

На правах рукопису

ШИШКІН ВЯЧЕСЛАВ ВАЛЕНТИНОВИЧ

ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ МОДЕМІВ ФМ ТА АФМ
СИГНАЛІВ

- 05.12.02 - Системи та пристрої передачі
інформації по каналах зв'язку;
05.12.17 - Радіотехнічні та телевізійні
системи та пристрої.

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Робота виконана в Одеському електротехнічному інституті
зв'язку ім.О.С.Попова.

Науковий керівник - кандидат технічних наук,
доцент П.В.Іващенко

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
професор В.А.Кисіль (ОЕІЗ)
- кандидат технічних наук,
доцент А.К. Гуцалюк (Одеський
НДІ зв'язку)

Провідна установа - Львівський науково-дослідний
радіотехнічний інститут (ЛНДРТІ).

Захист дисертації відбудеться 24 березня 1993 року о
10.00 годині на засіданні Спеціалізованої ради К 118.05.01
в Одеському електротехнічному інституті зв'язку ім. О.С.Попова за
адресою: 270021, Одеса, вул. Челюскінців, 1.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту.

Автореферат розіслано "___" _____ лютого 1993 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої ради
кандидат технічних наук,
професор

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00825803 (Q)

П.П.Воробієнко

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Удосконалення та розвиток мереж зв'язку країни потребують розробки нових високоефективних методів передачі інформації, а також підвищення енергетичної та частотної ефективності діючих систем передачі інформації (СПІ). Ефективність цифрових СПІ можна суттєво підвищити при використанні пристроїв цифрової обробки сигналів (ЦОС). В економічному відношенні використання ЦОС надає переваги завдяки досягненню більш високої ефективності використання смуги частот каналу зв'язку та потужності сигналу, високій технологічності виробництва та вигодами експлуатації обладнання.

Стан питання. В модуляторах та демодуляторах багатопозиційних ФМ та АФМ сигналів в цей час широке використання знаходить ЦОС. Досвід розробки модемів та огляд літератури дозволяє вважати, що значна доля енергетичних втрат (ЕВ) демодуляції - величини, що характеризує завадостійкість модема, - визначається характеристиками фільтрів інформаційного тракту (ІТ) модема. Використання цифрових фільтрів (ЦФ) дозволяє значно зменшити величину ЕВ демодуляції. Але ЦФ є найбільш складно реалізованими пристроями в модемі, що вимагає пошуку більш простих алгоритмів фільтрації. Недостатньо досліджена залежність величини ЕВ демодуляції від характеристик ЦФ модулятора та демодулятора (ЦФм та ЦФд).

Існує безліч методів синтезу ЦФ в частотній та частотно-часовій областях за критеріями близькості характеристик ЦФ до потрібних частотних та часових функцій. Але не існує методів синтезу ЦФ модема багатопозиційних ФМ та АФМ сигналів за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

Мета роботи та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є мінімізація величини ЕВ демодуляції, підвищення швидкодії та зниження складності ЦФ, шляхом оптимізації алгоритмів фільтрації та параметрів цифрових фільтрів модемів ФМ та АФМ сигналів; розробка елементів системи автоматичного проектування (САПР) ЦФ. Для цього в роботі вирішуються такі задачі:

1. Аналіз ЕВ демодуляції, обумовлених міжсимвольною інтерференцією, міжканальними завадами та непогодженою фільтрацією, що є наслідком неоптимальності фільтрів ІТ модема, що містить ЦФ.

2. Дослідження можливостей використання відомих методів синтезу ЦФ в частотній області – методу найменших квадратів та алгоритму Ремеза – для синтезу ЦФ модемів за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

3. Розробка нових методів синтезу ЦФ модемів за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

4. Дослідження впливу характеристик аналогових фільтрів, включених після ЦАП в модуляторі (пост-фільтрів) та включених до АЦП в демодуляторі (пред-фільтрів) на величину ЕВ демодуляції.

5. Розробка методу предкорекції цифровим фільтром модулятора неідеальності цифрового фільтра демодулятора з метов мінімізації ЕВ демодуляції модемів.

6. Дослідження методів зниження складності реалізації та підвищення швидкодії ЦФ демодуляторів.

7. Розробка методів синтезу ЦФ демодуляторів із пониженою складністю реалізації та підвищенням їх швидкодії.

8. Розробка елементів САПР, що забезпечують аналіз ЕВ модема з ЦФ та синтез ЦФ модема за критерієм мінімуму ЕВ.

Методи досліджень. У роботі застосовані ме-

тоди теорії передачі сигналів, теорії лінійних електричних ланцюгів, теорії цифрової обробки сигналів, методи лінійного та нелінійного програмування. Поряд з теоретичними методами широко застосовувались електронно-обчислювальні машини (ЕОМ) з метою проведення чисельного аналізу, синтезу ЦФ та моделювання модема. Робота містить також експериментальні дослідження модемів.

