

На правах рукопису

УДК 621.3.037

ПОЛОНСЬКИЙ СЕРГІЙ БОГІСОВИЧ

ЗАСТОСУВАННЯ НЕДВОЇЧНИХ КОДІВ ТА БАГАТОЧАСТОТНИХ  
СИГНАЛЬНО-КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ  
ЦИФРОВИХ ТРАКТІВ В АНАЛОГОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ

05.12.02 - системи та пристрої передачі інформації  
по каналах зв'язку

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

- дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса 1994

AB 30.067  
ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00778654 (.)

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії оз"язку ім.О.С.Попова

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент Лев О.Ю.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор Стеклов В.К.  
кандидат технічних наук Усов І.С.

Провідна організація - Український НДІ оз"язку, м.Київ.

Захист відбудеться - 17 червня 1994 р. о 10.00 години на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 118.05.01 в Українській державній академії оз"язку ім.О.С.Попова.

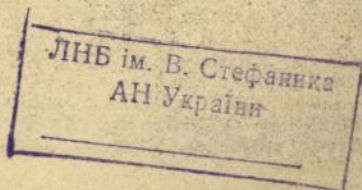
Адреса: 270021, Одеса, вул.Челюскінців, 1

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці академії.

Автореферат розісланий "-----"-----1994 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради

М.О. СОЛОП



витку електрозв'язку є рішення проблеми цифровізації первинної мережі. На сьогодні на магістральних та внутрішнь-обласних ділянках первинної мережі зв'язку України експлуатуються кабельні та радіорелейні аналогові системи передачі (АСП). Тому одним із напрямків цифровізації первинної мережі зв'язку є організація цифрових каналів в АСП шляхом використання пристроїв перетворення сигналів (ППС).

Відомо, що в трактах АСП технічно реалізується значна частотна ефективність ( $\eta = 4-8$  біт/с\*Гц). При такій частотній ефективності одним з основних є завдання найкращого угодження характеристик сигналу та каналу зв'язку. Одним із шляхів вирішення цього завдання є застосування в ППС нових методів побудови сигнально-кодових конструкцій (СКК), які об'єднують ефективні методи модуляції та завадостійкого кодування.

Питання розробки СКК досліджені в працях Вітербі А.Д., Джексона І., Костелло Д., Вулфа Дж., Зіско А.Г., Зяблова В.В., Портного С.Л., Банкета В.Л., Блоха Э.Л., Фінка Л.М. та інших. Але питання розробки СКК на базі багаточастотних ортогональних сигналів з застосуванням недовоїчних блочних кодів при великій  $\eta$ -ефективності досліджені недостатньо. Разом з тим відомо, що при значній  $\eta$ -ефективності перспективним є використання методу складного кодування з недовоїчними коректуючими кодами та методу багаточастотної передачі, який є альтернативним способом боротьби з лінійними спотвореннями каналу зв'язку. На відміну від послідовної (одночастотної) передачі в разі багаточастотної (паралельної) передачі значно зростає число сигналів та складність кодеку.

При підвищенні  $\eta$ -ефективності ППС зростає кратність ансамблю сигналів. Це приводить до зближення сигнальних точок багато-

мірного простору при сохрнаності числа вимірювань та відстані між крайніми точками сигнального простору (фіксована пікова потужність сигналу). Підвищення кратності за рахунок мірності призводить до розширення спектру, що часто буває небажаним.

У цьому зв'язку актуальним завданням є розробка і дослідження багаточастотних СКК (БЧСКК), які при значній  $\eta$ -ефективності об'єднують переваги паралельного та послідовного методів передачі з використанням каскадного кодування та недовоїчних блочних кодів, а також дозволяють підвищити кратність ансамблю сигналів за рахунок ущільнення по частоті, яке не призводить до розширення спектру сигналу.

**МЕТА РОБОТИ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Метою роботи є розробка та дослідження нових БЧСКК, які об'єднують переваги послідовного та паралельного методів передачі цифрової інформації по аналогових смугообмежених каналах зв'язку при значній  $\eta$ -ефективності.

У процесі роботи знайшли рішення наступні питання:

- розробка та дослідження БЧСКК та недовоїчних блочних кодів з використанням каскадного кодування;
- розробка методів використання БЧСКК для побудови ППС із значною  $\eta$ -ефективністю для передачі цифрових сигналів по каналах ТЧ, групових та лінійних трактах аналогових СП;
- розробка алгоритмів роботи ППС-4800, ППС-1024 та ППС-18000, призначених для організації цифрових потоків по каналах ТЧ та лінійних трактах АСП К-60П, ВК-960 та К-1020С зі швидкості відповідно 4800 біт/с, 1024 Кбіт/с та 18 Мбіт/с на базі багаточастотних СКК; дослідження імітаційної моделі ППС-1024 та ППС-18000; оптимізація опорних сигналів приймача.

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** При побудові та дослідженні БЧСКК використовувались методи спектрального аналізу, теорії випадкових процесів та математичної статистики, теорії передачі дискретних

повідомлень, методи теорії щільних пакувань та методи композиції. Для перевірки висновків теоретичних досліджень використовувалось моделювання та імітаційне моделювання.

