

МІНІСТЕРСТВО ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ
ім.О.С.Попова

На правах рукопису

УДК 621.3.037

КИСІЛЬ Андрія Віталійович

Оптимізація високошвидкісних систем
передачі інформації без обмежень
та при обмеженнях Найквіста

Спеціальності: 05.12.17.- Радіотехнічні і
телевізійні системи
та пристрої
05.12.14.- Теорія телекомуні-
кацій

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Одеса-1996

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751959 (-)

Державній Академії зв'язку

Науковий керівник-

канд. техн. наук, доцент

О.І.Ляхов

Офіційні опоненти-

академік Академії зв'язку

України, докт. техн. наук

Лучук А.М. (м.Київ)

канд. техн. наук, доц.

Сухачов Е.О. (м.Одеса)

Ведуча організація-

Український НДІ радіо та

телебачення (м. Одеса)

Захист дисертації відбудеться "14" 06 1996 р. о 10⁰⁰ годині
в ауд. 222 на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д 05.18.01 при
Українській державній академії зв'язку ім.О.С.Попова за адресою:

270021, м.Одеса-21, вул.Кузнечна, 1.

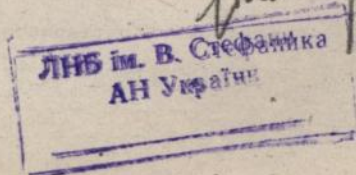
З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української держав-
ної академії зв'язку ім.О.С.Попова.

Вчений секретар спеціалізованої

Ради,

доцент, кандидат технічних наук

М.О.Солов



Мета дисертаційної роботи - постановка та теоретичне вирішення узагальненої задачі оптимізації високошвидкісних систем передачі дискретної інформації при усунуванні міжсимвольних завад (фільтрів Найквіста-ФНК), аналіз можливості побудови ФНК, стійких до лінійного перетворення їх імпульсної реакції, розробка технології мінімізації міжсимвольних завад (МСЗ) за рахунок тільки фазової корекції каналу та розрахункової методики для синтезу сигналів, які задовольняють двома чи трьома критеріям Найквіста водночас, теоретична розробка методу розрахунку фінітних сигналів, мінімізуючих МСЗ для надвисокошвидкісної передачі інформації та дослідження нової методики спільної мінімізації інтерференційних завад та адитивного шуму.

Нові властивості технології: підвищення вірогідності передаваної інформації за рахунок забезпечення мінімально досяжних значень інтерференційних завад у частотнообмежених високошвидкісних системах; усунування МСЗ за рахунок тільки фазової корекції та ефективного використання каналу внаслідок цього; зменшення імовірності помилки у надвисокошвидкісних системах за рахунок оптимізації форми сигналу; мінімізація інтерференційних завад для різних приймачів та поліпшення якості передаваної інформації в каналах з адитивним шумом.

Для досягнення мети були розв'язані такі задачі: 1) Формулювання й доведення чотирьох основних теорем, які дозволяють усунути міжсимвольну інтерференцію за рахунок корекції ФЧХ при фіксованій (заданій) АЧХ й різних швидкостях передачі. 2) Узагальнена оптимізація ФНК на неперервній та дискретній осях часу в системах з реєстрацією сигналу за методом одноразового відліку. 3) Розширення сфери використання результатів п.2 на системи з пороговими та інтегральними методами реєстрації. 4) Розрахунок сигналів, які задовольняють декільком критеріям Найквіста водночас. 5) Мінімізація енергії МСЗ для надвисокошвидкісної передачі за рахунок вибору форми фінітного сигналу. 6) Мінімізація дисперсії шуму при обмеженні на дисперсію МСЗ й навпаки за рахунок знаходження оптимальних частотних характеристик формувача та приймача.

Наукові положення, до захищається: 1) Метод усунування інтерференцій-

них завад за рахунок корекції ФЧХ при заданій АЧХ та моделі різних каналів зі змінюю частотам Найквіста (частотам дискретизації) при фіксованій АЧХ. 2) Метод розрахунку оптимальних ФНЧ, найбільш стійких до лінійного перетворення їх імпульсної реакції як на неперервній так і на дискретній осях часу. Методика оцінки гранично досяжних значень енергетичних параметрів, що оптимізуються. 3) Спектри сигналів, задовольняючих двом чи трьом критеріям Найквіста водночас й загальні положення їх синтезу. 4) Спектри каналів з оптимальними енергетичними параметрами й сигналів, стійких до основних завад, котрі задаються каналами зв'язку. 5) Розрахункова методика синтезу фінітних сигналів з мінімальною енергією МСЗ для швидкостей передачі вище за швидкість Найквіста й методика оцінки мінімально досяжного значення цієї енергії. 6) Метод сумісної мінімізації інтерференційних завад та адитивного шуму.

Загальна характеристика роботи.