Наукова новизна. Дисертаційна робота містить такі наукові результати:

1. Одержано співвідношення, що дозволяє розрахувати за характеристиками ЦФ_м і ЦФ_д величину ЕВ демодуляції, обумовлену як окремими факторами: міжсимвольною інтерференцією, міжканальними завадами та неузгодженою фільтрацією, так і спільною дією перерахованих факторів.

2. Одержані співвідношення дозволяють оптимізувати параметри ЦФ модема за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

3. Розроблено метод предкорекції цифровим фільтром модулятора неідеальності цифрового фільтра демодулятора, що дозволяє мінімізувати ЕВ демодуляції. Одержано вираз для АЧХ ЦФ модулятора, що виконує предкоррекцію, при відомій АЧХ ЦФ демодулятора.

4. Розроблено новий метод синтезу ЦФ модулятора та демодулятора (роздільного та спільного) за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

5. Розроблено метод синтезу ЦФ демодулятора, що має каскадну структуру з децимацією за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

6. Розроблено метод синтезу ЦФ з цілими коефіцієнтами обмеженої розрядності, а також при представленні їх сумою невеликого числа доданків, що являються цілими степенями числа 2.

Практична цінність. На основі одержаних результатів розроблено пакет програм для аналізу та синтезу ЦФ.

Синтезовані розробленими методами ЦФМ і ЦФД можуть бути безпосередньо використані для підвищення енергетичної та частотної ефективності СПІ з багатопозиційними ФМ та АФМ сигналами. Розроблені ЦФМ та ЦФД використовувались в дослідно-конструкторських роботах "ГРУПА-3", "ГЕОС", "АЗІЯ" (НДІ Радіо, Москва) та "ЦИТРУС" (Одеський НДІ зв'язку). ЦФ дозволяють оптимально сформувати та обробити сигнали і практично досягти потенційної завадостійкості сигналів при поелементному прийомі (ЕВ менш за 0,1 дБ), а також забезпечити необхідне подавлення позасмугових складових до рівня -60 дБ та нижче.

Реалізація результатів роботи. Результати, одержані в дисертації, є складовою частиною робіт, що проводяться в Одеському електротехнічному інституті зв'язку ім. О.С.Попова Галузевю науково-дослідною лабораторією "Підвищення завадостійкості та ефективності систем супутникового зв'язку" за цільовою програмою ОЦ-028-01-БАСС (номер держреєстрації НДР 01900005122). Результати досліджень використовувались в НДІ Радіо (Москва) та Одеському НДІ зв'язку для розробки моделей багатопозиційних ФМ та АФМ сигналів.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на Дев'ятій всесоюзній конференції в теорії кодування і передачі інформації (Одеса, 1988), Міжнародному симпозиумі "Супутниковий зв'язок: реальність та перспективи" (Одеса, 1990), Всесоюзній науково-технічній конференції "Комп'ютерні методи дослідження проблем теорії і техніки передачі дискретних сигналів по радіоканалах" (Євпаторія, 1990), науково-технічній конференції "Системи та технічні засоби передачі даних" (Черкаси, 1991), науково-технічній школі-семінарі "Цифрова обробка сигналів у системах зв'язку та управління" (Ростов

Великий, 1991), Міжрегіональній науково-технічній конференції "Цифрова обробка сигналів у системах зв'язку та управління" (Львів, 1992), конференціях професорсько-викладацького складу ОЕІЗ ім.О.С.Попова (1988-1993) та наукових семінарах кафедри теорії електричного зв'язку ОЕІЗ ім.О.С.Попова.

П у б л і к а ц і і. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 робіт, у тому числі 2 авторських свідоцтва.

С т р у к т у р а т а о б ' е м р о б о т и. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, заключення та додатків. Робота містить 193 с., у тому числі 133 с. тексту, 33 с. малюнків, 11 с. додатків, бібліографії із 103 найменувань на 11 с.

О с н о в н і п о л о ж е н н я, щ о в и н о с я т ь с я н а з а х и с т.

1. Співвідношення, що дозволяють розрахувати за характеристиках фільтрів модулятора та демодулятора величину ЕВ демодуляції, обумовлену як окремими факторами (міжсимвольною інтерференцією, міжканальними завадами та неузгодженою фільтрацією), так і спільною дією перерахованих факторів.

2. Метод роздільного та спільного синтезу ЦФм и ЦФд за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

3. Оптимальні значення порядку і частоти зрізу аналогових пред- та пост-фільтрів за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

4. Вираз для АЧХ ЦФм, виконуючого предкорекцію відомої АЧХ ЦФд, для мінімізації ЕВ демодуляції.

