

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.01.068>

УДК 535.39:531.715.1

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

Інститут радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України
ул. Академіка Проскури, 12, Харків, Україна, 61085
asagismart@gmail.com, vlap@ukr.net, ss_snake@ukr.net

Накопичення фаз фур'є-компонентів при спостереженні об'єкта за допомогою орбітального інструмента

При проведенні астрономічних спостережень з поверхні Землі отримання зображень з високим розділенням ускладнене спотвореннями, викликаними земною атмосферою. Є дві групи методів для подолання її впливу. Перші не втручаються у процес формування зображення та пов'язані з обробкою вже зареєстрованих результатів спостережень. Другі — це конструювання особливих спостережних інструментів. Винесення інструменту за межі атмосфери також можна умовно віднести до цієї групи. У цьому випадку впливу атмосфери немає, тому робиться припущення, що отримання зображення з дифракційним розділенням можливе без додаткових зусиль. У даній роботі розглянуто фактори, що можуть привести до виникнення фазових спотворень про проведені спостережень за допомогою орбітального багатодзеркального телескопа. Як метод боротьби з ними запропоновано використати метод накопичення повних фаз. Його розроблено для компенсації спотворення фаз фур'є-компонентів, викликане впливом земної атмосфери. Припущення щодо статистики фазових спотворень, зроблені при його розробці, є досить загальними та не перешкоджають його застосуванню до результатів космічних спостережень. Демонстрацію його ефективності та дослідження можливостей при обробці зображень, отриманих космічним багатодзеркальним телескопом, виконано за допомогою комп'ютерного моделювання. Необхідність застосування моделювання як інструмент дослідження викликана високою вартістю реального експерименту, а також необхідністю інформації щодо істинного зображення об'єкта для оцінки похибки методу. Для моделювання використано конфігурацію апертури телескопа ім. Джеймса Вебба, що будується. За допомогою моделювання показано різницю характеристик фазових

© Ю. В. КОРНІЄНКО, І. ЛЯШЕНКО, В. В. ПУГАЧ, С. І. СКУРАТОВСЬКИЙ, 2020

спотворень при земних та космічних спостереженнях. Продемонстровано необхідність накопичувати повні фази, а не їхні головні значення, в умовах космічних спостережень. Показана ефективність такого накопичення. Виявлено немонотонний характер залежності похибки реконструкції від числа накопичених зображень.

Ключові слова: космічні спостереження, багатодзеркальний телескоп, фазові спотворення, накопичення повних фаз, обробка зображень.

ВСТУП

Прагнення спостерігати слабкі астрономічні об'єкти спонукає створювати телескопи все більшого діаметра, щоб збирати більше світла. Іншим стимулом збільшення діаметра телескопа є бажання зменшити діаметр дифракційного зображення точки і тим самим підвищити роздільну здатність інструмента. Тут, однак, виникають певні труднощі. Парадоксально, але збільшення діаметра телескопа часто призводить до зниження його роздільної здатності. Ще У. Гершель зауважив, що земна атмосфера істотно впливає на роздільну здатність телескопа [16]. Усереднення за часом при реєстрації зображення ще більше погіршує картину [13]. Таким чином, виникла задача подолання небажаного впливу атмосфери [5].

Перші спроби були спрямовані на зменшення впливу атмосфери шляхом вибору місця і часу спостережень [15]. Зниження роздільної здатності під впливом турбулентної атмосфери обумовлене спотворенням фронту хвилі, яка надходить від спостережуваного об'єкта, випадковими неоднорідностями показника заломлення [4]. Основним чинником, що їх породжують, є перемішування повітря у нижньому шарі атмосфери, інтенсивність якого залежить від часу доби і географічного положення обсерваторії. Крім того, внаслідок випадкового характеру зміни неоднорідностей показника заломлення у певні моменти часу зображення може виявитись кращим від типового [2]. Це можна уявити як інший варіант оптимального вибору часу спостережень [1]. Є й інші підходи до боротьби із впливом атмосфери, що включають в себе як різні методи постдетекторної обробки зображень [5], так і зміну інструмента спостережень, наприклад використання адаптивної оптики [3] та інтерферометричні методи [10, 19]. Однак, якщо повернутися до вибору місця спостереження, можна виділити абсолютно особливу ідею — замість подолання впливу атмосфери постаратися його уникнути.

КОСМІЧНІ ТЕЛЕСКОПИ

Вперше концепція орбітального телескопа зустрічається в книзі Р. Оберта «Ракета в міжпланетному просторі» [18]. У ній було описано

загальну теорію ракети, опис конструкції ракети, проблеми біології, безпеки, а також перспективи використання ракет. Таким чином, книга містила всебічне обґрунтування ще не існуючої ракетно-космічної техніки у досить стислому викладі. Ціолковський, бажаючи підтвердити першість у створенні теорії космічного польоту з використанням ракет, перевидав свою роботу 1903 р. [14], після чого німецький ракетник визнав пріоритет російського вченого у розробці теорії космічного польоту.

