

Дніпропетровський державний університет

На правах рукопису

Любошенко Ігор Володимирович

СТІЙКІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ТА ~~З~~ВІСРАЖЕНЬ  
З СПОТВОРЕНИХ ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

01.04.03 -- Радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ,  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Дніпропетровськ -- 1997



Дисертаціє є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем обробки інформації та управління радіофізичного факультету Дніпропетровського державного університету.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор Ахметшин О.М.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Хандецький В. С.

кандидат технічних наук Славін І. В.

Провідна установа:

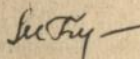
Харківський державний технічний університет радіоелектроніки.

Захист відбудеться « 26 » серпня 1997 року о « 14 » годині на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради К 03.01.12 по захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук при Дніпропетровському державному університеті за адресою: 320050, м. Дніпропетровськ, пров. Науковий, 13, радіофізичний факультет, корп. 12, ауд. 512.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Дніпропетровського державного університету.

Автореферат розісланий « 24 » травня 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фіз.-мат. наук, доцент

 М. Ф. Буланій

ДВ - 38, 2002

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з важливих проблем сучасної радіофізики є обробка та інтерпретація фазової інформації, яка отримується з фізичних вимірювань у частотній та часовій областях, а також підвищення стійкості отриманих при цьому результатів. У цьому зв'язку одним з пріоритетних напрямків в областях обробки зображень, кодуванні, скороченні надмірності інформації та інтроскопії фазо-контрастних діелектричних структур є відновлення сигналів та зображень за фазовими характеристиками їх перетворень Фур'є. Одним з нових напрямків у медичній діагностиці є використання фазової інформації для реконструкції зображень у когерентній рентгенівській томографії. В інтерферометрії радарів із синтезованою апертурою використання інтерферометричної фазової характеристики призводить до формування цифрової моделі місцевості, яка з високою точністю (до половини довжини хвилі випромінювача) описує досліджуваний рельєф. В інтроскопії шаруватих діелектричних структур використання фазової інформації доцільно при зондуванні фазо-контрастних структур, для яких характерні значні варіації фазо-частотної характеристики (ФЧХ) коефіцієнту відбиття досліджуваної структури при незначному змінюванні амплитудно-частотної характеристики у діапазоні вимірювання. В інтроскопії біологічних структур при мінімально можливій потужності випромінювання амплитудна характеристика може суттєво спотворюватися шумами, у той час як ФЧХ вимірюється точніше шляхом підсилення слабких відбитих гармонічних сигналів до фіксованого рівня, відповідного до опорної напруги на вході фазового детектора. В оптиці необхідність використання фазової інформації обумовлена ймовірною дефокусировкою в апаратурі прийому і, отже, значним спотворенням амплитудної характеристики перетворення Фур'є зображення досліджуваного об'єкту. В сейсміці, акустиці та теорії радарів використання фазової характеристики дозволяє оцінити з високою точністю час реєстрації та коефіцієнт підсилення прийнятого сигналу. Особливістю зазначених радіофізичних задач є значна чутливість їх рішень щодо якості первинної фазової інформації. Підвищення стійкості рішення цих задач потребує розробки спеціальних стійких математичних методів обробки фазових характеристик. Застосування цих методів обумовлено тим, що в реальних фізичних вимірюваннях фазова характеристика в частотній чи просторово-часовій областях спотворена шумами вимірювання з інтенсивністю, достатньою для значного спотворення отриманих результатів. Відсутність алгоритмів з високою точністю та стійкістю при обробці фазових характеристик, які отримуються в реальних фізичних вимірюваннях, зумовлює актуальність поставленої в дисертації теми досліджень.

Метою даної роботи є:

підвищення стійкості відновлення сигналів та зображень за фазовими характеристиками при обробці результатів фізичних вимірювань в просторовій та частотній областях.

Для досягнення зазначеної мети були розглянуті три практично важливі ситуації:

- відома інтерферометрична фазо-просторова характеристика, яка отримана через взаємне віднімання аргументів двох комплексних зображень, зареєстрованих за допомогою радару із синтезованою апертурою. Інтерферометрична фазова характеристика спотворена шумом із аналітично обчислюваною щільністю імовірності. Задача полягає у розробці стійкого алгоритму синтезу цифрової моделі місцевості за інтерферометричною фазо-просторовою характеристикою;

- відома ФЧХ коефіцієнту відбиття шаруватої діелектричної структури, яка була вимірена у кінцевому високочастотному діапазоні та спотворена шумами вимірювання. Задача полягає у тому, щоб за ФЧХ коефіцієнту відбиття, виміреної у частотній смузі, відшукати імпульсну характеристику зондуваної структури;

- відома ФЧХ фінітного дискретного сигналу або зображення та просторово-часова область, за межами якої значення відліків цього сигналу або зображення є тотожно рівними нулю. Для шуму, який є присутнім в ФЧХ, відома його дисперсія або найбільше абсолютне значення. Задача полягає у розробці стійкого алгоритму відновлення даного фінітного сигналу або зображення за його спотвореної ФЧХ.

