

**Українська державна академія залізничного транспорту**

**Басов Володимир Ілліч**

УДК 621.391.22:621.396.96

**СИСТЕМИ ПРИЙОМУ І ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В КАНАЛАХ З  
ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНИМИ ЗАВМИРАННЯМИ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків - 2004

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор **Поляков Петро Федорович**, Українська державна академія залізничного транспорту, завідувач кафедри “Транспортний зв’язок”

**Офіційні опоненти:** - доктор технічних наук, професор **Поповський Володимир Володимирович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри “Телекомунікаційні системи”

кандидат технічних наук, **Сивашенко Сергій Іванович**, Харківський інститут військово-повітряних сил ім. І. Кожедуба, начальник науково-дослідної лабораторії кафедри “Радіотехнічних систем навігації і посадки”

**Провідна установа** – Одеська національна академія зв’язку ім. О.С. Попова, державного комітету зв’язку та інформатизації України, кафедра “Системи документального електрозв’язку”, м. Одеса

Захист відбудеться “11” червня 2004 р. о 13<sup>30</sup> год. На засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 64.820.01 при **Українській державній академії залізничного транспорту** за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту.

Відгук на автореферат просимо надсилати за адресою:  
**Україна, 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.**

Автореферат розісланий “8” травня 2004 р.

*Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент*

**Книгавко М.В.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ.** Проблема оптимальної передачі повідомлень каналами зв'язку займає центральне місце в сучасній теорії і техніці зв'язку. Але і до нині деякі сторони проблеми залишаються, поки що, мало вивченими. Це зокрема відноситься до задачі передачі повідомлень по статистично неоднорідним середовищам, коли мають місце частотно-селективні завмирання через розсіювання енергії сигналу в каналі зв'язку. До таких реальних каналів відносяться широко використовувані при створенні систем зв'язку канал з іоносферним і тропосферним розсіюванням, короткохвильовий канал, хвильопроводи і кабелі з неоднорідностями та ін.

Після видання фундаментальних праць В.А. Котельникова [Теория потенциальной помехоустойчивости. –М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 152с.], які стосуються оптимальних методів прийому в однопроменевому каналі з флуктуаційним білим шумом коли точно відомий сигнал, і праці К. Шеннона [Работы по теории информации и кибернетике. – М.: 1963. –829с.] по теорії оптимального кодування в каналах з постійними параметрами і гаусівським шумом утворився новий науковий напрямок – статистична теорія зв'язку. Перші праці в межах цього напрямку, в яких запропоновані методи прийому в каналах з частотно-селективними завмираннями і флуктуаційним шумом, з'явилися в кінці 50-х – на початку 60-х років (Turin G.L., Bello P.A., Фанкельштейн Е.З., Кирилов Н.Е., Кловський Д.Д.). В подальшому статистична теорія зв'язку по каналам з частотно-селективними завмираннями розвивалася дякуючи працям вітчизняних та закордонних вчених (Андронов І.С., Ван Трис Гарри Л., Кеннеді Р., Кирилов Н.Е., Кловський Д.Д., Коржик В.І., Михайлов А.В., Немировский А.С., Окунев Ю.Б., Поляков П.Ф., Поповський В.В. Сойфер В.А., Фінк Л.М. та ін.). Створений ряд систем зв'язку, в яких реалізовані деякі з названих методів (системи “Рейк”, “MUSA”, “AME” “СІИП”, “Adapticom”, “Кинеплекс”, МС та ін.) Ці системи є або ж досить складними в практичній реалізації (наприклад, система “Рейк”) або ж реалізують суттєво неоптимальні алгоритми прийому сигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями (наприклад, система “СІИП”), особливо при дії адитивних завад відмінних від білого шуму.

Таким чином, задача створення систем прийому сигналів які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і адитивними завадами, яка дозволила б з одного боку одержати оптимальні (квазіоптимальні) алгоритми прийому, а з іншого досить просту їх технічну реалізацію є актуальною.

**ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ.** Робота виконувалась згідно з Концепцією розвитку телекомунікаційних систем на залізничному транспорті України на період 1998-2008 р.р., Програмою створення впродовж 2002-2006 років в системі Міністерства транспорту України єдиної транспортної мережі зв'язку.

Крім того, результати роботи використовувались в науково-дослідних роботах кафедри “Транспортний зв’язок” Української Державної академії залізничного транспорту, що виконувались за держбюджетним (НДР 21/1-Б, 21/2Б) та госпрозрахунковим планами (НДР 21/2, 21/3).

**МЕТА.** Метою дисертаційної роботи є розробка методів прийому сигналів, які пройшли канал зв’язку з частотно-селективними завмираннями (багатопроменевим розповсюдженням радіохвиль) та адитивними завадами, синтезу алгоритмів і систем прийому сигналів, аналізу їх завадостійкості при довільних випадкових параметрах сигналів та завад.

**Задача дослідження.** Відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються такі основні задачі дослідження:

1. Розробка моделі багатопроменевого каналу зв’язку.
2. Розробка методів і алгоритмів прийому сигналів, що пройшли канал багатопроменевого зв’язку при наявності адитивних завад.
3. Синтез систем прийому амплітудно- частотно- і фазомодульованих радіосигналів, що пройшли багатопроменевий канал зв’язку.
4. Аналіз завадостійкості алгоритмів і систем прийому радіосигналів, що пройшли багатопроменевий канал зв’язку при наявності адитивних завад.

**Об’єктом дослідження** в дисертаційній роботі є методи, алгоритми та системи прийому сигналів в багатопроменевих каналах.

**Предметом дослідження** є оптимальні методи, алгоритми та системи прийому сигналів в багатопроменевих каналах при дії адитивних завад.

**Методами дослідження** є математична статистика і теорія імовірностей, марківська теорія оптимальної нелінійності фільтрації, теорія функціонального аналізу, статистична теорія зв’язку.

**НАУКОВЕ ПОСУВАННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ** полягає в тому, що:

1. Розроблена марківська модель каналу зв’язку з частотно-селективними завмираннями (багатопроменевого каналу) з компенсацією нерівномірності групової затримки в каналі. Сигнальні та завадові складові на виході каналу описуються системою стохастичних нелінійних диференційних рівнянь. Таке описування каналу дозволяє використовувати марківський підхід до вирішення задачі синтезу оптимальних структур приймачів модульованих сигналів на виході багатопроменевого каналу зв’язку.

