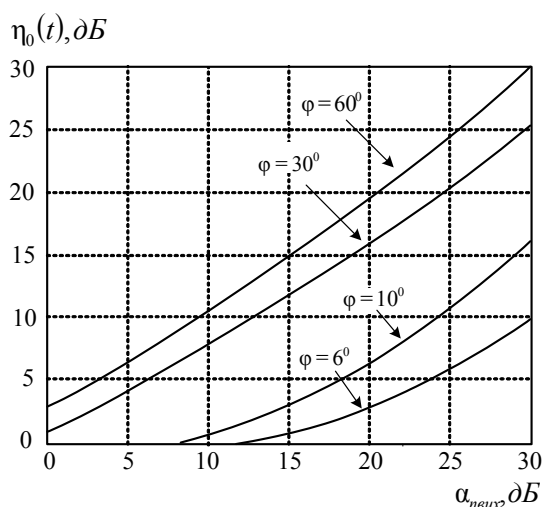


Рис. 18. Графіки залежностей коефіцієнта завадо захисту  $\eta_0(t)$  від значення відмінності кута приходу сигналу і завади  $\Delta\theta$

Для аналізу виберемо коефіцієнт  $\eta_0$  (36). Незважаючи на те, що процедура аналізу заснована на рівнянні фільтра Вінера-Хопфа (22), вона для даного випадку може застосовуватися, оскільки фільтр Калмана має ту ж ефективність. Залежність  $\eta_0(t)$  від  $\alpha_{невих} = W^T R_n W$  представлена на рис.18, звідки видно, що зі зменшенням рівня шуму ступінь заглушення завади зростає.

Ефективність зростає також при збільшенні відмінності поляризації сигналу і завади (зі збільшенням  $\varphi$ ). Характерно, що навіть при малій різниці в поляризаціях сигналу і завади (при  $\varphi \leq 30^\circ$ ) можна

досягти рівня заглушення 20 дБ і більше, що відповідно підвищує якість електромагнітної доступності.

Поряд з іншими факторами при реалізації ПЧД значний вплив справляє рівень квантування вагових коефіцієнтів, що формуються на загальному суматорі, що складає результуючі зважені сигнали. При недостатньому рівні кванту-

вання можливі великі похибки. Для рішення задач ПЧД, де відношення завада/шум не перевищує 25-30дБ, рівень квантування може бути вибраний  $n = 6$ .

У **сьомому розділі** запропоновано метод і проведено аналіз впливу реалізаційних обмежень, що викликані похибками при задаванні вихідних даних щодо сигнально-завадової обстановки, взаємного впливу між антенними елементами, багатопроменевості й широкосмуговості сигналів, характеристиками алгоритмів обробки сигналів (МСКВ – мінімального середнього квадратичного відхилення, МВСЗ – максимального відношення сигнал/завада+шум та ін.), ступеня просторової когерентності сигналів та завад. У результаті аналізу реалізаційних обмежень виявилась наявність втрат ефективності просторово-часового доступу, що деякою мірою знижує очікувану продуктивність доступу. Розроблено алгоритми з мінімізації зазначених втрат на основі даних про напрямки приходу сигналів на початковій стадії. При відсутності когерентності між корисним сигналом  $\vec{X}_c(t) = a(t)e^{-j(\omega_0 t + \varphi(t))} \vec{D}_c$  і завадою  $\vec{X}_{nv}(t) = a_v(t)e^{-j(\omega_0 t + \varphi_v(t))} \vec{D}_{nv}$  кореляційну матрицю вхідних сигналів можна записати у вигляді:

$$R_{xx} = \sigma_{ui}^2 I + P_c \vec{D}_c^* \vec{D}_c - \sum_{n=1}^L P_n \vec{D}_{n\gamma}^+ \vec{D}_{n\gamma}, \quad (37)$$

де  $\vec{D}_c$  – вектор хвильового фронту корисного сигналу;  $\vec{D}_{n\gamma}$  – вектор хвильового фронту завади;  $\sigma_{ui}^2$  – потужність теплового шуму в смузі сигналу;  $P_c$  – потужність корисного сигналу;  $P_n$  – потужність  $n$ -й завади від сусідньої АС.

Сигнали, що складаються з суми регулярних компонентів, носять назву когерентних. При цьому ступінь когерентності визначається у вигляді нормованого коефіцієнта просторової кореляції (КПК) між направляючими векторами сигналу  $D_c$  та завади  $D_n$ :

$$\gamma_{ij} = \frac{\vec{D}_i \vec{D}_j}{|\vec{D}_i| |\vec{D}_j|}, \quad (38)$$

де  $i, j = c = 1, 2, \dots, n$ .

З урахуванням цього виразу ВСЗШ на вході АР можна представити у вигляді (39). Очевидно, що максимальне значення ВСЗШ має вид (40):

$$\rho = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - \frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2 + P_{n\Sigma}} |\gamma_{1c}|^2 \right\}. \quad (39) \quad \rho_{\max} = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2}. \quad (40)$$

Коли завада зведена до нуля і КПК  $\gamma_{1c} = 0$ , буде досягнуто максимальне значення ВСЗШ. При цих умовах оптимальний ВВК має вид

$$\vec{W}_{opt} = n \vec{D}_c^+. \quad (41)$$

При управлінні ваговими коефіцієнтами амплітудно-фазове співвідношення формується відносно центральної частоти спектру сигналів АС. Зі збільшенням широкосмуговості в одну або іншу сторону від центральної частоти спо-

стерігаються все більші розбіжності в амплітудах і фазах. У якості прикладу для 2-х-елементної АР були розраховані та проаналізовані значення ВВК, оптимальні за критерієм МСКВ (42) та МВСЗШ (43).

$$\vec{W}|_{МСКВ} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{P_c + \sigma_{ш}^2}{P_{\Pi}} - \gamma^2 \left( \frac{P_c}{P_n} + e^{i(\varphi_c - \varphi_n)} \right) \\ \rho \left( e^{i\varphi_c} + e^{i\varphi_c} \left( \frac{P_c + \sigma_{ш}^2}{P_n} \right) - e^{i\varphi_n} - \frac{P_c}{P_n} \right) \end{pmatrix}, \quad (42) \quad \vec{W}|_{МВСЗШ} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\sigma_{ш}^2}{P_{\Pi}} - \gamma e^{i(\varphi_c - \varphi_n)} \\ \frac{\sigma_{ш}^2}{P_n} e^{i\varphi_c} + e^{i\varphi_c} - \gamma e^{i\varphi_n} \end{pmatrix}. \quad (43)$$

де  $\varphi_{c1} = \varphi_c$ ;  $\varphi_{n1} = \varphi_n$ .

