

Ю.В. Корнієнко, **І. Ляшенко**, **В.В. Пугач**, **С.І. Скуратовський**

 Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
 12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
 E-mail: ss_snake@urk.net

Про можливості методу накопичення повних фаз при спостереженні об'єкта крізь земну атмосферу

Предмет та мета роботи. Вплив атмосфери призводить до суттєвого спотворення зображень, що отримані за допомогою спостережних інструментів з поверхні Землі. При цьому спотворення фаз фур'є-компонентів зображення відіграє набагато більшу роль, ніж спотворення амплітуд. Вплив земної атмосфери на фази фур'є-компонентів можна розглядати як мультиплікативний шум у частотній площині. У якості заходу боротьби з цим впливом запропоновано використовувати накопичення сигналу. Однак накопичувати слід не головні значення фаз, які доступні для безпосереднього вимірювання з результатів експерименту, а повні фази. У цій роботі досліджено особливості запропонованого методу накопичення повних фаз.

Методи та методологія. Основою досліджень є комп'ютерний експеримент та теоретичний аналіз отриманих результатів. Для дослідження ефективності методу накопичення повних фаз було використано розроблену в ІРЕ НАНУ систему комп'ютерного моделювання отримання астрономічних зображень та їх обробки.

Результати роботи. Отримано залежності похибки реконструкції зображення методом накопичення повних фаз від кількості накопичених зображень для різних умов спостереження. З'ясовано, що така залежність має немонотонний характер, пояснення якого є предметом подальших досліджень.

Висновок. Наявність мінімуму в залежності похибки реконструкції зображення із застосуванням методу накопичення повних фаз є важливим фактором для практичного застосування даного методу. Продовження накопичення після деякої межі призведе до погіршення результатів накопичення. Оскільки положення мінімуму залежить від параметрів атмосфери, необхідно запропонувати критерій вибору оптимальної довжини послідовності. Іл. 2. Табл. 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: метод накопичення повних фаз, послідовність зображень, похибка реконструкції, оптимальна довжина послідовності.

Дослідження заатмосферних об'єктів як природного, так і штучного походження значною мірою базується на аналізі їх зображень, отриманих у тих чи інших ділянках спектра електромагнітних хвиль. Зазвичай мають справу з некогерентним зображенням, тобто з функцією $I(x, y)$, що характеризує інтенсивність випромінювання з одиниці площі об'єкта як функцію координат у площині об'єкта. Можливість отримувати інформацію про об'єкт з електромагнітної хвилі, яка приходить від нього, засновано на теоремі Ван Циттерта–Церніке, в якій йдеться про те, що функція когерентності поля хви-

лі $C(\xi, \eta)$ є фур'є-образом зображення об'єкта $I(x, y)$. Це дозволяє, вимірюючи тим чи іншим способом функцію когерентності і виконуючи над нею перетворення Фур'є, реконструювати зображення об'єкта $I(x, y)$.

Спосіб вимірювання функції когерентності залежить від діапазону частот, в якому проводиться спостереження об'єкта. На довгих хвилях найбільш природним є пряме оцінювання функції когерентності шляхом вимірювання комплексної амплітуди хвилі у двох віддалених одна від одної точках простору (наприклад, на різних континентах). Тоді функцію когерентнос-

ті знаходять шляхом усереднення за часом добутку вимірних амплітуд, а її фур'є-перетворення виконують цифровим способом.

В оптичному діапазоні перетворення Фур'є виконується аналоговим способом за допомогою об'єктива телескопа, і його результат природним чином формується у вигляді зображення у фокальній площині телескопа. Ця можливість ґрунтується на тому факті, що поле у задній фокальній площині лінзи є фур'є-образом поля у передній фокальній площині.

Однак картина ускладнюється тим, що спостереження з поверхні Землі завжди здійснюються крізь земну атмосферу, яка містить випадкові неоднорідності показника заломлення. Ці неоднорідності спотворюють плоский фазовий фронт прихідної хвилі і призводять до того, що зображення, отримане крізь атмосферу, виявляється згортокою істинного зображення з некогерентним атмосферно-апертурним ядром, яке визначається, в основному, атмосферними неоднорідностями. Результатом стає значне спотворення зображення, що проявляється, перш за все, в його згладжуванні, тобто в помітному зниженні кутової роздільної здатності.