2. Розроблені на основі теорії нелінійної оптимальної фільтрації алгоритми оптимального і квазіоптимального прийому модульованих (АМ, ЧМ, ФМ) радіосигналів. Одержані алгоритми дозволяють синтезувати оптимальні і квазіоптимальні приймачі не накладаючи обмеження на моделі сигналів, що приймаються і на діючі адитивні завади. Необхідно відзначити, що відомі алгоритми прийому сигналів в багатопроменевих каналах не дозволяють створювати алгоритми та системи прийому, оптимальні при адитивних завадах, відмінних від білого шуму.
3. На основі синтезованих алгоритмів синтезовані оптимальні і квазіоптимальні системи прийому радіосигналів, які пройшли багатопроменевий канал зв'язку при дії адитивних завад. Одержані структурні схеми систем прийому пристроїв в динамічному і стаціонарному режимах. Ці схеми можна реалізувати практично або програмним, або апаратним способами.
4. Використовуючи одержані системи нелінійних диференційних рівнянь для оціночних значень параметрів радіосигналів що фільтруються і для кумулянтів проведений розрахунок завадостійкості синтезованих прийомних пристроїв при різних видах модуляції. Аналіз результатів розрахунків дозволив зробити висновок про оптимальність синтезованих алгоритмів. Завадостійкість синтезованих систем прийому відповідає завадостійкості прийому при розподілі і когерентному складанні окремих променів.

**ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.** В модифікації мобільної системи радіозв'язку “Транспорт РС-6” використаний синтезований в дисертації алгоритм прийому частотно-модульованого радіосигналу на несучій частоті  $f_0=151\text{МГц}$  та з індексом модуляції  $m_{\text{ЧМ}}=3$ . Крім того, отримані результати використовуються також у навчальному процесі кафедри “Транспортний зв'язок”, де виконувалася дана робота.

**ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК ЗДОБУВАЧА.** Робота виконана на кафедрі “Транспортний зв'язок” УкрДАЗТ. Основні результати, отримані в дисертаційній роботі, належать особисто авторові і повністю опубліковані в фаховій літературі [1-7].

**АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.** Результати дисертації доповідалися на 7-ми міжнародних конференціях [8-14].

**ПУБЛІКАЦІЇ.** За матеріалами дисертації опубліковано [7] робіт, у тому числі: статті в спеціалізованих виданнях ВАК України [2-7], та монографії [1] у співавторстві.

**СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ ДИСЕРТАЦІЇ.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаної літератури. Загальний обсяг дисертації складає 136 сторінок: 112 основного тексту, 25 рисунків і 124 бібліографічних джерел на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У ВСТУПІ** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано метод та задачі дослідження наведено 4 пункти наукової новизни одержаних результатів та інші необхідні підрозділи щодо змісту роботи.

**У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ** проводиться аналіз стану проблеми прийому радіосигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями. Систематизовані публікації за основними напрямками прийому радіосигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями, сформульована задача досліджень і визначене місце результатів вирішення задачі прийому радіосигналів, одержаних в даній роботі.

Аналіз показує, що відомі в літературі моделі селективних завмирань і модель багато променевого розповсюдження радіохвиль досить повно і ефективно описують лінійний канал зв'язку. Вони є класичними. На основі цих моделей розроблено доволі велику кількість алгоритмів оптимального і квазіоптимального прийому сигналів, які пройшли канал з параметрами що залежать від частоти і з швидкими завмираннями. Для більшості додатків при неперервному каналі алгоритми виявляються досить складними в практичній реалізації.

З другого боку запропоновані алгоритми і системи прийому сигналів, які прості в технічній реалізації, основані на корекції каналу або сигналу. Такі системи передбачають використання на прийомній стороні в явній або неявній формі оцінювача поточного стану каналу (імпульсної характеристики або комплексного коефіцієнта передачі каналу) і пристрою, що відновлює втрачену форму системної характеристики (коректор каналу зв'язку) або інформаційний параметр сигналу (коректор сигналу). Критерієм точної настройки коректора сигналу є величина похибки відновлення інформаційного параметра в момент вибірки. Цьому напрямку присвячена досить велика кількість робіт (початок цьому напрямку, що називається нині адаптивною компенсацією, поклали роботи Л.М. Гольденберга і Д.Д. Кловського, 1959р.).

До нині створений ряд систем передачі повідомлень на основі лінійних адаптивних компенсаторів як для провідових, так і для радіоканалів. Дослідження завадостійкості таких систем показує, що вона нижча гранично можливої. Це пов'язане з тим, що в каналах, в яких на їх виході діє флуктуаційний шум, особливо при глибоких частотно-селективних завмираннях, відновлення форми передаваних сигналів, що є можливим при ідеальній корекції характеристики каналу, не

забезпечує ще мінімізацію кількості помилкових рішень при передаванні дискретних сигналів, або середньоквадратичну похибку відновлення передаваного повідомлення при передачі неперервних сигналів. В останньому випадку задача особливо ускладнюється тим, що передавань повідомлення, як правило, входить нелінійно в сигнал, що передається.

Як відзначає Д.Д. Кловський, “совершенно очевидно, что предельную помехоустойчивость систем в каналах с межсимвольной интерференцией и шумами можно обеспечить лишь на основе построения оптимальных приемников. При этом приходится жертвовать линейностью (прозрачностью) получающегося приемного устройства” [Кловський Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. –М.: “Радио и связь, 1982. – 304с.]”.

Для систем передачі неперервних повідомлень можна навести подібний приклад, основуючись на монографії П.Ф. Полякова [Прием сигналов в многолучевых каналах. –М.: “Радио и связь”, 1987. – 248с.], де досить строго вирішена проблема прийому (оптимального і квазіоптимального) неперервних і дискретних сигналів, які пройшли багатопроменевий канал зв'язку при наявності адитивних завад (в тому числі квазідетермінованих з невідомими параметрами). Застосування методу прийому сигналів, які пройшли багатопроменевий канал зв'язку, викладеного в монографії П.Ф. Полякова, дозволяє досягати потенціальної границі. При цьому алгоритми стає важко реалізувати.

В даній роботі пропонується і досліджується інший підхід, коли припускається, що фазочастотна характеристика каналу коректується до лінійної, а потім формується модель сигналу, який приймається і пропонуються методи оптимального прийому з урахуванням цієї моделі. Технічні рішення при такому підході простіше реалізуються при однакових характеристиках завадостійкості.