У 1946 р. Л. Спітцер відзначив головні переваги космічного телескопа (оригінальну статтю було перевидано, див. [21]). Передбачалося, що його кутова роздільна здатність буде обмежена лише дифракцією. Крім того, космічний телескоп здатний вести спостереження в недоступних для наземних спостережень діапазонах, зокрема у інфрачервоному, ультрафіолетовому, гамма-діапазонах. З іншого боку, є чимало очевидних обмежень, що накладаються на орбітальні телескопи. Необхідність доставки на потрібну орбіту обмежує масу і розміри використовуваних приладів, складність обслуговування підвищує вимоги до надійності, а обмежений час життя погано поєднується з високою вартістю. Все це ставило під сумнів швидке введення в експлуатацію таких телескопів.

Першим успішним орбітальним телескопом можна вважати радянський супутник «Космос-215» [11], запущений 19 квітня 1968 р. Двома роками раніше американський супутник ОАО-1 вийшов з ладу через три дні після запуску внаслідок відмови акумуляторів. 7 грудня 1968 р. відбувся успішний запуск супутника ОАО-2, а в серпні 1972 р. на кругову навколоземну орбіту висотою 750 км був виведений супутник ОАО-3 з 80-см телескопом системи Кассегрена. Більш відомий як «Коперник», він експлуатувався 8.5 років.

Окремою віхою в історії орбітальних обсерваторій є космічний телескоп ім. Е. Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) з діаметром дзеркала 2.4 м. Спочатку запуск був запланований на 1983 р., однак затримки проекту і подальша катастрофа космічного корабля «Челленджер» призвели до відстрочки на 7 років. Вже після виведення його на орбіту космічним кораблем «Дискавері» 25 квітня 1990 р. з'ясувалося, що дзеркало телескопа має сильну сферичну аберацію і не дозволяє отримувати чіткі зображення. Були й інші серйозні проблеми [22]. У цілому було організовано п'ять експедицій для технічного обслуговування телескопа, пов'язаних з заміною сонячних батарей і систем керування їхніми приводами, заміною гіроскопів, установкою нових акумуляторів, лагодженням теплоізоляції та іншим оновленням бортової апаратури. Останнє обслуговування було здійснено 11—24 травня 2009 р. у рамках місії STS-125 космічного корабля «Атлантіс». Згорання програми польотів багаторазових кораблів призвело до припинення пілотованих польотів для обслуговування та підтримання у справному стані HST. Але орбітальний телескоп продовжує свою роботу.

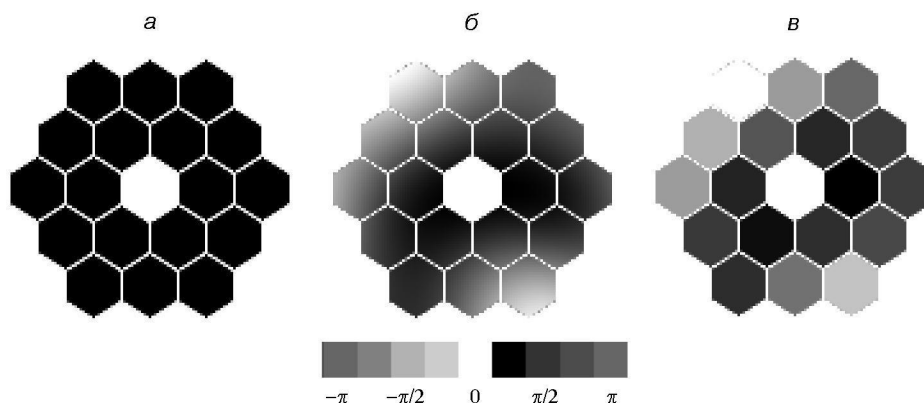


Рис. 1. Конфігурація апертури телескопа JWST (а), а також можливі фазові спотворення на апертурі при спостереженні з поверхні Землі (б) і з космосу (в)

На зміну HST готується космічний телескоп ім. Джеймса Вебба (James Webb Space Telescope, JWST) з діаметром дзеркала 6.5 м [20]. На відміну від HST, він має складене дзеркало, сегменти якого будуть розсунуті на орбіті (рис. 1а). Розмір кожного з 18 шестигранних сегментів дзеркала становить 1.32 м від ребра до ребра, а маса — 20 кг. Це дзеркало вже виготовлене і проходить випробування. Телескоп буде розміщено в точці Лагранжа L2 системи Сонце — Земля і оснащено сонячним щитом. Планований термін роботи телескопа — не менше 5 років. Запуск JWST планується на 2021 р. У свою чергу, на зміну JWST вже планується новий орбітальний телескоп ATLAST (Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope). Одна з розглянутих конструкцій — телескоп з головним дзеркалом 16.8 м, що складається з гексагональних сегментів. Його також буде розміщено в точці L2. Запустити в космос його передбачається у 2029 р.