5. Метод синтезу ЦФд, реалізованого за каскадною структурою з децимацією за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

6. Метод синтезу ЦФд з цілими коефіцієнтами обмеженої розрядності, а також при представленні їх сумою невеликого числа доданків, що являються цілими степенями числа 2.

7. Результати машинного моделювання ІТ квадратурного підканалу модема багатопозиційних ФМ і АФМ сигналів, що підтверджують теоретичні висновки.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність обраної теми. Дається короткий огляд відомих результатів, формулюються цілі та задачі дослідження.

Перший розділ присвячений аналізу алгоритмів ЦОС в модемах та ЕВ демодуляції.

На основі квадратурного представлення багатопозиційних ФМ та АФМ сигналів розглядені засоби побудови модемів, місце пристроїв ЦОС в модемах. Указані основні джерела ЕВ демодуляції. Досвід розробки модемів та огляд літератури дозволяють вважати, що значна частина ЕВ демодуляції визначається характеристиками фільтрів ІТ модема, утвореного каскадним включенням усіх фільтрів, крізь які проходить інформаційний сигнал від входу модулятора до виходу демодулятора. Використання ЦОС в модуляторі і демодуляторі дозволяє оптимально сформувати та обробити сигнал і практично досягнути потенційної завадостійкості сигналів при поелементному прийомі. При цьому ЦФ є найбільш складно реалізованим пристроєм у схемах модулятора і демодулятора.

Оскільки модулятор і демодулятор реалізуються по квадратурній схемі, а квадратурні підканали ідентичні, то для аналізу ЕВ демодуляції розглядається низькочастотна модель одного з підканалів спільно з каналом зв'язку в основній смузі частот. Несуче та тактове коливання при цьому вважаються ідеальними. У каналі зв'язку з постійними параметрами, які не вносять лінійних спот-

ворень у передаваемий сигнал, діє білий гаусовський шум з дво-
бічною спектральною густиною потужності шуму (СПП) $N_0/2$ та сигнала
сусідніх каналів, несучі частоти яких зміщені відносно несучої
частоти розглядуваного сигналу на величину частотного розносу Δf .

Класифікуються складові ЕВ демодуляції, що залежать від
параметрів ІТ модема, таким чином: втрати, обумовлені міжсимволь-
ною інтерференцією (МСІ) $\theta_{\text{МСІ}}$; втрати, обумовлені завадами від
сусідніх каналів (міжканальні завади) $\theta_{\text{МКЗ}}$; втрати, обумовлені
неузгодженістю, характеристик фільтра демодулятора зі спектром
оброблюваного сигналу $\theta_{\text{НС}}$.

Основна фільтрація в ІТ модема здійснюється ЦФм и ЦФд. Їх
доцільно реалізувати за нерекурсивним алгоритмом з симетричною
імпульсною характеристикою (ІХ) з таких причин: завдяки відсут-
ності зворотних зв'язків не відбувається накопичення помилок
квантування, що приводить до зниження необхідної розрядності в
порівнянні з рекурсивним алгоритмом; завдяки регулярній струк-
турі нерекурсивний ЦФ легше реалізувати на сигнальному процесорі;
нерекурсивний ЦФ з симетричною ІХ має строго лінійну ФЧХ та чис-
ло множень для обчислювання вихідного відліку ЦФ можна змен-
шити удвічі.

Інформаційний тракт модема містить також пред- та пост-фільтри.
Основною задачею цих фільтрів є виділення основної смуги
частот і послаблення завад накладання, що проявляються при цифро-
аналоговому та аналого-цифровому перетвореннях.

Для досягнення рівності нулю величина ЕВ демодуляції вимоги
до АЧХ ЦФм и ЦФд надаються у вигляді

$$H_M(f) = H_D(f) = \begin{cases} \sqrt{N(f)} & , \text{ при } |f| \leq f_H(1+\alpha), \\ 0 & , \text{ при } |f| > f_H(1+\alpha). \end{cases} \quad (1)$$

де $N(f)$ - амплітудний спектр Найквіста, $f_H = 1/(2T)$ - частота

Найквіста, T - тактовий інтервал, α - коефіцієнт розширення смуги частот ($0 \leq \alpha \leq 1$). Вимоги до ФЧХ ЦФМ та ЦФД - вони повинні бути лінійними.