Існує багато методів, спрямованих на подолання такого впливу атмосфери [1, 2]. Їх можна розподілити на дві групи: методи, спрямовані на вдосконалення інструментів спостереження, та методи, спрямовані на обробку отриманих зображень та їх серій. У цій роботі розглянуті особливості застосування та ефективність методу накопичення повних фаз, що належить до другої категорії. Розділ 1 являє собою короткий огляд методів обробки астрономічних зображень, спрямованих на подолання впливу атмосфери. У розд. 2 представлено постановку задачі, а розд. 3 містить опис використаної моделі та програмних засобів. Нарешті, у розд. 4 наведено результати експериментів і їх аналіз.

1. Методи подолання спотворюючого впливу земної атмосфери. Найбільш очевидною ідеєю є фільтрація зареєстрованого зображення фільтром, зворотним згладжувальному. Однак цьому заважають дві обставини. По-перше, при короткоекспозиційному зніманні ядро згладжування, як правило, є недоступним для вимірювання і залишається невідомим. По-друге, завдання розв'язання інтегрального рівняння, що пов'язує зареєстроване зображен-

ня з істинним, є некоректним за Адамаром [9]. У результаті практичне відновлення спотвореного зображення вимагає таких високих значень відношення сигнал/шум, які недосяжні на практиці.

Більш успішне розв'язання задачі можливе з використанням спекл-інтерферометрії (метод Лабейрі) [3]. Метод базується на тому, що модуль фур'є-компонентів зображення є менш спотвореним впливом атмосфери і легше піддається накопиченню. Отримана в результаті автозгортка зображення дозволяє в найпростіших випадках знайти за нею і саме зображення.

Проте, з математичної точки зору, слід було б ставити задачу більш точно: за серією зображень об'єкта знайти оптимальну статистичну оцінку його істинного зображення. Метод Лабейрі наближає нас до оптимальної оцінки модулів фур'є-компонентів зображення. У загальному випадку до цього необхідно додати оптимальну оцінку їх фаз.

Ідея в цьому напрямку була висловлена Л.Г. Содіним [4]. Він запропонував аналогічно накопичувати інформацію про фази фур'є-компонентів шляхом їх арифметичного усереднення за серією зображень об'єкта. Рівень розвитку обчислювальної техніки і цифрової обробки зображень не дозволили розвинути цю ідею у належній мірі на момент публікації роботи. Лише через 30 років метод Содіна був реалізований на практиці [5].

Проведене дослідження, однак, показало, що успіх застосування методу накопичення фаз залежить від середньоквадратичної величини δ атмосферного спотворення фази хвилі, що приходить від об'єкта. За умови $\delta \ll 1$ метод дає хороші результати; у випадку $\delta \approx 1$ результати ще прийнятні, а якщо $\delta > 1,2$, метод практично перестає працювати. Детальне вивчення предмета показало, що це пов'язано з областю визначення фази. Фаза комплексного числа (її головне значення) визначена у діапазоні $-\pi < \varphi < \pi$, в той час як фазове спотворення визначене на всій дійсній осі (від мінус нескінченності до нескінченності). Усереднювати слід не головне значення спотвореної фази, що отримується як аргумент фур'є-компонента, а повну фазу, яку неможливо визначити з результатів експерименту [6]. Для знаходження повної фази можна застосувати метод відстеження,

обчислюючи її значення з урахуванням головного значення фази в поточному кадрі і повної фази, знайденої в попередньому кадрі.

Скоригований таким чином метод був названий методом накопичення повних фаз [6]. Він працює значно краще класичного накопичення фаз, практично до $\delta = \pi$. Важливим, однак, є те, що межа застосування методу, як і раніше, існує, хоча й істотно відсувається. У [7] досліджено природу цієї межі. Показано, що вона пов'язана з неоднозначністю фази як функції просторової частоти поблизу точок частотної площини, в яких модуль фур'є-компонентів малий або наближується до нуля.