Актуальність та зміст проблеми. Важливим чинником, який обмежує швидкість та вірогідність передачі дискретної інформації, є інтерференційні завади (Н. Nyquist, Smith R., Pasupathy S, Grami A., Тамм Ю.А., Курцин С.А., Данилов Б.С. та ін.). В наш час методи боротьби з ними добре відомі, та на практиці разом з усуненням МСЗ часто доводиться розв'язувати низку додаткових оптимізаційних задач, яким має задовольняти система (Souza E.S., Sayar B., Pasupathy S., Кисіль В.А., Зько В.А. та ін.). Деякі окремі рішення оптимізації систем за мінімумом енергетичних параметрів одержані у вітчизняних та зарубіжних публікаціях, та єдиного рішення узагальненої задачі оптимізації немає. Більш того, за рахунок розв'язання задач на неперервній осі часу інколи не вдавалось досягти граничного значення величини, що оптимізувалася. Для повного усунення нехотимої інтерференції використовують фільтри Найквіста з нульовою (лінійною) фазочастотною характеристикою, що часто робить неможливим їх використання для будь-якої іншої мети, при цьому накладаючи жорсткі обмеження на АЧХ та частоту передачі дискретної інформації (частоту Найквіста), тому дослідження можливості відмови від нормування АЧХ та частоти Найквіста є дуже актуальними. В літературі не розглянуті

питання розрахунку сигналів, що задовольняли б водночас двом чи трьом критеріям Найквіста, котрі усувають міксимвольні завади незалежно від методу реєстрації їх у приймачі. В сучасних системах часто використовують передачу зі швидкістю вище за Найквіста. Та до цього часу проблема синтезу фінітних сигналів як для простої передачі, так і для парціального кодування (ПК) вивчена не повністю. Важливість та актуальність задачі мінімізації МСЗ та сумісної мінімізації МСЗ та адитивного шуму зумовила появу значної кількості публікацій (Amogoso, Galko P., Одинцов Б.В., Кисіль В.А.), але їх дослідження ще не завершено.

Методи досліджень. В роботі використовуються методи оптимізації, класичне варіаційне числення, методи теорії ймовірності, теорії передачі дискретних повідомлень та теорії коректорів, імітаційне моделювання на ЕОМ.

Наукова новизна: 1) Запропоновано новий метод усунення міксимвольних завад та зміни швидкості передачі за рахунок корекції тільки ФЧК; 2) Зайдено загальнені розв'язання та розрахункові співвідношення для синтезу найбільш стійких до лінійного перетворення фільтрів (сигналів) Найквіста на неперервній та дискретній осях часу. Одержано співвідношення, які дозволяють розрахувати мінімально досяжне значення енергетичного показника, що оптимізується; 3) У загальному вигляді вирішено задачу синтезу ФНк, стійких до випадкової затримки, до основних завад, котрі завдаються каналами зв'язку для ПК та розраховано сукупності їх характеристик; 4) Розраховано сигнали, які задовольняють водночас двом чи трьом критеріям Найквіста; 5) Розроблено розрахункову методику для синтезу оптимальних характеристик систем з пороговим прийомом за умови усунення міксимвольних завад; 6) Розраховані сукупності оптимальних робочих сигналів, стійких до випадкової затримки та лінійного перетворення для основних видів ПК системах з інтегральними методами обробки сигналу в приймачі; 7) Запропоновано нову розрахункову методику для синтезу фінітних сигналів для передачі зі швидкістю вище за Найквіста; 8) Розроблено новий підхід до сумісної мінімізації МСЗ та адитивного шуму.

Практична цінність. 1) Теоретичні дослідження доведено до інженерної методики, яка дозволяє синтезувати оптимальні системи з повним усуненням міжсимвольних завад для різних методів обробки сигналу в приймачі; 2) Знайдено сукупності фазочастотних характеристик, які мінімізують основні види спотворень сигналу, що їх можна безпосередньо використовувати при розробці апаратури; 3) Розраховано сукупності фазочастотних характеристик, які дозволяють змінювати частоту Найквіста при повному усуненні МСЗ для основних видів АЧХ, які використовуються на практиці; 4) Наведено сигнали, які задовольняють двом чи трьом критеріям Найквіста водночас для максимально досяжної швидкості передачі; 5) Запропоновано розрахункову методику синтезу фізично реалізованих сигналів, мінімізуючих енергію МСЗ для швидкості передачі вище за Найквіста.