Значення  $\gamma$  залежать від ширини й форми спектра сигналу (завади). Наприклад, у разі, коли обвідна спектру сигналу апроксимується гаусівською кривою, ця залежність має вигляд:

$$\gamma_j = e^{-\frac{(\Delta\omega\tau_j)^2}{4\pi}}, \quad (44)$$

де  $\Delta\omega$  – ширина спектру;  $\tau_j$  – груповий час запізнення.

У результаті математичного моделювання отримано значення ВСЗШ для різних значень коефіцієнта просторової кореляції сигналів і завад, що визначають значення їх широкосмуговості. При виконанні розрахунків використовувалися наступні вихідні дані:

$$\varphi_c = 0;$$

$$\varphi_s = \pi \sin 15^\circ = 0,812; \quad 10 \lg \frac{P_s}{\sigma_{ш}^2} = 20 \text{ дБ}.$$

Результати розрахунків залежності вихідного ВСЗШ від величини  $\gamma$  представлені на рис. 19 (криві 1, 3 вираз (42), криві 2, 4 - вираз (43)).

$$10 \lg(P_s/P_c) = 10 \text{ дБ (криві 1, 2);}$$

$$10 \lg(P_s/P_c) = 3 \text{ дБ (криві 3, 4).}$$

Таким чином, врахована можливість перевищення сигналу АС, що заважає, відповідно в 10 разів (криві 1,2) і в 2 рази (криві 3,4).

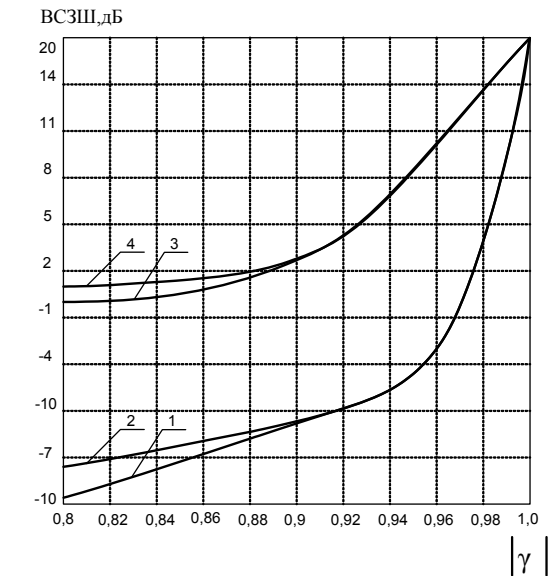


Рис. 19. Графіки залежності ВВК від величини  $\gamma$

Аналіз графіків показує, що з розширенням спектру сигналів і завад ВВК знижується практично до нуля. При реальній широкосмуговості в системах мобільного зв'язку 5G  $\Delta\omega/\omega_0 = (0,001 \div 0,05)$  це зниження складе від 3 до 6 дБ. При цьому алгоритми, що синтезовані за критерієм МВСЗШ, менш чутливі до параметрів широкосмуговості, ніж алгоритми, синтезовані за критерієм МСКВ. При наявності завад, когерентних з корисним сигналом, ефективність алгоритмів

ПЧОС може виявитися нульовою. Практично така ситуація навряд чи реальна, оскільки завади та сигнал повинні бути породжені одним і тим самим задаючим генератором. Помітне зниження ефективності спостерігається при зменшенні ступеня будь-якої просторової когерентності завод. Наявна при цьому неточність фазового фронту заважаючих сигналів за дією аналогічна вибіркоким значенням при оцінці зворотньої матриці. Дані втрати ефективності притаманні асимптотичним методам оцінки ВВК. Рекурсивні алгоритми помітних втрат ефективності не демонструють. Таким чином, при практичній реалізації методів ПЧД доцільно або зменшити апертуру АР при використанні алгоритмів оцінки коваріаційної матриці, або використовувати рекурсивні алгоритми типу Калмана-Б'юсі. Багатоприменевість сигналів у каналах мобільного зв'язку створює значні проблеми, зокрема й при вирішенні задач ПЧД. Рівень багатоприменевості може характеризуватися коефіцієнтом флуктуацій, тобто представленням відношення флуктуаційної та регулярної складових.

Здійснено детальний аналіз ПЧОС при різному відношенні флуктуаційної та регулярної складових квадратурних компонент. Результати аналізу дають підставу стверджувати, що наявність флуктуації як сигналів, так і завод завжди погіршує ефективність ПЧОС. При цьому флуктуації завод є більш деструктивними, ніж флуктуації сигналів при інших рівних умовах.

На рис.20 і рис.21 представлені залежності ефективності ВСЗШ від впливу широкосмугових завод і сигналів.

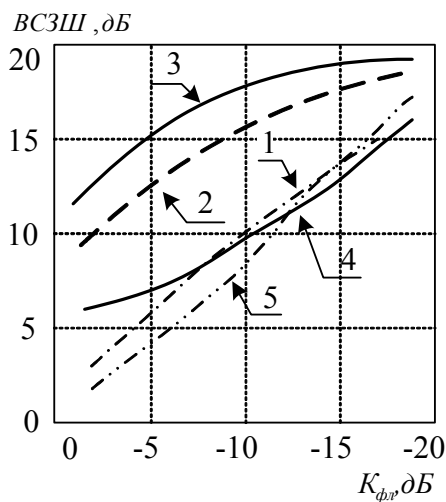


Рис. 20. Залежність ВСЗШ від  $K_{\phi}$  завади

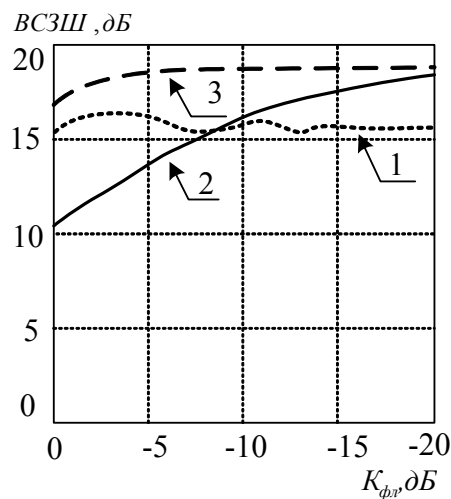


Рис. 21 Залежність ВСЗШ від  $K_{\phi}$  завади (алгоритм Калмана-Б'юсі)

Звідки слідує, що широкопasmовий сигнал слабо впливає на якість обробки. В той же час широкопasmовість завад призводить до зниження ВСЗШ на 15-20% при великих співвідношеннях флуктуаційної та регулярної складових.