СПОТВОРЕННЯ ФАЗИ ФУР'Є-КОМПОНЕНТІВ І МЕТОДИ БОРОТЬБИ З НИМИ

Дослідження космічних об'єктів як природного, так і штучного походження значною мірою базується на аналізі зображень, одержаних у тих чи інших ділянках спектру електромагнітних хвиль. Як правило, йдеться про некогерентні зображення, тобто функцію $I(x, y)$, що характеризує інтенсивність випромінювання з одиниці площі об'єкта як функцію координат у площині зображення. Можливість отримати інформацію про об'єкт з електромагнітної хвилі, що приходить від нього, базується на теоремі ван-Ціттерта — Церніке, яка стверджує, що функція когерентності поля хвилі $C(\mathbf{r}, \mathbf{r}')(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ є фур'є-образом зображення об'єкта $I(x, y)$. Це дозволяє вимірювати тим чи іншим способом функ-

цію когерентності і, виконавши над нею перетворення Фур'є, реконструювати зображення об'єкта. В оптичному діапазоні перетворення Фур'є виконується аналоговим способом з допомогою об'єктива телескопа, а його результатом є собою зображення у фокальній площині телескопа.

При проведенні спостережень за допомогою наземного телескопа така проста картина ускладнюється спотвореннями фази хвилі, що надходить від об'єкта, на неоднорідностях атмосфери:

$$J(x, y) = \iint g(x - x', y - y') I(x', y') dS' n(x, y), \quad (1)$$

где $J(x, y)$ — спостережуване зображення, $g(x, y)$ — ядро, що характеризує його спотворення у системі телескоп — атмосфера, $n(x, y)$ — випадкова похибка реєстрації.

Однак дана ситуація стосується спостережень об'єкта крізь атмосферу. Як вже було зазначено, однією із передбачуваних переваг виведення телескопа за межі атмосфери є виключення її впливу, тобто досягнення дифракційної межі роздільної здатності телескопа. Дана обставина повинна дозволити повною мірою реалізувати перевагу апертури великого діаметра без використання складної адаптивно-оптичної системи, яка знадобилася б при спостереженнях аналогічним інструментом з поверхні Землі.

Однак у цьому випадку виникають ускладнення. Дзеркало великого діаметра неможливо вивести на орбіту «цілком». Тому єдиним варіантом залишається використання складеного дзеркала, як видно на прикладі JWST. Це породжує додаткові питання, пов'язані з жорсткістю конструкції, її деформацією під дією теплового розширення, а також ударів мікрометеоритів. Перераховані фактори можуть призвести до виникнення фазових спотворень на апертурі телескопа космічного телескопа. Однак характер цих спотворень буде принципово іншим у порівнянні із спотвореннями, викликаними земною атмосферою (рис. 1). Розглянемо це питання докладніше.

Кожна складова частина апертури багатодзеркального телескопа (будемо традиційно називати її субапертурою) сама по собі є досить жорсткою порівняно з конструкцією, що їх з'єднує. Крім того, розмір субапертури d значно менший за повний діаметр апертури D . Ці факти дозволяють наближено вважати, що деформація апертури пов'язана виключно з деформацією конструкції, що з'єднує субапертури, а деформації субапертур немає. У цьому випадку можна виділити два види деформації — переки і зміщення. З перекосом могла б упоратися адаптивно-оптична система першого порядку, задіяна для кожного дзеркала окремо. Тут, однак, виникає питання вибору опорного джерела. Використовувані на сьогоднішній день принципи створення штучної зірки при відсутності атмосфери працювати не будуть. Таким чином, доведеться обмежитися використанням природних зірок. На щастя, природа фазових спотворень в даному випадку не накладає таких жорстких умов на близькість опорного джерела до спостережу-

ваного об'єкта, як у випадку спостережень крізь атмосферу. Що ж стосується зміщення, то для його компенсації пропонується застосовувати високоточні безконтактні вимірювачі відстані. Але це рішення не видається простим, особливо враховуючи, що на практиці вплив обох факторів нероздільний.

У рамках даної роботи ми будемо припускати, що адаптивна компенсація нахилу субапертур має місце, а компенсація зсуву не ідеальна, або її зовсім немає. Отже, фазове спотворення в частотному вікні, що передається парою субапертур, не змінюється в залежності від просторової частоти і визначається зміщенням субапертур відносно їхнього ідеального положення. Приклад фазових спотворень такого типу представлено на рис. 1в.

Теорія змінних у часі фазових спотворень в орбітальних інструментах розвинена значно слабкіше, ніж теорія атмосферних фазових спотворень, і спеціальних методів обробки зображень для даного випадку немає. Однак серед різноманіття методів боротьби із спотворювальним впливом атмосфери можна виділити досить загальні, не прив'язані безпосередньо до характеру спотворень. Такі методи можуть виявитися корисними і при обробці результатів космічних спостережень. Як простий приклад можна назвати фільтрацію зареєстрованого зображення фільтром, зворотним замивальному. Однак цей приклад не дуже практичний, оскільки при короткоекспозиційній зйомці замивальне ядро, як правило, недоступне для вимірювань, а задача розв'язування інтегрального рівняння, що пов'язує зареєстроване зображення з істинним, є некоректною по Адамару.