НАУКОВА НОВИЗНА. В дисертації отримані наступні нові результати:

1. Досліджені особливості використання комбінаційно-частотних сигналів та розроблені алгоритми роботи ППС для передачі цифрової інформації по аналогових каналах зв'язку, що збільшують ефективність передачі інформації.
2. Запропоновані ансамблі багаточастотних ортогональних сигналів при щільному пакуванні по частоті.
3. Синтезовані багатомірні ансамблі на базі розробленого методу побудови багаточастотних ортогональних сигналів, які об'єднують переваги послідовного та паралельного методів передачі.
4. Показано шляхи підвищення завадостійкості та запропоновані методи використання ансамблів БЧСКК, які спрощують побудову кодів ППС.
5. Запропонований спосіб корекції лінійних спотворень шляхом оптимізації форми опорних сигналів кореляторів приймача, який збільшує завадостійкість передачі.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ. Розроблено ППС на базі комбінаційно-частотних сигналів для передачі цифрової інформації по каналах ТЧ зі швидкості 4800 біт/с. Використання сигналів БЧСКК в ППС для швидкості 4800 біт/с дозволяє одержати енергетичний виграш 2,5 дБ в порівнянні з ФМ-8 (Рекомендації V.27).

Ансамблі сигналів, структурні схеми та алгоритми роботи ППС використовуються в ДКР "Розробка апаратури для організації цифрових каналів та підвищення числа каналів в цифрових трактах первинної мережі", яка проводилася НВП "ФАКТОР" в період з 1992 по 1993 рр.

**АПРОВАЦІЯ РОБОТИ:** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: НТК "Методи та засоби побудови високоефективних каналів передачі даних для мереж ПД та ЕОМ", (шифр АТС91-252), 1991 р.; НТК "Проблеми побудови мереж інтегрального обслуговування", 1993 р.; конференціях професорсько-викладацького складу та співробітників КВ ДАЗУ в період з 1991 по 1993 рр.

**ПУБЛІКАЦІЇ.** За матеріалами дисертації опубліковано 8 робіт.

**ОБ'ЄМ РОБОТИ.** Дисертаційна робота складається з вступу, 6-ти глав, висновків та 4-х додатків. Робота викладена на 158 с., в тому числі 100 с. тексту, 52 с. малюнків та таблиць; список цитованої літератури містить 60 джерел.

**ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЯКІ ВНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ.**

1. Використання багаточастотних сигнально-кодових конструкцій на базі комбінаційно-частотних сигналів дозволяє одержати енергетичний виграш (ЕВ) в порівнянні з ансамблем сигналів на базі КАМ при ймовірності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$  та однаковій  $\eta$ -ефективності.

2. Використання ансамблю комбінаційно-частотних сигналів замість ФМ-8 (Рекомендація МККТТ V .27) в ППС для передачі даних по каналу ТЧ зі швидкості 4800 біт/с дозволяє одержати енергетичний виграш 2,5 дБ в разі лінійної ФЧК каналу об'яку при однаковій середній потужності та ймовірності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$ .

3. Використання багаточастотних сигнально-кодових конструкцій на базі ортогональних сигналів при щільному пакуванні по частоті дозволяє приймати рішення "в цілому" та об'єднати переваги послідовного та паралельного методів передачі.

4. Використання ансамблю БЧСК на базі ортогональних сигналів замість ансамблю КАМ, забезпечує енергетичний виграш більше 2 дБ при значній надмірності сигнального простору і значній  $\eta$ -ефективності.

5. Використання розробленого методу побудови багаточас-

тотних СКК дозволяє спростити кодек ППС, збільшити завадо-  
стійкість та компенсувати монотонні спотворення АЧХ на краях  
каналу зв'язку.

6. Використання безнадмірного ансамблю БЧСКК-АМ замість  
ансамблю КАМ-64 у ППС-1024 та ППС-18000 дозволяє одержати енер-  
гетичний виграш - 7,8 дБ при рівних середніх потужностях сигна-  
лів; - 1,5 дБ при рівних пікових потужностях сигналів.

7. Результати імітаційного моделювання ППС-18000 на базі ан-  
самблів КАМ та ансамблів багаточастотних сигналів показали  
переваги методу БЧСКК-АМ.

8. При використанні БЧСКК-АМ оптимізація форми опорних сиг-  
налів кореляторів приймача дозволяє одержати енергетичний виграш  
1 дБ порівняно з прийманням без оптимізації. Використання багато-  
частотних СКК та оптимізації форми опорних сигналів дозволяє  
одержати енергетичний виграш 2,5 дБ у порівнянні з ансамблем КАМ  
при однаковій піковій потужності та імовірності помилки  $1 \cdot 10^{-4}$ .

#### ЗМІСТ РОБОТИ

У в с т у п і обґрунтована актуальність, сформульована мета  
й завдання дисертаційної роботи. Зроблено огляд літератури, охарак-  
теризовано стан проблеми.

У першій главі викладається постановка завдання  
та приводяться основні визначення, що використані при побудові  
сигнально-кодових конструкцій методом каскадного кодування з  
використанням недевічних нероздільних блочних кодів типу  $nBrq$ .

При побудові СКК по каскадному принципу вводяться код-  
сигнальні перетворення:

$$B_i \leftrightarrow A_i \leftrightarrow H_i \leftrightarrow S_i \quad (1)$$

де  $[\leftrightarrow]$  - вказує на взаємодозначність перетворення

$B_i \leftrightarrow A_i$ ;  $A_i \leftrightarrow H_i$ ;  $H_i \leftrightarrow S_i$  - етапи зовнішнього, проміжного

та внутрішнього кодування відповідно;  $i$  - дискретний час.