Впровадження результатів. Результати роботи використовувались при розробці аналого-цифрових фільтрів (ОЦФ-2 та ОЦФ-17), які є основними вузлами апаратури, що розроблялась на замовлення Міністерства Зв'язку України (тема № 559 "Дослідження принципів побудови цифрових засобів радіорелейного зв'язку", шифр "РРСР", початок-січень, 1994, завершення-кінець. 1995), виконавець УНДІРТ; при виконанні ОКР "Розробка уніфікованої волоконно-оптичної системи передачі ВОСП 30/120 для сільської мережі зв'язку", що розроблялась на замовлення Міністерства Зв'язку України (договір № 3-1-96 від 10.01.1996, тема 4, шифр "ВОСП 30-120-С", термін завершення-1997р.), виконавець УНДІЗ; при виконанні ОКР "Розробка волоконно-оптичної системи передачі ВОСП 2/8-ЗОНА для внутрішньозонової первинної мережі зв'язку", що розробляється на замовлення Міністерства Зв'язку України (договір № 3-6-96 тема 2 від 10.01.1996, шифр "ВОСП 2-8-ЗОНА", термін завершення-1998р.), виконавець УНДІЗ, а також у низці розробок, що проводились державним концерном РРТ протягом 1995-1996 років, а основні рекомендації щодо методів боротьби з МСЗ враховувались при виборі апаратури, яку закуповував концерн РРТ у іноземних виробників.

Апробація роботи. Науково-технічні результати та основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній

конференції UkrSatCom-93, 1-Міжнародній конференції " Системи стереофо-
нічного мовлення. Проблеми розвитку в Україні", 1993, наукових семінарах
кафедр радіотехнічних пристроїв та теорії електрозв'язку Украї-
нської державної академії зв'язку ім. О.С.Попова, технічній раді УНДІРТ.

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковано 10 праць, серед
яких три доповіді на міжнародних конференціях.

• Особистий внесок пошукача: запропоновано новий метод мінімізації
міжсимвольних завад за рахунок фазової корекції каналу; сформульовано
та вирішено загальнену задачу оптимізації фільтрів Найквіста та
синтезу ФНК, найбільш стійких до лінійного перетворення їх імпульсної
реакції на неперервній та дискретній осях часу для різних методів ре-
гістрації прийманих сигналів; у загальному вигляді розв'язано задачі
синтезу ФНК, стійких до випадкової затримки, до різних завад, котрі мають
місце в реальних каналах зв'язку для парціального кодування й розрахо-
вано сукупності їх характеристик; розраховано сигнали, які задо-
вольняють двом чи трьом критеріям Найквіста водночас, та приведено
загальні вимоги до їх спектрів; розраховано сукупності оптимальних ро-
бочих сигналів, стійких до різних завад для основних класів ПК в
системах з інтегральними методами обробки сигналів у приймачі; запропо-
новано нові розрахункові методики синтезу фінітних сигналів для швид-
кості передачі вище за швидкість Найквіста та сумісної мінімізації
міжсимвольних завад та адитивного шуму.

Об'єм та структура роботи. Дисертаційна робота має вступ, 5 розділів,
загальні висновки, додатки. Повний об'єм роботи складає 184с., 39 мал.,
(26 с.), список використаної літератури, зі 105 назв (8 с), додатки
(4 с.).

Зміст роботи

Перший розділ присвячено синтезу ФНК з нелінійною ФЧХ. В сучасних
системах високошвидкісної передачі дискретної інформації для мініміза-
ції інтерференційних завад використовуються ФНК з нульовою ФЧХ. Це
приводить до того, що при заданій ω_c (частоті зрізу ФНК) існує тільки
одна ω_n (частота Найквіста), яка зумовлює передачу дискретної інфор-
мації із усуненням З. В першій частині розділу доводиться теоретич-

на можливість усунення міжсимвольних завад та зміни w_n в системах з наперед заданою АЧХ за рахунок тільки фазової корекції каналу. При цьому розглядаються обмеження, яким має задовольняти АЧХ таких каналів. Аналіз проблеми базується на доведенні наступної теореми. Нехай $K(jw)$ деяка парна, додатня, частотно-обмежена функція. Якщо існує така частота w_c , для якої виконуються умови

