

ІВАНОВ ВІКТОР АНДРІЙОВИЧ



УДК 621.396.2

**ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПРИЙОМУ
СИГНАЛІВ В ЦИФРОВИХ ТРАНКІНГОВИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова
Державного комітету зв'язку та інформатизації України.

Науковий керівник –

кандидат технічних наук, доцент **Михайлов
Микола Костянтинович**, Одеська національ-
на академія зв'язку ім.О.С.Попова, доцент
кафедри ТЕД та СРЗ;

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Михайлов
Сергій Анатолійович**, Одеська національна
морська академія, завідувачий кафедрою те-
оретичних основ радіоелектроніки;

кандидат технічних наук, професор **Мазур-
ков Михайло Іванович**, Одеський
національний політехнічний університет,
професор кафедри радіотехнічних систем.

Провідна установа –

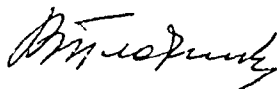
Український науково-дослідний інститут
зв'язку Державного комітету зв'язку та ін-
форматизації України, м.Київ.

Захист відбудеться " 16 " травня 2003 року о 10.00 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 41.816.02 в Одеській національній академії
зв'язку ім. О.С. Попова за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної
академії зв'язку ім. О.С. Попова за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

Автореферат розісланий " 14 " квітня 2003 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 41. 816.02, д. т. н., професор



Плотніков В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Концепцією розвитку зв'язку України до 2010 року, затвердженою Постановою Кабінету Міністрів за № 2238 від 9 грудня 1999 р., та другою редакцією КП ЄНСЗ України передбачено завершення до 2010 року комплексу заходів щодо створення загальнонаціональної системи корпоративно-відомчого рухомого зв'язку України на базі сучасних цифрових транкінгових систем. З метою виконання поставлених завдань на перехідний період необхідним вбачається розв'язання цілого ряду науково-технічних задач, спрямованих на загальне підвищення ефективності цифрових транкінгових систем, що плануються до впровадження в Україні.

В представленій дисертаційній роботі розглядаються питання підвищення ефективності цифрових транкінгових систем за показниками завадостійкості та обчислювальної складності сигнальної обробки приймачами базових станцій. Важливість і актуальність задач підвищення системної ефективності цифрових транкінгових систем обумовили появу багатьох наукових монографій та публікацій як у вітчизняній, так і в зарубіжній літературі. Значний внесок у розробку методів підвищення завадостійкості сучасних систем рухомого зв'язку внесли зарубіжні та вітчизняні вчені С. Райс, М. Накагамі, У. Лі, Д. Проакіс, С. Верду, Л.Є. Варакін, Ю.А. Громаков, І.М. Пишкін, В.Л. Банкет, Е.О. Сукачов, М.К. Михайлов.

У той же час, через стрімкий загальний розвиток сектора рухомого зв'язку в світі, появу нових стандартів та систем, можливо констатувати незавершеність досліджень цілого ряду питань стосовно підвищення завадостійкості прийому сигналів в сучасних цифрових транкінгових системах. Зокрема, в опублікованих наукових працях недостатньо висвітлені питання підвищення завадостійкості приймачів базових станцій цифрових транкінгових систем під час експлуатації в несприятливих умовах (нерівномірності рельєфу, значні рівні багатопроменевих замирань, значні доплерівські зсуви частот за рахунок високих швидкостей руху абонентів). Слід вважати, що перспективні наукові дослідження питань підвищення завадостійкості цифрових транкінгових систем доповнять отриманими результатами фундаментальну теорію завадостійкості рухомого зв'язку та сприятимуть позитивному вирішенню проблеми докорінного технічного переозброєння сектора корпоративно-відомчого зв'язку України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота включає результати системних досліджень, які виконувались за безпосередньої участі автора у таких науково-дослідних роботах на замовлення Державного Комітету зв'язку та інформатизації України і ВАТ "Укртелеком".

1. Концепція створення єдиної національної мережі оперативного рухомого радіозв'язку (ЄНМ ОРРЗ). Звіт про науково-дослідну роботу / УНДІРТ; Керівник М.К. Михайлов. – № ДР 0199U001475. – Одеса. – 1999. – 120 с.

2. Розробка концепції та програми переходу України до систем рухомого зв'язку 3-го покоління. Звіт про науково-дослідну роботу (заклучний) / УНДІРТ; Керівник М.К. Михайлов. – КП.64.20.13.–№ ДР 0101U005327. – Одеса. – 2001. – 153 с.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення загальної ефективності цифрових транкінгових систем за показниками завадостійкості прийому інформаційних сигналів та обчислювальної складності застосованих методів сигнальної обробки.

Для досягнення мети моделі розв'язані такі задачі:

1. Розробка лінійних моделей покращеної точності для цифрових радіоканалів транкінгових систем.
2. Підвищення точності алгоритмів каналної оцінки для цифрових радіоканалів транкінгових систем.
3. Покращення показників завадостійкості еквалайзування для цифрових радіоканалів транкінгових систем.
4. Визначення ефективної довжини тренувальних послідовностей для різних алгоритмів сигнальної обробки на прийомі.

Об'єктом досліджень у роботі є цифрові транкінгові системи.

Предмет досліджень – характеристики завадостійкості приймачів базових станцій цифрових транкінгових систем.

Методи дослідження, що використовуються для вирішення поставлених задач: теорія матриць, теорія систем, математична статистика, математичне моделювання та імітаційне моделювання на ЕОМ.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Запропоновано новий метод моделювання цифрових радіоканалів транкінгових систем на основі послідовної апроксимації функції формування імпульсів та символної вибірки зі зміщенням.
2. Покращено точність алгоритму каналної оцінки шляхом застосування методу проектування сигнального та шумового підпросторів зменшеного рангу.
3. Розв'язано задачу оцінки ефективної кількості елементів антенних решіток приймачів базових станцій цифрових транкінгових систем підвищеної завадостійкості.
4. Розроблено модель каналного еквалайзера з вирішуючим зворотнім зв'язком, що має покращені показники завадостійкості.