За рамками проведених у роботі [7] досліджень, однак, залишилося питання про вибір оптимальної довжини послідовності для накопичення. Це дослідження покликане заповнити цю прогалину.

2. Постановка задачі. Теорія [6] пропонує певну процедуру спостереження об'єкта і обробки даних, що отримані при цьому. У даній роботі ставиться завдання реалізувати на практиці рекомендації цієї теорії за конкретних фізичних умов, а також порівняти отримані результати з очікуваними на підставі теорії. Оскільки справжнє зображення об'єкта рідко буває достовірно відоме заздалегідь, експеримент пропонується виконувати на комп'ютерній моделі, що включає в себе моделювання істинного зображення спостережуваного об'єкта. Таким чином, воно є точно відомим і може служити еталоном для порівняння. Подібна постановка експерименту, на відміну від спостереження реального об'єкта, звільняє дослідника від необхідності будувати здогади щодо справжнього вигляду об'єкта, що досліджується.

Нехай виконані наступні умови. Спостережуваний об'єкт віддалений на нескінченність від інструмента спостереження. Кутовий розмір об'єкта досить малий, щоб його косинус можна було вважати рівним одиниці. Припускається, що атмосфера є нескінченно тонким шаром, розташованим в безпосередній близькості від апертури телескопа. Залежність флуктуації показника заломлення від часу і координат у площині апертури є стаціонарним гаусовим процесом з відомою дисперсією і спектральною щільністю. Об'єкт залишається незмінним протягом часу спостереження. Поле

фазових спотворень хвилі залишається незмінним протягом часу експозиції, яка для спрощення вважається миттєвою.

Шум реєстрації, який об'єднує в собі різні джерела похибок при реєстрації зображення, є важливим фактором, що впливає на успіх реконструкції зображення. У роботі [8], однак, була продемонстрована стійкість методу накопичення повних фаз до впливу таких шумів, тому в рамках цього дослідження будемо вважати, що шум реєстрації відсутній. Відповідно, єдиним фактором, що впливає на реконструйоване зображення, залишається атмосферний шум, який є мультиплікативним у частотній формі.

Також вважатимемо, що характеристики телескопа відомі, в першу чергу його апертурна функція $a(\xi, \eta)$, яка дорівнює одиниці в межах апертури і нулю за її межами. Припустимо, що телескоп має ідеальну якість, а його дифракційне розділення набагато вище за те, яке дозволяє отримати атмосфера в реальному випадку.

Потрібно:

1) змоделювати спостереження об'єкта за допомогою телескопа крізь атмосферу (параметри об'єкта, телескопа та атмосфери відомі); в результаті необхідно отримати задане число m зображень, що моделюють результат спостереження;

2) виконати обробку отриманої серії зображень методом накопичення повних фаз і реконструювати зображення об'єкта;

3) оцінити ефективність методу і ступінь відповідності отриманих результатів експерименту прогнозам теорії при різній довжині послідовності.

3. Модель і проведення експерименту. Основним засобом вирішення поставленого завдання є система комп'ютерного моделювання астрономічних спостережень, що частково описана в [2].

Вона містить у собі як прості інструменти (формування одно- і двовимірних псевдовипадкових послідовностей, корельованих та некорельованих; формування апертурної функції; засоби фур'є-фільтрації та ін.), так і більш комплексні (отримання зображення крізь атмосферу, накопичення амплітуд і фаз фур'є-компонентів, відстеження фаз).

Експеримент складався з двох етапів:

1) моделювання спостережень об'єкта при

заданих характеристиках телескопа та атмосфери;

2) обробка отриманих даних з метою реконструкції зображення об'єкта й оцінювання результатів.