У результаті аналізу реалізаційних обмежень виявляється, що реально отримані якісні характеристики можуть істотно відрізнитись від розрахованих. Разом з тим, вибором відповідних параметрів сигналів, антен, алгоритмів ПЧД, а також адаптації у АР ці втрати можуть бути в значною мірою скомпенсовані.

В восьмому розділі здійснено докладний аналіз механізмів контролю доступу (МКД) і механізмів запиту смуги пропускання (ЗСП) на прикладі стандарту безпроводового мобільного доступу IEEE 802.16, який показав, що метод просторово-часового доступу цілком сумісний з уже наявним протоколом доступу стандарту і є прозорим при формуванні необхідної якості сервісів (QoS).

При використанні ААР можливі два механізми призначення частотних ресурсів – сканування карт (Diversity-Map Scan) і прямої сигналізації (Direct Signaling). На рис.22 представлена структура кадру з полем використання ААР.

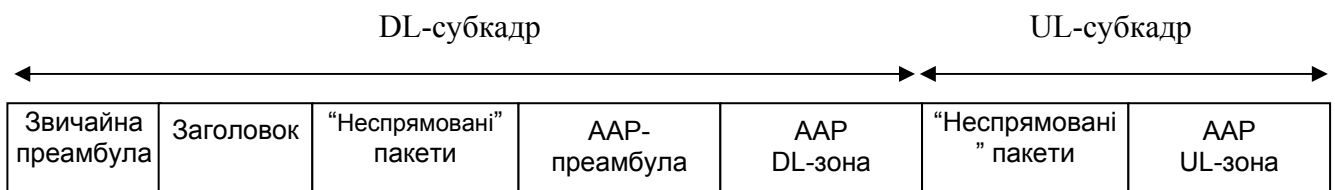


Рис. 22. Структура кадру с зоною ААР стандарту IEEE802.16m

Було показано, що при використанні методу ПЧД багато в чому залежать якісні показники мережі мобільного зв'язку, при цьому основний механізм, через який проявляється характерний вплив ПЧД, є механізм ЗСП. Під пропускнуою здатністю в даному випадку слід розуміти узагальнену смугу ( $\Delta\Omega$ ) часових ( $\Delta T$ ) і просторових ( $\Delta G$ ) частот –  $\Delta\Omega = \Delta T \cdot \Delta G$ . Смуга просторових частот визначається шириною головних пелюсток діаграми спрямованості АР. Відомо, що передача інформації в усій виділеній смузі не ведеться, зазвичай  $\Delta F$  розбивається на  $N_f$  парціальних смуг  $\Delta f$ , наприклад, для LTE це становить 20 МГц. Тобто у виділеній смузі  $\Delta F$  може використовуватися  $N_f \cdot \Delta f$  парціальних смуг часових частот. Аналогічно вся смуга просторових частот  $\Delta G$  розділяється на  $N_\lambda$  – число променів АР, кожен промінь якої утворює смугу просторових частот, у межах якої може бути передана будь-яка з парціальних часових частот. Таким чином, загальне число парціальних частот при ПЧД становить  $N_{ПЧД} = N_f \cdot N_\lambda$ , що в  $N_\lambda$  раз розширює продуктивність системи доступу базової станції.

У разі близького просторового розташування двох або кількох сигналів АС при великій щільності у разі збігу в межах однієї і тієї ж пелюстки АР виникає так званий ефект “засліплення” АР. З метою підвищення якості та продуктивності доступу запропоновано метод комплексного використання просторово-часового і ймовірносного конкурваного доступу з метою забезпечення вирішення колізій сигналів АС, що опинились в одному просторовому спектрі і конкурують за отримання частотного ресурсу.

На основі показника корисного використання каналу проведено аналіз ймовірсно-часових характеристик комбінованого множинного доступу:

$$k = \tau_y / \tau_n, \quad (45)$$

де  $\tau_y$  – час, що витрачається на успішну передачу одного пакета,  $\tau_n$  – середній час, який витрачає система для передачі одного пакета. Очевидно, що  $k \leq 1$ .

Незважаючи на те, що в системі період  $T$  розділений на слоти, для АС середній розмір вікна  $W$  виявляється менше через наявність відстрочки. Розмір вікна є випадковою величиною і його середнє значення –  $W_B = (W - 1) / 2$ . З огляду на те, що в конфлікті може брати участь  $m$  АС, ймовірність того, що будь-яка АС вибере даний слот в час  $t$  дорівнює  $1/W_B$ , таким чином

$$P_t = (1 - 1/W_B)^m. \quad (46)$$

Визначено ймовірність використання каналу:

$$P(m, w) = \frac{\tau_y (m/W_B)(1 - 1/W_B)^{m-1}}{\tau_n (1 - (1 - 1/W_B)^{m-1} (m/W_B) + 1/W_B - 1) + \tau_n (m/W_B)(1 - 1/W_B)^{m-1} + \tau_p (1 - 1/W)^m}. \quad (47)$$

Визначимо ймовірність  $\mu_{fr}$  того, що станція відправляє ЗСП у довільно обраному слоті в даному кадрі. Передача ЗСП проводиться при лічильнику очікування відправки, що дорівнює 0, незалежно від етапу вирішення конфліктів, тому ймовірність того, що для передачі обраний даний кадр, дорівнює

$$\tau_{fr} = \sum_{i=0}^m q_{i,0} = \frac{q_{0,0}}{1 - p_c}. \quad (48)$$

Оскільки всередині кадру слоти для відправки ЗСП вибираються рівно-ймовірно, а загальне їх число дорівнює  $K$ , то ймовірність вибору довільно обраного слота в довільно обраному кадрі дорівнює:

$$\tau_{fr} = K^{-1} \sum_{i=0}^m q_{i,0} = \frac{q_{0,0}}{(1 - p_c)K}, \quad (49)$$