5. Визначено ефективну довжину тренувальних послідовностей для цифрових транкінгових систем стандартів TETRA і TETRAPOL.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені методи, результати аналізу й оптимізації можуть бути використані для підвищення завадостійкості приймачів базових станцій цифрових транкінгових систем.

1. Теоретичні дослідження з питань підвищення завадостійкості прийому сигналів в цифрових транкінгових системах доведені до розрахункової методики, що дозволяє синтезувати приймачі підвищеної завадостійкості для різних умов розповсюдження радіосигналів.

2. Застосування каналного оцінювача зменшеного рангу, що має покращену точність, дає можливість збільшити розміри зон обслуговування цифрових транкінгових систем та оптимізувати частотно-територіальне планування мереж.

3. Застосування каналних еквалайзерів зменшеного рангу дозволяє покращити відношення сигнал/завада на співпадаючій частоті та підвищити ефективність частотно-територіального планування (подальше розширення зон обслуговування, збільшення зон взаємного перекривання).

4. Обґрунтоване зменшення на 20% ефективної довжини тренувальних послідовностей для транкінгових систем стандартів TETRA і TETRAPOL без втрати норм якості обслуговування дозволяє підвищити пропускну здатність каналів для передавання інформаційних повідомлень на 2 %.

Основні теоретичні висновки та практичні результати дисертаційної роботи впроваджені при виконанні двох НДР в Українському науково-дослідному інституті радіо і телебачення (УНДІРТ) і підтверджуються трьома актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Виконано одноосібно:

1. Дослідження методу моделювання цифрових радіоканалів транкінгових систем на основі послідовної апроксимації функції формування імпульсів.

2. Дослідження методу підвищення точності алгоритму каналної оцінки на основі проектування сигнального та шумового підпросторів каналних моделей.

3. Здійснена оцінка ефективної кількості елементів антенних решіток приймачів базових станцій цифрових транкінгових систем.

4. Досліджено алгоритми зменшення рангу сигнального та шумового підпростору каналних моделей цифрових транкінгових систем.

5. Розроблено модель каналного еквалайзера з вирішуючим зворотнім зв'язком покращеної завадостійкості.

6. Здійснена оцінка ефективності методів прямої та непрямої настройки еквалайзерів.

7. Оптимізовано довжину тренувальних послідовностей для цифрових транкінгових систем.

Апробація результатів дисертації. Науково-технічні результати дисертаційного дослідження доповідались на спеціалізованому семінарі "Связь и коммуникации", (Одеса, 1999), міжнародній науково-практичній конференції "Новые сетевые технологии в Украине", (Київ, 2000), симпозіумі "Мир высоких технологий в информации и телекоммуникациях" (Одеса, 2001), науково-практичній конференції "Современные телекоммуникационные технологии в Украине" (Київ, 2001), науково-практичній конференції "Радіотехнології у розвитку та модернізації сільського та приміського зв'язку. Прогресивні методи його побудови та експлуатації" (Київ, 2001), третій міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих спеціалістів країн СНД "Техника и технология связи (Одеса, 2001), а також обговорювались на наукових конференціях ОНАЗ ім. О.С. Попова і наукових семінарах кафедри ТЕД та СРЗ.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових праць, у тому числі 9 статей в збірниках наукових праць та журналах, зроблено 9 доповідей на науково-технічних конференціях (8 – самостійно). Самостійних публікацій 3.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і семи додатків. Загальний обсяг дисертації складає 181 сторінка тексту, з них 100 сторінок основного тексту, 47 сторінок з рисунками, 13 сторінок з таблицями, 31 сторінка додатків. Список використаних джерел на 12 сторінках включає 152 найменування.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглянуті обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету й основні задачі, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Приведено дані про особистий внесок автора, а також публікації з теми дисертаційної роботи.

У першому розділі здійснюється постановка задачі та огляд алгоритмів прийому інформаційних сигналів в цифрових транкінгових системах. Наведена загальна класифікація методів прийому в цифрових транкінгових системах на основі алгоритмів просторово-часової обробки сигналів.

На основі класифікації методів каналної оцінки підвищеної точності в сучасних системах рухомого зв'язку доведено доцільність застосування методу оцінки на основі проектування сигнального та шумового підпросторів.

Розглянуто функціональну структуру еквалайзера з вирішуючим зворотнім зв'язком (DFE) та оцінювача за максимальною правдоподібністю (MLSE)

та доведено ефективність застосування для радіоканалів зі змінними параметрами еквалайзера DFE.

Структура еквалайзера з вирішуючим зворотнім зв'язком представлена на рис. 1.

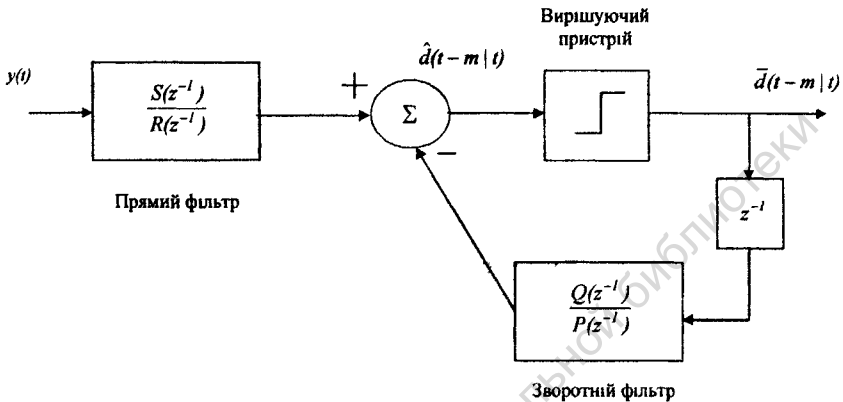


Рис. 1. Структурна схема DFE еквалайзера

Зважаючи на підтвержену результатами проведених НДР доцільність модернізації сектору корпоративно-відомчого рухомого зв'язку України на основі цифрових транкінгових систем стандартів TETRA та TETRAPOL, подальші дослідження здійснювалися для систем саме цих стандартів.