Таким чином, в даній дисертаційній роботі запропонована така постановка задачі. Найперспективнішим і радикальним напрямком в теорії і техніці прийому сигналів, які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і адитивними завадами є оптимальний (квазіоптимальний) прийом сигналів з оцінкою поточного стану каналу зв'язку. Задачу доцільно розв'язувати в два етапи. На першому етапі в результаті поточної оцінки фазочастотної характеристики каналу зв'язку здійснюється фазова корекція каналу. В результаті маємо канал зв'язку з лінійною фазочастотною характеристикою і довільною (реальною без амплітудної корекції) амплітудно-частотною характеристикою каналу.

На другому етапі здійснюється побудова моделі каналу зв'язку з реальною амплітудно-частотною характеристикою і адитивними завадами. При цьому модель враховує всі параметри каналу, завад, сигналу.

Враховуючи, що модель, одержана таким чином, відображає канал зв'язку без “пам'яті”, то можливе використання марківської теорії нелінійної фільтрації при вирішенні задач оптимального

(квазіоптимального) прийому сигналів, які пройшли в цілому канал з “пам’яттю”. В дисертаційній роботі показано, що внаслідок двоетапного підходу розв’язання задачі оптимального (квазіоптимального) прийому можливе при будь-яких адитивних завадах і одержані схеми приймачів простіші в технічній реалізації.

ДРУГИЙ РОЗДІЛ присвячений розв’язанню проблеми створення приведеної марківської моделі багато променевого каналу зв’язку. При цьому фізичний канал зв’язку має кінцеву пам’ять  $\tau$ . Розроблена модель дозволяє використати всі переваги марківської теорії оптимальної нелінійної фільтрації, застосувавши її до каналів з пам’яттю, зокрема до каналів з частотно-селективними завмираннями при наявності адитивних завад.

Приймаючи узагальнену модель полосового каналу зв’язку у вигляді лінійного чотириполіусника з характеристикою передачі  $K(j\omega, t) = K(\omega, t)\exp[j\varphi_K(\omega, t)]$  і розкладаючи функції  $K(\omega, t)$  і  $\varphi_K(\omega, t)$  в ряд Тейлора за аргументом  $\omega$  довкола  $\omega_0$ , одержимо таке описання моделі каналу

$$K(j\omega, t) = \left[ K^{(0)}(\omega_0, t) + K^{(1)}(\omega_0, t)(\omega - \omega_0) + (\omega - \omega_0)^2 K^{(2)}(\omega_0, t) + \dots \right] \times \exp \left[ j \left[ \varphi_K^{(0)}(\omega_0, t) + \varphi_K^{(1)}(\omega_0, t)(\omega - \omega_0) + \varphi_K^{(2)}(\omega_0, t)(\omega - \omega_0)^2 + \dots \right] \right], \quad (1)$$

де

$$K^{(i)}(\omega_0, t) = \left. \frac{\partial^i K(\omega, t)}{i! \partial \omega^i} \right|_{\omega = \omega_0};$$

$$\varphi_K^{(i)}(\omega_0, t) = \left. \frac{\partial^i \varphi(\omega, t)}{i! \partial \omega^i} \right|_{\omega = \omega_0}.$$

Модель (1) каналу зв’язку є багатоканальною. В кожному із каналів сигнал зазнає таких перетворень:

- отримує амплітудну модуляцію за законом  $K^{(i)}(\omega_0, t)$ ;
- проходить через чотириполіусник з частотно залежними параметрами за законом  $(\omega - \omega_0)^i$ ;
- проходить через чотириполіусник із змінною в часі і залежною від частоти фазочастотною характеристикою; причому фазочастотна характеристика для кожного  $i$ -того каналу однакова.

В результаті сигнал  $S_1(t)$  на виході каналу зв’язку можна подати як суму



$$S_1(t) = \sum_{i=0}^{\infty} S_{1i}(t), \quad (2)$$

де

$$S_1(t) = \frac{1}{2\pi} K^{(i)}(\omega_0, t) e^{j\varphi_K^{(0)}(\omega_0, t)} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) (\omega - \omega_0)^{(i)} \exp j[\varphi_K^{(1)}(\omega_0, t)(\omega - \omega_0) + \dots + \varphi_K^{(i)}(\omega_0, t)(\omega - \omega_0)^i + \dots] \exp(j\omega t) d\omega,$$

$$i=0,1,2, \dots; \quad (3)$$

$S(j\omega)$  - спектральна щільність сигналу, що передається.

Формула (3) по суті є математичною моделлю каналу передачі інформації з частотно-селективними завмираннями. У загальному випадку це модель немарківського каналу. Для одержання моделі марківського каналу досить обмежитися в кожному із параметричних парціальних каналів чотирма чотириполюсниками. Фізично це означає, що повинна бути скоректована нелінійна складова фазочастотної характеристики каналу зв'язку. Марківська модель при цьому описується виразом (2), де

$$S_{1i}(t) = \frac{1}{2\pi} K^{(i)}(\omega_0, t) \exp j[\varphi_K^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_K(t)] \times \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) (\omega - \omega_0)^i \exp j\omega[t - \tau(t)] d\omega, \quad (4)$$

де  $\tau_K(t) = \varphi_K^{(1)}(\omega_0, t)$ .

Легко помітити, що інтеграл в правій частині виразу (4) це по суті комплексне коливання на виході формального фільтра з коефіцієнтом передачі  $(\omega - \omega_0)^i$  коли на нього на вході діє сигнал  $S(t)$ .

Викладена тут модель каналу використана в дисертаційній роботі для розвитку теорії оптимального прийому радіосигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями на основі марківських процесів.

**У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ** дисертаційної роботи на основі розробленої автором і викладеної у другому розділі моделі каналу з частотно-селективними завмираннями синтезовані оптимальні і квазіоптимальні алгоритми системи передачі амплітудно-модульованих радіосигналів, які пройшли статистично неоднорідні середовища.

Узагальнена модель передаваного неперервно-значного сигналу представлена у вигляді

$$S(\vec{\lambda}_S(t), t) = A(\vec{\lambda}_S(t), t) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi(\vec{\lambda}_S(t), t)], \quad (5)$$

де  $\omega_0$  – несуча частота;  $A(\vec{\lambda}_S(t), t)$  та  $\varphi(\vec{\lambda}_S(t), t)$  – огибаюча і повільно змінювана частина фази передаваного сигналу, які можуть бути як детермінованими так і випадковими функціями часу, але детермінованими функціями процесу  $\vec{\lambda}_S(t)$ ;  $\vec{\lambda}_S(t) = \{\vec{\lambda}_\alpha(t), \vec{\lambda}_\beta(t)\}$ ;  $\vec{\lambda}_\alpha(t)$  – векторний марківський випадковий процес, що є моделлю неперервно-значного повідомлення;  $\vec{\lambda}_\beta(t)$  – векторний випадковий процес, що відображає наявність заважаючих факторів при формуванні сигналу в передавачі. При звичайній амплітудній модуляції модель (5) має вигляд

$$S(\vec{\lambda}_S(t), t) = [A_0 + M_a \lambda_\alpha(t)] \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (6)$$

де  $\varphi(t) = \lambda_\beta(t)$  – випадкова фаза;  $A_0$  і  $M_a$  – постійні величини.