Ймовірнісна модель конкурваного доступу на основі виразу ймовірності ЗСП може бути описана виразом

$$q_{0,0} = \left[ \frac{(1 - p_c)(1 + W_0 + 2p_c T_{rt}) + pW_0(1 - (2p_c)^M)}{2(1 - 2p_c)(1 - p_c)} \cdot \frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \right]^{-1}. \quad (50)$$

Колізія при передачі ЗСП відбувається, якщо хоча б одна з решти  $N-1$  станцій також вибрала даний слот для відправки ЗСП, тобто ймовірність колізії дорівнює

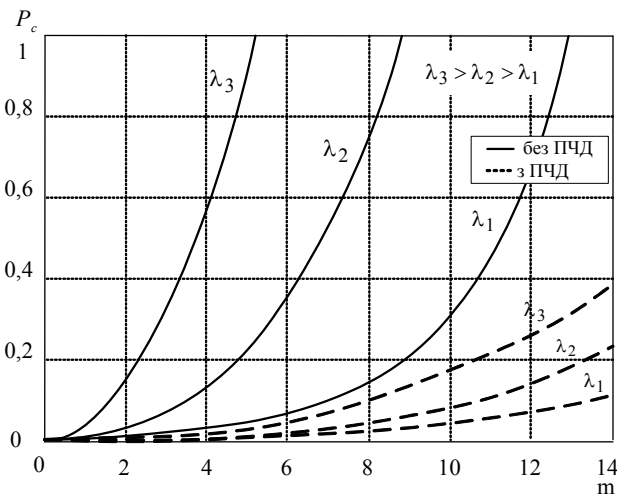


Рис.23. Графік залежності ймовірності колізій від числа АС

сивності заявок  $\lambda$ .

З графіків випливає, що зі збільшенням числа активних АС ймовірність колізій різко збільшується. У той же час, при тих же вихідних даних у системі з ПЧД ця ймовірність зменшується в десятки разів при кількості променів  $N = 12$ .

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі розв'язується актуальна науково-прикладна проблема, що полягає у розробці методології системних науково-технічних рішень щодо підвищення продуктивності доступу у системах мобільного зв'язку на основі використання методів адаптивної просторово-часової обробки сигналів при забезпеченні заданої якості послуг і незмінності основних алгоритмів функціонування мобільної мережі.

У процесі розв'язання поставленої наукової проблеми отримані наукові та практичні результати:

1. В умовах зростання кількості та якості потреб мобільного зв'язку все більш гострою стає проблема ефективного використання наявних і освоєння нових ресурсів, методів організації зв'язку, вибору інформаційних сигналів, методів доступу та інш. Одним із перспективних ресурсів, що на сьогодні лише пасивно використовується, є просторово-поляризаційний ресурс, задіяння якого для підвищення ефективності доступу забезпечує можливість заощадження радіочастотного ресурсу з одночасним підвищенням продуктивності систем мобільного зв'язку.

$$p_c = 1 - [1 - \tau]^{N-1} = 1 - \left[ 1 - \frac{q_{0,0}}{(1-p_c)K} \right]^{N-1}. \quad (51)$$

У припущенні використання ПЧД (50) набуває вигляду

$$p_{c\_пчд}^1 = 1 - \prod_{L=0}^N [1 - p_c] \quad (52)$$

де  $N$  – число променів АР.

Таким чином, отримана система з двох рівнянь (50) і (51), вирішуючи яку, знаходимо  $q_{0,0}$  і  $p_c$ . На рис. 23 представлена залежність ймовірностей колізій залежно від числа АС при різній інтен-

2. Запропонована модель індивідуального просторово-часового доступу АС до ресурсів БС, яка полягає у формуванні для сигналів кожної АС відповідного амплітудно-фазового розподілу за допомогою вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки з використанням методів адаптивної процедури управління вектором вагових коефіцієнтів. Для кожної з цих АС забезпечується максимально вдале співвідношення сигнал / завада + шум, причому сигнали інших АС, що здійснюють запит, розглядаються як завадові.

АР може бути побудована на антенних елементах з однією або різною поляризацією, що відповідно розширює простір використаного фізичного ресурсу.

3. Враховуючи високодинамічний стан каналів мобільного зв'язку, який обумовлений просторовим переміщенням АС і багатопроменевістю поширення сигналів, для вирішення задач адаптивного управління просторово-часовим доступом запропоновано використати математичні рекурсивні процедури представлені в просторі змінних стану, що забезпечують оптимальну оцінку вектору вагових коефіцієнтів. При високій ефективності ці процедури потребують мінімального часу, для досягнення сталого стану, що складає 8-10 кроків ітерацій на відміну від традиційно використовуваних асимптотичних процедур, для яких цей час на 2-3 порядки більший. У якості таких можуть виступати методи на базі марківської теорії нелінійної, або лінійної фільтрації, зокрема методи фільтрації Калмана – Б'юсі.

4. Для забезпечення збіжності алгоритмів просторово-часового доступу за період прийому викличних сигналів запропонована методика мінімізації часу досягнення сталого режиму з урахуванням початкових даних для процедури просторово-часового доступу. Показано, що використання початкових даних забезпечує збіжність процедури до сталого стану за 5-8 кроків. Показано, що початкові дані можна одержати на основі оцінки напряму приходу сигналу станції доступу, які слід використовувати у якості опорних сигналів в алгоритмі просторово-часового доступу.

5. Для вирішення задачі виявлення викличних сигналів абонентських станцій при просторово-часовому доступі в системах мобільного зв'язку в результаті аналізу параметричних і непараметричних методів обробки сигналів у якості основного вибрано метод параметричного енергетичного виявлення, заснованого на використанні Q-функцій Маркума, який в силу своєї простоти і універсальності застосовується в каналах із завмираннями для виявлення детермінованих сигналів відомої структури.