Далі аналізуються способи фізичної реалізації ЦФ модема. Реалізація ЦФМ, в задачу якого входить формування сигналу з компактним спектром, являється досить простою. На вхід ЦФМ на протязі одного тактового інтервалу T надходить одне p -розрядне число ν_r ($r = 1, \dots, M$), що визначає координату сигнальної точки на площині. При цьому розрядність p невелика ($p = \log_2 M$, де M - число сигналів у підансамблі квадратурних складових сигналів). Способом реалізації є використання постійно-запам'ятовуючого пристрою (ПЗП), в якому записані значення $m2^{pL}$ згортки усіх послідовностей вхідних чисел ν_r довжиною L з коефіцієнтами ЦФМ. Тут m - число відліків на тактовому інтервалі T , L - пам'ять фільтру (кількість тактових інтервалів входного сигналу, що визначають значення відліку вихідного сигналу). Для ЦФМ характерно, що його складність взагалі не залежить від значень коефіцієнтів, а залежить лише від порядку фільтра та величини m . При невеликих апаратних витратах можливо реалізувати досить складні ЦФМ, а, отже, і їх характеристики будуть близькі до характеристик оптимальних фільтрів (1).

Значно складніше реалізується ЦФД, оскільки на його вхід на протязі тактового інтервалу T поступають m не рівних один одному багаторозрядних відліків суміші сигналу, шуму та завад від сусідніх каналів частково відфільтрованих пред-фільтром. В залежності від швидкості передачі елементна база, на якій реалізуються ЦФД, може бути такою: на сигнальному процесорі з апаратним помножувачем; на сигнальному процесорі без апаратного помножувача; на елементах жорсткої логіки з помножувачем, реалізованим на ПЗП; на елементах жорсткої логіки з реалізацією на ПЗП операції

згортки; на елементах жорсткої логіки з використанням суматорів та регістрів - множення реалізується операцією зсуву зі складанням. При значно менших апаратних витратах можливо реалізувати ЦФМ більш високого порядку, що забезпечує більш точну апроксимацію необхідних характеристик, ніж ЦФд. Наприклад, для реалізації ЦФМ, порядок якого $N_M \leq 128$ вимагається лише чотири ІМС. Для реалізації ЦФд з помножувачем, виконаним на ПЗП (вхідні відліки 8-ми розрядні), оцінка необхідної кількості ІМС слідує: $7 + [N_d/14]_r + [N_d/14]_r + 2[N_d/32]_r + 2[(8 + \log_2 N_d)/4]_r$, де $[]_r$ означає найближче більше ціле число, а N_d - порядок ЦФд. Наприклад, при $N_d = 14$ ЦФд реалізується на 16 ІМС.

Проводиться аналіз ЕВ демодуляції. Одержані співвідношення для $\theta_{МС1}$, $\theta_{МКЗ}$, $\theta_{НС}$ та загальних ЕВ θ . Всі розрахунки проводяться у масштабі цифрових частот $w=f/f_d$, де $f_d = \pi/T$ - частота дискретизації.

$$\theta_{МС1} = 1 + [E/N_0] / [G_4/G_3^2]; \quad \theta_{МКЗ} = 1 + [E/N_0] / [G_5/G_3^2];$$

$$\theta_{НС} = G_1 G_2 / G_3^2; \quad \theta = [G_1 G_2 + E/N_0 [G_4 + G_5]] / G_3^2, \quad (2)$$

$$G_1 = \int_0^{\infty} H_M'^2(w) H_{ПМ}^2(w) dw, \quad G_2 = \int_0^{\infty} H_d^2(w) H_{ПД}^2(w) dw, \quad (3a)$$

$$G_3 = \int_0^{\infty} H_M'(w) H_d(w) H_{ПМ}(w) H_{ПД}(w) dw, \quad (3б)$$

$$G_4 = 4 \sum_{k=1}^R \left[\int_0^{\infty} H_M'(w) H_d(w) H_{ПМ}(w) H_{ПД}(w) \cos 2\pi w k \pi dw \right]^2, \quad (3в)$$

$$G_5 = \frac{A}{2\pi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 0}}^R \int_{-\infty}^{\infty} H_M'^2(w+i\Delta w) H_{ПМ}^2(w+i\Delta w) H_d^2(w) H_{ПД}^2(w) dw, \quad (3г)$$

$H_M'(w) = \text{sinc}(\pi w) H_M(w)$, E/N_0 - відношення енергії сигналу до СПП шуму на вході демодулятора, A - відносні потужності сусідніх каналів, що вказують у скільки разів потужність сусідніх каналів

більша за потужність розглядуваного каналу (вважається, що потужності сусідніх каналів однакові), $\Delta\omega$ - частотний рознос між несучими сусідніх каналів в масштабі цифрових частот, $H_{\text{ПД}}(\omega)$ - АЧХ пред-фільтру, $H_{\text{ПМ}}(\omega)$ - АЧХ пост-фільтру, R - число сусідніх каналів, несучі частоти яких розміщені вище (або нижче) несучої частоти розглядуваного каналу, що здійснюють суттєвий внесок у величину $\theta_{\text{МКЗ}}$, ρ - число сигналів переданих раніше (або пізніше) розглядуваного сигналу, що здійснюють суттєвий внесок в $\theta_{\text{МС1}}$.