Іншою продуктивною ідеєю є спекл-інтерферометрія, запропонована А. Лабейрі [17]. Вона здійснює накопичення квадратів модулів фур'є-компонентів зображення і заснована на тому, що модулі фур'є-компонентів менш схильні до спотворень. Однак автозгортка зображення, отримана в результаті такого накопичення, дозволяє відновити вихідне зображення лише в найпростіших випадках. Необхідно поставити завдання більш строго з математичної точки зору: знайти оптимальну статистичну оцінку істинного зображення об'єкта з серії перекручених його зображень. Таким чином, метод Лабейрі необхідно доповнити оптимальною оцінкою фаз фур'є-компонентів.

В роботі [6] було показано, що пряме накопичення фаз, запропоноване Л. Р. Содінім [12], при спостереженні в оптичному діапазоні неефективне, оскільки призводить до завалу частотної характеристики на високих частотах. Причиною цього є сама природа накопичуваної фази, яка набуває своїх значень не на прямий, а на колі [8]. Таким чином, значення фази i^2 еквівалентні одне одному, поки m залишається цілим числом. При цьому безпосереднє визначення m з результатів вимірювань неможливе.

Очевидно, що усереднювати слід не головні значення спотворених фаз, що отримуються як аргумент фур'є-компонента, а невідомі повні фази. Для їхнього визначення пропонується використовувати

метод відстеження, в основі якого лежить припущення про невелику відміну фази одного фур'є-компонента у сусідніх зображеннях. Повна фаза у поточному кадрі обчислюється з урахуванням головного значення фази у поточному кадрі і повної фази в попередньому кадрі. Запропонований метод був названий методом накопичення повних фаз [6]. Обробка з його допомогою послідовностей зображень, спотворених впливом атмосфери, була детально досліджена в роботах [8, 9]. Особливості застосування його до зображень, отриманих орбітальним багатодзеркальним телескопом, розглянуто нижче.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Будемо вважати, що спостережуваний об'єкт віддалений на нескінченність від інструмента спостережень. Кутовий розмір об'єкта досить малий, щоб вважати його косинус рівним одиниці. Об'єкт протягом часу спостережень залишається незмінним. Дзеркала субапертур вважаються ідеально жорсткими, а деформації апертури пов'язані виключно з їхньою з'єднувальною конструкцією. Інструмент оснащено системою адаптивної компенсації нахилів субапертур, тому зсув фази у межах субапертури постійний. Залежність зміни фази на субапертурі від часу, а також сукупність цих змін на субапертурах є стаціонарним гауссівським процесом з відомими дисперсією і спектральною щільністю. Фаза хвилі залишається незмінною протягом часу експозиції. Для спрощення будемо вважати експозицію миттєвою. У роботі [9] було показано, що шум реєстрації впливає на роботу методу накопичення повних фаз набагато слабше, ніж характеристики фазових спотворень. Тому в рамках даного дослідження будемо вважати, що він відсутній. Апертурна функція телескопа $a(\theta, \phi)$ також вважається відомою і дорівнює одиниці на апертурі та нулеві за її межами (рис. 1а). Оптична частина телескопа також вважається ідеальною.

Перераховані вище припущення є обґрунтованими з практичної точки зору і необхідними з точки зору теорії методу накопичення повних фаз (див. вище і роботу [6]). Завдання в рамках даної роботи ставиться таким чином: оцінити ефективність методу накопичення повних фаз при обробці зображень, отриманих за допомогою багатодзеркального орбітального телескопа. Підхід до вирішення даного завдання викладено у наступному розділі.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ

Необхідною складовою методу накопичення повних фаз є відстеження фази, що накладає певні умови на послідовність вихідних зображень [6]. Це, зокрема, стосується часу експозиції і тимчасового інтер-

валу між кадрами послідовності. Отримання таких даних на практиці, а тим більше з використанням орбітального телескопа — досить дорогий і трудомісткий процес. Тому таке дослідження доцільно проводити за допомогою комп'ютерного моделювання. На користь такого підходу свідчить і факт, що при реальних спостереженнях істинне зображення астрономічного об'єкта невідоме. Отже, немає можливості безпосередньої оцінки похибки методу. Таким чином, комп'ютерне моделювання процесу отримання зображень орбітальним багатодзеркальним телескопом є необхідною складовою вирішення поставленого завдання і першим етапом експерименту.

Моделювання реалізоване за допомогою системи комп'ютерного моделювання астрономічних зображень, що була розроблена і розвивається в ІРЕ НАНУ. Перший варіант системи був частково описаний в роботі [5]. Дана система містить в собі функціонал для моделювання псевдовипадкових послідовностей із заданими характеристиками, у тому числі поля фазових спотворень, формування апертурної функції для традиційного і багатодзеркального телескопа, отримання спотворювального ядра, а також обробки зображень за допомогою різних методів, зокрема методу спекл-інтерферометрії і різних версій методу накопичення фаз. У поточному її варіанті система надає можливість використання сучасних графічних обчислювачів, що суттєво впливає на час моделювання.

