

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

Яворський Володимир Іванович

УДК 621.372.542:376.56

МЕТОДИ І РЕАЛІЗАЦІЯ ДИСКРЕТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є
З ДЕЛЬТА-МОДУЛЯЦІЄЮ

05.11.05. Прилади та методи вимірювання
електричних та магнітних величин

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

Львів - 1995 р.

Дисертація є рукопис

Робота виконана у Тернопільському приладобудівному Інституті

Науковий керівник: доктор технічних наук,
професор,
академік Української
Академії Інформатики та
Міжнародної Академії
Інформатизації
В.О. Погрібний

Офіційні опоненти:

д.т.н., с.н.с. Мельник Анатолій Олексійович
к.ф.м.н., с.н.с. Федорів Роман Федорович.

Провідне підприємство: Інститут електродинаміки
НАН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00756171 (R)

Захист відбудеться "27" січня 1995р. о 14⁰⁰ год.
на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д068.36.04 при Державному
університеті "Львівська політехніка" (290013, м. Львів, вул.
С.Бандери, 12, аудиторія 226).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці університету
(вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "27" січня 1995р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої Ради:

к.т.н.

Я.Т. Луцик

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Анотація

Мета роботи: розробка ефективних методів та алгоритмів дискретного перетворення Фур'є випадкових дельта-модульованих сигналів для режиму реального часу, дослідження їхніх метрологічних особливостей, а також створення економічних спеціалізованих процесорів для реалізації вказаних методів та алгоритмів.

Для досягнення поставленої мети були розроблені нові методи і алгоритми ДКФ з ДМ з підвищеною швидкодією та економічністю. Дана методика дослідження їхніх метрологічних характеристик. Побудовані графіки та зняті аналітичні моделі функції регресії похибок від параметрів дельта-модуляції для різних класів випадкових сигналів. Досліджені методи імітаційного моделювання спеціалізованих процесорів ДКФ з ДМ. Запропонована модель тестового сигналу для імітації випадкового процесу. Створений універсальний метод вибору кроків квантування та частоти дискретизації при дельта-модуляції випадкових сигналів з метою обчислення коефіцієнтів ряду Фур'є. На базі розроблених методів і алгоритмів реалізовані ефективні спеціалізовані процесори ДКФ з ДМ. Шляхом імітаційного моделювання перевірено функціонування цих спеціалізованих процесорів і досліджені їхні метрологічні характеристики.

Одержані результати дозволяють реалізувати економічну цифрову апаратуру для спектрального аналізу випадкових сигналів в режимі реального часу для автоматизації контролю АЧК лінійних систем, потреб медицини, систем зв'язку, бортових досліджень та інших областей науки і народного господарства, де висуваються підвищені вимоги до економічності апаратури. Вони є розвитком методів цифрової обробки випадкових сигналів в режимі реального часу.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Цифрова обробка сигналів являється однією з підвалів інформатики. На основі аналізу сигналів даччів вона дає можливість одержувати відомості про досліджувані фізичні об'єкти та поля в будь-яких галузях науки і техніки. Тому ЦОС інтенсивно розвивається як в плані методично-алгоритмічному, так і апаратному.

Основними видами ЦОС в часовій області є кореляційний аналіз та цифрова фільтрація, а в частотній - спектральний аналіз на основі дискретного перетворення Фур'є. Останній

вид, поряд із використанням в теорії, одержав і дуже широке практичне розповсюдження у зв'язку з появою швидких алгоритмів, які дозволили зменшити число операцій від N^2 до $N \log_2 N$ і навіть меншого. ДКФ реалізують як за допомогою універсальних обчислювальних пристроїв так і спеціалізованих - спецпроцесорів. У зв'язку з поданням сигналів за допомогою багаторозрядної імпульсно-кової модуляції (ІКМ) економічність спецпроцесорів ДКФ з ІКМ не завжди задовільняє практичним вимогам. Альтернативою являється використання в ДКФ низькорозрядної дельта-модуляції, що обіцяє суттєву економічність структур спецпроцесорів. Але методи ДКФ з ДМ досліджені ще недостатньо (відомі лише роботи Н. Дзявнта, В. Ліу, В. Погрібною) як в методично-алгоритмічному, так і метрологічному плані. Це обмежує побудову відповідних спецпроцесорів.

Тому розробка нових ефективних методів та алгоритмів ДКФ з ДМ, метрологічного забезпечення та структур економічних спецпроцесорів є актуальною.

Теоретична і практична цінність роботи. Запропоновані методи і алгоритми, реалізовані на їх основі структури спецпроцесорів а також метод вибору параметрів ДМ дозволяють ставити нові та поглиблювати традиційні задачі, що відносяться до методів спектрального аналізу випадкових сигналів.

Розроблені методи дослідження метрологічних характеристик спецпроцесорів, метод вибору кроку квантування та частоти дискретизації а також модель тестового сигналу можуть використовуватися при розробці апаратури для будь-якого з методів ЦОС незалежно від способу аналого-цифрового перетворення.