Коливання на виході багатопроменевого каналу

$$y(\vec{\lambda}_S(t), t) = S_{10}(\lambda_S(t), t) + S_{11}(\lambda_S(t), t) + n(t) \quad (7)$$

де

$$\left. \begin{aligned} S_{10}(\bar{\lambda}_S(t), t) &= K^{(0)}(\omega_0, t) [A_0 + M_a \lambda_S(t - \tau_k)] \times \\ &\quad \times \cos[\omega_0 t + \varphi_k^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_k(t)] + n(t); \\ S_{11}(\bar{\lambda}_S(t), t) &= K^{(1)}(\omega_0, t) M_a \frac{d\lambda_S(t - \tau_k)}{dt} \times \\ &\quad \times \sin[\omega_0 t + \varphi_k^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_k(t)] + n(t); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{d\lambda_{\alpha_1}(t)}{dt} = -\beta\lambda_{\alpha_1}(t) + \frac{d\lambda(t)}{dt}.$$

На основі марківського підходу в дисертаційній роботі отриманий наступний алгоритм оптимального (квазіоптимального) прийому АМ радіосигналів: у вигляді системи стохастичних диференціальних рівнянь для оціночних значень  $\lambda^*_{\alpha}(t)$  для параметрів які фільтруються  $\lambda_{\alpha}(t)$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\lambda^*_{\alpha}(t)}{dt} &= -\alpha\lambda^*_{\alpha}(t) + K^*_{\lambda\lambda_1} F_{\lambda_1} + K^*_{\lambda\lambda} F_{\lambda}; \\ \frac{d\lambda^*_{\alpha_1}(t)}{dt} &= -\beta\lambda^*_{\alpha_1}(t) - \alpha\lambda^*_{\alpha}(t) + K^*_{\lambda\lambda_1} F_{\lambda} + K^*_{\lambda_1\lambda_1} F_{\lambda_1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

у вигляді системи нелінійних алгебраїчних рівнянь для кумулянтів (похибок фільтрації):

$$\left. \begin{aligned} K^*_{\lambda\lambda} \tilde{F}_{\lambda\lambda} + K^*_{\lambda\lambda_1} \tilde{F}_{\lambda_1\lambda_1} - 2\alpha K^*_{\lambda\lambda} + \frac{N_{\lambda}}{2} &= 0; \\ K^*_{\lambda_1\lambda_1} \tilde{F}_{\lambda_1\lambda_1} + K^*_{\lambda\lambda_1} \tilde{F}_{\lambda\lambda} - 2\alpha K^*_{\lambda\lambda_1} - 2\beta K^*_{\lambda_1\lambda_1} + \frac{N_{\lambda}}{2} &= 0; \\ K^*_{\lambda\lambda} K^*_{\lambda\lambda_1} \tilde{F}_{\lambda\lambda} + K^*_{\lambda\lambda_1} K^*_{\lambda_1\lambda_1} \tilde{F}_{\lambda_1\lambda_1} - \beta K^*_{\lambda\lambda_1} - \alpha(K^*_{\lambda\lambda_1} + K^*_{\lambda\lambda}) + \frac{N_{\lambda}}{2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В (9) і (10) позначено:

$$F_{\lambda}(\lambda_{\alpha}(t), \lambda_{\alpha_1}(t), t) = \frac{\partial F(\lambda_{\alpha}(t), \lambda_{\alpha_1}(t))}{\partial \lambda_{\alpha}} \Big|_{\lambda_{\alpha} = \lambda_{\alpha}^*};$$

$$F_{\lambda_1}(\lambda_{\alpha}(t), \lambda_{\alpha_1}(t), t) = \frac{\partial F(\lambda_{\alpha}(t), \lambda_{\alpha_1}(t))}{\partial \lambda_{\alpha_1}} \Big|_{\lambda_{\alpha_1} = \lambda_{\alpha_1}^*};$$

$$F(\lambda_{\alpha}(t), \lambda_{\alpha_1}(t), t) = \frac{1}{N_0} \left\{ 2y(t) - K^{(0)}[A_0 + M_a \lambda_{\alpha}(t)] \times \right.$$

$$\times \cos[\omega_0 t + \varphi_K^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_K(t)] + 2y(t) K^{(1)} M_a \frac{d\lambda_{\alpha}(t)}{dt} \times$$

$$\times \cos \left[ \omega_0 t + \varphi_K^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_K(t) - \frac{\pi}{2} \right] - \langle K^{(0)}[A_0 + M_a \lambda_{\alpha}(t)] \times$$

$$\times \cos \left[ \omega_0 t + \varphi_K^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_K(t) - \frac{\pi}{2} \right] + K^{(1)} M_a \frac{d\lambda_{\alpha}(t)}{dt} \times$$

$$\left. \times \cos \left[ \omega_0 t + \varphi_K^{(0)}(\omega_0, t) + \omega_0 \tau_K(t) - \frac{\pi}{2} \right] \right\}^2;$$

$$F_{ij}(\lambda_i(t), \lambda_j(t), t) = \frac{\partial^2 F(\lambda_i(t), \lambda_j(t), t)}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j} \Big|_{\substack{\lambda_i = \lambda_i^* \\ \lambda_j = \lambda_j^*}};$$

Система стохастичних диференційних рівнянь (9) дозволяє одержати схему оптимального приймача АМ радіосигналів (рис. 1), а система нелінійних алгебраїчних рівнянь (10) – формули для розрахунку відносної похибки фільтрації  $\delta_0$  повідомлення  $\lambda_{\alpha}(t)$ , яке приймається:

$$\delta_0 = \left[ 2q_{AM} \frac{m_a^2}{1 + m_a^2} \left( 4q_{AM} \frac{m_a^2 \Delta^2}{1 + m_a^2} + \Delta^2 + 1 \right) \right]^{-1} \times$$

$$\times \left[ 1 + 4q_{AM} \frac{m_a^2}{1 + m_a^2} \left( 4q_{AM} \frac{m_a^2 \Delta^2}{1 + m_a^2} + \Delta^2 + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} - 1,$$