У цьому дослідженні через відсутність атмосфери немає необхідності моделювати поле фазових спотворень, необхідно лише отримати фазовий зсув для кожної субапертури. Не слід, однак, забувати, що ці зміщення повинні бути скорельовані як між собою (оскільки субапертури конструктивно пов'язані), так і в часі. Кореляція між субапертурами забезпечується наданням випадковому процесу заданих спектральних властивостей безпосередньо (у частотній площині), тоді як кореляція у часовій області забезпечується згортками з прямокутним ядром шириною L елементів. У рамках даної роботи використовувалися значення $l = 5, L = 20, 40, 60$ (зміна кореляції у часі імітує зміна інтервалу часу між зйомкою кадрів). В іншому процес моделювання зображень аналогічний описаному в роботі [7], тобто є згорткою зображення об'єкта з просторово-частотною характеристикою телескопа з урахуванням спотворень.

Другий етап експерименту полягав в обробці отриманої серії зображень. При обробці необхідно було окремо накопичувати квадрати модулів і фази фур'є-компонентів зображень. Модулі фур'є-компонентів (k_x, k_y) отримуються безпосередньо з результатів спостережень (зображень), тому накопичення їхніх квадратів не відрізняється особливою специфікою і повністю відповідає ідеї Лабейри [17]. Тут k_x, k_y — компоненти вектора просторової частоти k . Однак, як зазначалося вище, безпосередньо з результатів спостережень можуть бути отримані лише головні значення фаз фур'є-компонентів (k_x, k_y) . Повна фаза пов'язана з головним її значенням виразом

$$(k_x, k_y) - (k_x, k_y) = 2m, \quad (2)$$

де m — невідоме ціле число. Другий доданок у (2) не впливає на значення відповідного фур'є-компонента, оскільки воно кратне 2. При накопиченні головних значень фази ми маємо

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i(k_x, k_y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i(k_x, k_y) + \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n m_i. \quad (3)$$

Хоча n і всі m_i цілі, коефіцієнт при 2 у правій частині (3) не обов'язково буде цілим. Видно, що накопичення головних значень фаз еквівалентне накопиченню повних фаз лише при відсутності повних обертів траєкторії фур'є-компонента навколо нуля, коли m_i однакові для всієї послідовності [6]. Таким чином, накопичувати необхідно саме повні фази фур'є-компонентів.

Для вирішення цієї проблеми було запропоновано алгоритм відстеження фази. Якщо часовий інтервал між сусідніми кадрами послідовності малий, то зміна фази фур'є-компонентів невелика. У випадку спостереження крізь атмосферу величина цього інтервалу визначалася часом замороженості атмосфери [8]. При використанні орбітального телескопа його має визначати статистика факторів, що викликають спотворення фази у космічному просторі. У рамках даної роботи таке дослідження не проводилося, оцінювалася лише принципова можливість використання методу накопичення повних фаз.

Процедура відстеження фази передбачає, що різниця фаз фур'є-компонента між сусідніми зображеннями не перевищує:

$$\varphi_{i+1}(k_x, k_y) - \varphi_i(k_x, k_y) = 2m_i(k_x, k_y). \quad (4)$$

Нерівність (4) дозволяє знайти єдине значення m_i для кожного фур'є-компонента кожного кадру [8]. Отримані згідно із (2) з використанням m_i оцінки повної фази $\varphi_i(k_x, k_y)$ і підлягають накопиченню. При цьому $\varphi_{i+1}(k_x, k_y) = \varphi_i(k_x, k_y) + 2m_i(k_x, k_y)$, якщо нерівність (4) для експериментальних даних не порушується.

Після обробки таким чином усіх кадрів послідовності модулі і фази фур'є-компонентів об'єднуються для реконструкції зображення об'єкта. В ідеальному випадку воно повинно бути ідентичним істинному зображенню об'єкта з поправкою на відсутність у реконструйованому зображенні частот, не переданих апертурою інструмента. Однак розглянуті в роботі [8] обставини призводять до руйнування інформації про об'єкт при спостереженні крізь атмосферу і, як наслідок, до збоїв у відстеженні фаз. При цьому як візуальна якість реконструйованого зображення, так і його середнє квадратичне відхилення від істинного істотно погіршуються. Нижче ми за допомогою комп'ютерного моделювання розглянемо докладніше даний ефект, що виникає при спостереженні за допомогою багатодзеркального орбітального телескопа.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

При моделюванні результатів спостережень у даній роботі використовувалася конфігурація апертури телескопа JWST, показана на рис. 1а. На рис. 2а показано змодельоване зображення точкового (нерозділеного) джерела, що отримується таким інструментом при відсутності яких-небудь спотворень (дифракційне зображення). На рис. 2б показано зображення того ж об'єкта за наявності фазового зсуву, постійного у межах субапертури. З ілюстративною метою тут і далі модельні зображення наведено в негативі. Середнє квадратичне значення фазових спотворень q , а параметр, що визначає кореляцію спотворень між субапертурами, дорівнює $\rho = 0.05$ [7]. Порівняння цих зображень наочно ілюструє необхідність боротьби з фазовими спотвореннями навіть в умовах орбітальних спостережень.