$$0.5w_c < w_s < w_c,$$

$$K(w) = C = \text{const}, \quad 0 < w \leq 2w_s - w_c,$$

$$K(w) + K(2w_s - w) \geq C, \quad 2w_s - w_c < w \leq w_c,$$

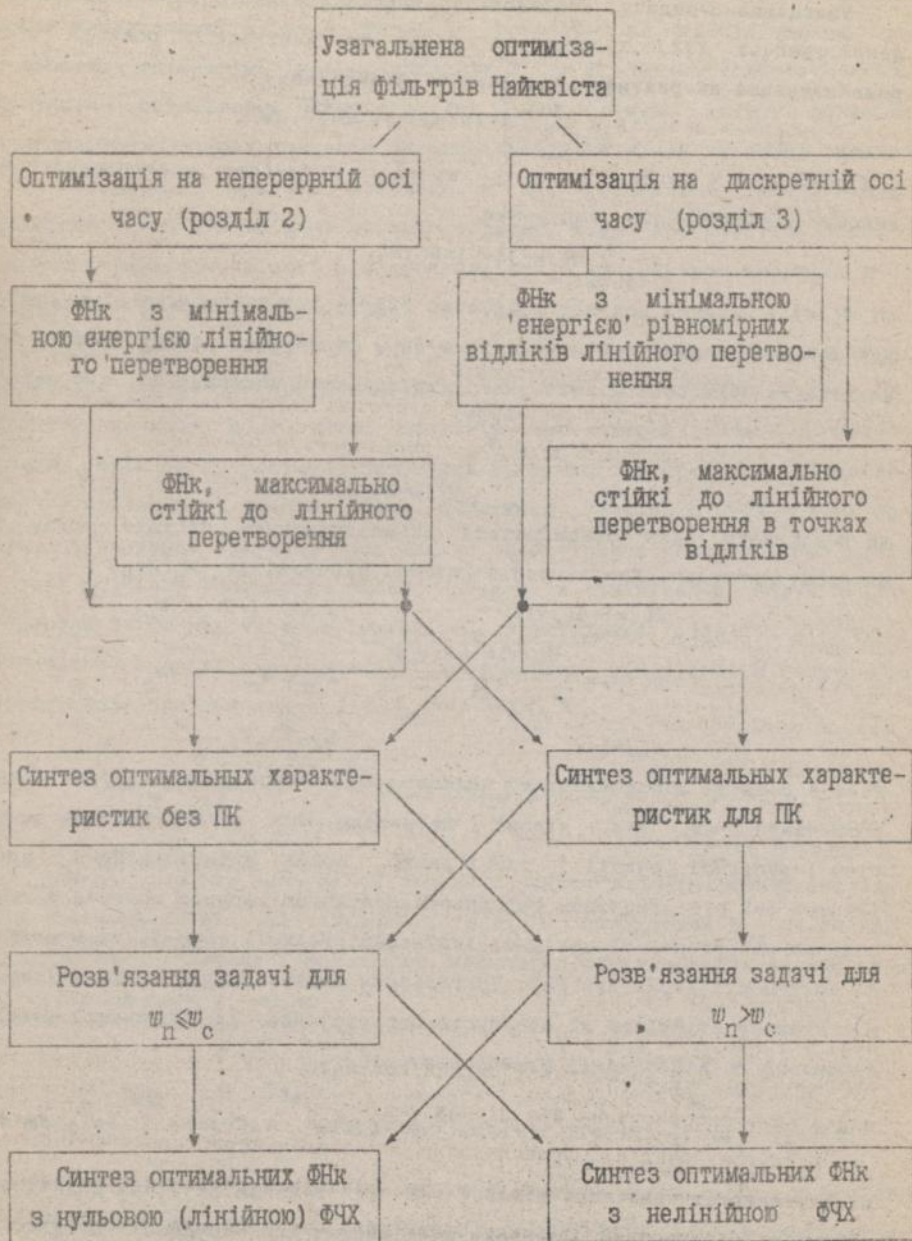
де C - деяка більша за нуль константа, то $K(jw)$ є амплітудно частотною характеристикою фільтру Найквіста з частотою Найквіста $w_n = 2w_c$ та фазо-частотною характеристикою $V(w)$, яка визначається рівнянням:

$$V(w) = 0, \quad 0 < w \leq 2w_s - w_c \text{ та } w \geq w_c,$$

$$V(w) = \text{tagccos} \frac{c^2 + K^2(w) - K^2(2w_s - w)}{2CK(w)}, \quad 2w_s - w_c < w < w_c.$$

Наведено декілька наслідків, які дозволяють оцінити межі зміни w_c та можливості побудування ФНк з нульовою ФЧХ. Також розглянуто можливість синтезу ФНк при заданій ФЧХ, частково заданих АЧХ та ФЧХ, для чого доводяться ще три теореми. Вони не наводяться. В другій частині розділу наводяться сукупності характеристик ФЧХ для основних видів АЧХ ФНк (трикутного, косинусоїдального та ін.), які дозволяють змінювати швидкість передачі при фіксованій АЧХ й досягати цілковитого усунення МСЗ за рахунок тільки фазової корекції. При цьому дисперсія шуму на виході таких систем не змінюється. Здобуті результати дозволяють синтезувати системи, в яких АЧХ задається виходячи з деяких сторонніх умов (наприклад, з умов неспотвореної передачі мовних сигналів), а ФЧХ добудується так, щоб виконувався перший критерій Найквіста, що значно розширює межі використання вже діючих систем.

В другому розділі проводиться оптимізація характеристик ФНк по ніякому енергетичних параметрів з врахуванням додаткових обмежень, які задані на неперервній осі часу. Структурна схема задачі оптимізації наведена на мал. 1.



Мал.1. Схема оптимізаційних задач.