Одержані результати сприяють реалізації економічної цифрової апаратури для спектрального аналізу випадкових сигналів в режимі реального часу, що має важливе народно-господарське значення.

Наукова новизна дисертації та основні положення, що вносяться на захист:

1. Розроблені нові, ефективні методи та алгоритми ДКФ у форматах ІКМ-ДМ та ДМ-ДМ.

2. Дана методика дослідження похибок ДКФ з ДМ.

3. Досліджені методи імітаційного моделювання спецпроцесорів для ДКФ з ДМ.

4. Запропоновані тестові сигнали для імітації випадкових процесів.

5. Створений універсальний метод вибору кроків квантування та частоти дискретизації при дельта-модуляції випадкових сигналів.

6. Реалізовані ефективні спецпроцесори ДКФ з ДМ.

Реалізація та впровадження результатів роботи.

Теоретичні та практичні результати дисертації впроваджені в розробку імітатора сигналів відеомагнітофону, виконану при безпосередній участі співзучака як відповідального виконавця в рамках госдоговору № 218-91/252-ДрВ "Дослідження, розробка і виготовлення імітатора сигналів відеомагнітофону" між Тернопільським приладобудівним інститутом і НВО "Електрон" (акт здачі-прийому від 15 лютого 1992 р.). Діючий макет імітатора експлуатується в технологічному процесі серійного виробництва телевізійних приймачів при їх налагоджуванні.

Апробація роботи. Дисертація в цілому доповідалася на кафедрі АСМ МТФ ДУ "Львівська політехніка".

Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на Всесоюзній школі-семінарі "Цифрова обробка сигналів в системах зв'язку та управління" (м. Ростов Великий, 1991), Всесоюзній науково-технічній конференції "Методи подання та обробка випадкових сигналів і полів" (м.Туапсе, 1991), Міжрегіональній науково-технічній конференції "Цифрова обробка сигналів в системах зв'язку та управління" (м.Славське, 1992), Міжнародних симпозиумах "Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів" (м.Тернопіль, 1992, 1993), науково-технічній конференції "Прогресивні технології і обладнання в машино- і приладобудуванні" (м.Тернопіль, 1992).

Публікації по роботі. По темі дисертації опубліковано 14 робіт. Серед публікацій 5 статей, 2 авторських свідоцтва на винахід.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох глав, закінчення, викладених на ... сторінках машинописного тексту, переліку використаної літератури з 78 найменувань, 6 додатків, викладених на

орієнтації. Ілюстрована 50 малюнками.

Методи досліджень базуються на апаратах перетворення Фур'є та рядів Фур'є, дискретної математики, матстатистики, булевої алгебри.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проблеми. На основі огляду літературних джерел сформульовані мета і задачі дослідження. Доведена наукова новизна отриманих в дисертації результатів і викладені положення, що виносяться на захист. Наведені відомості про апробацію роботи і публікації.

В першій главі наведені загальні відомості про подання сигналів за допомогою дельта-модуляції. При лінійній дельта-модуляції (ЛДМ) оперують кодом $E_k^{(x)} = \text{Sgn} [x(kT) - \tilde{x}(kT)] \in \{-1, 1\}$, де $x(kT)$ - відліки вхідного сигналу $x(t)$, $\tilde{x}(kT) = \tilde{x}_k$ - відліки апроксимуючого сигналу $\tilde{x}(t)$ дельта-кодера, T - період дискретизації. Апроксимуючий сигнал одержують на основі алгоритму

$$\tilde{x}_k = \sum_{i=1}^k E_i^{(x)} \epsilon, \text{ де } \epsilon - \text{модуль кроку квантування.}$$

Введено поняття еквівалентних, стосовно шумів квантування, імпульсно-кодової модуляції та дельта-модуляції, одержані співвідношення між їхніми кроками квантування і частотами дискретизації.

Запропоновано модель тестового сигналу для імітації випадкового процесу $x(t) = \sum_{k=1}^M [a_k \cos \omega t + b_k \sin \omega t]$, де a_k, b_k - попарно незалежні випадкові величини, розподілені згідно із заданим законом на відрізках $[-a_{0k}, a_{0k}]$ і $[-b_{0k}, b_{0k}]$ відповідно; $\omega = \frac{2\pi}{\theta}$; θ - тривалість реалізації випадкового процесу; M - номер верхньої частоти в спектрі сигналу.

Для подальшого аналізу, встановлено взаємно-однозначну відповідність між процесом і точков $2M$ вимірному простору з координатами (a_1, b_1) , $i = \overline{1, M}$. Очевидно множині всіх сигналів відповідатиме в R^{2M} $2M$ - вимірний куб Ω .