$B_i = (b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, \dots, b_n^{(i)})$  -  $n$ -розрядні блоки вхідного цифрового потоку;

$A_i = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_{N_A}^{(i)})$  -  $N_A$ -розрядний двоїчний зовнішній код;

$H_i = (h_1^{(i)}, h_2^{(i)}, \dots, h_{N_H}^{(i)})_{q_H}$  -  $q_H$ -ічний  $N_H$ -розрядний проміжний код;

$S_i = (s_1^{(i)}, s_2^{(i)}, \dots, s_{N_S}^{(i)})_{q_S}$  -  $q_S$ -ічний  $N_S$ -розрядний внутрішній код (ансамбль сигналів).

Символ  $s_j^{(i)}$ ,  $j = \overline{1, N_S}$  внутрішнього коду  $S_i$  (сигнал ансамблю) одночасно є символом багаточастотної СКК та являє собою комбінацію з  $X$  по  $Y$  елементарних сигналів. Під елементарними сигналами розуміються відрізки гармонічних коливань однакової тривалості, які мають фіксовані параметри (амплітуда, частота, фаза). Тривалість відрізків гармонічних коливань визначається частотою модуляції.

В результаті вкаваних каскадних перетворень утворюється багаточастотна СКК, яка являє собою недвоїчний нероздільний блочний код типу  $nB r_s q_s$ .

Далі розглядаються основні параметри ППС та кодів, які одержуються на етапах каскадного кодування.

На будь-якому етапі каскадного кодування може бути введена надмірність. Можуть також бути виключені деякі етапи, що не порушують принцип каскадного кодування, але спрощують кодек ППС.

У другій главі дано визначення БЧСКК комбінаційно-частотного типу та досліджені особливості їх використання для передачі цифрової інформації по каналах аналогових СП (ТЧ, ПГТ, ВГТ та інш.) з розділенням на  $N_K$  підканалів.

При формуванні сигналів комбінаційно-частотного типу на передачі виробляється  $X$  гармонічних коливань, частоти котрих фіксо-

вані й називаються сигнальними. На етапі проміжного кодування кодер ставить у відповідність кожній  $\Omega$ -розрядній комбінації зовнішнього двоїчного коду  $A_i$   $Y$  управління сигналів, що "дозволяють" проходження  $Y$  гармонічних коливань у суматор де коливання складаються та передаються по каналу зв'язку одночасно. Таким чином БЧСК комбінаційно-частотного типу характеризується тим, що кожній  $\Omega$ -розрядній комбінації вхідного цифрового потоку відповідає взаємоднозначно комбінація  $Y$  фіксованих частот із  $X$  дозволених.

Сигнали комбінаційно-частотних СКК описуються виразом:

$$S_{\Sigma}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t-nT_n) \cdot \sum_{i=1}^Y a_i \cos \omega_i t ; Y \leq X \quad (2)$$

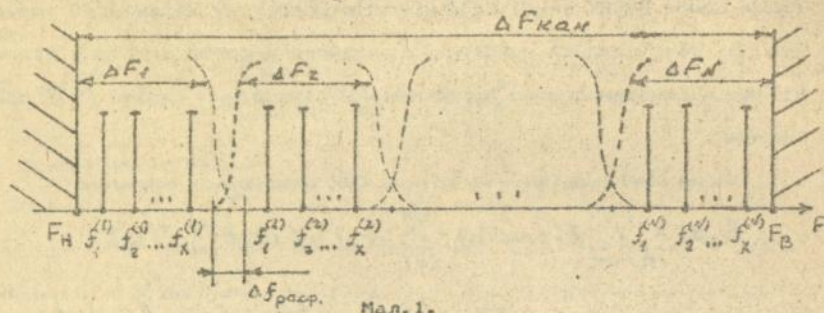
$$f(t) = \begin{cases} 0 ; & t \geq T_n, t < 0 \\ 1 ; & 0 \leq t < T_n \end{cases}$$

де  $Y$  - число гармонічних коливань, переданих по каналу зв'язку одночасно;  $X$  - правне число гармонічних коливань, яке визначено планом частот та кодовою таблицею;  $a_i$  - амплітуда гармонічного коливання постійна на інтервалі модуляції  $T_n$ .

В роботі досліджені ансамблі сигналів БЧСК комбінаційно-частотного типу, в яких для розділення елементарних сигналів використовується фільтровий метод. При цьому канал зв'язку поділено на  $N_k$  підканалів, де в кожному підканалі на інтервалі  $T_n$  може передаватися тільки один з  $X$  елементарних сигналів, який має фіксовану частоту (сигнальну частоту). Прийнято умову, що число сигнальних частот в підканалах однакове. Розроблена структурна схема системи зв'язку; план частот при фільтровому розділенні підканалів показаний на мал.1. Використання фільтрового розділення сигналів знижує частотну ефективність, виходячи з наявності смуги розфільтровки між підканалами.

Зроблена оцінка завадостійкості. При цьому введено припущення:

-на вхід приймача надходить сума корисного сигналу та завади  
 $S_{\Sigma}^*(t) = S_{\Sigma}(t) + n(t)$  ; -під завадою  $n(t)$  розуміється нор-  
 мальний стаціонарний випадковий процес (білий шум);  
 -рішення приймається в кінці інтервалу модуляції; -напряга  
 сигналу значно більша від завади  $V_c \gg \sigma$



Мал.1.