Узагальнено задачу мінімізації енергії лінійного перетворення заданої функції $f(t)$ зі спектром $F(j\omega)$ та імпульсної реакції $g(t)$ розв'язується за рахунок мінімізації функціоналу

$$E_Y = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K(j\omega) F(j\omega)|^2 d\omega,$$

при обмеженні у вигляді першого критерія Найквіста, узагальненого на випадок корелятивного кодування

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} K(j\omega - jk\omega_n) = G(j\omega), \quad (1)$$

де $G(j\omega)$ - заданий поліном кодувача, $K(j\omega)$ - шукана передатна функція. Для середніх швидкостей передачі ($\omega_n \ll \omega_c$) оптимальна характеристика ФНк визначається на основі класичного варіаційного числення й має вигляд

$$K(j\omega) = \frac{G(j\omega)}{F^2(\omega) \sum_{k=-m}^m \frac{1}{F^2(\omega - k\omega_n)}}$$

де m -параметр, який зумовлюється співвідношенням частоти зрізу та швидкості передачі. Для високошвидкісної передачі ($\omega_c \ll \omega_n \ll 2\omega_c$)

$$K(j\omega) = G(j\omega), \quad 0 < \omega < 2\omega_s - \omega_c,$$

$$K(j\omega) = \frac{G(j\omega) F^2(\omega - \omega_n)}{F^2(\omega) + F^2(\omega - \omega_n)}, \quad 2\omega_s - \omega_c < \omega < \omega_c,$$

$$K(j\omega) = 0, \quad \omega > \omega_c.$$

Далі в розділі доводиться, що відповідним вибором функції $F(j\omega)$ можна розв'язати як вже відомі (наприклад, ФНк з мінімальною енергією імпульсної реакції), так і низку нових оптимізаційних задач (синтез ФНк з мінімальною середньоквадратичною шириною полоси, з мінімальною енергією n -ої похідної імпульсної реакції тощо), та наводяться сукупності характеристик. Узагальнена задача пошуку ФНк, які мають максимальну стійкість до лінійного перетворення їх імпульсної реакції зводиться до мінімізації функціоналу

$$E_U = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} |K(j\omega)|^2 (|F(j\omega)|^2 - a F^*(j\omega) e^{j\omega\tau} - a F(j\omega) e^{-j\omega\tau} + a^2) d\omega d\tau,$$

де τ -випадкова величина, розподілена за законом $p(\tau)$ при додатковому обмеженні (1); $a = \text{const}$. Одержано розв'язання для середньої й для високої швидкостей передачі. Відповідним вибором $F(j\omega)$ можна сичтезува-

ти ФНк, які найбільш стійкі до багатьох лінійних перетворень (завад) в реальному каналі зв'язку. Виведено розрахункові співвідношення, які дозволяють оцінити мінімальне значення E_y та E_u . Значна кількість розрахунків оптимальних характеристик для різних $F(jw)$ дозволяє безпосередньо використовувати одержані результати при розробці апаратури. Розрахунки, зокрема, показали, що ФНк стійкий до завад, котрі завдаються каналом зв'язку першого порядку, добре апроксимується ФНк з "квазиоптимальним зрізом", фільтр Найквіста з мінімальною енергією n -ої похідної ($n \rightarrow \infty$)-ФНк з прямокутним зрізом.

Третій розділ присвячено розв'язанню узагальнених оптимізаційних задач, які наведено в другому розділі, на дискретній осі часу. У ряді випадків (наприклад, коли можна збільшити енергію передаваного сигналу) можна обмежити енергетичні параметри дискретною віссю часу. Як впливає з варіаційної засади, кожне додаткове обмеження звужує межі пошуку оптимальних значень. Тому аналіз енергетичних параметрів на дискретній осі часу приведе до більш глибокої їх мінімізації. Пошук характеристик ФНк з мінімальною "енергією" рівномірних відліків лінійного перетворення імпульсної реакції досягається мінімізацією наступного функціоналу при обмеженні (1):

$$E_{уд} = \frac{w_n}{4\pi^2} \int_{-w_n/2}^{w_n/2} \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} K(jw - jkw_n) F(jw - jkw_n) \right|^2 dw.$$

Доведено, що для низьких та середніх швидкостей передачі існує безліч оптимальних ФНк, які задовольняють (1) й для котрих $E_{уд} = 0$. Для високошвидкісної передачі комплексна передатна функція оптимального ФНк має задовольняти рівнянню

$$\begin{aligned} K(jw) &= G(jw), & 0 < w \leq w_n - w_c, \\ K(jw) &= \frac{G(jw)F(jw - jw_n)}{F(jw - jw_n) - F(jw)}, & w_n - w_c \leq w < w_c, \\ K(jw) &= 0, & w > w_c. \end{aligned}$$

Пошук ФНк з нульовою ФЧХ за відсутності парціального кодування здійснюється проекцією комплексного вектора $K(jw)$ на дійсну вісь. Пошук характеристик фільтра Найквіста, стійкого до лінійного перетво-

ення їх імпульсної реакції в точках відліків, здійснюється за рахунок мінімізації енергії завад $E_{нд}$ при обмеженні (1)

$$E_{нд} = \frac{w_n}{4\pi^2} \int_{-w_n/2}^{w_n/2} \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} K(jw - jkw_n) (F(jw - jkw_n) e^{-j(w - kw_n)\tau - a}) \right|^2 dw \rightarrow \min.$$