Наведена загальна класифікація методів моделювання радіоканалів систем рухомого зв'язку. Доводиться доцільність застосування для моделювання радіоканалів цифрових транкінгових систем зі змінними в часі параметрами та багатокористувацьким обслуговуванням методів дискретно-просторового представлення на основі теорії матриць.

У другому розділі розв'язується задача розробки моделі підвищеної точності для цифрових радіоканалів транкінгових систем.

Еквівалентна дискретна модель радіоканалу системи рухомого зв'язку може представлятися у вигляді двох послідовно з'єднаних систем зі скінченною імпульсною характеристикою (СІХ), що окремо представляють фільтр формування імпульсів та узгоджений фільтр фізичного каналу розповсюдження. При цьому СІХ система, що представляє фільтр-формував імпульсів, характеризується відомими коефіцієнтами фільтра Найквіста. В свою чергу, фізичний канал розповсюдження описується СІХ системою з реалізацією коефіцієнтів канальних імпульсних відгуків, які невідомі і підлягають визначенню за допомогою алгоритмів канальної оцінки.

Тоді сигнал на вході приймача визначається як:

$$\tilde{s}(t) = d(t) * p(z^{-1}) * h(z^{-1}) + n(t), \quad (1)$$

де $d(t)$ - інформаційна послідовність, $p(z^{-1})$ - функція формування імпульсів; $h(z^{-1})$ - функція імпульсних відгуків каналу розповсюдження; $n(t)$ - шум в каналі, * – згортка.

З метою покращення точності каналної моделі було запропоновано використовувати метод, за якого кожен прийнятий вибраний імпульс інформаційного сигналу описується лінійною комбінацією двох чи більше коефіцієнтів функції формування імпульсів $p(z^{-1})$, які зазнають вибірки не в синхронізовані моменти часу, а з певним зміщенням в інтервалі $[-T; T]$.

За рахунок неможливості адекватної апроксимації нелінійних методів цифрової модуляції для апроксимації функції формування імпульсів $p(t_c)$ був використаний підхід щодо представлення часових відліків за допомогою амплітудно-імпульсної модуляції (AIM):

$$p_r(t_c) = i^{-t_c/T} p(t_c). \quad (2)$$

Для табуляції апроксимантів лінійних СІХ каналних моделей застосовано метод Давідона, що використовує значення функції та її похідної.

Завдяки особливостям застосованих типів модуляції для цифрової транкінгової системи TETRA з модуляцією $\pi/4$ -DQPSK була використана двохранова апроксимація функції формування імпульсів, а для системи TETRAPOL з модуляцією GMSK – трьохпорядкова.

Кількісною характеристикою точності дискретно-просторових СІХ каналних моделей цифрових радіоканалів транкінгових систем виступала відносна помилка каналної апроксимації, яка визначається згідно наступного виразу:

$$P_{\text{кан ідект}} = \frac{\|y(t) - \hat{B}(z^{-1})d(t)\|_F}{\|\hat{B}(z^{-1})\|_F}, \quad (3)$$

де $y(t)$ - прийнятий дискретний сигнал; $\hat{B}(z^{-1})$ - матриця оцінених коефіцієнтів каналної моделі на базі СІХ системи; $d(t)$ – послідовність інформаційних символів; $\| _ \|_F$ - фробеніусова норма.

Розрахунок відносної помилки каналної апроксимації (рис.2) доводить, що для досягнення найкращої точності лінійної СІХ каналної моделі системи TETRAPOL оптимальним є часовий зсув між гілками функції формування імпульсів на $T/2$. З метою одержання лінійної каналної моделі найкращої точності системи для TETRA необхідно використовувати часовий зсув між гілками функцій формування імпульсів на інтервал $T/2$.

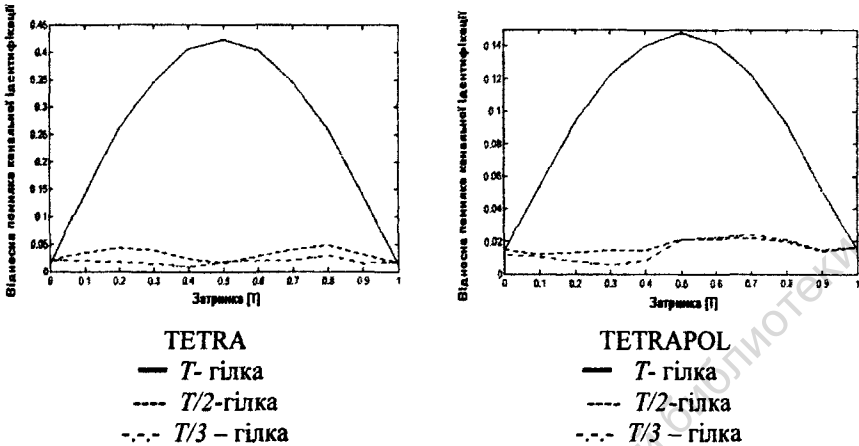


Рис.2. Відносна помилка каналної апроксимації для одного імпульса

Дослідження типових сценаріїв розповсюдження сигналів в радіоканалах цифрових транкінгових систем підтверджують адекватність моделювання фізичних каналів розповсюдження на основі СІХ лінійних каналних моделей з повним рангом 4.

У третьому розділі досліджуються методи підвищення точності алгоритмів каналної оцінки для приймачів базових станцій.

Необхідна умова для спільної оцінки змодульованого на основі СІХ системи сигналу та шуму полягає в тому, що кількість параметрів оцінки повинна бути меншою, ніж кількість рівнянь під час лінійної оцінки методом найменших квадратів (НК), тобто повинна виконуватись умова:

$$M^2 n_n + M(n_b + n_n + 1) < MN_{eff}, \quad (4)$$

де M – кількість антенних елементів; n_b – ранг сигнальної моделі; n_n – ранг шумової моделі; N_{eff} – ефективна довжина тренувальної послідовності.