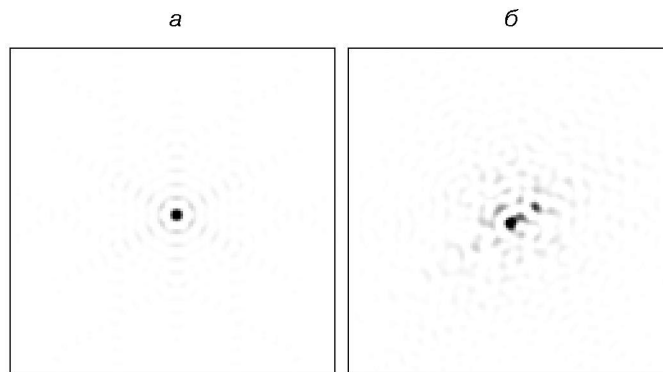


Рис. 2. Змодельоване зображення точкового джерела, отримане багатодзеркальним орбітальним телескопом з конфігурацією апертури, аналогічною JWST, при відсутності фазових спотворень (а) та при їхній наявності (б)

Як об'єкт спостережень було використано модельний об'єкт, показаний на рис. 3а (істинне зображення). Рис. 3б ілюструє неспотворені фази цього зображення. На рис. 3в і 3г відповідно показані дифракційне зображення цього об'єкта і приклад зображення, отриманого при наявності фазових спотворень з тими ж характеристиками.

На рис. 4 представлено результат накопичення головних значень фази фур'є-компонентів для точкового і протяжного об'єкта при середньому квадратичному відхиленні фазових спотворень. Порівняння накопичених фаз для протяжного об'єкта (рис. 4в) з істинними фазами (рис. 3б) підтверджує висновок про те, що накопичення головних значень фаз працює лише на низьких частотах (коли немає змін фази, що перевищують 2π). На більш високих частотах, де кількість оборотів траєкторії фур'є-компонента навколо початку координат велика, результат усереднення наближається до нуля. В результаті реконструйоване зображення протяжного об'єкта (рис. 4г) близьке до зобра-

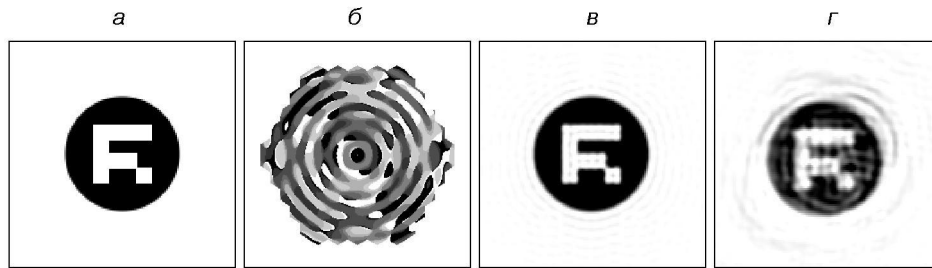


Рис. 3. Істинне зображення протяжного об'єкта (а), неспотворені фази фур'є-компонентів цього зображення (б), результат його спостереження при відсутності (в) і наявності (г) фазових спотворень

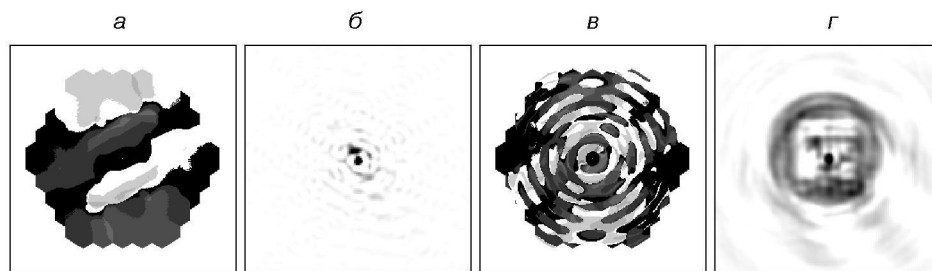


Рис. 4. Результат накопичення головних значень фаз фур'є-компонентів (а, в) і реконструйоване зображення (б, г) для точкового джерела (а, б) і протяжного об'єкта (в, г)

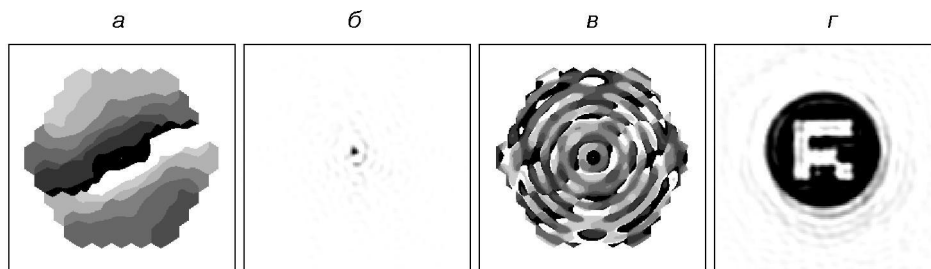


Рис. 5. Результат накопичення повних фаз фур'є-компонентів (а, в) і реконструйоване зображення (б, г) для точкового джерела (а, б) і протяжного об'єкта (в, г)