Внаслідок проведених досліджень були отримані наступні основні результати, які вносяться на захист:

- розвиток методу відновлення радіолокаційного зображення за спотвореною фазо-просторовою характеристикою, вимірною за допомогою радару із синтезованою апертурою, який ґрунтується на застосуванні стійкого регуляризуючого алгоритму обчислення градієнту вимірної інтерферометричної фазової характеристики та використанні інтегрального перетворення, отриманого на основі першого рівняння Гріна;

- стійкий ітераційний алгоритм відновлення фінітних сигналів за їх спотворених ФЧХ, побудований на послідовному ортогональному проектуванні сигналів на опуклу замкнуту множину сигналів із відомою тривалістю та на опуклу підмножину переріза нечітких множин сигналів із відомою спотвореною ФЧХ. Розмір даної підмножини однозначно визначається статистичними характеристиками шуму, який є присутнім у ФЧХ сигналу. Відновлення імпульсної характеристики шаруватої діелектричної структури за ФЧХ її коефіцієнту відбиття показує збіжність методу до наближеного рішення за кінцеве число кроків ітераційного процесу;

- стійкий прямий регуляризуючий алгоритм відновлення фінітних сигналів та зображень за ФЧХ їх перетворень Фур'є, який ґрунтується на матричному запису регуляризованого рішення некоректної оберненої задачі відновлення сигналу або зображення за ФЧХ їх перетворень Фур'є із застосуванням параметру регуляризації, величина якого розраховується згідно з узагальненим принципом відхилу однозначно за апіорно відомою дисперсією адитивного шуму, який є присутнім у ФЧХ. Підвищену стійкість методу порівняно із існуючими алгоритмами показано на прикладі широкопasmової інтроскопії діелектричної шаруватої структури за спотвореною фазо-частотною залежністю її коефіцієнта відбиття, виміренню у кінцевій частотній смузі, та відновленні імпульсної характеристики досліджуваної структури по ФЧХ її коефіцієнту відбиття;

- метод розрахунку розподілу похибки у нормалізованому рішенні задачі відновлення фінітних сигналів за фазовою характеристикою їх перетворень Фур'є, спотвореною адитивним шумом із апіорно відомою дисперсією. Метод ґрунтується на розкладенні шуканого рішення в ряд за власними векторами матриці лінійного перетворення, який зв'язує шуканий дискретний фінітний сигнал та його ФЧХ.

#### Наукова новизна та теоретична цінність роботи полягає:

- у розробці нового методу відновлення зображень за спотвореною інтерферометричною фазо-просторовою характеристикою, який має, порівняно з існуючими методами, підвищену стійкість щодо похибок у виміренні інтерферограми;
- у розробці нових алгоритмів відновлення сигналів та зображень за спотвореною фазовою характеристикою їх перетворень Фур'є, які відрізняються від існуючих методів відновлення високою точністю та стійкістю по відношенню до спотворення первинних даних.

Практична цінність роботи полягає у можливості створення на основі розроблених методів цифрових систем, які мають стійкість по відношенню до спотворення первинних даних при відновленні сигналів та зображень за фазовими характеристиками.

Вірогідність основних наукових результатів дисертації. У роботі використані поняття та методи статистичної радіофізики у галузі прийому та обробки сигналів та зображень, методи широкопasmових високочастотних вимірювань параметрів шаруватих діелектричних структур, методи теорії радарів із синтезованою апертурою, математичний апарат теорії розв'язку некоректних обернених задач, теорії нечітких множин, функціонального аналізу, теорії ітераційних процесів та оптимізації, теорії матриць. Вірогідність основних наукових результатів підтверджено:

- аналітично через використання методів, збіжність яких до точного розв'язку при зменшенні рівня шуму в даних теоретично обґрунтовано;

- результатами чисельного моделювання через зрівняння отриманого рішення з точним при реальних рівнях шуму в первинних даних;
- результатами обробки реальних експериментальних даних через зрівняння отриманого рішення з точним у разі, коли звісна як фазова, так і амплітудна характеристики сигналів та зображень.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на 2-ій всеукраїнській конференції «Обробка сигналів, зображень та розпізнавання образів», м. Київ, 1994 р., 3-ій та 4-ій міжнародних конференціях «Розпізнавання образів та обробка інформації», м. Мінськ, 1995 р., 1997 р., міжнародній конференції з обчислювальних методів та зворотнім задачам в неруйнівному контролі та діагностиці «СМ NDT'95», м. Мінськ, 1995 р., 13-ій міжнародній конференції з розпізнавання образів «ICPR'96», м. Відень, Австрія, 1996 р., семінарі з цифрової обробки сигналів «DSPW'96», м. Лосен, Норвегія, 1996 р., науковій конференції кафедри обробки зображень Національної Вищої Школи Телекомунікацій (ENST), м. Париж, Франція, 1996 р.