Аналіз формули (4) свідчить про існування декількох шляхів покращення точності алгоритмів каналної оцінки в цифрових транкінгових системах:

- 1) визначення ефективної кількості елементів антенних решіток приймачів базових станцій (параметр M);
- 2) зменшення рангу сигнального підпростору СІХ моделі (параметр n_b);
- 3) зменшення рангу шумового підпростору СІХ моделі (параметр n_n).

Критерієм для визначення ефективної кількості елементів антенних решіток для цифрових транкінгових систем було вибрано відношення сигнал-завада на співпадаючій частоті (CIR). Для розрахунку CIR використовується

значення рівня прямих інтерференційних завад та інтермодуляційних завад 3-го порядку від сусідніх базових станцій:

$$CIR = \frac{P_{BC}}{\sum_s IM_3 + \sum_m N\sigma_i^2}, \quad (5)$$

де P_{BC} – потужність базової станції; m – загальна кількість базових станцій; IM_3 – інтермодуляційні завади 3-го порядку; σ_i^2 – потужність інтерферуючого сигналу, N – кількість джерел інтерференційних завад.

Результати розрахунку залежності інтегрального закону розподілення (ІЗР) ймовірності показника CIR з рис.3 свідчать, що антенна решітка, яка має $M = 8$ елементів, характеризується найбільшим рівнем, тобто цифрова транкінгова система володіє найвищою завадостійкістю.

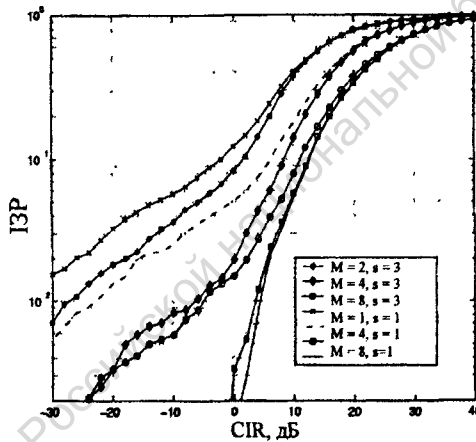


Рис. 3. ІЗР CIR для антенної решітки транкінгової системи

Досліджено питання підвищення точності алгоритмів каналної оцінки шляхом зменшення рангу сигнального підпростору загальної СІХ каналної моделі. Обґрунтовано доцільність використання методу розкладу на сингулярні числа (РСЧ) для зменшення рангу сигнального підпростору СІХ моделі.

Для автоковаріаційної матриці каналної моделі РСЧ має вигляд:

$$R_{hh} = U\Lambda V^H, \quad (6)$$

де U – унітарна матриця, що містить власні вектори; Λ – діагональна матриця, що містить сингулярні числа $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{N-1}$ на головній діагоналі:

$$\Lambda = \text{diag} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \frac{\beta}{\text{SNR}}}, \dots, \frac{\lambda_{N-1}}{\lambda_{N-1} + \frac{\beta}{\text{SNR}}} \right), \quad (7)$$

де β - константа, яка залежить від сигнального сузір'я (тут $\beta = 11/7$).

Канальний оцінювач рангу P_b оцінює канальний імпульсний відгук згідно виразу:

$$\begin{aligned} \hat{h}_{R_b} &= U \begin{bmatrix} \Delta_{R_b} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^H \left(U \left(\Lambda + \frac{\beta}{\text{SNR}} I \right) U^H \right)^{-1/2} \hat{h}_{\text{НК}} = U \begin{bmatrix} \Delta_{R_b} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left(\Lambda + \frac{\beta}{\text{SNR}} I \right)^{-1/2} \times \\ &\times U^H \hat{h}_{\text{НК}} = U \begin{bmatrix} \Delta_{R_b} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^H \hat{h}_{\text{НК}}, \end{aligned} \quad (8)$$

де Δ_{R_b} - матриця розмірності $R_b \times R_b$ (верхній лівий куток матриці Λ), що включає R_b найбільших векторів сингулярних чисел; I - матриця ідентифікації.

Оптимальний порядок рангу для оцінки зменшеного рангу визначається як:

$$r^* = \arg \min_r \|\Delta H\|^2, \quad (9)$$

де $\Delta H = H - \hat{H}_{RR}$ - різниця між початковим та зменшеним рангом.

Структура каналного еквалайзера зменшеного рангу представлена на рис.4.

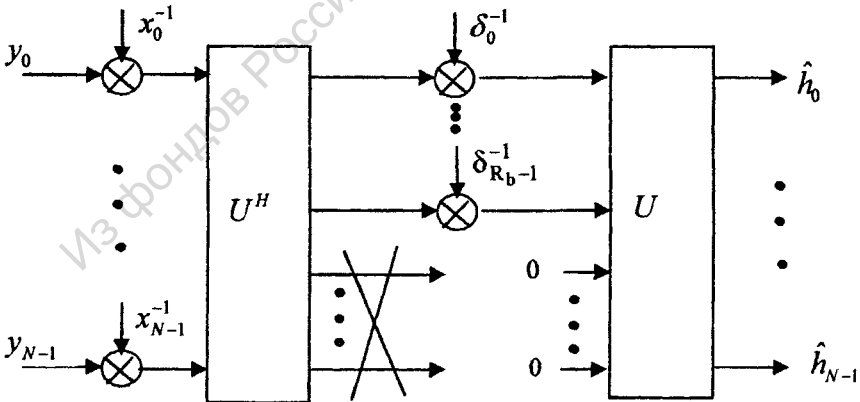


Рис.4. - Блок-діаграма оцінювача каналної моделі рангу

На основі моделі каналного оцінювача для потужності сингулярних чисел сигнального підпростору використовується вираз:

$$\sigma_s^2 = \left(\sum_{j=1}^{\hat{d}} \hat{\lambda}_j \right) - \hat{d} \hat{\sigma}_{I+N}^2, \quad (10)$$

а для потужності сингулярних чисел шумового підпростору – вираз:

$$\hat{\sigma}_{I+N}^2 = \frac{1}{L - \hat{d}} \sum_{j=\hat{d}+1}^L \hat{\lambda}_j, \quad (11)$$

де L – кількість символів прийнятого сигналу в кожному векторі.