Показано, що ймовірність помилки визначається виразом:

$$p = 2 \sum_{j=1}^{N_k} \left[ \frac{\chi_j - 1}{\chi_j} \right] \left[ 0,5 - \varphi \left( \frac{\Delta F_j \cdot S}{2 \cdot f_* \cdot \chi_j} \right) \right], \quad (3)$$

де  $N_k$  - число підканалів;  $\chi_j$  - число сигнальних частот одного підканалу;  $\Delta F_j$  - ширина смуги частот одного підканалу;  $S = \frac{V_c}{\sigma}$  - відношення амплітуди сигналу до середньквадратичної напруги завади;  $f_*$  - нормована частота, значення якої залежить від розміщення переданої сигнальної частоти у смузі частот підканалу.

Показано, що нормована частота визначається виразом:

$$f_* = \sqrt{\frac{(F_B - f_i)^3 - (F_H - f_i)^3}{3 \cdot \Delta F_{кан}}}, \quad (4)$$

де  $f_i$  - сигнальна частота;  $F_B, F_H$  - верхня та нижня частоти підканалу.

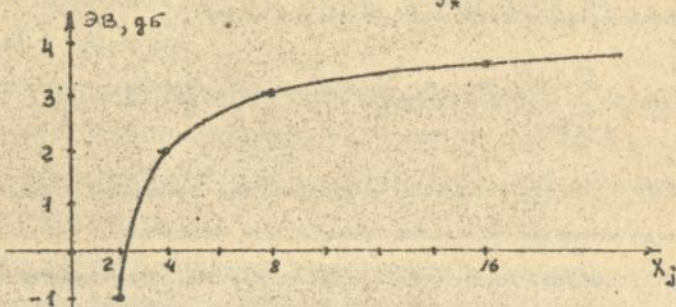
Оцінка енергетичного виграву від використання БЧСКК замість КАМ зроблена за умовою, коли число підканалів БЧСКК дорівнює двом, підканали однакової ширини, число сигнальних частот у підканалі відповідає числу амплітуд на одній осі сигнального про-

сторю КАМ, пікова потужність сигналів БЧСКК та КАМ однакова.

Визначено, що енергетичний виграш (ЕВ) при використанні БЧСКК замість КАМ змінюється як показано на мал. 2.

За результатами досліджень зроблено такі висновки:

1. Оскільки залежність  $f_x = F(f_c)$  має нелінійний характер, то необхідно збільшувати амплітуду сигналів на краях підканалів, або нерівномірно розміщувати фіксовані значення сигнальних частот. В останньому випадку необхідно прийняти:  $\frac{\Delta f_{ij}}{f_x} = \text{Const.}$



Мал. 2.

2. Визначено, що відношення  $\frac{\Delta f_{ij}}{f_{xj}}, j = \overline{1, N_K}$  (де  $f_{xj} \in f_c = \frac{F_B + F_H}{2}$ ) має завжди одне й те саме значення, яке дорівнює 3,468, незалежно від числа сигнальних частот у підканалі.

У третій главі розроблено метод та досліджені особливості побудови багаточастотних сигнально-кодових конструкцій на базі ортогональних сигналів при щільному пакуванні по частоті з використанням амплітудної модуляції.

Реалізації ансамблю багаточастотних СКК з амплітудною модуляцією (БЧСКК-АМ) являють собою комбінації елементарних ортогональних сигналів. Під елементарними сигналами розуміються модульовані по амплітуді відрізки гармонічних коливань. Частоти гармонічних коливань фіксовані. На мал. 3. показаний узагальнений план частот та рівней ансамблю БЧСКК-АМ.

Введені визначення:  $L$  - число сигнальних частот, розміщених

у каналі зв'язку рівномірно в інтервалом  $\Delta f$ ;  $K_i, i=\overline{1, L}$ —число рівномірно розміщених амплітуд коливань  $i$ -тої сигнальної частоти;  $A_{mi}, i=\overline{1, L}$ —максимальна амплітуда коливань  $i$ -тої сигнальної частоти;  $\Delta F_K$ —ширина смуги частот каналу зв'язку;  $F_H$  та  $F_B$  відповідно, нижня та верхня частоти смуги пропускання каналу зв'язку. Ансамбль визначається БЧСКК-АМ- $(K, L)$ .

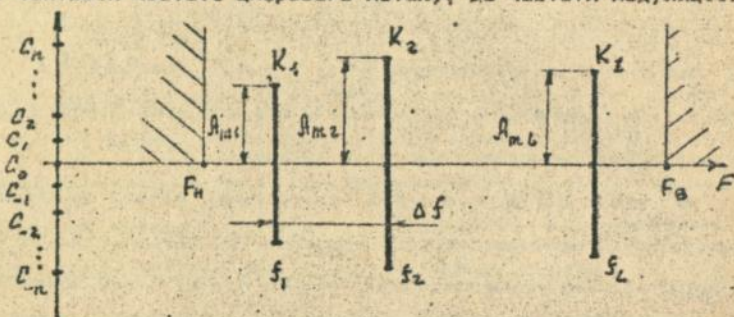
Щільне пакування по частоті досягається завдяки тому, що проміжок між частотами гармонічних коливань дорівнює  $\Delta f = 0.5 F_H$ .