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано 12 друкованих праць, список яких наведено у кінці автореферату.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновку, списку літератури із 103 найменувань та додатку. Загальний об'єм дисертації складає 172 сторінки, з яких 134 сторінки основного тексту, 39 рисунків та 10 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовані актуальність та практичне значення роботи, проведено огляд публікацій за темою дисертації, сформульовані мета роботи і основні результати, які виносяться на захист.

У першому розділі роботи розв'язується задача стійкого відновлення радіолокаційного зображення місцевості за спотвореною інтерферометричною фазовою характеристикою (ІФХ), отриманою через взаємне віднімання аргументів двох комплексних сигналів, вимірюваних через застосування радару із синтезованою апертурою (РСА) при дистанційному зондуванні земної поверхні. На процес формування інтерферограми впливають наступні фактори: можливість вимірювання ІФХ тільки по модулю  $2\pi$  (інакше кажучи, на відрізку  $[-\pi, \pi]$  радіан), необхідність точного накладення одного комплексного зображення на друге з метою взаємного віднімання аргументів для елементів зображення, відповідних одній й тій же точці земної поверхні, необхідність віднімання в аргументі кожного з двох зображень фазового зсуву, залежного від відстані між супутником та елементами земної поверхні, необхідність урахування явища спекла через усереднення певних відліків в інтерферограмі із відповідною втратою

розділювальної здатності інтерферометрії.

Через вплив зазначених факторів у вимірній інтерферограмі є присутніми хибні флукуації, які призводять до появи локальних областей на інтерферограмі, в яких однозначне відновлення радіолокаційного зображення земної поверхні неможливо через наявність сингулярних (особливих) точок, які призводять до появи залежності результату відновлення зображення від шляху інтегрування градієнту ІФХ. Присутність хибних флукуацій в ІФХ призводить також до значних похибок при обчислюванні градієнту ІФХ – операції, здійснення якої потрібно у багатьох існуючих методах відновлення. Поява сингулярних точок при обчисленні градієнту ІФХ походить також через наявність областей із недостатньою дискретизацією сигналу відгуку від земної поверхні при куті нахилу місцевості, більшому, ніж середнє значення куту бокового виду радару (для супутника ERS-1 він дорівнює 23 градуси). Перелічені труднощі відновлення радіолокаційного зображення земної поверхні по ІФХ обумовлюють застосування спеціальних підходів, які орієнтовані як на попередню обробку первинної ІФХ – фільтрації, застосуванні масок, забороняючих проходження шляху інтегрування градієнту ІФХ у замаскованій області, згладжуванні через усереднення сусідніх відліків ІФХ, так і на використанні процедур зважування первинних відліків ІФХ згідно з результатами статистичної класифікації областей інтерферограми. Існуючі методи потребують притягнення додаткової радіолокаційної інформації, яка отримується при дистанційному зондуванні земної поверхні для проведення процедури класифікації – зображень амплитуди відбитого сигналу, кореляції та когерентності. Як слідство, значно зростають час для обчислювання та витрати пам'яті.

Методом, стійким по відношенню до розповсюдження похибки відновлення зображення та одночасно економічним за витратами часу для обчислювання та витрат пам'яті, є алгоритм, який ґрунтується на використанні інтегрального перетворення, якого виведено через застосування першого рівняння Гріна. Проте, як показують дослідження, похибка при обчислюванні градієнту ІФХ у певній точці інтерферограми призводить у цьому методі до виникнення значної локально розподіленої похибки у відновленому радіолокаційному зображенні, яка пропорційна за абсолютною величиною похибці обчислення градієнту ІФХ. Відомо, що задача обчислення похідної деякого додатнього порядку є некоректною. Отже, похибка при вимірюванні ІФХ може призвести до значних хибних флукуацій у зображенні, відновленому з ІФХ. З метою зменшення цих флукуацій у дисертаційній роботі запропоновано використовувати регуляризуючий алгоритм обчислення градієнту ІФХ із вибором параметра регуляризації згідно із принципом узагальненого відхилення або із застосуванням локальної регуляризації. Кінцевим результатом

використання методу є ФХ, яка у довільній точці  $r'=(x', y')$  поверхні  $S$  з межею  $C$ , в якій проводиться пошук рішення, дорівнює

$$\phi(r') = -c_D^2 \iint_S dS \nabla g(r' - r) \cdot (\nabla \varphi(r))_{n_x} + \int_C dc \left[ \phi_c(r) \frac{\partial k(r' - r)}{\partial n} \right], \quad c_D = \left[ 1 - \frac{D}{2} \right]^{-1},$$

де  $(\nabla \varphi(r))_{n_x}$  є градієнтом ІФХ, обчисленим згідно зі згаданим методом регуляризації,  $g$  – функція Гріна області  $S$ :

$$g(r' - r) = -\frac{1}{2\pi} \ln|r' - r|,$$

$n$  – нормаль до дотичної межі  $C$ ,  $\phi$  – ІФХ, яка спотворена шумом із дисперсією  $D$ .