Для оцінки похибки ДКФ з ДМ вводиться поняття близькості двох сигналів M_1 і M_2 з множини Ω . З метою кількісної оцінки близькості двох сигналів множина Ω перетворена в метричні простори (Ω, ρ_1) і (Ω, ρ_2) шляхом введення відповідних метрик на Ω :

$$\rho_1(M_1, M_2) = \max \left\{ |a_1 - a'_1|, |b_1 - b'_1| \right\}, \quad i = \overline{1, M} \quad i$$

$$\rho_2(M_1, M_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^M \left[(a_1 - a'_1)^2 + (b_1 - b'_1)^2 \right]}, \quad \text{де } a_1, b_1 -$$

координати точки M_1 , а a'_1, b'_1 - координати точки M_2 .

Даний універсальний, незалежний від виду ЦОС і класу вхідного сигналу, метод знаходження кроку квантування і частоти дискретизації при дельта-модуляції випадкового сигналу з метою подальшої його цифрової обробки. Метод побудований на основі статистичного підходу і орієнтований на машинний експеримент.

У другій главі розглянуті основні прийоми, що були використані при розробці відомих методів ДКФ дельта-модульованих сигналів. Наведені найефективніші серед відомих алгоритмів ДКФ у форматах ІКМ-ДМ і ДМ-ДМ. Показано, що типова операція алгоритмів ДКФ у форматі ІКМ-ДМ складається з логічної операції "ВИКЛЮЧАЄ АБО" над однорозрядними кодами і операції багаторозрядного додавання. У випадку ДКФ у форматі ДМ-ДМ багаторозрядні арифметичні операції відсутні, а типова операція складається з логічної операції "ВИКЛЮЧАЄ АБО" над однорозрядними дельта-кодами і операції інкременту (декременту) вмістивого регістра-акумулятора.

Запропонований метод прорідження часової послідовності віддіків апроксимуючого сигналу з одночасним відсіканням неінформативної частини ряду коефіцієнтів Фур'є (модуль цих коефіцієнтів рівний нулю), що не погіршує роздільної здатності спектрального аналізу. Це дозволило розробити ряд нових, більш ефективних алгоритмів ДКФ у форматах як ІКМ-ДМ, так і ДМ-ДМ із зменшенням до практично коректного рівня числом операцій та об'ємом пам'яті коефіцієнтів.

Так, наприклад, кращий серед відомих алгоритмів ДКФ у форматі ІКМ-ДМ має вигляд

$$\hat{X}_n = \sum_{r=1}^N E_r^{(\infty)} C_{n,r} + j \sum_{r=1}^N E_r^{(\infty)} S_{n,r}, \quad \text{де} \quad C_{n,r} = \sum_{i=r}^N \cos \frac{2\pi}{N} ni,$$

$$S_{n,r} = \sum_{i=r}^N \sin \frac{2\pi}{N} ni, \quad \text{і потребує виконання } \boxed{1.32 \cdot 10^5} \text{ типових}$$

операцій, при об'ємі пам'яті наперед обчислених коефіцієнтів $C_{n,r}, S_{n,r} - \boxed{1.32 \cdot 10^5}$ багаторозрядних слів. Тут і далі, при проведенні порівняльного аналізу, характеристики алгоритмів обчислюються для випадку обробки сигналу з верхньов частотом $m = 32$, довжині дельта-коду $N = 256$ і $\mu = \frac{N}{2M} = 4$.

Наведемо, для порівняння, деякі із запропонованих алгоритмів у форматі ІКМ-ДМ і вкажемо їхні характеристики.

Економічний алгоритм ДКФ у змішаному форматі

$$\hat{X}_m = \sum_{k=1}^{N^{(1)}} \sum_{i=1}^{k\mu} E_i^{(\infty)} \left[\cos \frac{2\pi}{N^{(1)}} a - j \sin \frac{2\pi}{N^{(1)}} b \right], \quad \text{де}$$

$$m = 1, N^{(1)} \geq 2; N^{(1)} = 2M; a = mk + \frac{N^{(1)}}{4} - N^{(1)} \text{ENT} \left[\frac{4mk + N^{(1)}}{4N^{(1)}} \right];$$

$$b = mk - N^{(1)} \text{ENT} \left[\frac{mk}{N^{(1)}} \right]. \quad \text{Число типових операцій} = \boxed{5.3 \cdot 10^5},$$

об'єм пам'яті коефіцієнтів = $\boxed{64}$ багаторозрядних слова.