ження точкового джерела (рис. 4б). Накопичення повних фаз, у свою чергу, дозволяє в результаті накопичення отримати більш правдоподібну карту фаз фур'є-компонентів для протяжного об'єкта (рис. 5в). В результаті реконструйоване зображення також набагато ближче до істинного (рис. 5г), особливо якщо мова йде про протяжний об'єкт. Однак для точкового об'єкта (рис. 5а, 5б) цього сказати не можна. Залежності точності реконструкції від кількості накопичених зображень, представлені на рис. 6, підтверджують цей висновок. Для протяжного об'єкта (рис. 6б) очевидно є перевага методу накопичення повних фаз, однак для точкового джерела (рис. 6а) точнішим виявляється накопичення головних значень фаз. Справа тут у побічному придушенні високих частот, внаслідок чого при накопиченні головних

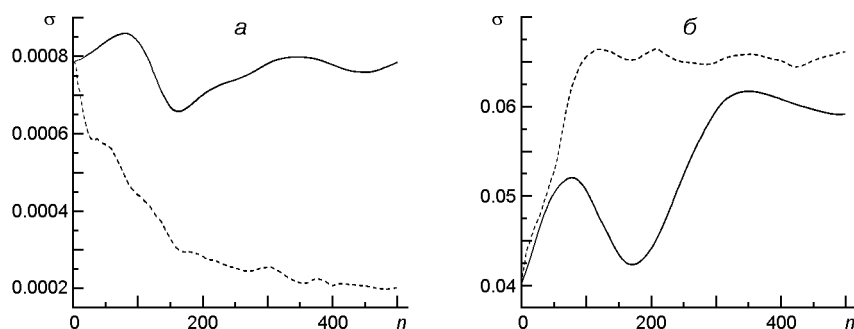


Рис. 6. Залежність точності реконструкції зображення точкового джерела (а) і протяжного об'єкта (б) від кількості накопичених зображень при використанні накопичення повних фаз (суцільна крива) і головних значень фаз (штрихова крива)

значень фаз будь-який реконструйований об'єкт при достатній довжині послідовності буде нагадувати точковий (рис. 4з).

Результати реконструкції, отримані з застосуванням методу накопичення повних фаз (рис. 5б, 5г), підтверджують його ефективність для обробки результатів спостережень багатодзеркальним орбітальним телескопом при наявності фазових спотворень. Вони аналогічні результатам, отриманим в роботі [7] для випадку наземного телескопа. Таким чином, можна вважати актуальними також висновки про руйнування інформації під дією фазових спотворень та його вплив на накопичення фаз [8] (з поправкою на іншу природу чинників, що викликають спотворення). Тим не менш, є питання, які у проведених раніше дослідженнях не розглядалися.

Нерівність (4) пов'язує фази фур'є-компонентів у поточному та попередньому кадрах. За початкове значення для відстеження беруться фази фур'є-компонентів у першому кадрі послідовності. При відсутності збоїв відстеження, описаних в роботі [8], початкове наближення не впливало б на результат накопичення. Будь-яке постійне зміщення зберігається протягом всієї послідовності, і після усереднення призводить до такого ж зміщення відновленої фази. Однак наявність збоїв відстеження фази суттєво змінює ситуацію.

У роботі [9] було показано, що однією з причин виникнення збоїв у відстеженні фази є наближення модуля фур'є-компонента до нуля. Така ситуація виникає в результаті просторового усереднення при багаторазовій передачі інструментом спостережень просторової частоти при наявності фазових спотворень [8]. Збої призводять до того, що при часовому усередненні зсув фази фур'є-компонента з постійного стає випадковим. У результаті виявляється можливою залежність ефективності накопичення від початкового зображення (яке визначає початковий зсув фази). У наступному експерименті здійснювалася перевірка цієї гіпотези.

Було сформовано послідовність з 1400 модельних зображень при $l = 5$ і $L = 60$. Накопичення фази проводилося по 1000 кадрах. Після

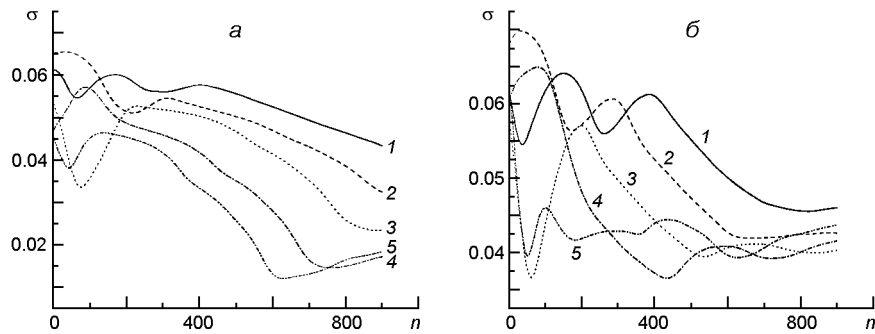


Рис. 7. Залежність середньої квадратичної похибки реконструкції зображення від кількості накопичених кадрів при різному виборі початку накопичення (1 — 1-й кадр, 2 — 101-й кадр, 3 — 201-й кадр, 4 — 301-й кадр, 5 — 401-й кадр) для $3/4$ (а) і (б)

додавання кожних 10 кадрів здійснювалася реконструкція зображення об'єкта, і вимірювалося середнє квадратичне відхилення реконструйованого зображення від дифракційного. При цьому початок послідовності для накопичення зміщувався в інтервалі від 1 до 401 через 100 кадрів. В результаті було отримано п'ять графіків залежності середньої квадратичної похибки реконструкції від кількості накопичених кадрів. Такий експеримент було проведено для значень середнього квадратичного відхилення фазових спотворень $q = 3/4$ і $1/4$. Графіки представлено відповідно на рис. 7а і 7б.