Подано розрахункові співвідношення, які дозволяють оцінити $E_{нд}$ фільтр Найквіста з нульовою ФЧХ при відсутності ПК синтезується заміною $G(jw)$ на C та проєкцією $K(jw)$ на дійсну вісь. В розділі подаються розрахунки сукупностей оптимальних характеристик й доведено, що відповідним вибором $F(jw)$ можна здобути як розв'язок усіх відомих задач так і цілого класу нових з єдиних позицій. Наприклад наведені ФНК, гранично стійкі до заданих перетворень в реальному каналі зв'язку, з мінімальною енергією n -ої похідної (для будь-якого n). Якщо $n=0$, задача перетворюється на задачу пошуку ФНК з мінімальною енергією імпульсної реакції на дискретній та неперервній осях часу; якщо $n=1$ - в задачу синтезу ФНК, стійкого до неточності синхронізації та тощо. Для ПК проведено дослідження можливості обмеження межі пошуку оптимальних ФНК фільтрами з дійсною чи уявною передатними функціями. Така умова аналогічна вимозі записати кодуючий поліном в дійсній чи уявній формах. Описано чотири базових класи парціального кодування, для яких це можливо, й для кожного з них одержано перший критерій Найквіста.

В четвертому розділі результати, які одержані в другому та третьому розділах, узагальнюються для систем з пороговими та інтегральними методами прийому. Доведено, що другий критерій Найквіста являє собою окремий випадок корелятивного кодування. Таким чином, оптимізаційні задачі, розв'язані в розділах 2 та 3, можуть знайти використання в порогових системах в тих випадках, коли це має сенс. В системах з інтегральною обробкою сигналу в приймачі умову відсутності міксимвольних завад становить третій критерій Найквіста

$$\frac{(2k+1)\Delta t}{2} \int s(t) U(t-k\Delta t) dt = a_k, \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2)$$

$$\frac{(2k-1)\Delta t}{2}$$

де a_k - задані величини, з котрими мають співпадати відліки імпульсної реакції при заданому Δt ; $U(t)$ - опорний сигнал зі спектром $U(j\omega)$ та $s(t)$ - робочий сигнал зі спектром $S(j\omega)$. На неперервній осі часу розв'язано декілька класів оптимізаційних задач для систем, які задовольняють (2). Пошуком спектра оптимального робочого сигналу $s(t)$ при заданому опорному сигналі $U(t)$ мінімізована енергія лінійного перетворення робочого сигналу з додатковим обмеженням

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} S(j\omega - jk\omega_n) D(j\omega - jk\omega_n) U^*(j\omega - jk\omega_n) = G(j\omega), \quad (3).$$

де $D(j\omega)$ - допоміжна функція, яка надає обмеженням різний фізичний зміст. Для середньої та високої швидкостей передачі одержані відповідні розрахункові співвідношення. Розраховано: оптимальний робочий сигнал, який мінімізує енергію завади з додатковим обмеженням (3); сигнал, стійкий до випадкової затримки як у загальному вигляді, так і для конкретних опорних сигналів та законів розподілу випадкової затримки. Доведено можливість більш глибокої мінімізації параметрів, що оптимізуються, за рахунок переходу на дискретну вісь. Далі в розділі розглянуті питання синтезу сигналів, які задовольняють декільком критеріям Найквіста водночас. Для максимальних швидкостей передачі наведено спектри $s(t)$ при прямокутному опорному сигналі та опорному сигналі "піднятий" косинус. Результати четвертого розділу дозволяють розраховувати частотні характеристики для порогових систем, оптимальні робочі сигнали для корелятивних систем та сигнали, які мінімізують МСЗ при різних методах реєстрації інформаційних відліків.

П'ятий розділ присвячено питанням мінімізації МСЗ за рахунок пошуку оптимальної форми сигналу для надвисокошвидкісної передачі за мінімумом Е-критерію та спільної мінімізації адитивного шуму та МСЗ.

При оптимізації форми сигналу по мінімуму Е-критерію до сигналу висувається додаткова умова фізичної реалізації. Задача розв'язана як при використанні ПК, так і за його відсутності. В залежності від окремої задачі оптимальний сигнал знаходиться розв'язанням нелінійних інтегральних рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} T/2 \\ 2 \int_{-T/2}^{T/2} s(t) K(t, t') dt' + \sum_{k=0}^n \lambda_k L_k(t) = 0; \\ T/2 \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) L(t) dt = a_k, \end{array} \right.$$