Швидкоплиний алгоритм ДКФ у змішаному форматі

$$\hat{X}_m = \sum_{i=1}^N E_i^{(\infty)} [\alpha(i, m) - j \beta(i, m)] \quad (1)$$

Як показали дослідження, $\alpha(i^{\mu}, m) = \alpha(i^{\mu} + v, m), \beta(i^{\mu}, m) = \beta(i^{\mu} + v, m)$, де $i^{\mu} = 1 + \mu(k-1), k=1, N^{(1)}, v=0, \mu-1$. Отже, маємо лише $N^{(1)}$ різних коефіцієнтів $\alpha(k, m)$ і $\beta(k, m)$ для кожного m . Залежно від методу їх формування, алгоритм має такі три модифікації:

а) коефіцієнти $\alpha(k, m) = \alpha(k-1, m) - \cos \frac{2\pi}{N^{(1)}} m(k-1), \beta(k, m) =$

$= b\langle k-1, m \rangle - \sin \frac{2\pi}{N^{(1)}} m \langle k-1 \rangle$, де $a\langle 1, m \rangle = b\langle 1, m \rangle = 0$, обчислюються наперед і зберігаються в пам'яті спеціального процесора, тоді число типових операцій = $1.6384 \cdot 10^4$, а об'єм пам'яті коефіцієнтів = 4096 багаторозрядних слів;

б) коефіцієнти $a\langle k, m \rangle$, $b\langle k, m \rangle$ обчислюються в реальному часі згідно з виразами даними для випадку "а)", тоді число типових операцій = $1.8432 \cdot 10^4$, а об'єм пам'яті коефіцієнтів = 64 багаторозрядних слів;

в) наближені значення коефіцієнтів $a\langle k, m \rangle \cong \frac{-N^{(1)}}{2\pi^2 \text{ENT}(\log_2 m)} \sin \frac{2\pi mk}{N^{(1)}}$, $b\langle k, m \rangle \cong \frac{N^{(1)}}{2\pi^2 \text{ENT}(\log_2 m)} \left[\cos \frac{2\pi mk}{N^{(1)}} - 1 \right]$ обчислюються для $m = 1$ і зберігаються в пам'яті спеціального процесора, їх значення для $m = 2, N^{(1)}/2$ одержують шляхом зсуву кодів $a\langle k, 1 \rangle$, $b\langle k, 1 \rangle$ на $\text{ENT}(\log_2 m)$ розрядів вправо, тоді число типових операцій = $1.6384 \cdot 10^4$, а об'єм пам'яті коефіцієнтів = 128 багаторозрядних слів.

Кращий серед відомих алгоритмів ДКФ у форматі ДМ-ДМ має вигляд $\hat{X}_n = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{nk} E_1^{(k)} E_r^{(c)} - j \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{nk} E_1^{(k)} E_r^{(s)}$, де $E_r^{(c)}$, $E_r^{(s)}$ - дельта-коди косинусоїди та синусоїди відповідно, і потребує виконання $3.7 \cdot 10^{11}$ типових операцій, при об'ємі пам'яті коефіцієнтів - 256 біт.

Запропонований економічний алгоритм ДКФ у форматі ДМ-ДМ

$$\hat{X}_m = \sum_{k=1}^{N^{(1)}} \sum_{i=1}^{k\mu} \sum_{r=N/4}^b E_1^{(k)} E_r^{(c)} - j \sum_{k=1}^{N^{(1)}} \sum_{i=1}^{k\mu} \sum_{r=1}^a E_1^{(k)} E_r^{(s)}, \quad \text{де}$$

$$m=1, N^{(1)}, a = mk\mu - N \text{ENT} \left[\frac{mk\mu}{N} \right], b = \frac{N}{4} + mk\mu - N \text{ENT} \left[\frac{N+4mk\mu}{4N} \right].$$

Число типових операцій = $3.35 \cdot 10^7$, об'єм пам'яті коефіцієнтів = 256 біт.

Запропонований швидкодіючий алгоритм ДПФ у форматі ДМ-ДМ

$$\hat{X}_m = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \hat{a}_{i,m} E_1^{(c \times d)} E_{im}^{(c \times a)} - j \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N b_{i,m} E_1^{(c \times d)} E_{im}^{(c \times b)} \quad (2)$$

Залежно від методу формування коефіцієнтів $\hat{a}_{i,m}$, $b_{i,m}$ цей алгоритм має такі модифікації:

а) коефіцієнти $\hat{a}_{i,m}$, $b_{i,m}$ обчислюються попередньо, згідно з виразами даними для випадку "а)" вище наведеного алгоритму (1), і зберігаються в пам'яті спеціального процесора, тоді число типових операцій = $1.4763 \cdot 10^4$, а об'єм пам'яті коефіцієнтів = **4096** багаторозрядних слів;

б) наближені значення коефіцієнтів $\hat{a}_{i,m}$, $b_{i,m}$ обчислюються згідно з виразами даними для випадку "в)" алгоритму (1), і зберігаються в пам'яті спеціального процесора, тоді число типових операцій = $1.4763 \cdot 10^4$, а об'єм пам'яті коефіцієнтів = **128** багаторозрядних слів.