Як показують чисельні експерименти, якість відновлених зображень при цьому значно підвищується (від 2 до 6 разів в залежності від прийнятої метрики, в якій підраховується відносна похибка відновлення). Експерименти з реальними даними проводились щодо відновлення радіолокаційного зображення, яке відповідає гірському району біля м. Берн, Швейцарія, за ІФХ, отриманою з радара супутника ERS-1 Національним Центром Космічних Досліджень Франції (CNES), м. Тулуза, (Франція). Вони підтвердили високу стійкість запропонованого методу відновлення. Результати застосування запропонованого методу відновлення радіолокаційних зображень за спотвореною ІФХ у зрівнянні із результатами, отриманими у попередніх дослідженнях, наведені у таблиці.

Таблиця. Зрівняння похибок відновлення радіолокаційного зображення  $\phi(x, y)$  за ІФХ існуючим та запропонованим методами.

Дисперсія шуму, [рад <sup>2</sup> ]	Існуючий метод			Запропонований метод		
	Похибка в $L^2$ , %	Похибка в $W^1$ , %	Похибка $\nabla \phi$ в $L^2$ , %	Похибка в $L^2$ , %	Похибка в $W^1$ , %	Похибка $\nabla \phi$ в $L^2$ , %
0.1	14.4	17.5	82.2	12.6	12.6	18.2
0.25	16.3	22.5	128.0	12.8	13.0	24.8
0.5	21.3	30.7	183.0	13.7	14.0	26.0

У другому розділі роботи розроблено стійкий ітераційний метод відновлення дискретних фінітних сигналів за кінцевим набором відліків ФЧХ їх перетворень Фур'є. Із теорії відомо, що задача відновлення дискретних фінітних сигналів та зображень за відліками ФЧХ їх перетворень Фур'є є еквівалентною некоректній задачі розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР)  $Ax=u$ , з матрицею та правою частиною, елементи яких є відомими функціями відліків ФЧХ, спотвореної шумами вимірювання:

$$\begin{aligned}
 x(0) &= x(0), \\
 \sum_{n=1}^{N-1} x(n) \sin(\varphi_s(\omega_k) + n\omega_k) &= -x(0) \sin(\varphi_s(\omega_k)), \\
 k &= 1, \dots, N-1,
 \end{aligned}$$

де  $\varphi_s$  – відома ФЧХ сигналу  $x$ , яка виміряна на частотах  $\omega_k \in (0, \pi)$ . Рішення цієї системи вкрай нестійке по відношенню до спотворення матриці та правої частини системи, що обумовлює необхідність розробки спеціальних стійких методів відновлення. Проте, існуючі методи відновлення сигналів та зображень по ФЧХ не враховують впливу шуму вимірювань на якість ФЧХ, внаслідок чого спостерігається значна нестійкість отриманих рішень. Наприклад, існуючий ітераційний алгоритм розходиться при діянні на ФЧХ адитивного гаусового шуму із дисперсією  $D \geq 0.0001 \text{ рад}^2$ . Існуючий прямий алгоритм призводить до рішення із похибкою, квадрат норми якої (у метриці  $L^2$ ) при дисперсії адитивного шуму  $D = 0.01 \dots 0.025 \text{ рад}^2$  у 3—10 разів перевищує квадрат норми точного рішення. Нестійкість існуючих методів особливо проявляється при відновленні зображень за спотвореною ФЧХ їх перетворень Фур'є. Використання прямого методу призводить до надто спотвореного рішення вже при  $D = 10^{-12} \text{ рад}^2$ .

З метою підвищення стійкості відновлення фінітних дискретних сигналів за спотвореними відліками ФЧХ їх перетворень Фур'є у роботі запропоновано ітераційний алгоритм, який ґрунтується на використанні послідовного ортогонального проектування сигналів на замкнуту опуклу підмножину переріза нечітких множин сигналів із відомою спотвореною ФЧХ та замкнуту опуклу множину фінітних сигналів із відомою кінцевою областю визначення. Методологію теорії нечітких множин застосовано для обліку спотворень, присутніх у ФЧХ. Розмір підмножини переріза нечітких множин однозначно визначено значенням дисперсії адитивного шуму. Формально розроблений метод має запис:  $f_i = P_N P_{\alpha} f_{i-1}$ , де  $i$  – номер ітерації,  $P_N$  та  $P_{\alpha}$  – оператори проектування відповідно на замкнуту опуклу множину фінітних сигналів із відомою кінцевою областю визначення ( $N$  – кількість відліків сигналу) та на замкнуту опуклу підмножину переріза нечітких множин сигналів із відомою спотвореною ФЧХ:

$$P_N s(t) = \begin{cases} s(t), & t \in [0, N-1], \\ 0, & t \notin [0, N-1], \end{cases} \quad g = P_{\alpha} s = \begin{cases} s + \lambda \nabla \mu(\varphi_s), & s \in \alpha - \Pi, \\ s, & s \in \alpha - \Pi, \end{cases}$$