Задача ПЧД повинна вирішуватись на інтервалі часу прийому викличного сигналу АС з тим, щоб з початку прийому інформації всі процеси ПЧД були вирішені. Для цього запропонований метод скорочення процедури виявлення

запиту виклику абонентської станції з використанням непараметричної процедури оптимального прийому  $k$  сигналів з  $m$ -переданих, з урахуванням початкової стадії процедури виявлення, що дозволило заощадити відрізок часу процесу виявлення визивних сигналів для досягнення сталого режиму для адаптивного алгоритму просторово-часового доступу.

6. Проведено аналіз, на основі якого здійснено вибір методів визначення напрямку приходу сигналів абонентів мобільної мережі. Для організації просторово-часового доступу у нисхідному каналі зв'язку для подальшої установки головної пелюстки діаграми спрямованості в напрямку АС, яка здійснює запит на виклик, і так само задача супроводу сигналу АС протягом сеансу зв'язку, показав що на основі зіставлення оцінок роздільної здатності алгоритмів напрямку приходу сигналів від АС, з'являється можливість здійснювати раціональний вибір алгоритму при різних сигнально-завадових умовах і конфігурації антенної решітки. Були проаналізовані методи понадроздільної здатності з отриманням численних оцінок, які показали, що роздільна здатність даних методів дозволяє їх використання в задачах просторово-часового доступу при строго обмежених умовах.

Одержані дані щодо напрямків приходу рекомендуються для подальшого використання в алгоритмі просторово-часового доступу в якості опорних сигналів, а також при вирішенні задачі підвищення енергетичного потенціалу з віддаленими окремими станціями в напрямку нисхідного каналу.

7. Запропонована методика аналізу реалізаційних обмежень при процедурі просторово-часового доступу, що враховує похибки початкових даних щодо сигнально-завадової обстановки, взаємний вплив між антенними елементами, характеристики алгоритмів обробки сигналів (МСКВ, МВСЗ та ін.), багатопроменевість, широкосмуговість і просторову когерентність сигналів та завад.

Показані втрати ефективності сигналів просторово-часового доступу, при наявності багатопроменевої структури сигналів мобільного зв'язку, які можуть сягати від 2-3 до 7-10 дБ в залежності від інтервалу кореляції. Для компенсації витрат у роботі запропоновано використання процедури ітеративної еквалізації і оцінки багатопроменевого каналу у частотній області, яка передує просторово-часовому доступу, що при прийомі OFDM сигналів призводить до збільшення відношення регулярної та флуктуаційної компонент, збільшення інтервалу кореляції на 25-30%, і практично повністю компенсує вказані витрати.

Показано, що збільшення швидкості збіжності процесу адаптації алгоритмів управління адаптивної антенної решітки на основі даних про напрямки приходу сигналів на початковій стадії забезпечує необхідну якість алгоритму просторово-часового доступу, незважаючи на наявність втрат, викликаних вказаними обмеженнями.

8. Проведений аналіз просторових методів підвищення продуктивності показав, що значне розширення можливостей існуючої інфраструктури вдається отримати при використанні мікро- і фемтостільників. При плануванні просторового розміщення мікро- і фемтостільників виникає необхідність раціонального їх розміщення в приміщенні, на площі. Запропоновано метод планування просторового розміщення фемто та мікростільників мобільної мережі, що базується на теорії оптимізації упаковки 2-х та 3-х мірних об'єктів шляхом одиночного приєднання об'єктів розміщення на основі логічного вибору з уникненням традиційних  $NP$ -повних задач перебору, який дозволяє скоротити час пошуку точки установки на порядок.

9. При реалізації просторово-часового доступу можлива поява ефекту “засліплення” AP у випадку, коли 2 або більше сигналів AC трапляють в одну і ту же смугу просторових частот. Дана колізія може бути вирішена з використанням методів частотно-часового доступу, зокрема на базі ймовірнісного конкурентного доступу. Показано, що в межах однієї смуги просторових частот можна використати  $N$  частотно-часових сигналів на базі ймовірнісного конкурентного алгоритму (BEV – Binary Exponential Backoff – метод подвійної експоненціальної відстрочки), що в потенціалі можна одержати  $N_{чч} \times N_{пч}$  каналів доступу. Використання конкурентного доступу надає можливість якісного доступу в умовах збігу та близького просторового розташування двох або більше сигналів абонентських станцій при їх великій щільності. Показано, що за рахунок спільного використання методів ймовірнісного конкурентного доступу з просторово-часовим доступом вдається забезпечити вирішення колізій сигналів абонентських станцій за мінімальний час у межах однієї і тієї ж пелюстки антенної решітки при її “засліпленні”. Аналіз показав, що метод просторово-часового доступу цілком сумісний з уже існуючим протоколом доступу і формує якість сервісів (QoS), що визначається механізмами контролю доступу (МКД) і механізмами запиту смуги пропускання (ЗСП).

10. Розроблена аналітична модель, що дозволяє визначити характеристики часу обслуговування пакетів при використанні механізму запиту смуги пропускання AC і порівняти при цьому дані характеристики для випадку використання методу просторово-часового доступу і без нього. Ці дані дозволяють зробити висновок, що включення механізму просторово-часового доступу призводить до підвищення якісних показників часу обслуговування у 8-12 разів.

11. З метою більшої оперативності при формуванні багатопроменевої діаграми спрямованості кругової антени рекомендовано використання методу синтезу парціальних діаграм, що дозволяє отримати більш точне, хоча й енергетично менш ефективне рішення. Зроблено оцінку продуктивності цифрового обчислювача, що реалізує алгоритм управління діаграмою спрямованості багато-

променевої антени. Показано, що для формування одного парціального променя необхідно  $1436 \cdot 10^3$  операцій, для формування багатопроменевої діаграми спрямованості знадобиться  $1759 \cdot 10^8$  операцій.

12. У роботі поряд із централізованими методами доступу, що реалізуються на базі центрального процесора розглянуто метод децентралізованого доступу з використанням технології P2P, коли відповідно до надходження заявки від АС мережею виділяється необхідний ресурс незалежно від інших заявок, що дає можливість істотно підвищити продуктивність і надійність доступу. Запропоновано математичну модель управління потоком фрагментів в піринговій мережі P2P-TV при передачі відеоконтенту з використанням критерію мінімуму сумарної втрати часу на обслуговування  $N$ -фрагментів інформаційної послідовності. Отримане рішення приводить до процедури динамічного програмування.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Москалец Н.В., Наорс И. Анад. Повышение эффективности использования радиочастотного ресурса при внедрении систем широкополосного беспроводного доступа WiMAX. *Радиотехника*. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. Вып.155.С. 186–190.