Таким чином, завдяки використанню в ДПФ з ДМ прорідженої послідовності відліків апроксимуючого сигналу і, отже, відсіканню неінформативної частини ряду коефіцієнтів Фур'є вдалося збільшити швидкодію обчислень при апаратурній реалізації. Число типових операцій і об'єм пам'яті коефіцієнтів в запропонованих алгоритмах суттєво зменшені у порівнянні з відомими алгоритмами (тим суттєвіше, чим ширша смуга частот спектрального аналізу). Найбільш ефективним у форматі ІКМ-ДМ є алгоритм (1) при варіанті "б)" обчислення коефіцієнтів. Він забезпечує найвищу точність обчислень. Найбільш економічним є алгоритм (2) у форматі ДМ-ДМ у поєднанні з наближеним методом (варіант "б)") обчислення коефіцієнтів.

В третьій главі проведено аналіз можливих джерел похибки коефіцієнтів ряду Фур'є для дельта-модульованих сигналів обчислених за допомогою спеціального процесора. Виявлено такі, впливаючі на похибку, фактори: обмежена довжина реалізації випадкового сигналу, дискретне подання неперервного сигналу, квантування відліків сигналу, занижена частота дискретизації дельта-модуляції (перенавантаження дельта-кодера за

крутістю), обмежена розрядність регістрів спеціального процесора, зокруглення (відсікання) результатів нагромадження, а також вхідний сигнал і алгоритм обробки.

Досліджується залежність похибки від специфічних для ДПФ з ДМ наведених вище чинників, крім перших двох, котрі властиві методу ДПФ незалежно від алгоритму його реалізації.

Дається опис машинного експерименту для проведення досліджень метрологічних характеристик спеціального процесора з ДМ. Результат обробки спеціального процесора в цьому експерименті порівнюється з еталонним рядом Фур'є, і знаходиться абсолютна похибка $\Delta x_k = x_k - \hat{x}_k$, де $k = 1, N^{(1)}/2$, $\{x_k\}$ - еталонний ряд Фур'є, $\{\hat{x}_k\}$ - ряд Фур'є, обчислений за допомогою спеціального процесора.

Як показали дослідження компоненти вектора $\{\Delta x_k\}_{k=1}^{N/2}$ залежні від кожного з вище перерахованих факторів. Однак, їх вплив важко піддається аналізу, крім цього, більшість з них (шум квантування, шум від зокруглень при обчисленнях, перенавантаження дельта-кодера за крутістю, вхідний сигнал, ...) мають випадковий характер. Це дає підстави прийняти гіпотезу, що вектор абсолютної похибки є вибіркою з деякої генеральної сукупності випадкових величин. Відомо, що коли випадкова величина пов'язана з впливом багатьох факторів, серед яких немає домінуючого, і котрі самі мають випадковий характер, то її розподіл є нормальним (гаусовим). Тому можна задатися нормальним розподілом компонент вектора $\{\Delta x_k\}_{k=1}^{N/2}$. Статистична гіпотеза про нормальність розподілу генеральної сукупності перевірена при допомозі критерію згоди Колмогорова.

Це дало можливість кількісно оцінювати похибку ДПФ з ДМ за допомогою характеристик нормального закону розподілу: математичного сподівання $M(\Delta x)$, дисперсії $D(\Delta x)$. Зрозуміло, що у випадку експериментальних даних обмеженої довжини, їх можна лише оцінити:

$$\hat{M}(\Delta x) = \frac{2}{N^{(1)}} \sum_{k=1}^{N^{(1)}/2} \Delta x_k, \quad \hat{D}(\Delta x) = \frac{2}{N^{(1)}} \sum_{k=1}^{N^{(1)}/2} (\Delta x_k - \hat{M}(\Delta x))^2.$$

Як виявилось далі ще зручнішими для користування є середньоквадратичне значення похибки $\sigma = \sqrt{\widehat{D(\Delta X)}}$, і максимальне значення похибки $\Delta X_{\max} = \max |\Delta X_k|$, $k = 1, N^{(1)}$.

Можливості машинного експерименту при дослідженні метрологічних характеристик спеціпроцесорів ДКФ з ДМ продемонстровані для п'яти різних реалізацій тестових сигналів. Приведено відповідний графічний матеріал.

Експерименти підтвердили необхідність дослідження функціональної залежності похибки від модуля кроку квантування і частоти дискретизації дельта-модуляції. Їх вплив неможливо зменшити до рівня, яким би можна було знехтувати, це веде до погіршення експонічності та швидкодії апаратури. Тому необхідно вміти знаходити оптимальні значення цих параметрів для кожного конкретного використання.