У другому розділі вирішуються основні задачі оптимізації параметрів ЦФ, пост- та пред-фільтрів модема. Оптимізація ЦФ проводиться шляхом синтезу їх відомими та розробленими методами. Знайдені залежності величини ЕВ демодуляції від гарантованого затухання, яке забезпечує пред- та пост-фільтри в області $f_{\text{д}} - f_{\text{н}}(1+\alpha) < |f| < f_{\text{д}} + f_{\text{н}}(1+\alpha)$ (область першого пелюстка АЧХ ЦФ) окремо для ЦФ_м та ЦФ_д. Визначаються оптимальні значення порядку та частоти зрізу пред- і пост-фільтрів від m та A за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції. Досліджується інтерполююча для ЦАП. Доводиться, що з метою зменшення складності пост-фільтру, в ЦФ_м доцільно вибирати $m \geq 16$. При цьому складність ЦФ_м збільшується незначно. Доводиться, що в ЦФ_д доцільно вибирати m рівне 4 або 8. При цьому досягається оптимальне співвідношення між складностями ЦФ_д и пред-фільтра.

Одержані аналітичні вирази для $\theta_{\text{МС1}}$, $\theta_{\text{МКЗ}}$, $\theta_{\text{НС}}$ та загальних ЕВ θ , виражені через коефіцієнти ЦФ_м и ЦФ_д: $b_{\text{м}l}$, $l = 0, 1, 2, \dots, N_{\text{м}} - 1$ та $b_{\text{д}l}$, $l = 0, 1, 2, \dots, N_{\text{д}} - 1$.

Досліджується можливість використання відомих методів синтезу ЦФ в частотній області (метода найменших квадратів і алгоритму Ремеза) для синтезу за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції. Синтезується ЦФ_м або ЦФ_д. При цьому припускається, що другий ЦФ має

АЧХ виду "корінь з піднятого косинуса". Проводиться порівняння результатів синтезу, з яких виходить, що метод найменших квадратів більше відповідає критерію мінімуму ЕВ демодуляції, ніж алгоритм Ремеза.

Досліджується метод зниження ЕВ демодуляції шляхом предкорекції АЧХ цифрового фільтру демодулятора цифровим фільтром модулятора. Ставиться задача: після синтезу ЦФд, АЧХ якого $H_d(w)$ апроксимує функцію $\sqrt{N(w)}$ при обмеженнях на складність, визначити таку функцію $B_M(w)$, що визначає вимагаєму АЧХ ЦФд, щоб ЕВ демодуляції були мінімальні. Уявимо шукану функцію у вигляді

$B_M(w) = H(w) + H_1(w)$, де $H^2(w)$ - спектр Найквіста, можливо не співпадаючий з функцією $N(w)$, що використана при синтезі ЦФд; $H_1(w)$ - невідома функція. Задача полягає в пошуку функції $H(w)$, що мінімально відрізняється в середньоквадратичному значенні від знайденої $H_d(w)$, тобто функція $H(w)$ зв'язана з $H_d(w)$ функціоналом

$$\int_0^{W_H(1+\alpha)} [H_d(w) - H(w)]^2 dw \rightarrow \min, \quad (4)$$

Для послідовних викладок $H_d(w)$ виразимо у вигляді

$H_M(w) = H(w) + H_2(w)$, де $H_2(w)$ - невідома функція.

Доведено, що при умові $|H_1(w)| \ll |H(w)|$ та $|H_2(w)| \ll |H(w)|$, $0 \leq |w| \leq W_H(1+\alpha)$ ЕВ будуть мінімальні, якщо $H_1(w) = -H_2(w)$. При відомій АЧХ $H_d(w)$ мінімальна величина ЕВ демодуляції досягається, якщо АЧХ $B_M(w)$ буде дорівнювати

$$B_M(w) = \begin{cases} 2H(w) - H_d(w) & \text{при } 0 \leq |w| \leq W_H(1+\alpha), \\ 0 & \text{при } W_H(1+\alpha) < |w| \leq 0,5. \end{cases} \quad (5)$$

де

$$H(w) = a \frac{H_d^2(w)}{\sqrt{H_d^2(2W_H - w) + H_d^2(w)}}. \quad (6)$$

$$a = \frac{\int_0^{2W_H} \frac{H_d^2(w)}{\sqrt{H_d^2(2W_H - w) + H_d^2(w)}} dw}{\int_0^{2W_H} \frac{H_d^2(w)}{H_d^2(2W_H - w) + H_d^2(w)} dw}. \quad (7)$$

Співвідношення (5)...(7) визначають потрібну АЧХ для синтезу ЦФМ.