де  $\delta_0$  – відносна похибка фільтрації повідомлення  $\lambda_\alpha(t)$ ;  $m_a = M_a \sigma_\lambda / A_0$  ;

$$q_{AM} = q \frac{(1 + m_a^2)}{m_a^2}; \quad \Delta = K^{(1)} \alpha / K^{(0)}.$$

На схемі рис. 1 позначено:

$$k_1 = \frac{2\delta_0 \sigma_\lambda^2 K^{(0)}}{N_0}; \quad k_2 = \frac{2K^{(1)} \beta \delta_2 \sigma_\lambda \sigma_{\lambda_1}}{N_0};$$

$$k_3 = \frac{2K^{(1)} \beta \delta_1 \sigma_{\lambda_1}^2}{N_0}; \quad k_4 = \frac{2K^{(0)} \delta_2 \sigma_\lambda \sigma_{\lambda_1}}{N_0},$$

$M_{AM}$  – модулятор АМ радіосигналу.

Як видно із схеми рис. 1 приймач АМ радіосигналів, що пройшли багатопроменевий канал радіозв'язку, містить інформаційний канал, на виході якого формується оцінка повідомлення  $\lambda^*_\alpha(t)$ , і канал формування оціночного значення  $\lambda^*_{\alpha_1}(t)$ . Між цими каналами існують перехресні зв'язки, глибина яких визначається коефіцієнтами  $k_2$  і  $k_4$ . Запропонований підхід дозволяє враховувати будь яку розмірність наведеної моделі багатопроменевого каналу зв'язку. Із збільшенням розмірності моделі схема приймача буде відповідно ускладнюватися.

Як показують розрахунки відносної похибки  $\delta_0$  фільтрації повідомлення  $\lambda_\alpha(t)$  (рис. 2), вже при двомірній моделі багатопроменевого каналу похибка фільтрації близька до граничної при будь-яких значеннях параметра  $\Delta$ .

В цьому ж розділі наведені результати синтезу і аналізу оптимальних і квазіоптимальних приймачів ДМ і ОМ радіосигналів, які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і флуктуаційним шумом.

**ЧЕТВЕРТИЙ РОЗДІЛ** присвячений синтезу систем оптимального і квазіоптимального прийому частотно- і фазомодульованих радіосигналів, які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і адитивним білим шумом, та наведений аналіз завадостійкості прийому.

Модель коливання на виході багатопроменевого каналу радіозв'язку має вигляд (при частотній модуляції):

$$y(t, \vec{\lambda}_s(t)) = K^{(0)}(\omega_0, t) A_0 \cos[\phi_0(t) + \Psi(\lambda_\alpha(t), t)] + \\ + K^{(1)}(\omega_0, t) A_0 M_\times \lambda_\alpha(t) \cos\left[\phi_0(t) + \Psi(\lambda_\alpha(t), t) + \frac{\pi}{2}\right] + n(t), \quad (11)$$

де  $\Phi_0(t) = \omega_0[t + \tau_k(t)] + \varphi_k^{(0)}(\omega_0, t) + \varphi_0$ ;  $\Psi(t, \lambda_\alpha(t)) = \varphi_0 + M_\times \int_0^t \lambda_\alpha(\tau) d\tau$ ;

$M_\times$  – постійний коефіцієнт;  $\varphi_0$  – початкова фаза.

Одержані в дисертаційній роботі алгоритми нелінійної фільтрації для моделі (11) мають вигляд:

для апостеріорної оцінки повідомлення яке фільтрується

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\lambda_\alpha^*(t)}{dt} &= -\alpha\lambda_\alpha^*(t) + K^*_{\lambda\lambda} F_\lambda + K^*_{\lambda\Psi} F_\Psi; \\ \frac{d\Psi^*(t)}{dt} &= K^*_{\lambda\Psi} F_\lambda + K^*_{\Psi\Psi} F_\Psi + M_\times \lambda_\alpha^*(t); \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

для кумулянтів (похибок фільтрації) в стаціонарному режимі

$$\left. \begin{aligned} K^*_{\lambda\lambda} \tilde{F}_{\lambda\lambda} + K^*_{\lambda\Psi} \tilde{F}_{\Psi\Psi} + 2K^*_{\lambda\lambda} K^*_{\lambda\Psi} \tilde{F}_{\lambda\Psi} - 2\alpha K^*_{\lambda\lambda} + \frac{N_\lambda}{2} &= 0; \\ K^*_{\lambda\Psi} \tilde{F}_{\lambda\lambda} + K^*_{\Psi\Psi} \tilde{F}_{\Psi\Psi} + 2K^*_{\lambda\Psi} K^*_{\Psi\Psi} \tilde{F}_{\lambda\Psi} + 2M_\times K_{\lambda\Psi} &= 0; \\ K^*_{\lambda\lambda} K^*_{\lambda\Psi} \tilde{F}_{\lambda\lambda} + K^*_{\lambda\Psi} K^*_{\Psi\Psi} \tilde{F}_{\Psi\Psi} + (K^*_{\lambda\lambda} K^*_{\Psi\Psi} + K^*_{\lambda\Psi}) \times \\ \times \tilde{F}_{\lambda\Psi} - \alpha K^*_{\lambda\Psi} + M_\times K^*_{\lambda\lambda} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де

$$F(\lambda_\alpha(\alpha), t) = -\frac{1}{N_0} \left\{ \left[ y(t) - K^{(0)} A_0 \cos[\Phi_0(t) + \Psi(\lambda_\alpha(t), t)] - \right. \right. \\ \left. \left. - K^{(1)} A_0 M_\times \lambda_\alpha(t) \cos \left[ \Phi_0(t) + \Psi(\lambda_\alpha(t), t) + \frac{\pi}{2} \right] \right]^2 \right\},$$

а функції  $\tilde{F}_i$  і  $\tilde{F}_{ij}$  визначаються аналогічно (8).

Схема оптимального в стаціонарному режимі (квазіоптимального) приймача ЧМ радіосигналів одержана із (14) і наведена на рис. 3.