Моделювання отримання зображення об'єкта крізь атмосферу здійснювалося шляхом згортки істинного його зображення з миттєвим атмосферно-апертурним ядром. Останнє є квадратом модуля зворотного перетворення Фур'є від атмосферно-апертурної функції, що дорівнює добутку апертурної функції $a(\xi, \eta)$ на атмосферну, яка визначається як

$$A(\xi, \eta) = \exp(i\psi(\xi, \eta)), \quad (1)$$

де $\psi(\xi, \eta)$ – реалізація двовимірного псевдовипадкового поля фазових спотворень із заданими статистичними характеристиками. У рамках цієї роботи ми будемо характеризувати $\psi(\xi, \eta)$ двома параметрами – середньоквадратичним відхиленням δ та параметром ширини спектральної щільності α :

$$S(k_x, k_y) = \exp(-\alpha(k_x^2 + k_y^2)). \quad (2)$$

Однак нам необхідно моделювати не поодинокі зображення, а серії зображень, інтервал між реєстрацією яких менше або близький до часу замороженості атмосфери. Це вимагає наявності кореляції між реалізаціями $\psi(\xi, \eta)$, причому ширина кореляційної функції обернено пропорційна часовому інтервалу між зображеннями, що моделюються. Подробиці моделювання є предметом окремої статті. Однак слід зауважити, що спектральну щільність зміни фазового спотворення $\psi(\xi, \eta)$ у часі ми також вважаємо гауссовим випадковим процесом і моделюємо багаторазовим згладжуванням послідовності прямокутним ядром. Ширина ядра M і кількість згладжувань m також є параметрами нашої моделі атмосфери. У всіх експериментах у цій роботі $m = 5$. Таким чином, ми маємо справу з тривимірною випадковою функцією $\psi(\xi, \eta, t)$ із заданою спектральною щільністю. Найбільш важливим етапом обробки отриманої серії зображень є процедура відстеження фази, запропонована в [5]. Отримана як аргумент фур'є-компонента фаза $\varphi(\xi, \eta)$ відрізняється від повної фази на невідомий доданок:

$$\Phi(\xi, \eta) = \varphi(\xi, \eta) + 2\pi k. \quad (3)$$

Множник k , як було вказано вище, неможливо визначити з результатів експерименту. Проте для успішного накопичення його абсолютне значення не є суттєвим, має значення перехід до визначення повної фази $\Phi(\xi, \eta)$ на прямій. Важливим є відносне положення фаз фур'є-компонентів на цій прямій, тобто правильне розміщення на ній кожної наступної фази відносно попередньої. Повні фази фур'є-компонентів у першому кадрі послідовності ми приймаємо рівними їх головним значенням, тобто для них $k = 0$. Для повної фази фур'є-компонента у кожному наступному кадрі ми вибираємо таке k , яке забезпечує різницю між фазами не більшу ніж π .

Однак вибір k відповідно до викладеного вище методу має статистичний характер. Таке значення повної фази передбачає її мінімальну зміну від кадру до кадру, і є найбільш імовірним за умови, що інтервал між кадрами менше часу замороженості атмосфери. Однак існує ненульова ймовірність w того, що даний вибір є невдалим, і в результаті у значення повної фази буде внесена похибка. У результаті послідовного характеру відстеження ця похибка буде поширена на всі наступні значення повної фази цього фур'є-компонента і, таким чином, суттєво вплине на результат накопичення. На реконструйованому зображенні вона проявляється як додатковий шум.

Імовірність w тим менша, чим більш зкорельованими є фазові спотворення в сусідніх кадрах. Це якраз і забезпечується вибором інтервалу між реєстрацією кадрів, що є малим у порівнянні з часом замороженості атмосфери.

Відстеження проводилося для кожного фур'є-компонента окремо, без урахування просторової кореляції фаз. Реконструйовані таким чином повні фази усереднювалися за послідовністю зображень, а потім поєднувалися з усередненими за тією ж послідовністю модулями фур'є-компонентів. У рамках цієї роботи, щоб локалізувати джерело похибки, замість реконструкції модулів фур'є-компонентів використовуються модулі еталонного зображення – модельного зображення того ж об'єкта, отриманого тим же телескопом за відсутності атмосфери. Таким чином, похибка реконструкції зображення об'єкта цілком визначається точністю реконструкції фаз фур'є-компонентів.