$\lambda$  – множник Лагранжа,  $\mu(\varphi_s)$  – функція приналежності сигналу  $s$  до замкнутої опуклої  $\alpha$ -підмножини ( $\alpha - \Pi$ ) переріза нечітких множин сигналів із відомою спотвореною ФЧХ (для якої  $\mu(\varphi_s) \geq \alpha$ ):

$$\mu(\varphi_s) = 1 - \min \left\{ 1, \left[ \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \mu_i(\varphi_s))^r \right]^{1/r} \right\}, \quad \mu_i(\varphi_s) = \exp \left( -k [\varphi_s(\omega_i) - \varphi_s^*(\omega_i)]^2 \right),$$

$\varphi_s^*(\omega_i)$  – відома вимірена ФЧХ,  $\varphi_s(\omega_i)$  – ФЧХ сигналу  $s$  на частоті  $\omega_i \in (0, \pi)$ .

Метод забезпечує збіжність за прийнятну кількість (20—40) ітерацій

до рішення із достатньо низьким (максимум 7% у метриці  $L^2$ ) рівнем відносної похибки, що порівняно з існуючим ітераційним підходом забезпечує виграш у точності у 2—6 разів (після 40 ітерацій), в залежності від рівня шуму. Запропонований метод збігається до фіксованої точки ітерацій, у той час як похибка рішення існуючого ітераційного алгоритму продовжує зростати із ростом кількості ітерацій (аж до 198% при  $D=0.01$  рад<sup>2</sup> після 100 ітерацій):

Таблиця. Зрівняння похибок відновлення фінітного сигналу за спотвореною ФЧХ існуючим та запропонованим методами.

№ ітерації	Похибка відновлення, %			
	$D=0.001$ рад <sup>2</sup>		$D=0.01$ рад <sup>2</sup>	
	Існуючий метод	Запропонований метод	Існуючий метод	Запропонований метод
10	8.160	8.92	12.74	8.51
20	11.36	6.24	21.70	8.05
30	13.58	5.57	32.11	7.84
40	15.71	5.50	43.70	7.77
50	17.87	5.50	57.32	7.76
60	20.07	5.50	73.79	7.76
70	22.34	5.50	94.13	7.76
80	24.65	5.50	119.85	7.76
90	27.01	5.50	153.39	7.76
100	29.44	5.50	198.82	7.76

Розроблений ітераційний алгоритм використовувався при відновленні імпульсної характеристики шаруватої діелектричної структури по ФЧХ її комплексного коефіцієнту відбиття стосовно до задач інтроскопії фазоконтрастних шаруватих структур у радіохвильовому та акустичному діапазонах. Використання запропонованого методу дозволило отримати рішення, точність якого у 2 рази перевищує точність рішення, отриманого за допомогою існуючого ітераційного алгоритму.

У третьому розділі дисертаційної роботи розроблено прямий (безітераційний) регуляризуючий алгоритм (РА) відновлення дискретних фінітних сигналів та зображень за спотвореними відліками ФЧХ їх перетворень Фур'є. Метод ґрунтується на використанні РА для розв'язання СЛАР із спотвореною матрицею  $A_h$  та правою частиною  $u_s$ .

$$x_n^* = \arg \min (M^n[x]) = (A_h^T A_h + \alpha I)^{-1} A_h^T u_s,$$

де  $I$  – діагональна матриця,

$$M^n[x] = \|A_h x - u_s\|_l^2 + \alpha \Omega[x], \quad \Omega[x] = \|x\|_r^2,$$

а вибір параметру регуляризації  $\alpha$  проводиться за узагальненим принципом відхилу: узагальнена похибка

$$\rho(\alpha) = \|A_h x_{\eta}^{\alpha} - u_{\delta}\|_{l'}^2 - \left( \delta + h \|x_{\eta}^{\alpha}\|_X \right)^2 - \mu(A_h, u_{\delta})^2$$

має дорівнювати нулю при

$$\|u_{\delta} - u\|_{l'} \leq \tau \sqrt{\sum_i (1 - (u_{\delta})_i^2)},$$

$$\|A_h - A\| \leq \tau \sqrt{\sum_{i,j} (1 - (A_h)_{i,j}^2)}, \quad \mu(A_h, u_{\delta}) = \inf \|A_h x - u_{\delta}\|_{l'},$$

де  $\tau > 0$  — константа, для якої нерівність  $s(\omega) > \tau \sigma$  ( $D = \sigma^2$  — дисперсія шуму) виконується із ймовірністю, близькою до нуля.