Звідси відношення сигнал/інтерференційна завада (SIR) для каналної оцінки зменшеного рангу розраховується як

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{L} \frac{\hat{\sigma}_s^2}{\hat{\sigma}_{I+N}^2}. \quad (12)$$

Згідно результатів розділу 2 в системах рухомого зв'язку повний каналний ранг СІХ моделі складає 4. Оцінки радіоканалів зменшеного рангу (2 та 1) дозволяють отримати покращені показники сигнал/завада та норми бітрової помилки (BER) за умови зменшення складності алгоритму оцінки (рис.5).

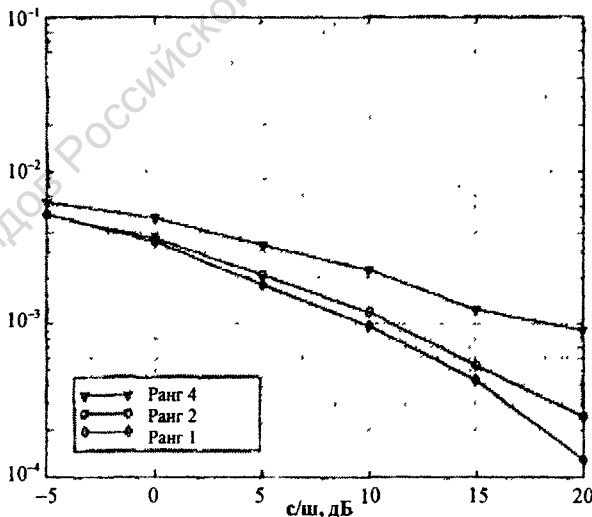


Рис 5. Результати низькорангової оцінки для цифрової транкінгової системи

За рахунок використання алгоритму низькорангової оцінки сигнального підпростору СІХ каналної моделі за умови заданого рівня якості обслуговування ($BER = 10^{-2}$) для системи TETRAPOL можливе покращення відношення сигнал/інтерференційна завада на 3,2 дБ, для системи TETRA – на 2,8 дБ.

Ефективним механізмом покращення точності оцінки шумового підпростору та загальної СІХ каналної моделі є оцінка низькорангового шумового підпростору. В загальному випадку норма BER каналного оцінювача на основі шумової моделі зменшеного рангу визначається як функція SIR:

$$SIR = \frac{R_{ss}}{R_{nn}} = \frac{R_{yy} v_i^s}{R_{yy} v^n}, \quad (13)$$

де $R_{ss} = B_0 B_0^H + \sum_{i=1}^N B_i B_i^H$ – коваріаційна матриця сигнального підпростору;

R_{nn} – коваріаційна матриця шумового підпростору; R_{yy} – коваріаційна матриця прийнятого сигналу; v_i^s – власний вектор сигнальної коваріаційної матриці; v^n – власний вектор шумової коваріаційної матриці.

Застосування авторегресивної (AR) моделі зменшеного рангу низькорангової оцінки шумового підпростору для СІХ каналної моделі на основі міжнародної моделі COST-259 дає покращення відношення сигнал/шум на 1,5 – 3 дБ, або за фіксованого відношення сигнал/шум поліпшує BER.

У четвертому розділі проводиться дослідження методів підвищення завадостійкості еквалайзування для цифрових радіоканалів транкінгових систем. Порядок СІХ систем, що описують прямий та зворотній фільтри DFE, визначається рангом сигнального та шумового підпросторів відповідної каналної моделі, тобто існує можливість еквалайзування зменшеного рангу.

Для отримання математичної моделі DFE еквалайзера зменшеного рангу застосовується метод РСЧ до матриці каналних коефіцієнтів з "відбіленим" шумом. Відношення сигнал/шум на біт для j -го користувача на виході еквалайзера зменшеного рангу визначається згідно виразу:

$$\gamma_b^{-j} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{K_b} \frac{E[|b_j^2|^2 E[|s_j(k)|^2]]}{E[|v_j(k)|^2]}, \quad (14)$$

де M – кількість антенних елементів; b_j – комплексні елементи СІХ моделі; $s_j(k)$ – символ, переданий j -им користувачем; $v_j(k)$ – завади, R_b^j – поточний ранг СІХ каналної моделі; $E[.]$ – усереднення по ансамблю.

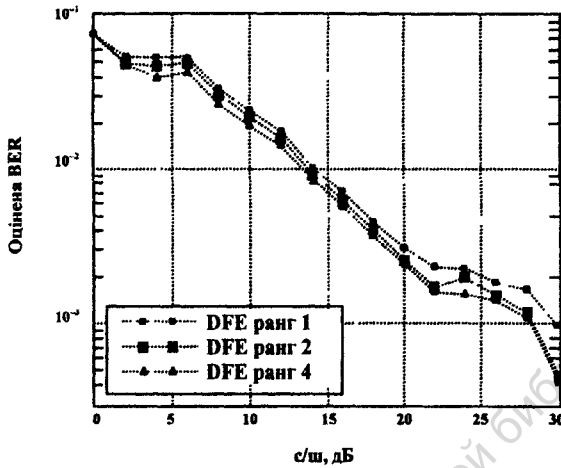


Рис. 6. Завадостійкість системи TETRA з використанням DFE еквалайзера зменшеного рангу

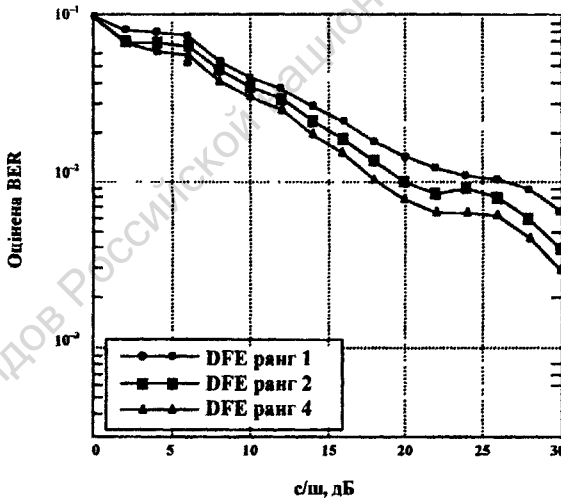


Рис. 7. Завадостійкість системи TETRAPOL з використанням DFE еквалайзера зменшеного рангу

Аналіз отриманих результатів (рис.6 та 7) свідчить, що за стандартних показників якості зв'язку ($C/N_{TETRA} = 19$ дБ та $C/N_{TETRAPOL} = 15$ дБ) еквалайзування зменшеного рангу не погіршує загальної BER нижче стандартизо-

ваних норм і характеризується завадостійкістю, близькою до повнорангового рішення.