2. Москалец Н.В., Селиванов К.А., Наорс И. Анад. Анализ энергетических параметров системы WiMAX. *Радиотехника*. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. Вып. 159. С. 143–147.

3. Москалец, Н.В., Наорс И. Анад. Анализ влияния интерференции на уровень принимаемого сигнала в системе WiMAX. *Радиотехника*. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2010. Вып. 163. С. 112–117.

4. Москалец Н.В., Наорс И. Анад. Методология проведения экспериментальных исследований по тестированию производительности широкополосной беспроводной сети IEEE 802.16e. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 4/3(52). С. 11–15.

5. Москалец Н.В., Селиванов К.А., Никитенко Т.В. Анализ нелинейных искажений в радиотракте с применением различных методов оценки нелинейности. *Электронное научное специализированное издание «Проблемы телекоммуникаций»*. 2011. № 2 (4). С. 150–161. URL: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_selivanov\\_radio.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_selivanov_radio.pdf).

6. Москалец Н.В., Скибин В.П. Модель состояния телекоммуникационной сети в условиях случайных воздействий. *Международный научный журнал «Наука и Мир»*. 2014. Том 1, №3 (7). С.181–184.

7. Москалец Н.В., Поповская Е.О. Модели одноранговых пиринговых сетей для передачи потоков IPTV. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. Ч. 2. № 4(23). г. Екатеринбург. С. 46 – 50.

8. Москалец Н.В. Метод использования генетических алгоритмов при распределении ресурсов в группировке радиоэлектронных средств. *Национальная ассоциация ученых (НАУ). Ежемесячный научный журнал*. 2015. № 4 (9), Часть 2. С.141–143.

9. Москалец Н.В. Методика анализа электромагнитных взаимодействий в больших радиоэлектронных системах. *Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты»*. 2015, 30 июня. Россия, г.Тамбов. С.89–92.

10. Москалец Н.В. Адаптивный метод компенсации задержки на границах разделения беспроводной среды и транспорта. *Сборник трудов по материалам XIV Международной научно-практической конференции "Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия"*. 2015, 14.08-15.08. Россия, г. Новосибирск. С. 43–48.

11. Москалец, Н.В., Скибин В.П. Анализ состояния ТКС по результатам самодиагностирования. *Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи*. 2014. №1. С.329–333.

12. Moskalets N.V. Mathematical modeling of electromagnetic interactions in the large radioelectronic systems. *Science and Education Studies "Stanford University Press"*. 2015. № 2(16). P. 398-402.

13. Moskalets N.V. Adaptive method of delay compensation on boundaries separating wireless environment and transport. *«American Journal of Science and Technologies»*. Princeton University Press. 2015. № 2(20). P. 642–653.

14. Москалец Н.В., Поповская Е.О., Тарасов К.А. Оптимизация суммарного взвешенного времени обслуживания в пиринговой сети. *Международный научно-исследовательский журнал Научный альманах*. 2016. № 6-2 (20). С110–116.

15. Москалец Н.В., Наорс И Анад Алсалим, Теплицкая С.Н. Анализ методов определения направления прихода сигналов в задачах пространственно-временного доступа. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 4/9 (82). С.36–44.

16. Москалец, Н.В. Анализ методов обнаружения вызывных сигналов абонентских станций в мобильных системах связи. *Научный журнал «ScienceRise»*. 2016. № 8/2 (25). С.26–35.

17. Moskalets N.V., S.Teplytska. Analysis of methods using for superresolution of the signals in the tasks of space-time access. *Scientific journal «EUREKA: Physics and Engineering»*. 2016. Volume 5(6). P.16–24.

18. Москалец Н.В. Методы организации пространственно-временного доступа в системе мобильной связи. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. 2016. № 4(1176). С.49–58.

19. Москалец Н.В., Поповский В.В. Анализ применимости алгоритмов адаптивной пространственно-временной обработки в системах мобильной связи. *Электронное научное специализированное издание «Проблемы телекоммуникаций»*. 2016. №2(19). С.3–27.

URL:[http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162\\_popovsky\\_stsp.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162_popovsky_stsp.pdf).

20. Москалец, Н.В. Анализ влияния ограничений при реализации методов пространственно-временного доступа. *Вісник національного технічного університету "ХПИ"*. 2016. №50 (122). С.95–100.

21. Москалец Н.В., Поповская Е.О. Анализ динамики пиринговой сети. *Международный научный журнал «Символ науки»*. 2017. № 03-2. С.106–109.

22. Москалец, Н.В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов. *Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* 2017. Вып.188. С.126–135.

23. Москалец Н.В. Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы. *Вісник національного технічного університету "ХПИ"*. 2017. №16 (1238). С.53–61.

24. Moskalets M. Evaluating The Effectiveness Of Adaptive Antenna Array Weight Coefficients In Discretization. *International Journal "Technology audit and production reserves"*. 2017. №2/2(34). С.12–18.

25. Москалец Н.В. Использование метода оптимизации упаковки объектов в задачах планирования фемтосот мобильных систем связи. *Наукове періодичне видання "Системи управління, навігації та зв'язку"*. 2017. №2(42). С.185–187.

26. Москалец Н.В., Поповская Е.О. Функциональная модель управления в сетях пиринговой связи. *Научный журнал "Радиоэлектроника и информатика"*. ХНУРЕ. 2017. №1. С. 48–52.

27. Москалец Н.В., Поповская Е.О. Фрагментация TV-контента в P2P-сетях с помощью процедуры динамического программирования. *Зв'язок. №2(126), (березень- квітень), 2017. С.14–17.*

28. Москалец, Н.В. Наорс І. Анад. Проблемы внедрения в Украине систем широкополосного беспроводного доступа WiMAX с учетом эффективного использования частотного ресурса. *Зб. матер.13-го Міжнародного молодіжного*

форума «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.», м.Харків, ХНУРЕ, 2009р. Харків, 2009. С. 153.