Вибір параметру регуляризації проводиться за узагальненим принципом відхилу, для формулювання якого достатньо знати дисперсію або найбільше абсолютне значення адитивного шуму, який є присутнім у ФЧХ. Рішення обчислюється при застосуванні глобальної регуляризації через використання постійного, незалежного від номера відліку сигналу або зображення, параметра регуляризації, а також при використанні локальної регуляризації, при якій сглажуючий функціонал  $\Omega[x]$  формулюється у вигляді квадрата норми добутку діагональної матриці, складеної з дисперсій похибки обчислення нормалізованого рішення задачі відновлення дискретного фінітного сигналу за спотвореною ФЧХ, та вектору відліків отриманого рішення. З метою обчислення вектору дисперсій похибки у нормалізованому рішенні задачі відновлення у роботі розроблено метод розрахунку кореляційної матриці вектора похибки у відновленому сигналі, який ґрунтується на розкладенні матриць по своїх власних векторах. Результати застосування методу повністю підтверджуються даними статистичного аналізу нормалізованих рішень задачі відновлення сигналів за спотвореною ФЧХ. Кореляційна матриця вектору похибки відновлення, яка описує розподіл похибки відновлення по відліках відновленого сигналу, яка була обчислена за допомогою запропонованого методу, практично співпадає із кореляційною матрицею, отриманою на основі статистичного аналізу похибки відновлення 100 сигналів за ФЧХ, спотвореною адитивним шумом із  $D=0.01 \text{ рад}^2$ . Головна діагональ цієї матриці становить собою вектор дисперсій похибки відновлення кожного відліку сигналу. Використання розробленої методики розрахунку розподілу похибки відновлення надає можливість, окрім її застосування в алгоритмі локальної регуляризації, визначити інтервали в області визначення сигналу, які є найбільш чутними до спотворення ФЧХ. Зокрема, у роботі експериментально доведено, що найбільш чутними до спотворення ФЧХ є інтервали, які ідуть слідом за областями локальної енергетичної концентрації сигналів. Результати застосування обох запропонованих методів регуляризації наведені у таблиці:

Таблиця. Результати застосування методів регуляризації.

Дисперсія шуму, рад <sup>2</sup>	Похибка існуючого прямого методу ( $\alpha=0$ ), %	Похибка стандартного РА, %	Похибка методу локальної регуляризації, %
0.001	10.26	1.34	1.03
0.005	67.92	4.33	3.09
0.10	185.25	7.18	4.48
0.0125	265.53	8.11	5.03
0.015	359.31	8.92	5.53
0.020	584.03	10.34	6.46
0.025	909.92	11.64	7.35
0.050	740706.1	19.28	12.18

З цієї таблиці видно, що точність локально регуляризованих рішень є вищою (у середньому у 1.5 разів) за точність рішень для РА, в якому параметр регуляризації не залежить від розподілу похибки по відліках відновленого сигналу. Результати застосування методу регуляризації стосовно відновлення зображень за спотвореною ФЧХ наведені на рисунку, де зліва направо зображені *a)* істинне, *б)* відновлене існуючим методом при дисперсії шуму  $10^{-12}$  рад<sup>2</sup>, та *в-д)* відновлені запропонованим методом регуляризації зображення при зменшенні дисперсії шуму від  $10^{-8}$  рад<sup>2</sup> (*в*),  $10^{-10}$  рад<sup>2</sup> (*г*) до  $10^{-12}$  рад<sup>2</sup> (*д*):



Запропонований у роботі РА для відновлення сигналів за спотвореною ФЧХ із вибором параметра регуляризації за принципом узагальненого відхилю був використаний в НВЧ-інтроскопії фазо-контрастних структур за ФЧХ їх коефіцієнту відбиття, стосовно до задач мікрохвильової та ультразвукової інтроскопії. Результати чисельного моделювання на прикладі радіохвильової інтроскопії в НВЧ-діапазоні (20—40 ГГц), а також реальної перевірки, яка була проведена на ультразвукової установці, діючої у діапазоні 3—4 МГц, по відновленню комплексної огинаючої аналітичної імпульсної характеристики шаруватої діелектричної структури, показали, що використання запропонованого методу дозволяє значно підвищити точність інтроскопії в умовах спотвореної ФЧХ.