Пропонується новий метод роздільного або спільного синтезу ЦФМ та ЦФД, який забезпечує мінімум ЕВ демодуляції. Коефіцієнти ЦФМ b_{m1} , $l = 0, 1, 2, \dots, N_M - 1$ зв'язані з коефіцієнтами c_{m1} , $l = 0, 1, 2, \dots, K_M$ співвідношеннями: для непарних N_M : $K_M = (N_M - 1)/2$, $c_{m0} = b_{mK}$, $c_{m1} = 2b_{m(K-1)} = 2b_{m(K+1)}$, $l = 1 \dots K_M$, $v_M = 0$; для парних N_M : $K_M = N_M/2 - 1$, $c_{m1} = 2b_{m(K-1)} = 2b_{m(K+1)}$, $l = 0 \dots K_M$, $v_M = 0,5$. Аналогічно визначаються коефіцієнти ЦФД. Роздільний метод полягає в тому, що АЧХ ЦФМ вважається відомою та визначаються коефіцієнти ЦФД (або навпаки - відома АЧХ ЦФД та визначаються коефіцієнти ЦФМ). Коефіцієнти c_{d1} , $l = 1, 2, \dots, K_D$ (вважається, що $c_{m0} = 1$), визначаються в результаті розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР)

$$\bar{c}A = 0. \quad (8)$$

Коефіцієнти матриці A визначаються

$$D_{n,1} = W_N d_{n,1}^{(1)} - d_{n,1}^{(2)} + \frac{E}{N_0} [d_{n,1}^{(3)} + A d_{n,1}^{(4)}], \quad (9)$$

$$l = 0, \dots, K_D; n = 0, \dots, K_D,$$

$$\text{де } d_{n,1}^{(1)} = \int_0^{0.5} \cos 2\pi w(n+v_D) \cos 2\pi w(1+v_D) dw,$$

$$d_{n,1}^{(2)} = a_n^{(2)} \cdot a_1^{(2)}, \quad a_1^{(2)} = \int_0^{0.5} \cos(2\pi w(1+v_D)) H_M(w) dw,$$

$$d_{n,1}^{(3)} = 4 \sum_{k=1}^p a_{n,k}^{(3)} a_{1,k}^{(3)}, \quad a_{1,k}^{(3)} = \int_0^{0.5} H_M(w) \cos(2\pi w(1+v_D)) \cos 2\pi w k n dw,$$

$$d_{n,1}^{(4)} = \frac{1}{\pi} \sum_{l=1}^R \int_0^{0.5} \cos(2\pi w(n+v_D)) \cos(2\pi w(1+v_D)) H_M^2(w+l\Delta w) dw.$$

Проводиться дослідження величини ЕВ, що обумовлена неідеальністю ЦФД, синтезованого з пропозованим методом при різних N_D , m , A , α , E/N_0 . При цьому вважається, що ЦФМ - це фільтр з ідеальною АЧХ вигляду "корінь із піднятого косинуса". Доведено, що при зменшенні α , або при збільшенні відношення сигнал/шум при вході демодулятора для досягнення однакової величини ЕВ порядок фільтру необ-

хідно збільшувать. Наприклад, при $E/N_0 = 9$ дБ, $m = 4$ та $A = 7$ дБ для забезпечення величини ЕВ демодуляції 0,1 дБ при $\alpha = 0,4$ вимагається ЦФд 26-го порядку, а при $\alpha = 0,2$ - 37-го порядку. Для забезпечення тієї ж величини ЕВ при $\alpha = 0,4$ та $E/N_0 = 4$ дБ вимагається ЦФд 22-го порядку.

Спільний синтез ЦФм та ЦФд в ітеративній процедурі полягає в наступному:

1) розв'язуючи СЛАР (8), визначаємо c_{d1} . Вважаючи, що $H_M(w)$ описується функцією "корень із піднятого косинуса". Нехай номер ітерації $J = 0$;

2) визначаємо c_{m1} , вважаючи, що $H_d(w)$ - АЧХ відомого ЦФд, синтезованого на попередньому ступені;

3) визначаємо c_{d1} , вважаючи, що $H_M(w)$ - АЧХ відомого ЦФм, синтезованого на попередньому ступені;

4) по одержаним коефіцієнтам ЦФм та ЦФд визначаємо величину ЕВ демодуляції θ_J (де J - номер ітерації). Якщо різниця $\theta_{J-1} - \theta_J$ більше деякої встановленої величини $\Delta\theta$, то збільшуємо J на одиницю і переходимо до ступеню 2). У противному разі закінчуємо розрахунки. Розрахунки показують, що, якщо на першій ітерації величина ЕВ демодуляції менша за 0,1 дБ, то для спільного синтезу достатньо обмежитись однією ітерацією. Якщо на першій ітерації величина ЕВ демодуляції більша за 0,1 дБ, то для спільного синтезу достатньо обмежитись двома-трьома ітераціями.