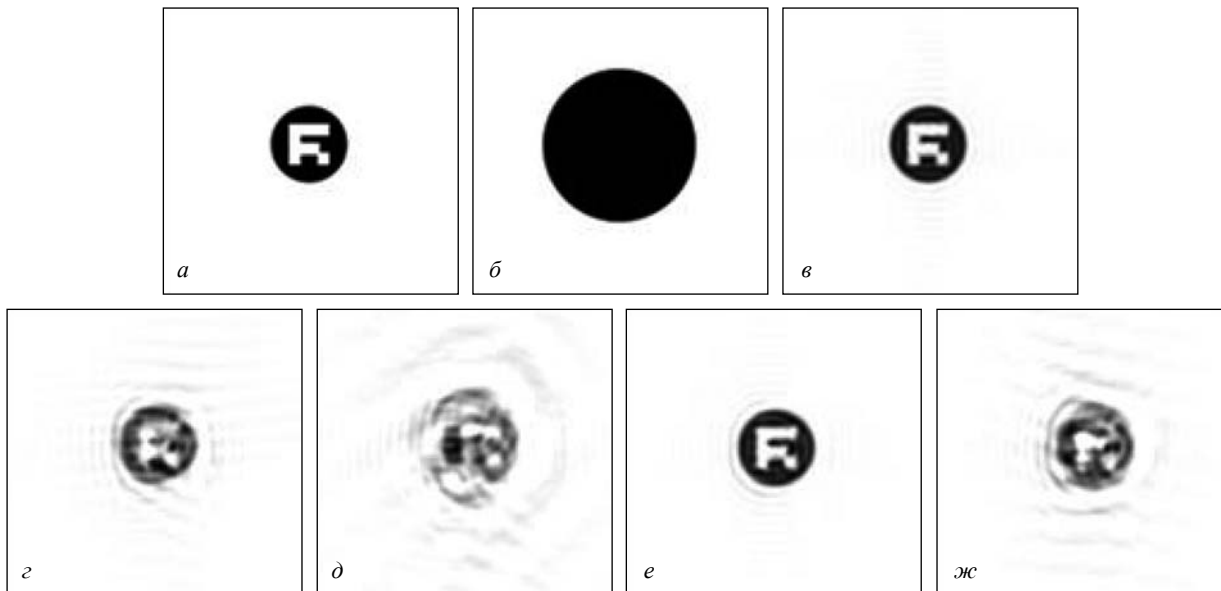


Рис. 1. Зображення об'єкта, що використовується для моделювання (а), апертурна функція спостережного інструмента (б), дифракційне зображення (в) і приклади модельних зображень, отриманих при різних параметрах атмосфери: $\alpha = 0,05$, $\delta = \pi/2$ (г); $\alpha = 0,05$, $\delta = \pi$ (д); $\alpha = 0,1$, $\delta = \pi/2$ (е); $\alpha = 0,1$, $\delta = \pi$ (ж)

4. Отримані результати. На рис. 1, а показано справжнє зображення об'єкта, який використовувався для моделювання у цій роботі. Такий об'єкт привабливий відсутністю будь-якої симетрії, яка могла б спростити процедуру реконструкції. Апертурну функцію телескопа $a(\xi, \eta)$ ілюструє рис. 1, б. Еталонне зображення, отримане за відсутності атмосфери телескопом з такою апертурою, показано на рис. 1, в, а на рис. 1, г–ж наведені моделі спотворених зображень, отриманих з різними параметрами атмосфери.

Як відомо з теорії, накопичення сигналу приводить до зменшення похибки в \sqrt{N} раз, де N – довжина накопиченої послідовності. Таким чином, ми очікуємо, що зі збільшенням кількості зображень, які беруть участь у накопиченні повних фаз, похибка реконструкції буде зменшуватись, а реконструйоване зображення наближатиметься до еталонного (рис. 1, в).