У висновку сформульовані основні наукові та практичні результати дисертації.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Розвинено метод відновлення радіолокаційного зображення за спотвореною інтерферометричною фазовою характеристикою, яку отримано при обробці результатів зондування земної поверхні радаром із синтезованою апертурою. Розвиток методу проведено через використання існуючого інтегрального перетворення, виведеного на основі першого рівняння Гріна, із застосуванням регуляризуючого алгоритму обчислення градієнту інтерферометричної фазової характеристики. Параметр регуляризації було розраховано згідно з узагальненим принципом відхилення, а також із застосуванням алгоритму локальної регуляризації, який забезпечує високу роздільовальну здатність процедури відновлення. Запропонований метод має просту чисельну реалізацію, яка ґрунтується на використанні алгоритмів швидкого перетворення Фур'є для обчислення інтегралів згортки при обчисленні регуляризованого рішення задачі пошуку градієнту ІФХ та застосуванні інтегрального перетворення, яке зв'язує обчислений градієнт із відновленим зображенням. Як показують результати чисельних експериментів та відновлення зображень з реальних вимірювань ІФХ, регуляризація обчислення градієнту ІФХ дозволяє значно підвищити, порівняно з існуючим підходом, точність, стійкість та роздільовальну здатність процедури відновлення. Розроблений підхід є удосконаленням існуючого методу відновлення радіолокаційних зображень за виміреною ІФХ, який ґрунтується на використанні першого рівняння Гріна, та враховує вплив шуму вимірювання, статистичні характеристики якого обчислюються аналітично в теорії радарів із синтезованою апертурою.

2. Розроблено стійкий ітераційний алгоритм відновлення фінітних сигналів за відліками спотвореної ФЧХ, який ґрунтується на використанні алгоритму послідовного ортогонального проектування синтезованих сигналів на опуклий замкнутий переріз нечітких множин сигналів із даними значеннями відліків ФЧХ, та на опуклу замкнуту множину фінітних сигналів із відомою тривалістю. Оператори проектування обчислювались безпосередньо в часовій області, що забезпечило їх однозначне визначення. Використання алгоритму опуклого проектування гарантує збіжність методу до фіксованої точки ітерацій за невелике число кроків ітераційного процесу, а використання методології теорії нечітких множин забезпечує отримання рішення із більш високою точністю відновлення порівняно з існуючими ітераційними методами. Врахування впливу шуму вимірювань, який є присутнім у ФЧХ, проведено за рахунок обмеження множини ймовірних рішень сигналами із відповідним рівню спотворення ФЧХ діапазоном значень функції приналежності до перерізу нечітких множин сигналів. Чисельна реалізація методу ґрунтується на застосуванні

алгоритму швидкого перетворення Фур'є під час проведення операції ортогонального проєктування сигналів на опуклі множини. Результати чисельних експериментів та перевірки методу на реальних даних підтверджують підвищену стійкість розробленого методу порівняно із існуючими ітераційними алгоритмами, а також високу швидкість збіжності до наближеного рішення.

3. Розроблено стійкий регуляризуючий алгоритм відновлення фінітних сигналів та зображень за спотвореними ФЧХ їх перетворень Фур'є, який ґрунтується на обчисленні стійкого рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Відповідний параметр регуляризації обчислювався згідно з узагальненим принципом відхилення, що дозволило урахувати статистичні властивості шуму, який є присутнім у ФЧХ сигналу чи зображення. Чисельні експерименти по відновленню сигналів та зображень показали, що розроблений метод більш ніж у 40 разів перевищує у точності відновлення існуючий прямий метод, що свідчить про високу ефективність запропонованого методу з точки зору стійкості відновлення в умовах спотворення ФЧХ.

4. Розроблено метод розрахунку похибки у нормалізованому рішенні задачі відновлення сигналів за спотвореною ФЧХ, результатом використання якого є кореляційна матриця вектору похибки у нормалізованому рішенні задачі відновлення. Зрівняння отриманих результатів із результатами обчислення статистичних характеристик вектору похибки у сигналах, відновлених за спотвореними ФЧХ, демонструє близькість теоретично та експериментально обчислених кореляційних матриць вектору похибки. На основі запропонованої методики розрахунку розподілу похибки розроблено алгоритм локальної регуляризації із застосуванням змінного параметру регуляризації, значення якого обчислюється у часовій області для кожного окремого відліку відновлюваного сигналу за допомогою узагальненого принципу відхилення. Чисельні експерименти показали, що за рахунок використання статистичної інформації стосовно розподілу похибки по відліках відновлюваного сигналу запропонований метод локальної регуляризації має підвищену точність не тільки порівняно із існуючим прямим алгоритмом відновлення, але також порівняно із раніше згаданим регуляризуючим алгоритмом. Розроблений метод розрахунку похибки може бути застосованим у процедурах згладжування спотворень, виникаючих під час відновлення фінітних дискретних сигналів за спотвореною ФЧХ з метою підвищення точності, роздільної здатності та стійкості відновлення.

5. Показано ефективність розроблених методів на прикладі відновлення комплексних огинаючих аналітичних імпульсних характеристик (ІХ) шаруватих діелектричних структур за фазо-частотною залежністю їх коефіцієнту відбиття стосовно до задач мікрохвильової та ультразвукової

інтроскопії фазо-контрастних структур. Чисельні експерименти по відновленню ІХ за ФЧХ коефіцієнту відбиття, смодельованій у НВЧ-діапазоні [10–40 ГГц], а також реально виміряної у радіодіапазоні [3–4 МГц], показують більш високу (у 2–10 разів) точність відновлення ІХ за допомогою розроблених методів порівняно із існуючими методами відновлення, що свідчить про доцільність використання запропонованих методів для підвищення інформаційних можливостей інтроскопії в задачах неруйнівного контролю та діагностики.