Покращенню показників завадостійкості каналних еквалайзерів сприяє використання розглянутого вище методу розкладу функцій формування імпульсів, зсунутих на певний часовий зсув. За рахунок використання оптимізованої апроксимації функції формування імпульсів зі зсувом на $T/2$ загальна кількість комплексних параметрів імпульсного відгуку каналу зменшується від 4 до 1, що дає вигоду у відношенні сигнал/шум каналного еквалайзера.

Здійснюється оцінка складності настройки еквалайзера для цифрових радіоканалів транкінгових систем. Складність обчислення для еквалайзера прямої настройки (D-DFE):

$$C_{D-DFE} \approx \frac{1}{6}(M(n_s + 1) + n_Q + 1)^3 + \frac{1}{2}(M(n_s + 1) + n_Q + 1)^2 \left(N_{seq} - l - n_Q + \frac{11}{2} \right) cu, \quad (15)$$

де n_s – порядок прямого СІХ фільтра DFE; n_Q – порядок зворотнього СІХ фільтра DFE; l – затримка рішення в прямому фільтрі DFE, N – довжина тренувальної послідовності, M – кількість елементів антенної решітки; cu – елемент складності (одне множення).

Для еквалайзера непрямої настройки I-DFE складність визначається як:

$$C_{I-DFE} \approx \frac{1}{6}(M(n_s + 1) + n_Q + 1)^3 + \frac{1}{2}M^2(n_s + 1)^2 + \frac{19}{4}(M(n_s + 1) + n_Q + 1)^2 + (N_{seq} - n_b)(n_b + 1)M + \frac{1}{2} \left(n_b + 1 - \frac{n_s}{2} \right) (n_s + 1)^2 M^2 cu. \quad (16)$$

Загальна складність обчислень еквалайзера розраховується як:

$$C = (M(n_s + 1) + n_Q + 1)N_{data}cu, \quad (17)$$

де N_{data} – довжина блоку даних, на якому здійснюється оцінка складності.

Обчислення складності алгоритмів еквалайзування радіоканалів цифрових транкінгових систем прямої та непрямої настройки здійснювалися за таких вихідних даних:

- порядок прямого фільтра DFE $n_s = 3$;
- порядок зворотнього фільтра DFE $n_Q = 2$;
- порядок СІХ каналної моделі $n_b = 4$;
- середня довжина тренувальної послідовності $N_{seq} = 26$;

– довжина блоку даних для оцінки складності, $N_{data} = 116$.

Результати обчислень складності настройки DFE еквалайзера для радіоканалів цифрових транкінгових систем представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку складності настройки еквалайзера

	Складність настройки еквалайзера, [cu]		
	M = 5	M = 10	M = 20
<i>D-DFE</i>	11705	42738	196205
<i>1-DFE</i>	14309	53022	236849

У випадку, коли можливе застосування лише коротких тренувальних послідовностей, еквалайзер підвищеної завадостійкості буде мати меншу складність настройки за непрямою схемою за рахунок того, що цей метод на зазнає значного впливу при низьких відношеннях сигнал/шум. Згідно розрахованих даних метод прямої настройки еквалайзера радіоканалів транкінгових систем на 20 % ефективніший в аспекті складності.

У п'ятому розділі здійснюється вибір та застосування критеріїв оптимізації довжини тренувальної послідовності (ТП), що використовується в цифрових транкінгових системах.

Розглянуто методи використання ТП в цифрових транкінгових системах.

Призначення ТП полягає в допомозі приймачеві в оцінці імпульсного відгуку каналу в коригованому шляху на протязі тривалості кожного символу.

Мінімальна ефективна довжина ТП для випадку AR шумової моделі зменшеного рангу обчислюється як:

$$N_{eff} = Mn_n + n_b + n_n + 1. \quad (18)$$

За умови спільної оцінки СІХ каналної та AR шумової моделей, довжина ТП визначається як:

$$N_{seq} \geq M(n_n + 1) + 2(n_b + n_n) + 1. \quad (19)$$

Звідси ефективна довжина ТП для непрямого методу настройки:

$$N_{1-DFE} = N_{seq} - n_b. \quad (20)$$

Аналіз результатів з таблиці 2 свідчить про можливість зменшення фактичної довжини ТП, що використовується в сучасних цифрових транкінгових системах, за умови використання каналного оцінювача шумового підпростору зменшеного рангу.

Таблиця 2

Ефективна довжина ТП для цифрових транкінгових систем

Параметр	TETRA	TETRAPOL
Довжина ТП згідно технічного стандарту	22 біти	15 біт
Мінімальна ефективна довжина ТП для AR моделі зменшеного рангу	14 біт	14 біт
Мінімальна ефективна довжина ТП для спільної оцінки СІХ каналної та AR шумової моделей	27 біт	27 біт
Мінімальна ефективна довжина ТП для непрямой настройки еквалайзера	23 біти	23 біти

Оцінка залежності BER від довжини ТП здійснювалася для середнього значення відношення сигнал/шум, прийнятого в цифрових транкінгових системах, 18 дБ та для різних типів настройки еквалайзера – еквалайзера непрямой настройки з AR моделлю зменшеного рангу (IS-DFE), еквалайзера зменшеного рангу з багаторозмірним узгодженим фільтром (IS-БУФ-DFE), еквалайзера непрямой настройки повного рангу (I-DFE), еквалайзера прямої настройки повного рангу (D-DFE) (рис.8).