де a_k -інформаційні відліки сигналу, n -лі кількість, $L(t)$ -лінійне ядро, $K(t, t')$ -квадратичне ядро, w_c -частота зрізу каналу з комплексною передатньою функцією $F(jw)$, λ_k -множники Лагранжа, чи розв'язанням на ЕОМ одного рівняння

$$2\Delta t \int_{-T/2}^{T/2} s(t') K(t, t') dt' - L(t) = 0.$$

В першому випадку ми точно досягаємо виконання ПК на виході системи, але менш глибоко мінімізуємо Е-критерій. Далі в розділі розв'язано задачу спільної мінімізації адитивного шуму та міксимвольних завад, яка ґрунтується на граничній мінімізації одного з процесів при накладенні обмежень на дисперсію іншого. Для розрахунку дисперсії інтерференційних завад використовувалась узагальнена по всім реалізаціям послідовність сигналів. Доведено, що передатна функція оптимального коректора приймача має задовольняти рівнянню

$$K(jw) = \frac{L^*(jw) T^*(jw) \lambda_1 S}{(N(w) + \lambda_2 C(w)) (1 + \lambda_1 SR)}$$

де $L(jw)$ -комплексна передатна функція формувача, $T(jw)$ -каналу, $N(w)$ -спектральна густина шуму, λ_1 та λ_2 -множники Лагранжа, S -функція, яка враховує кореляцію символів, $C(w)$ -вагова функція, E -статистичне зосередження, R -допоміжна функція;

$$S = \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m e^{jwm\Delta t}, \quad d_m = E\{a_k a_{k+m}\}, \quad k \in (-\infty, \infty).$$

$$R = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{|L(jw - jk w_{\Delta}) T(jw - jk w_{\Delta})|^2}{N(w - k w_{\Delta}) + \lambda_2 C(w - k w_{\Delta})}$$

В такому разі мінімізується дисперсія шуму при обмеженні на дисперсію МСЗ та на зважену площу квадрата ЛЧХ приймача. Наведено аналогічні розрахункові співвідношення, які мінімізують $\sigma_{\text{ш}}$ при $\sigma_{\text{ш}} = \text{const}$.

На закінчення в розділі розглянуто питання практичного впровадження результатів. Так, зокрема, при розробці апаратури ОЦФ-17 (швидкість цифрового потоку 8.448 Мбіт/с) запропонована розрахункова методика дозволила розрахувати корелятивний кодер коректор (ККК). Його ефективність досліджувалась в наступному експерименті. Сигнал, який моделює реальний цифровий потік з виходу генератора псевдовипадкової послідовності (ГПВП) подавався на фільтр, характеристики якого моделювали характеристики реального каналу апаратури ОЦФ-17 з одним переприйомом (МФ). З виходу МФ сигнал після розв'язувального пристрою та дескремблера подавався на вимірвач частоти похибок. Без використання ККК $R_{\text{пох}} = 10^{-3}$. Використання ККК дозволило зменшити частоту похибок до 10^{-6} . (Акт впровадження додається.)

Основні результати роботи

В дисертації сформульовано та розв'язано науково та науково-технічні проблеми побудови високошвидкісних та надвисокошвидкісних систем передачі дискретної інформації (СПДІ). Серед них підкреслимо такі: 1) Мінімізація (усунення) МСЗ за рахунок тільки фазової корекції; 2) Усунення МСЗ водночас з оптимізацією інших параметрів СПДІ для різних методів реєстрації інформаційних параметрів сигналу; 3) Мінімізація Е-критерію для надвисокошвидкісної передачі; 4) Спільна корекція адитивних шумів та інтерференційних завад. Запропонованим методикам притаманні такі нові властивості: 1) Мінімізація Е-критерію за рахунок лише фазової корекції без зміни дисперсії шуму на виході та форми АЧХ; 2) Можливість більш ефективного використання вже існуючих каналів без складних пристроїв адаптивної корекції; 3) Зміна швидкості передачі з одночасним усуненням МСЗ без зміни форми АЧХ; 4) Гранничний рівень стійкості до різних спотворень за рахунок використання дискретної осі часу; 5) Фізична реалізованість сигналів для надвисокошвидкісної передачі, мінімізуючих Е-критерій; 6) Більш глибока мінімізація одного з процесів при спільній мінімізації МСЗ та адитивного шуму; 7) Прості розрахункові методики. Поставлені задачі є досить актуальними, розв'язані вони в повному обсязі; їх науково-технічне розв'язання є закінченим та у цілому ряді випадків досить оригінальним.

В результаті: 1) Запропоновано новий метод усунення МСЗ та зміни швидкості передачі за рахунок тільки фазової корекції, розраховано сукупності фазочастотних характеристик, які дозволяють змінювати частоту Найквіста для основних видів АЧХ, які використовуються на практиці; 2) Розроблено узагальнені розрахункові співвідношення для синтезу найбільш стійких до лінійного спотворення фільтрів (сигналів) Найквіста на безперервній та дискретній осях часу та наведено сукупності характеристик; 3) Одержано співвідношення, які дозволяють розрахувати мінімально можливе значення параметра, що оптимізується; 4) В загальному вигляді розв'язано задачу синтезу фільтрів Найквіста, стійких до випадкової затримки, до різноманітних спотворень, що завдаються каналом зв'язку для ПК та розраховано сукупності характеристик; 5) Розраховано спектри, які задовольняють водночас двом чи трьом критеріям Найквіста; 6) Розроблено методику синтезу оптимальних характеристик порогових систем за умови відсутності МСЗ; 7) Розраховано сукупності оптимальних робочих сигналів, стійких до випадкової затримки та лінійного перетворення для основних видів ПК в системах з інтегральними методами обробки сигналу в приймачі; 8) Запропоновано нову розрахункову методику для синтезу фінітних сигналів для швидкості передачі вище за Найквіста; 9) Розроблено новий підхід до спільної мінімізації МСЗ та адитивного шуму.