В третьому розділі досліджуються методи зниження складності ЦФд.

Найбільш ефективним методом зниження складності ЦФд, або при однаковій складності поліпшення його характеристик, є метод представлення ЦФд у вигляді каскадного з'єднання $P+1$ нескладних ЦФ, що мають багато нульових коефіцієнтів. Алгоритм роботи ЦФд має

таку особливість. Для роботи системи тактової синхронізації демодулятора достатньо двох відліків на тактовому інтервалі по виходу ЦФд, хоча для винесення рішення про передаваний сигнал чи для роботи декодера з м'яким рішенням достатньо одного відліка на тактовому інтервалі. Використовуючи цю особливість можна ще більш зменшити складність та підвищити швидкодів ЦФд за рахунок пониження частоти дискретизації від каскаду до каскаду в 2 рази та зменшення числа елементів лінії затримки на величину, рівну числу нульових коефіцієнтів. Основну фільтрацію здійснює ЦФ останнього каскаду. Кожний каскад, окрім останнього, виконує по відношенню до подальшого каскаду задачу, аналогічну аналоговому пред-фільтру, а саме, подавляє спектральні складові в областях частот $f_d / 2^{P-r} - f_n(1+\alpha) \leq |f| \leq f_d / 2^{P-r} + f_n(1+\alpha)$, де r - номер каскаду (нумерація каскадів вводиться, починаючи з останнього). Грунтуючись на методі синтезу для однокаскадно реалізуємих ЦФ, розглянутому у другому розділі, розроблено метод синтезу каскадно реалізуємого ЦФд за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

Каскадна реалізація дозволяє зменшити складність ЦФд більш ніж в два рази. Наприклад, трьохкаскадний фільтр з ЦФ першого каскаду 4-го порядку, ЦФ другого каскаду 5-го порядку та ЦФ третього каскаду 9-го порядку еквівалентний своїми характеристиками однокаскадному ЦФ 46-го порядку.

Розглядається ЦФд з цілими коефіцієнтами обмеженої розрядності. Пропонується метод синтезу таких ЦФд за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції, використовуючи процедуру p -мірного локального пошуку. Цей метод синтезу забезпечує більш точну апроксимацію, ніж квантування дійсних коефіцієнтів ЦФд.

Розглядається спосіб зниження складності ЦФд та підвищення його швидкодії шляхом представлення коефіцієнтів сумою невеликого

числа доданків, які є цілими степенями числа 2. Пропонується метод синтезу таких ЦФд за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції, використовуючи процедуру n-мірного локального пошуку.

Розглядається спосіб зниження складності ЦФд та підвищення його швидкодії при використанні як методу каскадування, так і представлення коефіцієнтів ЦФ кожного з каскадів сумою невеликого числа доданків, що є цілими степенями числа 2. Викладається метод синтезу таких ЦФд за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції. Розглянутим методом було синтезовано трьохкаскадний ЦФд, реалізований з коефіцієнтами, що є цілими степенями числа 2, або сумою двох таких чисел. Фільтр містить 19 суматорів. Гарантоване затухання в смузі затримання такого ЦФд дорівнює 40 дБ. ЕВ демодуляції, обумовлені неідеальністю ЦФд, дорівнюють 0,06 дБ. Для реалізації однокаскадного фільтру, еквівалентного за своїми характеристиками розглянутому трьохкаскадному фільтру, необхідно представляти деякі з його коефіцієнтів сумою трьох доданків, що є цілими степенями числа 2. При цьому фільтр реалізується більш, ніж на 40 суматорах.

В четвертому розділі з метою підтвердження теоретичних висновків другого та третього розділів розроблена машинна модель ІТ квадратурного підканалу модема багатопозиційних ФМ та АФМ сигналів. Моделювання проводиться для ІТ з оптимальними ЦФ, одержаними в результаті синтезу. Результати моделювання показують, що сумарна величина ЕВ не перевищує 0,1 дБ, що підтверджує розрахункові значення, наведені в розділах 2 та 3.

Приводяться результати розроски та експериментальних досліджень модемів ФМ₄ з ЦОС. Проведені випробування показали, що застосування ЦФ дозволяє практично досягти потенційної завадостійкості сигналів при поелементному прийомі (ЕВ менше за 0,1 дБ).

ЛІНБ ім. В. Стефаніка
АН України

з також забезпечити подавлення позасмугових складових на виході модулятора до рівня -60 дБ та нижче.