Залежність середньоквадратичної похибки реконструйованого зображення відносно еталонного від кількості зображень, які брали участь у накопиченні, наведена на рис. 2. Кожен графік на рисунку є результатом усереднення за 100 експериментами, які відрізнялися реалізацією поля фазових спотворень. Видно, що в переважній більшості випадків залежність має яскраво виражений мінімум, тобто далека

від передбачуваного вигляду. Зменшення α та збільшення δ викликають зменшення кількості накопичених зображень, що відповідає мінімуму, і навпаки (рис. 2, а, в, д). Те ж саме можна сказати про M і m . Збільшення будь-якого з цих параметрів означає більшу ступінь кореляції між сусідніми кадрами, що моделює менший часовий інтервал між їх реєстрацією. Відповідно, для досягнення мінімуму потрібно накопичити більше число зображень. Це демонструється попарним порівнянням зображень на рис. 2 у лівому та правому стовпчиках. За умови $\alpha = 0,1$, $\delta = \pi/2$ і $M = 60$ (рис. 2, е), судячи з характеру залежності, мінімум також має бути присутнім, проте для його досягнення потрібно накопичити понад 1 000 зображень.

Накопичені зображення, які відповідають мінімумам залежностей, наведених на рис. 2, показані у таблиці (див. с. 66). Порівняння їх з зображеннями на рис. 1, г–е підтверджує, що накопичення необхідно закінчувати саме в цих точках. Однак очевидний зв'язок між положенням мінімуму і параметрами атмосфери, на жаль, не допомагає здійснити вибір кількості накопичуваних зображень для досягнення найкращого результату. Ці параметри в реальному експерименті є невідомими. Істинний об'єкт також невідомий, тому немає можливості сказати, коли саме досягнутий мінімум. Його положення