29. Белокурський, Ю.П., Н.В.Москалец, О.В.Коваленко, В.М.Захаров. Геоінформаційні технології для планування зв'язку та розміщення засобів радіоелектронної боротьби Зб. тез доповідей III-ї науково-практичної конференції "Наукове забезпечення службово-бойової діяльності внутрішніх військ МВС України", секція 2, м.Харків, Академія внутрішніх військ МВС України, 2011 р.,30-го березня. Харків,2011. С. 76–78.

30. Москалец, Н.В., Василенко Ю.А. Аналіз характеристик систем широкополосного безпроводного доступу 4G. *Науково-технічна конференція Академії внутрішніх військ МВС України «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку»*, м.Харків, 2012р. Харків, 2012. С.12-13.

31. Vasilenko Yuriy, Hussein Y., Moskalets M. Synthesis algorithm for determining the direction of the arrival signal from mobile station. *12-th International Conference. The experience of designing and application of cad systems in microelectronics (IEEE)*, Polyana Svalyava (Zakarpattya), Ukraine 19 - 23 February. 2013. Поляна Свалява, 2013. С.369–372.

32. Москалец Н.В., Василенко Ю.А. Аналіз вероятностных характеристик при комбинированном многостанционном доступе. *Материалы 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013) (IEEE)*, Севастополь, 8-13 сентября, 2013 г., в 2 т. Севастополь: Вебер, 2013г., Т.1. Севастополь,2013. С. 466-467.

33. Moskalets, M.V. Method of detection and evaluation of activated subscriber stations in a mobile system communication 4G. *First International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (IEEE PIC S&T` 2014)*, Ukraine, Kharkiv, NURE, 2014, October 14-17. Харків, 2014. С.122–124.

34. Москалец Н.В. Андриенко О.В. Метод определения числа сигналов абонентских станций. *Матеріали 67-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів*, м.Одеса, 2014 р., 3-5 грудня. Одеса, 2014. С.58.

35. Moskalets N., Popovskaya E. Mathematical scheduling models of IPTV peer to peer networks. *Матеріали 3-ї Міжнародної наукової конференції «Інформація, комунікації, суспільство» (IEEE)*, м.Славське, 21-24 травня, 2014р., Славське, 2014. С. 20–21.

36. Москалец, Н.В. Аналіз задач реализации пространственно-временного доступа в системах мобильной связи 4-го поколения. Зб. матер. 19-

го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.», м.Харків, ХНУРЕ, 20 - 22 квітня, 2015р. Харків, 2015. С. 69-70.

37. Moskalets, M.V. Effective use of multibeam antenna and space-time multiple access technology in modern mobile communication systems. *X International Conference on Antenna Theory and Techniques Proceedings (IEEE)*, Ukraine, Kharkiv, NURE, 21-24 april, 2015. Харків, 2015. С.1–2.

38. Москалец, Н.В., В.А.Лошаков, К.А.Селиванов. Методы решения задач ЭМС средствами антенной техники в тропосферной связи. *Первая Международная научно-техническая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи» (ЭМС-2015)*, м. Харків, ХНУРЕ, 27 травня, 2015р. Харків, 2015. С.153.

39. Moskalets M., Teplitskaya S. Analysis of efficiency for space-time processing of signals from subscriber stations in implementation of space-time division multiple access. *2nd International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PIC S&T` 2015)*. (IEEE). Kharkiv, NURE, October 13-15, 2015, T1. Харків, 2015. С.234.

40. Москалец Н.В. Анализ методов повышения производительности современных сетей мобильной связи на основе организации пространственно-временного доступа. Зб. матер. 20-го Ювілейного міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.», м.Харків, ХНУРЕ, 19-21 квітня, 2016. Харків, 2016. С. 53–54.

41. Москалец Н.В., Поповский В.В. Оптимальные методы компенсации задержек доступа. *Вторая Международная научно-техническая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи» (ЭМС 2016)*, г.Харьков, 27 мая, ХНУРЭ, 2016г. Харків, 2016. С. 95–98.

42. Moskalets M., Kuzminich I. Methods of Femtocells Planning Using Methods of Packaging Optimization. *3rd International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PIC S&T` 2016)* (IEEE), Kharkiv, NURE, October 4-6, 2016. Харків, 2016. С. 211-213.

43. Москалец Н.В., Колоколов А.В. Анализ методов сверхразрешения в задачах пространственно-временного доступа. *V-а Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»*. Україна, Чернівці, 3-5 листопада, 2016. Чернівці, 2016. С.200–201.

44. Москалец Н.В., Тарасов К.А. Методы организации пространственно-временного доступа в системах мобильной связи. *Третий Всеукраинской научно-технической конференции «Информатика, управление и искусственный ин-*

*теллект*» (ИУИИ-2016) (г. Харьков, НТУ "ХПИ", кафедра вычислительной техники и программирования), 23-25 ноября, 2016р. Харків, 2016. С.58.

45. Москалец, Н.В., Поповский В.В. Упорядоченный отбор с использованием генетического алгоритма приспособленности. *Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Актуальні питання розвитку, удосконалення та експлуатації озброєння та військової техніки в Національній гвардії України»*, м.Харків, 17 листопада, 2016р. Харків, 2016. С.54-55.

46. Москалец, Н.В. Оценка влияния суммы дестабилизирующих факторов при реализации методов пространственно-временного доступа. *21-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь В XXI веке», конференция «Перспективы развития телекоммуникационных и информационно-измерительных технологий»*. Харків, ХНУРЕ, 25-27 квітня, 2017р. Харків, 2017. С.55-56.

47. Москалец, Н.В. Анализ системных подходов по использованию методов пространственно-временного доступа. *Научно-практическая конференция «Применение информационных технологий в подготовке и деятельности сил охраны правопорядка»* (Национальная академия Национальной гвардии Украины, г.Харьков, 15-16 марта, 2017г.). Харків, 2017. С.129–131.

48. Москалец, Н.В., Поповская Е.О. Методы управления потоком фрагментов в пиринговых сетях. *Видання "Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій»*.Київ,18 квітня, НДІ телекомунікацій ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2017р. Київ, 2017. С.1-3.

49. Moskalets, M. Analysis of Methods Direction of Arrival Estimation in Space-Time Access. *Первая МНТК «Компьютерные и информационные системы и технологии»*, г.Харьков, ХНУРЭ, 20-22 апреля, 2017г. Харків, 2017. С.54.