Наукові та практичні результати широко апробовано. Їх впроваджено при розробках систем аналогічного призначення. Припускається, що досить широке впровадження технологій дозволить як значно розширити межі використання вже діючих, так і поліпшити потенційні параметри розроблюваних систем (Б-критерій, швидкість передачі, стійкість до різноманітних спотворень тощо).

Публікації по темі дисертації.

1. Кисель А. В. Минимизация шумов и интерференционных помех в синхронных системах связи. Информатика и связь. Сборник научных трудов Укр. Гос. акад. связи им. А. С. Попова. Киев. Техника, 1995, стр 122-126.
2. Кисель А. В. Универсальные фильтры Найквиста. Труды УНИИРТ №3, 1995, стр. 14-21.

3. Кисель А.В. Фильтры Найквиста, устойчивые к случайной задержке. Труды УНИИРТ №4, 1995.
4. Ляхов А.И., Кисель А.В. Синтез оптимальных характеристик систем с линейной фазой при коррелятивном кодировании. Труды УНИИРТ №4, 1995.
5. Кисель А.В. Предельная оптимизация фильтров Найквиста 1 по минимуму 'энергетических' параметров. Депон. рукоп. в БНТБ № , 20с.
6. Кисель А.В., Ляхов А.И. Ограничение доступа к каналам спутникового телевизионного вещания. Международная научно-техническая конференция UkrSatCom-93. Сентябрь 6-10, 1993. Одесса.
7. Кисель А.В. Оптимальные фильтры Найквиста. Труды УНИИРТ №1, 1996.
8. Одинцов Б.В., Кисель А.В. Синтез сигналов, удовлетворяющих нескольким критериям Найквиста. Труды УНИИРТ №1, 1996.
9. Ляхов А.И., Кисель А.В. Подача программ радиовещания через ИСЗ. 1-Международная научно-техническая конференция "Системы стереофонического вещания. Проблемы развития в Украине". Октябрь 26-29, 1993. Одесса.
10. Кисель А.В. Ограничение доступа к каналам спутникового и телевизионного вещания. Там-же.

A.V.Kisel. "Optimization of high speed data transmission systems without restrictions and with Nyquist ones", Manuscript. Thesis for Ph.D. degree. Speciality 05.12.17- radiocommunication systems and devices. Ukrainian State Communications Academy named after A.S.Popov, Odessa, 1996.

The results are presented in 10 works and applied widely.

The following new methods and problems were theoretically elaborated and practically investigated: 1. Energy parameters minimization for high speed data transmission system signals and characteristics. 2. Finite signals synthesis in the case when transmission speed is greater than the Nyquist one. 3. Joint minimization of intersymbol interference and additive noise. 4. Intersymbol interference minimization by the appropriate choice of phase characteristics. *New horizons of the proposed techniques:* 1. Intersymbol interference prevention and data transmission speed variation by phase equalization. 2. More effective

utilization of communication channels. 3. Top limit optimization, by means of the discrete time axis. 4. Optimal signals for superhighspeed transmission are physically realizable .

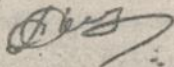
А.В.Кисель. "Оптимизация высокоскоростных систем передачи информации без ограничений и при ограничениях Найквиста", рукоп. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17-Радиотехнические и телевизионные системы и устройства. Украинская государственная академия связи им.А.С.Попова, Одесса, 1996.

Результаты изложены в 10 работах и широко апробированы.

Выполнены теоретическая разработка и практические исследования: метода минимизации межсимвольных искажений на основе фазовой коррекции; проблемы оптимизации характеристик сигналов и каналов по энергетическим параметрам высокоскоростных систем передачи дискретной информации; задачи синтеза финитных сигналов для сверхвысокоскоростной передачи; проблемы совместной минимизации аддитивного шума и интерференционных помех. *Новые свойства технологий:* минимизация энергии межсимвольных помех и изменение скорости передачи только фазовой коррекцией; возможность более эффективного использования уже имеющихся каналов; предельный уровень оптимизации за счёт использования дискретной оси времени; физическая реализуемость оптимальных сигналов для сверхвысокоскоростной передачи.

Ключові слова: міжсимвольні завади, критерій Найквіста, варіаційне числення.

Автор:



А.В.Кисель

Підписано до друку 25.04.1996р. Обсяг 0,78 друк. арк.
формат 60x84^I/16. Зам. 159. Тираж 80.

Друкарня УДАЗ. Одеса, Старопортофранківська, 61

436833

AB 35.051