Сигнали ансамблів описуються виразом:

$$S_{\Sigma}(t) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^L C_{ij} \cos [m^* F_H + (i-1) \Delta f] 2\pi (t - p T_H), \quad (5)$$

де  $C_{ij} (i=\overline{1, L}; -n \leq j \leq n)$ —постійна (на інтервалі модуляції) амплітуда коливань з  $i$ -тою сигнальною частотою;

$F_H = T_H^{-1}$ —частота та інтервал модуляції;  $m^*$ —відношення частоти, кратної тактовій частоті цифрового потоку, до частоти модуляції.



Мал. 3.

Постійні на інтервалі модуляції амплітуди сигнальних частот можуть приймати не тільки від'ємні та додатні фіксовані значення, але також нульові. Якщо для амплітуди коливань з  $i$ -тою сигнальною частотою передбачено нульове значення, тоді  $K_i$  цієї сигнальної частоти від'ємне, в іншому разі  $K_i$ —додатне.

Середня потужність сумарного сигналу (5) ансамбля БЧСКК-АМ

визначається виразом:

$$P_{\text{ср.з}} = \sum_{i=1}^L \frac{A_m i}{K_i} \sum_{j=1}^K 2C_{ij}^2, \quad (6)$$

де  $C_{ij}$  -  $j$ -та амплітуда.

Розрядність внутрішнього коду  $S_i$  відповідає числу сигнальних частот  $L$ . Вибір  $K_i$  та  $L$  можна одержати різними ансамблями сигналів ( $L$ -мірні ансамблі сигналів). Мірність ансамблю відповідає кількості сигнальних частот.

Розглянута схема системи зв'язку на базі БЧСКК-АМ. Її особливості слідуючі:

1. Система зв'язку відноситься до типу синхронних.
2. Сигнальні частоти передавача та опорні сигнали приймача жорстко зв'язані в тактовому частотному цифровому потоку, який надходить від джерела повідомлень.
3. Прийом когерентний. Демодуляція сигналів у приймачі відбувається кореляційним методом.

При передачі сигналу у смугообмеженому каналі з спотвореннями АЧХ та ФЧХ порушуються ортогональність елементарних сигналів, але залишається їх лінійна незалежність. Тому опорні сигнали демодулятора є лінійними комбінаціями сигнальних частот та списуються періодичними функціями виду:

$$g_{i,j}(t) = \sum_{j=1}^K a_i \cos [m^* F_m + (i-1)\Delta f] 2\pi t, \quad (7)$$

де  $a_i$  - амплітуда  $i$ -ї складової частини опорного сигналу

Коефіцієнти  $a_i$  вибираються з умов розділу елементарних сигналів, що еквівалентно корекції АЧХ та ФЧХ каналу зв'язку.

Знайдено верхні межі імовірності помилки для різних ансамблів сигналів БЧСКК-АМ та КАМ при однаковій частотній ефективності, середній потужності та захищеності. Під захищеність розуміється відношення середньої потужності сигналу до потужності завади.

Будьмо припущення: - під завадою розуміється адитивний стаціонарний гаусовський випадковий процес; - амплітудно-частотна й фазо-частотна характеристики демодулятора лінійні у робочому діапазоні частот; - когерентний прийом; - напруга сигналу значно більша від завади; - рішення приймається в кінці інтервалу модуляції.

Верхня межа імовірності помилки визначається виразом:

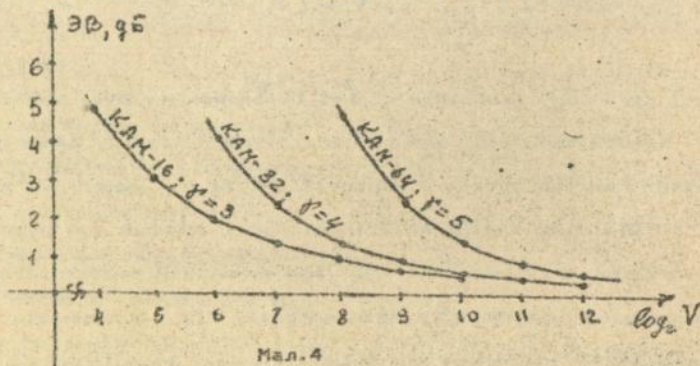
$$p \leq \left[ \frac{q_{s-1}}{q_s} \right] \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{k_i \cdot k^2 \cdot \log_2 M}{(k_i - 1)^2 \cdot \gamma \cdot L \cdot \sum_{n=1}^K j_n^2}} \right) \right], \quad (8)$$

де  $k^2$  - відношення середньої потужності сигналу до потужності завади.

Синтезовано ансамблі сигналів БЧСКК-АМ для  $\gamma$ -ефективності 3 - 6 біт/с\*Гц та різними об'ємами сигнального простору з надмірністю та безнадмірних.

При оцінці завадостійкості для кожного значення  $\gamma$ -ефективності вибиралися такі ансамблі КАМ, які забезпечують максимально можливу швидкість модуляції у каналі та максимальну відстань між точками сигнального простору.

Залежність енергетичного виграшу від об'єму  $V$  сигнального простору ансамблів БЧСКК-АМ у порівнянні з КАМ при рівних значеннях  $\gamma$ -ефективності показана на мал. 4.