В з а к л ю ч е н н і подані основні підсумки досліджень та практичні результати роботи:

1. Одержані аналітичні вирази для величини ЕВ демодуляції, обумовлені неідеальністю фільтрів ІТ модема. Ці вирази дозволяють не тільки розрахувати втрати, але і оптимізувати параметри ЦФ модема.

2. Розроблено новий метод спільного та роздільного синтезу ЦФ ІТ модема за критерієм мінімуму ЕП демодуляції.

3. В класі аналогових фільтрів Батерворта визначені оптимальні значення параметрів аналогових пред- та пост-фільтрів за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції.

4. Одержано аналітичний вираз для АЧХ ЦФм здійснюючого предкорекцію неідеальності АЧХ ЦФд демодулятора з метою зниження до мінімуму величини ЕВ демодуляції.

5. Розроблено метод синтезу ЦФд, реалізованого з метою зниження складності у вигляді каскадного з'єднання декількох нескладних ЦФ з пониженням частоти дискретизації від каскаду до каскаду.

6. Розроблено метод пошуку за критерієм мінімуму ЕВ демодуляції цілих коефіцієнтів ЦФд обмеженої розрядності, представлених сумою невеликого числа доданків, що є цілими степенями числа 2.

7. Розроблені та випробувані ЦФ модема, що формують в модуляторі оптимальним чином спектр сигналу і оптимально обробляють сигнал в демодуляторі. Такі фільтри забезпечують ЕВ демодуляції, обумовлені неідеальністю характеристик ІТ, менш за $0,1$ дБ, а подавлення позасмугових складових на виході модема більш за 60 дБ.

8. Розроблено САПР, що забезпечує аналіз ЕВ модема з ЦФ,

синтез ЦФ модема за критерієм мінімуму ЕБ і моделювання роботи квадратурного підканалу модема спільного з каналом зв'язку.

Матеріали дисертаційної роботи відображені в підсумковому звіті Галузевої науково-дослідної лабораторії "Підвищення заводостійкості систем супутникового зв'язку" ОЕІЗ ім.О.С.Попова і викладені у таких публікаціях:

1. Иващенко П.В., Шишкин В.В. Анализ энергетических потерь модема с цифровыми фильтрами // Радиотехника, 1993 № 3.
2. Иващенко П.В., Шишкин В.В. Совместный синтез передающего и приемного цифровых фильтров модема ФМ сигналов // Девятая всесоюзн. конф. по теории кодирования и передачи информации. Тез. докл. - Одесса, 1988. - с. 33 - 35.
3. Иващенко П.В., Шишкин В.В. Анализ энергетических потерь модема с цифровыми фильтрами // Помехоустойчивость систем связи: Сб. научн. трудов Одесск. электротехн. ин-т связи им. А.С.Попова. Одесса, 1990. 129 с.
4. Иващенко П.В., Шишкин В.В. Анализ энергетических потерь модема дискретных двумерных сигналов с цифровыми фильтрами // Международный симпозиум "Спутниковая связь: реальность и перспективы" Тез. докл. - Одесса 1990. - с. В.7.1 - В.7.10.
5. Иващенко П.В., Шишкин В.В. Синтез цифровых фильтров модема дискретных сигналов // Всесоюзн. НТК "Компьютерные методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам" Тез. докл. - Евпатория, 1990. - с. 68-69.
6. Шишкин В.В., Иващенко П.В. Реализация цифрового фильтра демодулятора модема двумерных сигналов на микропроцессоре или БМК // НТК "Системы и технические средства передачи данных" Тез. докл. - Черкассы, 1991. - с. 55 - 56.

1.7.1138

7. Шишкин В.В., Иващенко

двумерных дискретных сигналов с цифровой обработкой // НТ шко-
ла-семинар "Цифровая обработка сигналов в системах связи и управ-
ления" Тез. докл. - Ростов Великий 1991. - с. 70 - 71.

8. Шишкин В.В., Иващенко П.В. Метод снижения энергетических

потерь модема двумерных дискретных сигналов с цифровой обработкой
// Межрегиональная НТК "Цифровая обработка сигналов в системах
связи и управления" Тез. докл. - Львов 1992. - с. 42 - 43.

9. А.с. 1614120 СССР, МКИ⁴ H04L 7/02. Устройство тактовой

синхронизации/ Шишкин В.В., Мельник А.М., Иващенко П.В. - Оpubл.
15.12.90, Бюл. № 46. - с.

10. А.с. 1688441 СССР, МКИ⁴ H04L 27/22. Устройство синхро-

низации несущей/ Мельник А.М., Шишкин В.В., Иващенко П.В. -
Оpubл. 30.10.91, Бюл. № 40. - с.

giz

Підписано до друку 13.02. 93 р.

Об'єм: 1,25 друк. арк.

Формат 60x84 1/16.

Зам. № 32. Тираж 100.