На ній позначено:

$$k_{1 \times i} = \frac{2A_0}{N_0} (M_\div K^*_{\lambda\lambda} K^{(1)} + K^*_{\lambda\Psi} K^{(0)}); \\ k_{2 \times i} = \frac{2A_0}{N_0} (K^*_{\lambda\Psi} K^{(1)} M_\times + K^*_{\Psi\Psi} K^{(0)}); \\ k_{3 \times i} = \frac{2K^*_{\lambda\Psi}}{N_0}; \quad k_{4 \times i} = \frac{2K^*_{\Psi\Psi}}{N_0};$$

$M_{\times i}$  - модулятор ЧМ радіосигналу;  $M_{\div \times i}$  - модулятор подвійної частотної і двополосної амплітудної модуляції з подавленою несучою.

Як видно із схеми оптимального приймача (рис. 3), він містить інформаційний канал, на виході якого формується оцінка повідомлення  $\lambda^*_\alpha(t)$ , і канал формування оцінки фази  $\Psi^*(t)$ . На схемі явно проглядається петля фазового автопідстроювання частоти в складі блоків формування радіосигналу  $S_{10}(\lambda^*_\alpha(t), \Psi^*(t), t)$ , вхідного суматора, перемножувала, підсилювача з коефіцієнтом передачі  $k_{4 \times i}$ , суматора, інтегруючого пристрою і підстроюваного гетеродина.

Коли параметри каналу  $K^{(0)}$ ,  $K^{(1)}$ ,  $\tau_k(t)$  є невідомими і (або) випадковими, рівняння фільтрації, що визначають алгоритм оптимального прийому, можна одержати за аналогією з (13) і (14). При цьому схема приймача ускладнюється, тому що вона буде містити додаткові канали оцінок цих параметрів, тобто параметрів  $K^{(0)}$ ,  $K^{(1)}$ ,  $\tau_k(t)$ ,

В цілому запропонований підхід дозволяє вирішити задачу оптимального (квазіоптимального) прийому радіосигналів, які пройшли багатопроменевий канал зв'язку (канал з частотно-селективними замираннями) при будь-яких невідомих параметрах як сигналу, так і каналу і завад (наприклад, спектральної щільності флуктуаційного білого шуму  $N_0$ ). У цьому

випадку в разі впливу структурної адитивної завади, у вектор невідомих параметрів можуть входити і невідомі параметри структурної або іншої адитивної завади. Необхідно відзначити, що використання відомих методів (наприклад методу компенсації) не дає можливості суттєво зменшити шкідливий вплив структурної завади, тоді як запропонований метод дозволяє реалізувати квазіоптимальний (оптимальний) прийом багатопроменевих сигналів на фоні адитивних завад довільної структури.

В результаті розв'язання системи рівнянь (14) одержано вираз для розрахунку завадостійкості (відносної похибки  $\delta_{\times\dot{\lambda}}$  фільтрації повідомлення  $\lambda_{\alpha}(t)$  в стаціонарному режимі:

$$\delta_{\times\dot{\lambda}} = \left[ 2q_{\times\dot{\lambda}} m_{\times\dot{\lambda}}^2 (4q_{\times\dot{\lambda}} \Delta^2 + \Delta^2 + 1) \right]^{-1} \left\{ 1 + 2m_{\times\dot{\lambda}} \left[ q_{\times\dot{\lambda}} (4q_{\times\dot{\lambda}} \Delta^2 + \Delta^2 + 1) \right]^{1/2} - \left\{ 1 + 4m_{\times\dot{\lambda}} \left[ q_{\times\dot{\lambda}} (4q_{\times\dot{\lambda}} \Delta^2 + \Delta^2 + 1) \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \right\} \left\{ 1 + 4m_{\times\dot{\lambda}} \left[ q_{\times\dot{\lambda}} (4q_{\times\dot{\lambda}} \Delta^2 + \Delta^2 + 1) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

де  $m_{\times\dot{\lambda}} = M_{\times} \sigma_{\lambda} / \alpha$  індекс частотної модуляції корисним повідомленням  $\lambda_{\alpha}(t)$  з дисперсією  $\sigma_{\lambda}^2 = N_{\lambda} / 4\alpha$ ;  $q_{\times\dot{\lambda}} = A_0^2 / 2\alpha N_0$  - відношення сигнал/шум на вході приймача.

На рис. 4 наведені результати розрахунків за формулою (15) відносної похибки фільтрації при прийомі ЧМ сигналів для різних значень параметра  $\Delta$  і коефіцієнтів частотної модуляції  $m_{\times\dot{\lambda}}$ . Із аналізу графіків видно, що із збільшенням параметра  $\Delta = \alpha K^{(1)} / K^{(0)}$  відносна похибка фільтрації зменшується при будь-яких значеннях відношення сигнал/шум  $q_{\times\dot{\lambda}}$  і коефіцієнтах частотної модуляції  $m_{\times\dot{\lambda}}$ . Таким чином, синтезований алгоритм, що описується системою рівнянь (13), (14), і відповідна йому схема прийомного пристрою, наведена на рис. 5, забезпечують квазіоптимальний прийом багатопроменевого ЧМ радіосигналу на фоні флуктуаційного білого шуму  $n(t)$ .

В цьому ж розділі, використовуючи запропонований в дисертаційній роботі підхід, розроблені алгоритми оптимального і квазіоптимального прийому ФМ радіосигналів і синтезовані відповідні структурні схеми системи радіоприйому. Узагальнена структурна схема системи радіоприйому ФМ радіосигналів близька до структурної схеми системи радіоприйому ЧМ радіосигналів. Аналіз завадостійкості радіоприйому ФМ радіосигналів показує також якісні залежності, як і при прийманні ЧМ радіосигналів і кількісні результати тут не наводяться через нестачу місця).





## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

Проблема оптимальної передачі повідомлень по каналах, що містять статистично неоднорідні середовища, займає центральне місце в сучасній теорії і техніці зв'язку. Можна легко помітити, що практично усі реальні канали зв'язку відносяться до цього класу каналів.

До тепер деякі сторони проблеми залишаються поки що маловивченими. Це, зокрема, відноситься до задач передачі повідомлень статистично неоднорідними середовищами, коли мають місце частотно-селективні завмирання і адитивні завади в каналах зв'язку. Не вирішена задача створення теорії прийому радіосигналів, які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і адитивними завадами, яка дозволяє з одного боку одержати оптимальні (квазіоптимальні) алгоритми прийому, а з другого – досить просту їх технічну реалізацію.