Використання ансамблів БЧСКК-АМ в якості евклідових кодів ППС має свої особливості. У зв'язку з цим розглянуті наступні завдання:

- підвищення завадостійкості;
- спрощення кодеку шляхом зміни значення  $K_c$  при збереженні об'єму сигнального простору;
- компенсація монотонної зміни АЧХ поблизу граничних частот смуги пропускання каналу зв'язку;
- оцінка завадостійкості при виборі середньої потужності складових частин сигналу (6) та спрощення кодеку.

При дослідженні особливостей побудови ансамблів БЧСКК-АМ отримані наступні нові результати:

Гнучкість у виборі числа амплітуд сигнальних частот дозволяє використати метод квазігексагонального пакування сигнальних точок та підвищити мінімальну евклідову відстань, використати метод розкладу  $M$ -розрядного проміжного коду на односторядні підкоди для спрощення кодеку ППС.

Можливість вибору середньої потужності складових частин сигналу (6) дозволяє коректувати монотонну зміну АЧХ на краях каналу зв'язку.

За рахунок гнучкості методу є можливість отримати однакову мінімальну відстань на всіх сигнальних частотах та одночасно спростити кодек ППС. Ансамбль, у якого мінімальна відстань на всіх сигнальних частотах однакова має енергетичний виграв 1.5 дБ у порівнянні з ансамблем, у якого мінімальна відстань на сигнальних частотах різна, при рівності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$  та однакових середніх потужностях вихідних сигналів ППС.

У ч е т в е р т і й г л а в і розглянуто алгоритм роботи ППС для передачі цифрової інформації по каналу ТЧ зі швидкістю 4800 біт/с та проведена оцінка завадостійкості у порівнянні з ансамблем СМ-8, який використовується на цій швидкості згідно Рекомендації V.27 МККТТ. Дослідження особливостей використання

БЧСКК відбувалося шляхом макетування ППС-4800.

У багаточастотній СКК ППС-4800 використовується недробічний блочний код  $ZB1(Q_{15}=16)$ . Спуга частот каналу ТЧ поділена на два підканали. В кожному підканалі розміщено по 4 сигнальних частоти. Одночасно у кожному підканалі може передаватися тільки одна з 4 сигнальних частот. Сигнал ППС-4800 є комбінацією сигнальних частот першого та другого підканалів. Кодування безнадмірне. Частота модуляції дорівнює 1200 Гц.

При побудові ППС-4800 розроблено план частот ансамблю сигналів, структурну схему, модуляційну та кодову таблиці.

Структурна схема характерна тим, що робота ППС є джерелом інформації синхронна, каскадне кодування безнадмірне, вхідний цифровий потік від джерела повідомлень підлягає скремблюванню та поділяється на блоки по 4 розряди, далі формується двохранрядний четверичний проміжний код.

При складанні кодової та модуляційної таблиць використано маніпуляційний код Грея. Для усунення впливу нелінійного характеру нормованої частоти (4) введено нерівномірне розміщення сигнальних частот у підканалах.

При оцінці ймовірності помилки враховувалось, що середні потужності сигналів БЧСКК та ФМ-8 однакові; у випадку ФМ-8 використано недробічний блочний код  $ZB1(Q_{15}=8)$  та маніпуляційне кодування кодом Грея, під захищеністю розуміється відновлення амплітуди сигналу до середньоквадратичного значення завади.

Оцінка ймовірності помилки показала, що при використанні методу БЧСКК та ймовірності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$  енергетичний виграш дорівнює 2,5 дБ у порівнянні з ФМ-8. Дослідження макету ППС-4800 показало доцільність використання ансамблю БЧСКК замість ФМ-8.

У п'ятій главі розглянуто алгоритм роботи ППС для передачі цифрової інформації по лінійних трактах СП К-60П,

ВК-960 та К-1020С. По лінійному тракту К-60П інформація передається зі швидкістю 1024 Кбіт/с (ППС-1024), а по лінійних трактах ВК-960 та К-1020С зі швидкістю 18 Мбіт/с (ППС-18000).

Визначено особливості ППС-1024 та ППС-18000, головні з яких зводяться до наступного:

для ППС-1024 - контрольна частота лінійного тракту 112 КГц не передається; - частотна ефективність становить 4,57 біт/с\*Гц,  
для ППС-18000 - контрольних частот у "активній" частотній області лінійного тракту не має; - частотна ефективність становить 4,5 біт/с\*Гц;

У ППС-1024 та ППС-18000 використано ансамбль БЧСКК-АМ-(4,3), який характеризується тим, що у смузі частот каналу об'єкту розміщується три сигнальних частоти. Амплітуда кожної сигнальної частоти може приймати на інтервалі модуляції одне з чотирьох фіксованих значень. Об'єм сигнального простору становить 64 сигнальних точки, таким чином використовується недовічний блочний безнадмірний код  $681(Q_S = 64)$ .

Розроблено структурну схему, плани частот, кодової та модуляційної таблиці. Використання однакового ансамблю сигналів для ППС-1024 та ППС-18000 припускає, що алгоритми код-сигнальних перетворень та, відповідно, структурні схеми ППС будуть однакові. Розрізняються тільки плани частот. При складанні кодової та модуляційної таблиць використано маніпуляційний код Грея.