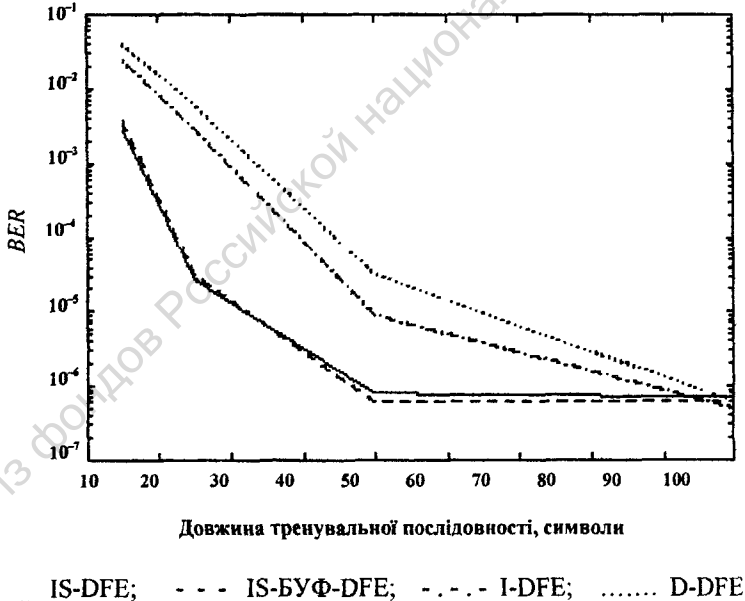


Рис.8. Залежність BER від довжини ТП для різних типів еквалайзерів

Згладжування затримки для всіх типів еквалайзерів дорівнює порядку прямого фільтра і становить $\ell = n_s = 3$, у той час як порядок зворотнього фільтра має вигляд $n_Q = 3$. Регуляризація константи σ_n^2 для D-DFE та I-DFE прийнята рівню дев'яти каналного шуму.

Згідно результатів з рис.8, завадостійкість повнорангових еквалайзерів прямої та непрямой настройки погіршується при зменшенні довжини ТП. Це пояснюється тим, що ці типи еквалайзерів потребують використання спільної ПЧ моделі шуму, що неможливо для коротких ТП. В свою чергу еквалайзери зменшеного рангу володіють кращими показниками для коротких та середніх ТП.

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні наведено теоретичне узагальнення та розв'язання наукової задачі загального підвищення ефективності цифрових транкінгових систем за критеріями завадостійкості та системної складності алгоритмів прийому.

В дисертації були отримані такі головні наукові та практичні результати.

1. В процесі розробки моделей радіоканалів цифрових транкінгових систем досліджено метод оптимізованої апроксимації функцій фільтра-формувача імпульсів та узгодженого каналного фільтра, що дозволяє будувати СІХ каналні моделі підвищеної точності і може використовуватися при вирішенні інших актуальних теоретичних задач.

2. Задача підвищення точності алгоритмів оцінки радіоканалів цифрових транкінгових систем була розв'язана шляхом використання алгоритму проектування сигнального та шумового підпросторів зменшеного рангу.

3. Встановлено, що в діючих системах цифрового транкінгового зв'язку оптимізація кількості елементів антенних решіток БС та використання каналних оцінювачів зменшеного рангу веде до загального покращення відношення сигнал/шум в радіоканалі.

4. Були уточнені критерії загального покращення завадостійкості методів адаптивного прийому в цифрових транкінгових системах стандартів TETRA і TETRAPOL за енергетичними показниками при застосуванні каналних еквалайзерів зменшеного рангу. Загальне покращення завадостійкості алгоритмів адаптивного прийому спостерігається при застосуванні методу розкладу загальної апроксимованої функції формування імпульсів.

5. Здійснена оцінка ефективності прямої та непрямой настройки еквалайзерів зменшеного рангу доводить перевагу прямого методу настройки.

6. Визначено ефективну довжину ТП для цифрових транкінгових систем TETRA та TETRAPOL за умов використання різних типів еквайзерів.

7. Розроблені в результаті проведених досліджень методи та отримані числові дані дозволяють комплексно підійти до розв'язання проблеми підвищення системної ефективності цифрових транкінгових систем в аспекті збільшення зон обслуговування і полегшення частотно-територіального планування мереж і можуть доповнювати загальну теорію завадостійкості та оптимального прийому в цифрових транкінгових системах.

Основні результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Іванов В.А. До проблеми математичного моделювання радіоканалів систем рухомого зв'язку // Праці УНДІРТ. – 2001. – Вип. 1 (25). – С. 38 – 44.

2. Іванов В.А. Лінійна канална модель цифрових транкінгових систем // Зв'язок. – 2001. – Вип. 5. – С. 21 – 25.

3. Іванов В.А. Оптимізація довжини тренувальної послідовності в цифрових транкінгових системах // Праці УНДІРТ. – 2002. – Вип. 1 (29). – С. 9 – 16.

4. Іванов В. А., Іваницький В. В. Аспекти вибору доцільного для України стандарту рухомого зв'язку 3-го покоління // Зв'язок. – 2002. – Вип. 3. – С. 9 – 15. (Особистий внесок – здійснено порівняльний аналіз технічних характеристик мереж радіодоступу та транспортних мереж систем рухомого зв'язку 3-го покоління – 0,7 д.а.).

5. Іванов В.А., Севостьяненко А.О. Україна на шляху до систем рухомого зв'язку 3-го покоління // Зв'язок. – 2002. – Вип.6. – С. 30 – 33. (Особистий внесок – окреслено шляхи впровадження технології загального пакетного передавання GPRS на мережах рухомого зв'язку України – 0,41 д.а.).

6. Банкет В.Л., Іванов В.А. Аналіз ефективності систем цифрового рухомого радіозв'язку // Зв'язок. – 1999. – Вип. 6. – С. 21 – 25. (Особистий внесок – здійснено аналіз основних критеріїв ефективності систем рухомого зв'язку та запропоновано методика розрахунку зон радіопокриття – 0,36 д.а.).