1. В дисертаційній роботі розроблена марківська модель каналу зв'язку з частотно-селективними завмираннями (багатопроменевого каналу) з компенсацією нерівномірності групової затримки в каналі. Сигнальні та завадові складові на виході каналу описуються системою стохастичних нелінійних диференційних рівнянь. Таке описування каналу дозволяє використовувати марківський підхід до вирішення задачі синтезу оптимальних структур систем прийому модульованих сигналів на виході багатопроменевого каналу зв'язку.

2. Розроблені на основі теорії нелінійної оптимальної фільтрації алгоритми оптимального і квазіоптимального прийому модульованих (АМ, ЧМ, ФМ) радіосигналів. Одержані алгоритми дозволяють синтезувати оптимальні і квазіоптимальні приймачі не накладаючи обмеження на моделі сигналів, що приймаються і на діючі адитивні завади. Необхідно відзначити, що відомі алгоритми прийому сигналів в багатопроменевих каналах не дозволяють створювати алгоритми прийому, оптимальні при адитивних завадах, відмінних від білого шуму.

3. Синтезовані на основі розроблених алгоритмів оптимальні і квазіоптимальні системи прийому радіосигналів, які пройшли багатопроменевий канал зв'язку при дії адитивних завад. Одержані структурні схеми прийомних пристроїв в динамічному і стаціонарному режимах. Ці схеми можна реалізувати практично або програмним, або апаратним способами.

4. Використовуючи одержані системи нелінійних диференційних рівнянь для оціночних значень параметрів радіосигналів що фільтруються і для кумулянтів проведений розрахунок завадостійкості синтезованих прийомних пристроїв при різних видах модуляції. Аналіз результатів розрахунків дозволив зробити висновок про оптимальність синтезованих алгоритмів. Завадостійкість синтезованих приймачів відповідає завадостійкості прийому при розподілі і когерентному складанні окремих променів.

5. Одержані в дисертаційній роботі алгоритми квазіоптимального (оптимального в стаціонарному режимі) прийому ЧМ радіосигналів, використані при модифікації мобільної системи

радіозв'язку “Транспорт РС-6”, дозволили підвищити ефективність систем поїзного та станційного радіозв'язку, уникнути перерв у зв'язку, завмирань сигналу та ін.)

Таким чином, в дисертації розроблені методи прийому сигналів що пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями (багато променевим розповсюдженням радіохвиль) і адитивними завадами, синтезовані алгоритми і системи прийому таких сигналів і виконано аналіз завадостійкості алгоритмів і систем прийому при довільних випадкових параметрах сигналів і завад.

#### ОСНОВНІ ПРАЦІ ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Басов В.И., Загарий Г.И., Самсонкин В.Н., Терещенко Ю.Н. Цифровые интегральные сети связи. Харьков: Регион-Информ, 2000. -168с.
2. Поляков П.Ф., Басов В.И. Системы оптимального і квазіоптимального прийому радіосигналів у багатопроменевих каналах // Міжвуз. зб. наук. пр. Харків: - ХарДАЗТ, 1999. – Вип.35. –С.68-71.
3. Поляков П.Ф., Басов В.И. Синтез согласованных фильтров с когерентным откликом // Радиотехника: Межвуз. научн.-техн.сб. Тематич. вып. “Проблемы телекоммуникаций” Харьков: ХНУРЭ- 2001. -Вып. 123. -С.185-190.
4. Поляков П.Ф., Басов В.И., Сухорада А.И. Синтез характеристик и анализ помехоустойчивости оптимальных фильтров с когерентным откликом // Прикладная радиоэлектроника: Всеукр. межвуз. научн.-техн. сб. -Харьков: ХНУРЭ. -2003. -Вып.1. -С.27-30.
5. Басов В.И. Расчет и анализ помехоустойчивости оптимального и квазіоптимального приема ФМ радиосигналов в каналах с частотно-селективными замираннями и флуктуационным шумом //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. - 2003. №6. - С.32-34.
6. Поляков П.Ф., Басов В.И. Системы прийому сигналів з частотними спектрами, які перекриваються // Мережі і системи телекомунікації на залізничному транспорті: Міжвуз. зб. наук. праць –Харків: - ХарДАЗТ, 1999. – Вип.35. –С.65-68.
7. Соболев Ю.В., Поляков П.Ф., Басов В.И. Терещенко Ю.Н. Эволюция систем оперативно-технологической связи на железнодорожном транспорте // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. 2004. №1. –С. 3-14.
8. Басов В.И., Поляков П.Ф. Исследование работоспособности приемников многолучевых сигналов // Матеріали міжнародної школи-семінару з перспективних систем управління: Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –Харків. – 1998. -№4. -С.121.

9. Басов В.И., Поляков П.Ф. Новые подходы к повышению помехоустойчивости систем подвижной радиосвязи в условиях многолучевого распространения радиоволн // Матеріали міжнародної школи-семінару з перспективних систем управління: Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. – 1998. -№4. -С.122.
10. Басов В.И. Нові методи боротьби з інтерференційними замираннями у каналах зв'язку // Спеціальний випуск за результатами роботи 63-ої науково-техн. конференції Харківської державної академії та фахівців залізничного транспорту: Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. – 2001. -№5. – С.90-91.
11. Басов В.И. Синтез оптимальних фільтрів з когерентним відгуком // Матеріали 15-ї Міжнародної школи-семінару “Перспективні системи управління на залізничному транспорті: Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. – 2002. – №4,5 (додаток). – С.52.
12. Поляков П.Ф., Басов В.И., Терещенко Ю.М. Перспективи розвитку мереж оперативно-технологічного зв'язку залізничного транспорту України // Матеріали 15-ї Міжнародної школи-семінару “Перспективні системи управління на залізничному транспорті: Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків. – 2002. - №4,5. –С.52.
13. Поляков П.Ф., Басов В.И., Сухорада О.И. Синтез алгоритмів і систем прийому сигналів в каналах з частотно-селективними замираннями // Матеріали 16-ї Міжнародної школи-семінару “Перспективні системи управління на залізничному транспорті: // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. – 2003. - №5. -С. 51.
14. Поляков П.Ф., Басов В.В. Синтез сигналів для систем уплотнення абонентських ліній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків. – 1999. - №4. – С.95.

## АНОТАЦІЯ

Басов В.І. Прием та обробка сигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи і мережі. Українська державна академія залізничного транспорту. Харків, 2004.

Проводиться аналіз стану проблеми прийому радіосигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями. Систематизовані публікації за основними напрямками прийому радіосигналів в каналах з частотно-селективними завмираннями, сформульована задача досліджень і визначене місце результатів вирішення задачі прийому радіосигналів, одержаних в даній роботі.