Крім цього, експерименти доводять, що похибки ДКФ з ДМ залежать від параметрів сигналу. На рис.1,а подано функціональну залежність похибок від параметрів ДМ для конкретного сигналу. В напрямі осі "y" змінюється частота дискретизації у відносних одиницях $\hat{\mu} = \frac{\mu - 8}{8}$, де $\mu = \frac{f}{F} = (8, 64)$, F - частота Найквіста; а в напрямі осі "x" - крок квантування у відносних одиницях $\hat{\alpha} = \frac{\alpha - 0,7}{0,15}$, де

$$\alpha = \frac{\epsilon_{\text{опт}}(f)}{\epsilon(f)} = (0,7, 1,3), \quad \epsilon_{\text{опт}}(f) = \frac{\hat{M} \left[|S|_{\max} \right]}{f}, \quad \hat{M} \left[|S|_{\max} \right] -$$

максимальне значення крутості сигналу в межах реалізації, усереднене по реалізаціях. При цьому для перетинів $x = 0$ -

$\alpha = 1$, тому $\epsilon(f) f = \hat{M} \left[|S|_{\max} \right]$; для всіх перетинів $x < 0$ -

$\alpha > 1$, тому $\epsilon(f) f > \hat{M} \left[|S|_{\max} \right]$, і для перетинів $x > 0$ -

$\alpha < 1$, тому $\epsilon(f) f < \hat{M} \left[|S|_{\max} \right]$. Однак визначення такої функції для загального випадку не представляється можливим.

Тому далі розв'язується задача визначення імовірнісних характеристик випадкових функцій $\epsilon(f, \epsilon)$ і $\Delta X_{\max}(f, \epsilon)$

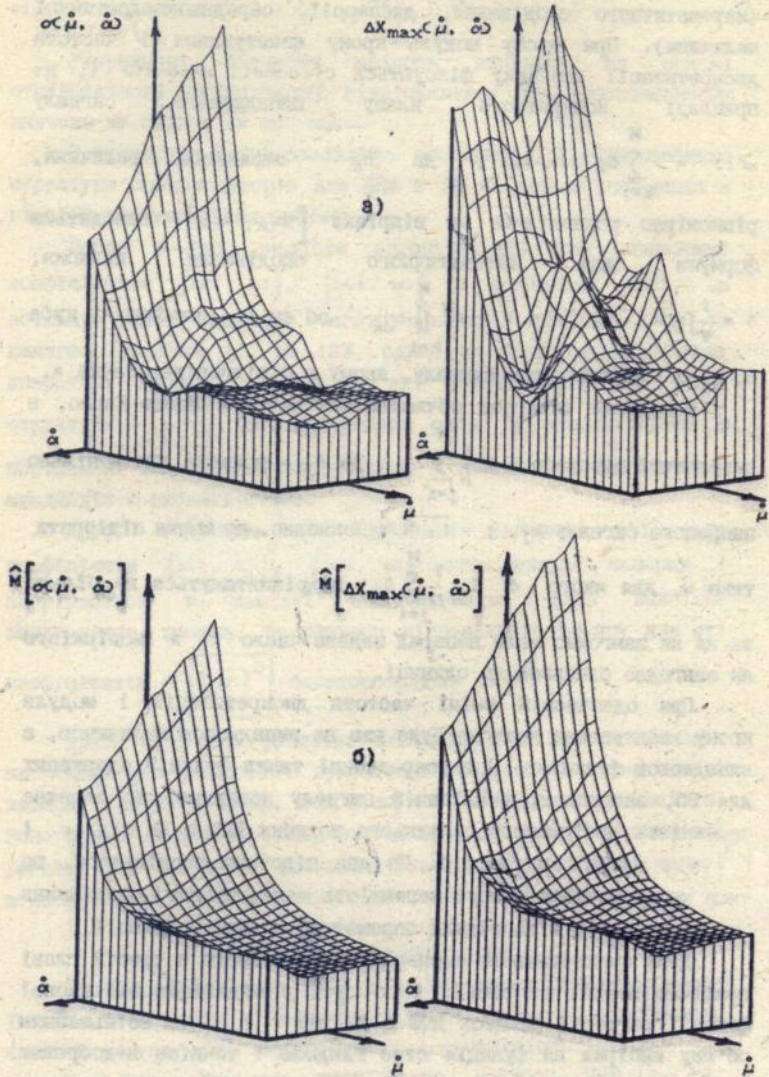


Рис. 1.

(математичного сподівання, дисперсії, середньоквадратичної величини). При цьому модуль кроку квантування і частота дискретизації спочатку фіксуються ($f = \text{const}$, $\varepsilon = \text{const}$) і, наприкладі конкретного класу випадкового сигналу

$$x(t) = \sum_{k=1}^M b_k \sin k\omega t, \quad \text{де } b_k - \text{випадкова величина,}$$

рівномірно розподілена на відрізку $[-b_{0k}, b_{0k}]$, виводиться формула для математичного сподівання похибки:

$$\delta = \frac{1}{V} \int_{\Omega} s(A) d\tau_A, \quad \text{де } V = 2^M \prod_{k=1}^M b_{0k} - \text{об'єм } M - \text{вимірного куба}$$

Ω , $s(A)$ - похибка для сигналу, якому в Ω відповідає точка A .