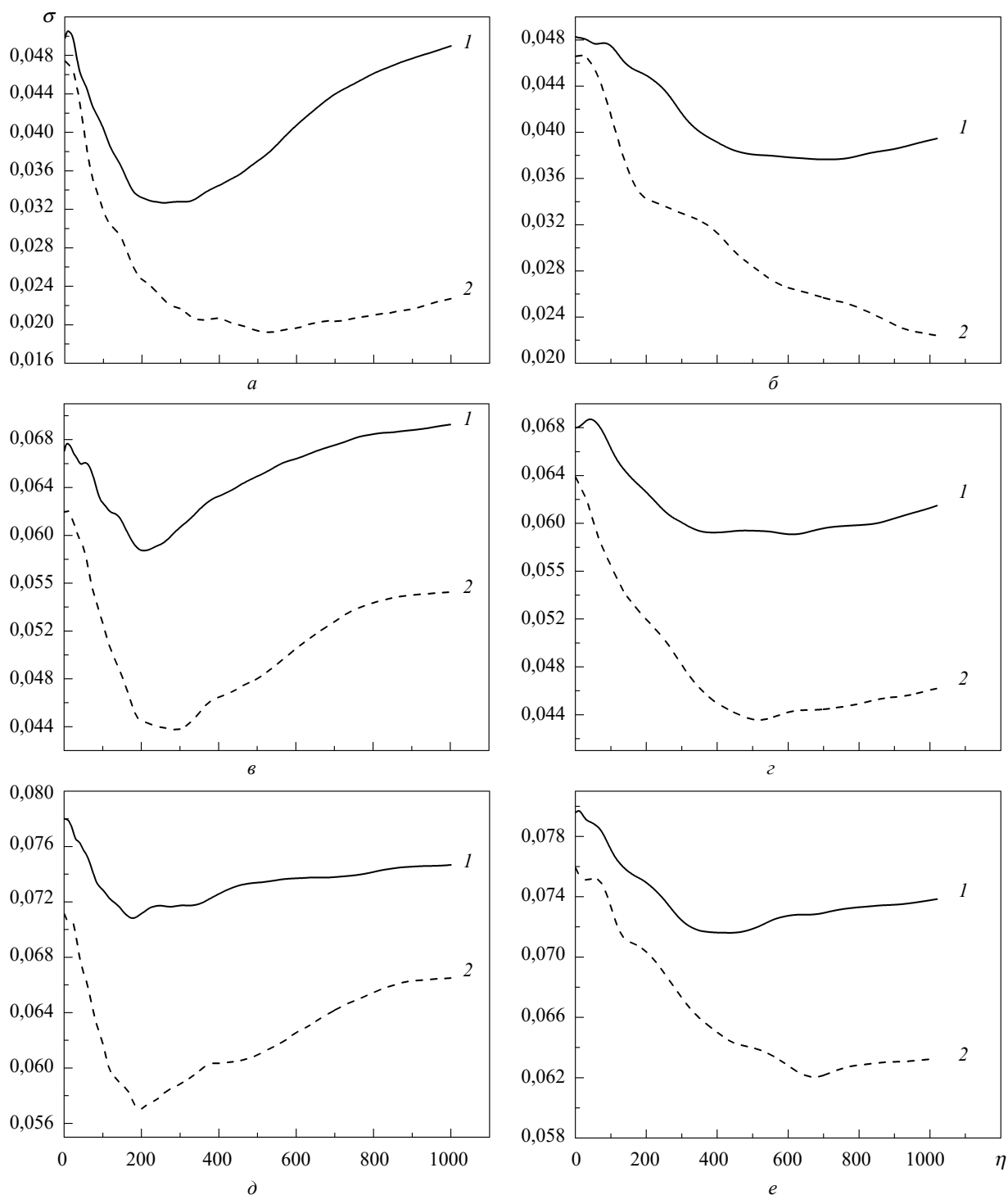














Рис. 2. Залежність точності реконструкції від кількості накопичених зображень при різних параметрах атмосфери: $\delta = \pi/2, M = 20$ (а); $\delta = \pi/2, M = 60$ (б); $\delta = 3\pi/4, M = 20$ (в); $\delta = 3\pi/4, M = 60$ (г); $\delta = \pi, M = 20$ (д); $\delta = \pi, M = 60$ (е); у всіх випадках $m = 5$. Суцільна крива (1) відповідає $\alpha = 0,05$, пунктирна (2) – $\alpha = 0,1$

належить визначати з закономірностей, властивих самому процесу накопичення. Однак перш, ніж ставити таку задачу на порядок денний, необхідно з'ясувати природу чинників, що викликають відхилення залежності від \sqrt{N} .

У якості робочої гіпотези можна назвати вплив збоїв у відстеженні фази у процесі накопичення. Як показано в [7], такі збої частіше відбуваються за умови збільшення середньоквадратичного відхилення фазових спотворень.

Реконструйоване методом накопичення повних фаз зображення спостережуваного об'єкта при різних параметрах атмосфери (кількість зображень відповідає мінімуму похибки; $m = 5$)

σ	$M = 20$		$M = 60$	
	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$
$\pi/2$				
$3\pi/4$				
π				

Кількість збоїв, що сталися за час накопичення, має бути пропорційною довжині послідовності. Два чинника з протилежним впливом – зниження дисперсії шуму і збільшення числа збоїв – можуть призводити до появи мінімуму. Розгляд цього питання має стати предметом подальших досліджень.

Висновки. Ця робота доповнює проведені раніше дослідження методу накопичення повних фаз аналізом залежності результатів рекон-

струкції від кількості накопичених зображень. Отримана в результаті залежність відрізняється від передбачуваної теоретично наявністю яскраво вираженого мінімуму.

Положення цього мінімуму дещо змінюється залежно від конкретної реалізації атмосфери, але після усереднення спостерігається явний зв'язок з параметрами атмосфери. Природа виникнення мінімуму є предметом майбутніх досліджень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Timofeev, Yu.M., Vasilyev A.V. *Theoretical basis of atmosphere optics*. Cambridge International Science Pub. May 1, 2008. 496 p.
2. Корнієнко Ю.В. Обработка изображений в ИРЭ НАН Украины. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков. 2008. Т. 13, спец. вып. С. 423–445.
3. Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron. Astrophys.* 1970. Vol. 6, No 1. P. 85–87.
4. Содин Л.Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере. *Письма в астроном. журн.* 1976. Т. 2. С. 554–558.
5. Корнієнко Ю.В., Скуратовский С.И. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. I. *Кинематика и физика небесных тел.* 2011. Т. 27, № 6. С. 52–63.
6. Корнієнко Ю.В., Скуратовский С.И. О реконструкции неискаженного изображения объекта по серии его изображений, искаженных средой со случайными неоднородностями показателя преломления. *Доп. НАН України.* 2010. № 2. С. 83–89.
7. Корнієнко Ю.В., Скуратовский С.И. Механизм разрушения информации при наблюдении сквозь неоднородную среду. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2012. Т. 17, № 1. С. 39–48.
8. Корнієнко Ю.В., Скуратовский С.И. Накопление фаз фурье-компонентов при наблюдении объекта сквозь турбулентную атмосферу. I. *Кинематика и физика небесных тел.* 2012. Т. 28, № 2. P. 77–84.
9. Hadamard J. Sur les Problèmes aux Dérivées Partielles et Leur Signification Physique. *Princeton University Bulletin.* 1902. No 13. P. 82.