## АНОТАЦІЯ

**Москалець М.В.** Методи просторово-часового доступу у перспективних системах мобільного зв'язку. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи і мережі. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2018.

На відміну від наявних рішень щодо реалізації просторово-часового доступу, заснованих на формуванні відповідної багатопроменевої діаграми спрямованості антенної решітки, в роботі запропонована реалізація методу індивідуального просторово-часового доступу абонентської станції до ресурсів базової станції, яка полягає у формуванні для сигналів кожної абонентської станції від-

повідного амплітудно-фазового розподілу за допомогою вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки з використанням методів адаптивної процедури управління вектором вагових коефіцієнтів.

На основі проведеного аналізу оптимальних алгоритмів адаптивної обробки сигналів в антенній решітці показано, що більш конструктивним для використання в задачах просторово-часового доступу є рекурсивні процедури, що дозволяють здійснювати корекцію вектора вагових коефіцієнтів в динамічній, в тому числі нестационарній завадово-сигнальній обстановці, що особливо важливо для зв'язку з мобільними абонентськими станціями і дозволяє скоротити час на обробку викличних сигналів, при незмінності основних режимів роботи мобільної мережі.

**Ключові слова:** мобільний зв'язок, просторово-часовий доступ, антенна решітка, адаптивна просторово-часова обробка сигналу, рекурсивна процедура, напрямок приходу сигналів, вибіркова коваріаційна матриця.

## АННОТАЦІЯ

**Москалец Н.В.** Методы пространственно-временного доступа в перспективных системах мобильной связи. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы, которая заключается в разработке методологии системных научно-технических решений по повышению производительности доступа в системах мобильной связи на основе использования методов адаптивной пространственно-временной обработки сигналов при обеспечении заданного качества услуг. Показано, что одним из перспективных ресурсов, который на сегодня только пассивно используется, является пространственно-поляризационно-временной ресурс, задействование которого для повышения эффективности доступа обеспечивает возможность экономии частотного ресурса с одновременным повышением производительности систем мобильной связи.

В отличие от существующих решений по реализации пространственно-временного доступа, основанных на формировании соответствующей многолучевой диаграммы направленности антенной решетки, в работе предложена реализация метода индивидуального пространственно-временного доступа абонентской станции к ресурсам базовой станции, которая заключается в формировании для сигналов каждой абонентской станции соответствующего амплитудно-фазового распределения с помощью весовых коэффициентов адаптивной

антенной решетки с использованием методов адаптивной процедуры управления вектором весовых коэффициентов. Для каждой из этих абонентских станций обеспечивается максимально удачное соотношение сигнал/помеха+шум, при этом сигналы других абонентских станций, осуществляющих запрос на связь, рассматриваются как помехи.

На основе проведенного анализа оптимальных алгоритмов адаптивной обработки сигналов в антенной решетке показано, что более конструктивным для использования в задачах пространственно-временного доступа является рекурсивные процедуры, позволяющие осуществлять коррекцию вектора весовых коэффициентов в динамической, в том числе нестационарной помеховой-сигнальной обстановке, что особенно важно для связи с перемещающимися абонентскими станциями, и позволяет сократить время на обработку вызывных сигналов, при неизменности основных режимов работы мобильной сети. На основе разработанных системных научно-технических решений предложен метод реализации пространственно-временного доступа в виде 2-х этапной процедуры: 1) прием и обработка антенной решеткой вызывного сигнала абонентской станции и формирование вектора весовых коэффициентов для каждого принимаемого сигнала; 2) пространственно-временная обработка каждого из принимаемых сигналов абонентской станции.

Разработана методика анализа реализационных ограничений при процедуре пространственно-временного доступа, учитывающая погрешности начальных условий, данные по сигнально-помеховой обстановке, взаимное влияние между антенными элементами, характеристики алгоритмов обработки сигналов, многолучевость, широкополосность и пространственную когерентность сигналов и помех.

Проведен анализ реализационных ограничений, в результате которого показано, что увеличение скорости сходимости процесса адаптации алгоритмов управления адаптивной антенной решеткой на основе данных о направлениях прихода сигналов на начальной стадии обеспечивает необходимое качество алгоритма пространственно-временного доступа, несмотря на наличие потерь вызванных указанными ограничениями.

Предложена методика минимизации времени достижения установившегося режима с учетом исходных данных для процедуры пространственно-временного доступа с целью обеспечения сходимости алгоритмов пространственно-временного доступа за период приема вызывных сигналов. Показано, что использование исходных данных обеспечивает сходимость процедуры к устойчивому состоянию за 5-8 шагов. Показано, что начальные данные можно получить на основе оценки направления прихода сигнала станции доступа, ко

торые следует использовать в качестве опорных сигналов в алгоритме пространственно-временного доступа.

**Ключевые слова:** мобильная связь, пространственно-временной доступ, антенная решетка, адаптивная пространственно-временная обработка сигнала, рекурсивная процедура, направление прихода сигналов, выборочная ковариационная матрица.

## ANNOTATION

**Moskalets M. V.** – Methods of space-time access in advanced mobile communication systems. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor of Engineering Sciences degree in the speciality 05.12.02 – Telecommunication systems and networks. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the current scientific and applied problem, which consists in developing a methodology for system scientific and technical solutions of increasing access performance in mobile communication systems based on the use of adaptive space-time signal processing methods while ensuring a specified quality of services.

It is shown that one of the promising resources that is currently only passively used is the spatially polarized resource, which, in order to increase the efficiency of access, provides the possibility of saving the frequency resource while increasing the productivity of mobile communication systems.

In contrast to the existing solutions for space-time access based on the formation of the corresponding multibeam directivity pattern of the AR, the implementation of the method of individual space-time access for the subscriber station to resources of the base station is proposed, which consists in generating a corresponding amplitude-phase distribution for the signals of each subscriber station by the adaptive antenna array weight coefficients using adaptive methods of the procedure for controlling the weight vector. For each of these subscriber stations, the most favorable signal-to-interference-plus-noise-ratio is provided, while signals from other subscriber stations that make the request for communication are treated as interferences.

**Keywords:** mobile communications, space-time signal processing, antenna array, adaptive space-time signal processing, recursive procedure, direction of signal arrival, sample covariance matrix.