Наведений інтеграл обчислюється методом Монте-Карло, в

результаті одержано $\delta \cong \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta_j$, де δ_j - похибка для довільно

вибраного сигналу A_j , $j = 1, \dots, N$. Показано, що можна підібрати

таке N , для якого δ і $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta_j$ відрізнятимуться не більше

як на як завгодно мале наперед задане число ξ з імовірністю як завгодно близькою до одиниці.

При одночасній зміні частоти дискретизації і модуля кроку квантування похибка буде вже не випадковою величиною, а випадковою функцією. При усередненні таких функцій одержаних для 50, наприклад, реалізацій сигналу поверхня, що виражає залежність вибіркового середнього похибки ДФФ з ДМ від ε і f стає плавнішою (рис.1,б). Це дає підстави сподіватися, що така крива точніше описує залежність математичного сподівання цих похибок від відповідних параметрів дельта-модуляції.

Дані стохастичного експерименту описаного в третій главі графічно подані на рис.1, і по суті є відліками вибіркової функції регресії похибок ДФФ з ДМ від f і ε . Із збільшенням об'єму вибірки ця функція стає гладшою і точніше відображає згадану регресійну залежність. Це дає підстави пошукати аналітичну модель (апроксимацію) регресійної залежності похибок від параметрів ДМ. Знайдений вираз має вигляд:

$$\sigma_{\dot{\mu}}, \dot{\omega} = \left[3.5 \cdot 10^{-5} \dot{\alpha} + 0.4 \cdot 10^{-4} \right] \dot{\mu}^5 - 0.075 \dot{\alpha} + 1.6.$$

Усереднені значення похибок знайдені на основі стохастичного експерименту відрізняються від апроксимованих значень не більше як на $\pm 5\%$.

В четвертій главі розглянуто особливості і запропоновано структури спецпроцесорів для ДКФ з ДМ на основі наведених в главі 2 ефективних алгоритмів.

Перша з них реалізує алгоритм (1) при обчисленні коефіцієнтів $\{a_{i, m}\}$, $\{b_{i, m}\}$ в реальному часі. Це збільшує число операцій багаторозрядного додавання, що їх вимагає алгоритм (1) на 12%, однак не потребує додаткових апаратних засобів. Об'єм пам'яті коефіцієнтів для даної структури - $N^{(1)}$ багаторозрядних слів, що значно менше в порівнянні з відомими структурами і забезпечує їй достатню швидкодів і економічність.

Друга структура теж реалізує алгоритм (1), але коефіцієнти $\{a_{i, m}\}$, $\{b_{i, m}\}$ обчислюються наперед і зберігаються в пам'яті спецпроцесора. Вона найбільш швидкодіє, навзаль, за рахунок відповідного обсягу пам'яті коефіцієнтів - $N^{(1)2}$ багаторозрядних слів.

Третя структура реалізує алгоритм (2). Вона побудована на основі однорозрядного арифметичного пристрою, тому, як і належить формату ДМ-ДМ, відрізняється високою економічністю. Вона придатна для бортових досліджень, досліджень в польових умовах тощо. Вказана економічність досягнута ціною деякої втрати швидкодів, що обмежує область її застосування.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблені нові методи та алгоритми ДКФ у форматах ІКМ-ДМ та ДМ-ДМ з підвищеною, за рахунок прорідження апроксимуючого коду, швидкодів та економічністю.

2. Дана методика дослідження похибок ДКФ з ДМ. Побудовані графіки функції регресії похибок від параметрів дельта-модуляції для різних класів випадкових сигналів. Знайдена аналітична модель регресійних залежностей цих

похибок.

3. Досліджені методи імітаційного моделювання спецпроцесорів ДКФ у форматах ІКМ-ДМ та ДМ-ДМ для перевірки їхнього функціонування та метрологічних характеристик.

4. На основі канонічного подання випадкової функції запропоновані тестові сигнали для імітації випадкового процесу.

5. На основі імовірнісного підходу створені універсальний метод вибору кроків квантування та частоти дискретизації дельта-модуляції випадкових сигналів для ДКФ шляхом аналізу вихідних шумів спецпроцесора.

6. На базі розроблених методів та алгоритмів реалізовані ефективні спецпроцесори ДКФ з ДМ.

ПУБЛІКАЦІЇ

1. А. с. 1100726 ССРСР, МКИ н оз к 13/02. Преобразователь код-напряжение / Я.В. Бучинский, С.Б. Ильясевич, М.Н. Микитив, В.И. Оршико и В.И. Яворский. - Оpubл. 30.06.84. Блл. № 24.

2. А. с. 1481736 ССРСР, МКИ с о в ф 3/153. Устройство для отображения информации / В.И. Яворский, В.И. Яворский и З.И. Домбровский. - Оpubл. 23.05.89. Блл. № 19.

3. Погрибной В.А., Яворский В.И. Алгоритм и реализация дискретного преобразования Фурье с дельта-модуляцией // Методы представления и обработки случайных сигналов и полей : Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Харьков, 1991. - С. 165.