7. Іваницький В.В., Іванов В.А. Методи оцінки замираний в радіоканалах системи сотової зв'язу CDMA IS-95 // Праці УНДІРТ. – 1999. – Вип. 3 (23). – С. 84 – 88. (Особистий внесок – здійснено класифікацію замирань в радіоканалах рухомого зв'язку з технологією CDMA та запроновано рівняння для їх опису – 0,47 д.а.).

8. Михайлов М.К., Іванов В.А., Гуцалюк А.К., Мухін П.В., Севостьяненко А.О., Зяблов С.В., Чистяков Ю.І., Іваницький В.В. Концепція переходу України до систем рухомого зв'язку 3-го покоління (проект) // Зв'язок. - 2002. Вип.4. – С. 2 – 8. (Особистий внесок – самостійно розроблено та підготовлено до друку чотири розділи Концепції – 0,55 д.а.)

9. Михайлов М.К., Гуцалюк А.К., Иванов В.А., Мухін П.В., Севостьяненко А.О., Стасюк В.І., Чистяков Ю.І. Програма переходу України до систем рухомого зв'язку 3-го покоління (проект) // Зв'язок. - 2002. Вип.5. – С. 2 – 5. (Особистий внесок – розроблено два розділи Програми – 0,42 д.а.)

Іванов В. А. Підвищення завадостійкості прийому сигналів в цифрових транкінгових системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова, – Одеса, 2003.

Дисертація присвячена підвищенню завадостійкості прийому сигналів в цифрових транкінгових системах шляхом визначення необхідних параметрів та характеристик приймачів базових станцій.

Одержані в процесі удосконалення цифрових транкінгових систем значення параметрів і характеристик механізмів сигнальної обробки на прийомі визначають необхідні умови для контролю показників завадостійкості під час експлуатації в несприятливих умовах, можуть використовуватися при проектуванні нових зразків техніки рухомого зв'язку.

Запропонована загальна методика підвищення точності лінійної апроксимації СІХ каналних моделей цифрових транкінгових систем.

За заданими критеріями якості обслуговування одержані розрахункові дані характеристик каналних оцінювачів підвищеної точності та еквалайзерів підвищеної завадостійкості, які можуть використовуватися при проектуванні приймачів базових станцій.

Визначено ефективну довжину тренувальних послідовностей, що застосовуються в цифрових транкінгових системах.

Ключові слова: цифрова транкінгова система, лінійна канална модель, канална оцінка, каналне еквалайзування, тренувальна послідовність.

Іванов В. А. Повышение помехоустойчивости приема сигналов в цифровых транкинговых системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, – Одесса, 2003.

Диссертация посвящена повышению помехоустойчивости приема сигналов в цифровых транкинговых системах путем определения необходимых параметров и характеристик приемников базовых станций.

Полученные в процессе усовершенствования цифровых транкинговых систем значения параметров и характеристик механизмов сигнальной обра-

ботки на приеме определяют необходимые условия для контроля показателей помехоустойчивости во время эксплуатации в неблагоприятных условиях, могут использоваться при проектировании новых образцов техники подвижной связи.

В процессе решения общей задачи линеаризации модели радиоканалов цифровых транкинговых систем предложен новый метод оптимизированной аппроксимации функций фильтра-формирователя импульсов и согласованного канального фильтра, что позволяет разрабатывать КИХ канальные модели повышенной точности. Для повышения точности линейных КИХ канальных моделей использовался метод разложения общей функции аппроксимации импульсов на несколько составляющих, смещенных между собой на определенный временной интервал.

По заданным критериям качества обслуживания получены расчетные данные характеристик канальных оценщиков повышенной точности и эквалайзеров повышенной помехоустойчивости, которые могут использоваться при проектировании приемников базовых станций. Задача повышения точности алгоритмов оценки радиоканалов цифровых транкинговых систем решалась на основе алгоритма проектирования сигнального и шумового подпространств уменьшенного ранга.

Проведенная оценка эффективности прямой и не прямой настройки эквалайзеров уменьшенного ранга подтверждает преимущества в использовании прямого метода настройки.

Определена эффективная длина обучающих последовательностей для цифровых транкинговых систем TETRA та TETRAPOL при условии использования различных типов эквалайзеров и сформулирована возможность ее уменьшения для канальной оценки и эквалайзирования уменьшенного ранга

Ключевые слова: цифровая транкинговая система, линейная канальная модель, канальная оценка, канальное эквалайзирование, обучающая последовательность.

Ivanov V. A. – The noise stability increasing for signals reception in digital trunking systems. – A manuscript.

Dissertation for the application of scientific degree of a candidate of technical sciences on specialty 05.12.13 – radio technical devices and facilities of telecommunications. Odessa National Academy of Telecommunications named after A.S.Popov, Odessa, 2003.

The dissertation is devoted to the task of noise stability increasing for signals reception in digital trunking systems by definition of necessary parameters and characteristics of base stations receivers.

The meanings of parameters and alarm processing mechanisms characteristics on reception, obtained during the improvement of digital trunking systems define

the necessary conditions for noise stability parameters control during operation in adverse conditions and can be used for designing of new samples of mobile communication equipment.

The general technique of Finite Impulse Response (FIR) linear approximation accuracy increase for digital trunking systems channel models is proposed.

By the given criteria of quality of service there were received the computed data on the increased estimators accuracy and noise stability channel equalizers characteristics, which can be used for base stations receivers designing.

The definition of effective length of training sequences, which are used in digital trunking systems was carried out.

Key words: digital trunking system, linear channel model, channel estimation, channel equalizing, training sequence.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Здано до складання 4.04.2003.

Підписано до друку 7.04.2003. Обсяг 0,83 друк. арк.
Формат 60x88/16. Зам. №1769. Тираж 100 екз.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні редакційно-видавничого центру Українського
науково-дослідного інституту радіо і телебачення.

Україна, 65029, м.Одеса, вул. Буніна, 31.

© УНДІРТ, 2003.

РНБ Русский фонд

2004-4

238

Из фондов Российской национальной библиотеки