Основні результати дисертації опубліковано в роботах:

1. А. М. Ахметшин, И. В. Любошенко, Метод восстановления финитных сигналов по зашумленному фазовому спектру // *Радиотехника и электроника*, № 10, с. 1229, 1996.
2. А. М. Ахметшин, И. В. Любошенко, Интроскопия слоистых структур по фазо-частотной зависимости коэффициента отражения // *Дефектоскопия*, № 12, с. 64-69, 1995.
3. И. В. Любошенко, А. М. Ахметшин, Регуляризирующий алгоритм широкополосной интроскопии по зашумленной фазо-частотной характеристике коэффициента отражения зондируемой структуры // *Дефектоскопия*, № 1, с. 71-75, 1997.
4. I. Lyuboshenko, *Une méthode stable de développement de la phase en interférométrie ROS*, Réf. D96D014, ISSN 0751-1345, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, 1996, 66 pages.
5. А. М. Akhmetshin, I. V. Lyuboshenko, N. A. Ivanova, Ultrasonic phase introscopy of layered media in frequency and time domains // *Proc. Int. Conf. CMNDT'95*, pp. 275-282, Minsk, Belarus.
6. I. V. Lyuboshenko, A. M. Akhmetshin, Regularization of the problem of image restoration from its noisy Fourier transform phase // *Proc. ICIP'96*, pp. 793-796, Lausanne, Switzerland.
7. I. V. Lyuboshenko, A. M. Akhmetshin, A stable direct algorithm for image retrieval from its noisy Fourier transform phase // *Proc. IEEE Digital Signal Processing Workshop*, pp. 255-258, Loen, Norway, 1996.
8. А. М. Akhmetshin, I. V. Lyuboshenko, The reconstruction of signals and images from the noisy Fourier transform phase by means of the generalized difference principle // *Proc. 13<sup>th</sup>-ICPR'96*, pp. 703-708, Vienna, Austria.
9. А. М. Akhmetshin, I. V. Lyuboshenko, Synthesis of discrete finite signals from noisy phase with error analysis // *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. PRIA'95*, pp. 117-121, Minsk, Belarus.
10. I. V. Lyuboshenko, The magnitude retrieval from phase of finite continuous signals // *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. PRIA'95*, pp. 123-127, Minsk, Belarus.
11. А. М. Akhmetshin, I. V. Lyuboshenko, Stable algorithms for signal reconstruction from noisy phase characteristics // *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. UkrOBRAZ'94*, pp. 86-90, Kiev, Ukraine.

12. I. V. Lyuboshenko, A. M. Akhmedov, *Stable methods for signal restoration from noisy Fourier transform phase // Proc. 4th Int. Conf. PRIA'97, vol. I, pp. 121-126, Minsk, Belarus.*

Lyuboshenko I. V. Stable methods for signal and image restoration from noisy phase characteristics.

Thesis for obtaining the scientific degree of «Candidate of sciences in physics and mathematics» on the specialty 01.04.03 – Radiophysics, Dnepropetrovsk State University, 1997.

Topical problems of radiophysics were considered, the initial data for their solution being interferometric phase or Fourier transform phase of a signal or image, corrupted by measurement noise with analytically computed variances. Stable methods for finite signal or image restoration from their noisy phases measured in both frequency and spatial domains were developed in order to increase restoration stability, accuracy and resolving ability. The analysis, numerical and experimental verification were carried out with application to important problems in the synthetic aperture radar interferometry, introscopy of phase-contrast layered dielectric structures, digital signal and image processing.

Любошенко И. В. Устойчивые методы восстановления сигналов и изображений из зашумленных фазовых характеристик.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, Днепропетровский госуниверситет, 1997.

Рассмотрены актуальные задачи радиофизики, в которых исходными данными для их решения служат интерферометрическая фазовая характеристика или фазо-частотная характеристика сигнала или изображения, зашумленные измерительным шумом с аналитически вычисляемой дисперсией. Разработаны устойчивые методы восстановления финитных сигналов и изображений по их зашумленным фазовым характеристикам, измеренным в частотной и пространственной областях с целью повышения устойчивости, точности и разрешающей способности восстановления. Выполнены анализ, численная и экспериментальная проверка их работоспособности применительно к актуальным задачам интерферометрии радаров с синтезированной апертурой, интроскопии фазо-контрастных диэлектрических слоистых структур, цифровой обработки сигналов и изображений.

Ключові слова: фінітний сигнал, шум, спотворення, зображення, інтерферограма, нечітка множина, градієнт, регуляризація, похибка, розподіл, кореляційна матриця, ітераційний алгоритм, інтроскопія, коефіцієнт відбиття, шарувата структура.