4. Погрибной В.А., Яворский В.И. Оценка эффективности алгоритма ДКФ с линейной дельта-модуляцией // Цифровая обработка сигналов в системах связи и управления: Тез. докл. межрегион. науч.-техн. конф. - Львов, 1992. - С. 31-32.

5. Погрибной В.А., Яворский В.И. Развитие методов ДКФ с линейной дельта-модуляцией // Цифровая обработка сигналов в системах связи и управления: Тез. докл. науч.-техн. школы-семина. - Ростов Великий, 1991. - С. 76.

6. Погрибний В.О., Яворський В.І., Яворський В.І. Підпрограма швидкого перетворення Фур'є для наукових експериментів // Автоматизація виробничих процесів. - 1993. Вип. 31. - С. 77-79.

7. Погрибний В.О., Яворський В.І. Методика дослідження

похибки спектрального аналізу дельта-модульованих сигналів // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів: Збірка наук. праць під ред. В.О. Смільченка. - Харків. - 1992. - С. 117-120.

8. Погрібний В.О., Яворський В.І. Підвищення швидкодії алгоритмів ДКФ з дельта-модуляцією // Автоматизація виробничих процесів. - 1992. Вип. 30. - С. 111-114.

9. Погрібний В.О., Яворський В.І. Похибки ДКФ з дельта-модуляцією // Інформаційні технології та розпізнавання образів: Збірка наук. праць міжнарод. симпозиуму "Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів". - Тернопіль. - 1993. - С. 158-159.

10. Яворский В.И., Домбровский З.И., Яворский В.И., Лотоцкий Я.В. Частота дискретизации при реализации цифровых полосовых фильтров // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. - 1985. - № 4. - С. 78-80.

11. Яворский В.И., Яворский В.И., Домбровский З.И., Лотоцкий Я.В. Контролер цветного дисплея для экспресс-визуализации телеметрической информации // Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Технические и программные средства тематической обработки спутниковой информации". - Москва, 1989 г. - с.47-48.

12. Яворский В.И. Алгоритм преобразования структур данных в устройствах отображения информации с дисплейным терминалом растрового типа // Методы и средства обработки информации. - Тернополь: ТФЭИ, 1985. - 59 с. Рукопись деп.в УкрНИНТИ 14.03.86, № 797-Укр86.

13. Яворський В.І. Аналіз алгоритмів ДКФ з лінійною дельта-модуляцією // Прогресивні технології і обладнання в машино- і приладобудуванні: Тез. доп. наук.-техн. конф. ТНП. - Тернопіль. - 1992. - С. 167.

14. Яворский В.И. Специализированные вычислительные устройства для спектрального анализа // Современные проблемы математики и механики. - Тернополь: ТФЭИ, 1986. - 89 с. Рукопись деп.в УкрНИНТИ 04.03.87, № 22-98-Укр87.

Yavorsky V. I. *Methods and Realization of the Discrete Fourier Transform with Delta-Modulation.*

Dissertation on the competition of the technical science candidate's degree of the speciality 05.11.05 - Instruments and Methods of Electrical and Magnetic Values Measuring. State University "Lviv Polytechnika", Lviv, 1994.

A scientific work, being defended, consists of 14 articles containing theoretical investigations of the casual delta-modulated signals discrete Fourier transform real time mode methods and algorithms, their metrological peculiarities and suggesting economizing back-end processors realizing methods and algorithms, mentioned above.

An universal method of staircase steps and delta-modulated signals discrete frequency selection for further digital processing has been developed and test signal model for "pink" noise imitation has been proposed.

Яворский В.И. Методы и реализация дискретного преобразования Фурье с дельта-модуляцией.

Диссертация на соиск. уч. степени канд. техн. наук по специальности 05.11.05 - приборы и методы измерения электрических и магнитных величин. Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1994.

Защищается 14 научных работ, которые содержат теоретические исследования методов и алгоритмов дискретного преобразования Фурье случайных дельта-модулированных сигналов для режима реального времени, исследования их метрологических особенностей. А Предложены структуры экономичных спецпроцессоров, реализующих вышеупомянутые методы и алгоритмы. Разработан универсальный метод выбора шагов квантования и частоты дискретизации при дельта-модуляции случайных сигналов с целью их дальнейшей цифровой обработки. Предложена модель тестового сигнала для имитации "розового" шума.

Ключові слова: дискретне перетворення Фур'є, дельта-модуляція, імпульсно-кодова модуляція, спектральний аналіз, частота Найквіста, частота дискретизації, кроки квантування, метрологічні характеристики спецпроцесора.

B. S. V.

Підп. до друку 19.12.94 . Формат 60x84¹/16
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умовн. друк. арк. 125
Умовн. фарб.-відб. 125 Умовн. видав. арк. 122
Тираж 100 прим. Зам. 578. Безплатно

ДУЛП 290646 Львів-ІЗ, Ст. Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ДУЛП
Львів, вул. Городецька, 286

456306

AB 31.679