Стаття надійшла 24.01.2020

REFERENCES

1. Timofeev, Yu.M., Vasilyev, A.V., 2003. *Theoretical basis of atmosphere optics*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
2. Kornienko, Yu.V., 2008. Image processing in IRE NAS of Ukraine. In: V.M.Yakovenko, ed. 2008. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **13**(spec. iss.), pp. 423–445 (in Russian).
3. Labeyrie, A., 1970. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron. astrophys.*, **6**(1), pp. 85–87.
4. Sodin, L.G., 1976. Prospects for achieving the diffraction limit of telescope resolution in a turbulent atmosphere. *Sov. Astron. Lett.*, **2**(6), pp. 220–222.
5. Kornienko, Yu.V., Skuratovskiy, S.I., 2011. Fourier-component phase accumulation in observation of an object through a turbulent atmosphere: I. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*, **27**(6), pp. 304–310 (in Russian).
6. Kornienko, Yu.V., Skuratovskiy, S.I., 2010. About the reconstruction of the undistorted image of an object by a series of its images distorted by a medium with random inhomogeneities of the refractive index. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, **2**, pp. 83–89 (in Russian).
7. Kornienko, Yu.V., Skuratovskiy, S.I., 2012. Mechanism of information degradation in observations through a randomly inhomogeneous medium. *Radiophysics and radioastronomy*, **17**(1), pp. 39–48 (in Russian).
8. Kornienko, Yu.V., Skuratovskiy, S.I., 2012. Fourier-component phase accumulation in observation of an object through a turbulent atmosphere: II. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*, **28**(2), pp. 77–84 (in Russian).
9. Hadamard, J., 1902. Sur les Problèmes aux Dérivées Partielles et Leur Signification Physique. *Princeton Université Bulletin*, **13**, p. 82.

Received 24.01.2020

Yu.V. Kornienko, I. Liashenko, V.V. Pugach, S.I. Skuratovskiy

O.Ya. Usikov IRE of NASU
12, Akad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

ON THE POTENTIAL OF THE TOTAL PHASE ACCUMULATION METHOD
IN OBJECT OBSERVATIONS THROUGH EARTH'S ATMOSPHERE

Subject and Purpose. The influence of Earth's atmosphere leads to significant distortion of object images obtained with Earth-based instruments. In this case, the distortion of the Fourier component phase plays a far more important role than the module distortion. The influence of Earth's atmosphere on the Fourier component phase may be considered as a multiplicative noise in the frequency domain. For combatting this influence, we propose signal accumulation, implying that total phases rather than their main values, which are available for the direct measurements by experiment, should be accumulated. The features of the proposed total phase accumulation method are studied in the present paper.

Methods and Methodology. The current studies depend on computer experiment and theoretical analysis of the obtained results. The performance efficiency of the total phase accumulation method is evaluated with the aid of the computer system of astronomical image modeling and processing developed in the O.Ya. Usikov IRE of NASU.

Results. A relationship has been obtained between the error of image reconstruction by the total phase accumulation method and the number of the accumulated images in different observation conditions. The dependence has a non-monotonic behavior, which remains to be investigated.

Conclusion. That the reconstruction error dependence in the total phase accumulation method has a minimum is important for the practical method application as there comes an accumulation point after which the reconstruction accuracy degrades. The location of that minimum depends on the atmospheric parameters, sending us in search of a criterion for choosing an optimal sequence length of image accumulation.

Key words: total phase accumulation method, image sequence, reconstruction error, optimal sequence length.