Частота модуляції у каналі об'єкту для ППС-1024 становить 170,66 КГц, а проміжок між сигнальними частотами - 85,33 КГц.  
для ППС-18000 частота модуляції дорівнює 3 МГц, а проміжок між сигнальними частотами - 1,5 МГц.

Зроблена оцінка енергетичного виграшу при використанні ансамблю БЧСКК-АМ-(4,3) замість КАМ-64. Вибір ансамблю КАМ-64 замість КАМ-32 обґрунтований значним укладом енергії в біт/с\*Гц.

УНІВ. ІМ. В. СТЕФАНІКА  
АН України

формуєть спектр сигналу ППС. В разі КАМ-64 використано недевоічний нероздільний код 6В1 ( $Q_S = 64$ ). Порівняння провадилося у випадку однакових середніх та пікових потужностей сигналів; під захищеність розуміється, відповідно, відношення середньої або пікової потужності сигналу до потужності адитивного білого шуму.

У випадку однакових середніх потужностей сигналів БЧСКК та КАМ енергетичний виграв становить 7,8 дБ, а в разі однакових пікових потужностей - 1,5 дБ.

У шостій главі розглянуто основні результати імітаційного моделювання побудови сигналів БЧСКК-АМ-(4,3) та КАМ-64, а також проходження сигналів крізь канал зв'язку при впливі завади та міжсимвольній інтерференції.

Мета імітаційного моделювання (ІМ) - оцінка імовірних та детермінованих параметрів ансамбле БЧСКК-АМ-(4,3) у порівнянні з аналогічними параметрами ансамбле КАМ-64.

У процесі імітаційного моделювання оцінювались такі параметри та характеристики ансамблів БЧСКК-АМ-(4,3) та КАМ-64:

1. Імовірні: - залежність імовірності помилки від захищеності при когерентному прийомі; - залежність імовірності помилки від захищеності при оптимізації прийому за критерієм мінімуму дисперсії помилки.

2. Детерміновані: - залежність міжсимвольної та перехідної завади від характеристики каналу зв'язку; - залежність амплітуди відліку на виході інтеграторів від осузу частоти складових частин опорного сигналу; - залежність амплітуди відліку на виході інтеграторів від осузу фази складових частин опорного сигналу; - залежність максимального значення перехідної завади від осузу фази складових частин опорного сигналу; - залежність міжсимвольної та перехідної завади від осузу сигнальних частот від номінального значення.

Імітаційна модель ППС реалізована на базі функціонального

методу; характеристики визначені як середні значення по деякій великому числі реалізацій.

При побудові імітаційної моделі введено припущення:

1. Розглядається передача рівноймовірних сигналів по каналу з постійними параметрами та білим шумом (цей вид завади при заданій середній потужності має найбільшу ентропію та сильніше над усе знижує пропускну здатність каналу).

2. Розглядається прийом "в цілому" при визначенні імовірних параметрів та поелементний прийом при визначенні детермінованих параметрів.

3. Фазочастотна характеристика каналу зв'язку лінійна.

4. Розглядається когерентний прийом. При цьому враховується можливість розладнення фази опорного коливання.

5. У процесі передачі сигналу на вхід приймача надходить суміш спотвореного сигналу та завади  $S_{\Sigma}^*(t) = g(t) * S_{\Sigma}(t) + n(t)$ , де  $n(t)$  - адитивна завада;  $g(t)$  - імпульсна характеристика каналу зв'язку;  $*$  - знак операції згортки.

6. Точність оцінки імовірності помилки задається шириною надійного інтервалу.

Оптимізація прийому за критерієм мінімуму дисперсії помилки полягала в визначенні амплітуд складових частин опорних сигналів (7). У процесі імітаційного моделювання отримані результати, що підтверджують доцільність використання ансамблів БЧСКК-АН замість КАМ.

Узаєрешенні сформульовані основні наукові та практичні результати, які полягають у наступному:

1. Використання ансамблів сигналів комбінаційно-частотного типу дозволяє отримати енергетичний вииграш у порівнянні з ансамблями сигналів на базі КАМ та імовірності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$ ; при збільшенні об'єму сигнального простору БЧСКК та КАМ енергетичний

виграш асимптотично наближується до значення порядку 4 дБ.

2. Використання ансамблів комбінаційно-частотних сигналів замість 61-8 (Рекомендація V.27) у ППС для передачі даних по каналу ТЧ зі швидкістю 4800 біт/с дозволяє отримати енергетичний виграш 2,5 дБ у випадку лінійної ФЧК каналу за'язку при однаковій середній потужності сигналів та імовірності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$ .

3. Синтезовані та досліджені ансамблі ортогональних багаточастотних сигналів при щільному пакуванні по частоті (БЧСКК-АМ), застосування яких замість ансамблів КАМ забезпечує енергетичний виграш більше 2 дБ при значній надмірності сигнального простору ансамблів БЧСКК-АМ.

4. Вибір параметрів ансамблів сигналів БЧСКК-АМ дозволяє збільшити мінімальну евклідову відстань шляхом використання надмірності сигнального простору та квазігексагонального пакування точок, що приводить до росту завадостійкості.

5. Гнучкість методу побудови ансамблів БЧСКК-АМ та застосування недекодуваних блочних кодів дозволяє спростити кодек ППС, збільшити завадостійкість та компенсувати монотонні спотворення АЧХ на краях каналу за'язку шляхом вибору середньої потужності абої складової частини вихідного сигналу ППС.