Аналіз показує, що відомі в літературі моделі селективних завмирань і модель багато променевого розповсюдження радіохвиль досить повно і ефективно описують лінійний канал зв'язку. Вони є класичними. На основі цих моделей розроблено доволі велику кількість алгоритмів оптимального і квазіоптимального прийому сигналів, які пройшли канал з параметрами що залежать від частоти і з швидкими завмираннями. Для більшості додатків при неперервному каналі алгоритми виявляються досить складними в практичній реалізації.

З другого боку запропоновані алгоритми і системи прийому сигналів, які прості в технічній реалізації, основані на корекції каналу або сигналу. Такі системи передбачають використання на прийомній стороні в явній або неявній формі оцінювача поточного стану каналу (імпульсної характеристики або комплексного коефіцієнта передачі каналу) і пристрою, що відновлює втрачену форму системної характеристики (коректор каналу зв'язку) або інформаційний параметр сигналу (коректор сигналу). Критерієм точної настройки коректора сигналу є величина похибки відновлення інформаційного параметра в момент вибірки. Цьому напрямку присвячена досить велика кількість робіт (початок цьому напрямку, що називається нині адаптивною компенсацією, поклали роботи Л.М. Гольденберга і Д.Д. Кловського, 1959р.).

До нині створений ряд систем передачі повідомлень на основі лінійних адаптивних компенсаторів як для прощодових, так і для радіоканалів. Дослідження завадостійкості таких систем показує, що вона нижча гранично можливої. Це пов'язане з тим, що в каналах, в яких на їх виході діє флуктуаційний шум, особливо при глибоких частотно-селективних завмираннях, відновлення форми передаваних сигналів, що є можливим при ідеальній корекції характеристики каналу, не забезпечує ще мінімізацію кількості помилкових рішень при передаванні дискретних сигналів, або середньоквадратичну похибку відновлення передаваного повідомлення при передачі неперервних

сигналів. В останньому випадку задача особливо ускладнюється тим, що передавань повідомлення, як правило, входить нелінійно в сигнал, що передається.

В даній роботі пропонується і досліджується інший підхід, коли припускається, що фазочастотна характеристика каналу коректується до лінійної, а потім формується модель сигналу, який приймається і пропонуються методи оптимального прийому з урахуванням цієї моделі. Технічні рішення при такому підході простіше реалізуються при однакових характеристиках завадостійкості.

Таким чином, в даній дисертаційній роботі запропонована така постановка задачі. Найперспективнішим і радикальним напрямком в теорії і техніці прийому сигналів, які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і адитивними завадами є оптимальний (квазіоптимальний) прийом сигналів з оцінкою поточного стану каналу зв'язку. Задачу доцільно розв'язувати в два етапи. На першому етапі в результаті поточної оцінки фазочастотної характеристики каналу зв'язку здійснюється фазова корекція каналу. В результаті маємо канал зв'язку з лінійною фазочастотною характеристикою і довільною (реальною без амплітудної корекції) амплітудно-частотною характеристикою каналу.

На другому етапі здійснюється побудова моделі каналу зв'язку з реальною амплітудно-частотною характеристикою і адитивними завадами. При цьому модель враховує всі параметри каналу, завад, сигналу.

Враховуючи, що модель, одержана таким чином, відображає канал зв'язку без "пам'яті", то можливе використання марківської теорії нелінійної фільтрації при вирішенні задач оптимального (квазіоптимального) прийому сигналів, які пройшли в цілому канал з "пам'яттю". В дисертаційній роботі показано, що внаслідок двоетапного підходу розв'язання задачі оптимального (квазіоптимального) прийому можливе при будь-яких адитивних завадах і одержані схеми приймачів простіші в технічній реалізації.

Розроблений метод прийому сигналів, які пройшли канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями (багатопроневим розповсюдженням радіохвиль) і адитивними завадами; синтезовані нелінійні алгоритми і системи прийому сигналів, що пройшли такий канал при наявності як флуктуаційних, так і квазідетермінованих адитивних завад. Наведені результати розрахунків завадостійкості прийому радіосигналів з частотною, фазовою і амплітудною модуляцією, котрі показують суттєву перевагу розробленого підходу до синтезу систем радіоприйому порівняно з існуючими.

Ключові слова: канал зв'язку, частотно селективне завмирання, багатопроневе розповсюдження радіохвиль, нелінійна фільтрація, нелінійна обробка сигналів, алгоритм обробки, квазіоптимальний, оптимальний прийом радіосигналів, дисперсія, кумулянт, похибка фільтрації.

## АННОТАЦИЯ

Басов В.И. Прием и обработка сигналов в каналах с частотно-селективными замираниями. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2004.

Разработан метод приёма сигналов, прошедших канал связи с частотно-селективными замираниями (многолучевым распространением радиоволн) и аддитивными помехами. Создана Марковская модель многолучевого канала связи, синтезированы нелинейные алгоритмы и системы приёма сигналов, прошедших такой канал при наличии как флуктуационных так и квазидетерминированных аддитивных помех. Приведены результаты расчетов помехоустойчивости приема радиосигналов с частотной, фазовой и амплитудной модуляцией, которые показывают существенное преимущество разработанного подхода к синтезу систем радиоприема по сравнению с существующими.

Ключевые слова: канал связи, частотно-селективные замирания, многолучевое распространение радиоволн, нелинейная фильтрация, нелинейная обработка сигналов, алгоритм обработки, квазиоптимальный, оптимальный прием радиосигналов, дисперсия, кумулянт, погрешность фильтрации.

## SUMMARY

Basov V. I. Reception and signal processing in channels with frequency – selective fadings - Manuscript.

Thesis on reception of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.12.02 “Telecommunication systems and networks”. The Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2004.

Reception method of signals, passing along a communication channel with frequency - selective fading (multipath propagation of radio waves) and additive interferences is worked out. The Markov model of multi-rays communication channel is created, the non-linear algorithms and systems of a signal reception, passing along such a channel with fluctuation and quasidetermined additive interferences is synthesized. Results of calculations of noise interference of radio signals with frequency, phase and amplitude modulation are given. They demonstrate the essential advantage of the worked out approach to the synthesis of systems of radio reception as compared to the existing ones.

Keywords: communication channel, frequent - selective fading behaviors, multipath propagation of radio waves, non-linear filtration, non-linear signal processing, processing algorithm, quasioptimal, optimal radio signals reception, cumulant, filtration error.