6. Ансамбль БЧСКК-АМ, де відстань між усіма сусідніми точками сигнального простору однакова має енергетичний виграш 1,5 дБ у порівнянні з ансамблем, у якого відстань між сусідніми точками різна при однаковій середній потужності сигналу та імовірності помилки  $1 \cdot 10^{-5}$ .

7. Використання багаточастотних СКК на базі ортогональних сигналів замість КАМ в ППС-1024 та ППС-18000 дозволяє одержати енергетичний виграш 7,8 дБ при однакових середніх потужностях сигналів та 1,5 дБ при однакових пікових потужностях сигналів.

8. Імітаційне моделювання показало, що при обмеженні спектру

сигналу БЧСКК-АМ ортогональність елементарних складових частин порушується, але залишається їх лінійна незалежність. Тому опорні сигнали демодулятора є лінійними комбінаціями сигнальних частот. Коефіцієнти сигнальних частот вибираються з умов розділу елементарних сигналів, що еквівалентно корекції АЧХ та ФЧХ каналу зв'язку. Застосування оптимізації форми опорних сигналів приймача за критерієм мінімуму дисперсії помилки дозволяє одержати енергетичний виграв 1 дБ у порівнянні з прийманням без оптимізації.

9. Використання БЧСКК-АМ та оптимізації дозволяє одержати енергетичний виграв 2,5 дБ у порівнянні з ансамблем КАМ-64 при однаковій піковій потужності та імовірності помилки  $1 \cdot 10^{-4}$ .

10. При дослідженні детермінованих параметрів БЧСКК-АМ визначено, що максимальне значення міжсимвольної завади на крайніх сигнальних частотах значно менше міжсимвольної завади на центральній сигнальній частоті. При використанні обвідної елементарного сигналу типу "припіднятий косинус" міжсимвольна завада зменшується, а перехідна збільшується. При зміні сигнальних частот на 0,1% значення перехідної завади змінюється на 5%; тому допустима відносна нестабільність сигнальних частот становить  $1 \cdot 10^{-5}$ . При зміні фаз опорних сигналів кореляторів приймача на  $\pm 27^\circ$ , перехідна завада змінюється на 10%; тому точність фазової автопідстроїнки допустима у межах  $\pm 0,5^\circ$ .

У дисертації розроблено методи побудови багаточастотних сигнально-кодкових конструкцій, які збільшують ефективність модемів.

У додатку наведено опис макету ППС-4800, плани частот синтезованих ансамблів БЧСКК-АМ, програма імітаційного моделювання та акт використання результатів роботи.

ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ. По темі дисертації опубліковано наступні роботи:

1. Полонський С.Б. Пристрій передачі повідомлень на базі багато-

частотних сигнально-кодових конструкцій /Київ.філ.Одес.електротехн. ін-ту зв'язку. -Київ, 1993. деп. в УкрІНТЕІ 03.02.93, № 95- Ук93.

2. Полонський С.Б. Особливості застосування методу багаточастотних сигнально-кодових конструкцій з розділенням смуги частот на два підканалі /Київ.філ.Одес.електротехн.ін-ту зв'язку.-Київ,1993.Деп. в УкрІНТЕІ 03.02.93, № 94 -Ук93.

3. Лев О.Ю., Полонський С.Б. Багатомірні ансамблі сигналів на базі багаточастотних сигнально-кодових конструкцій /Київ.філ.Одес.електротехн.ін-ту зв'язку. -Київ, 1993.Деп.в ДНБ України 20.05.93, № 935 - Ук93.

4. Полонський С.Б. Особливості застосування ансамблів сигналів на базі багаточастотних СКК /Київ.філ.Одес.електротехн.ін-ту зв'язку.-Київ,1993. деп.в ДНБ України 28.06.93, № 1241-Ук93.

5. Полонський С.Б. Побудова ППС-18000 для лінійних трактів ВК-960 та К-1020С на базі багатомірного ансамблю/Київ.філ.Одес.електротехн. ін-ту зв'язку. -Київ, 1993. деп. в ДНБ України 20.05.93г, № 936 -Ук93.

6. Лев О.Ю., Полонський С.Б. Застосування багаточастотних сигнально-кодових конструкцій.//Тез.доп.нак.-техн. конф."Проблеми побудови цифрових мереж інтегрального обслуговування",20-22 апр. 1993 г.- Київ,1993.- С. 57 - 58.

7. Полонський С.Б. Імітаційне моделювання пристроїв перетворення сигналів для лінійних трактів ВК-960 та К-1020/Київ.філ.Одес.електротехн. ін-ту зв'язку. -Київ, 1993. деп.в ДНБ України 18.10.93, № 2040-Ук93.

8. Полонський С.Б. Дослідження параметрів ППС на базі багаточастотних сигналів шляхом імітаційного моделювання/Київ.філ.Одес.електротехн.ін-ту зв'язку.-Київ,1993. деп.в ДНБ України 18.10.93, № 2039-Ук93.

Підписано до друку 3.05.1994 р. Обсяг 0,88 друк. арк.

Формат 60x84<sup>1</sup>/16. Зам. 65. Тираж 50.

---

Друкарня УДАЪ Ім. О.С.Попова. Одеса, Старопортофранківська,61

457452

71-30057  
**AB 30.067**