Порівняння отриманих залежностей дозволяє зробити два важливі висновки. Графіки дуже подібні між собою. Спостерігається пряма залежність між зміщенням початкового кадру відносно першого і зміщенням графіка до початку координат. Особливо добре це видно при $q = 3/4$ (рис. 7а). Таким чином, висунута вище гіпотеза знаходить підтвердження. «Невдалі» місця у послідовності будуть викликати збої у відстеженні незалежно від початку накопичення і, відповідно, абсолютного значення фази. Мінімум кривої, що відповідає найкращому результату, зміщується до початку координат доти, доки кількості накопичених зображень буде достатньо для поліпшення результату (криві 1...4 на рис. 7б). Після цього характер залежності різко змінюється (крива 5 на рис. 7б). Другим важливим висновком є наявність яскраво вираженого мінімуму практично на всіх графіках. Від накопичення сигналу можна очікувати зовсім іншого — монотонного зменшення похибки із збільшенням довжини послідовності.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було поставлено питання про наявність фазових спотворень при спостереженнях за допомогою багатодзеркального орбітального телескопа. Було здійснено теоретичний розгляд специфіки

фазових спотворень в такому інструменті. Систему комп'ютерного моделювання отримання зображення астрономічних об'єктів крізь атмосферу було доповнено можливістю моделювати фазові спотворення у багатодзеркальних телескопах, зокрема орбітальних. З її допомогою були отримані моделі зображень, які можуть бути зареєстровані за допомогою James Webb Space Telescope. Отримані модельні зображення дозволили підтвердити ефективність методу накопичення повних фаз для боротьби з фазовими спотвореннями у багатодзеркальних орбітальних телескопах. В результаті експериментів з різними частинами послідовності було виявлено залежність результату реконструкції від вибору початкового кадру. Також було встановлено, що залежність точності реконструкції від довжини послідовності має яскраво виражений мінімум. Причини немонотонності даної залежності, а також можливості вибору початкового зображення і кількості накопичуваних зображень будуть розглянуті в рамках подальших досліджень.

1. Анисимов Н. Ф., Бердина Р. Н., Нечаева Н. Н., и др. Вероятность получения хороших изображений звёзд при фотографировании с короткими экспозициями. *Атмосферная оптика: труды совещаний по атмосферной оптике комиссии по оптической неустойчивости атмосферы Астросовета АН СССР*. М. 1968. С. 37—44.
2. Данжон А., Куде А. Атмосферное волнение. *Астрон. журн.* 1940. 17, Вып. 1. С. 77—89.
3. Канев Ф. Ю., Лукин В. П. *Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования*. Томск, 2005. 250 с.
4. Канер Э. А. К теории распространения волн в среде со случайными неоднородностями. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1959. 2. № 5. С. 827—829.
5. Корниенко Ю. В. Обработка изображений в ИРЭ НАН Украины. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. НАН Украины. ИРЭ им. А. Я. Усикова*. Харьков. 2008. 13, спецвыпуск. С. 423—445.
6. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. О реконструкции неискаженного изображения объекта по серии его изображений, искаженных средой со случайными неоднородностями показателя преломления. *Доп. АН України*. 2010. № 2. С. 83—89.
7. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонентов при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. *Кинематика и физика небес. тел.* 2011. 27. № 6. С. 52—63.
8. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Механизм разрушения информации при наблюдении сквозь неоднородную среду. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. 17. № 1. С. 39—48.
9. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонентов при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. *Кинематика и физика небес. тел.* 2012. 28. № 2. С. 45—58.
10. Корниенко Ю. В., Уваров В. Н. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу. *Докл. АН УССР. Сер. А*. 1987. № 4. С. 60—63.
11. Петров Г. И. Развитие космических исследований. *Вестн. АН СССР*. 1969. № 5. С. 65—71.

12. Содин Л. Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере. *Письма в астрон. журн.* 1976. 2. С. 554—558.
13. Тихов Г. А. *Основные труды: в 5 т.* Алма-Ата: АН КазССР. 1954—1960.
14. Циолковский К. Э. *Ракета в космическое пространство*: Второе издание. Вступительная заметка на немецком языке А. Л. Чижевского. 1924. Калуга. 1-я Государственная типо-литография. Площадь Энгельса. № 3. 1924. 32 с.
15. Щеглов П. В. *Проблемы оптической астрономии*. М.: Наука. 1980. 272 с.
16. Bennett J. A. On the power of penetrating into space: the telescopes of William Herschel. *J. Hist. Astron.* 1976. 7. Part 2. № 19. P. 75—108.
17. Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron. and Astrophys.* 1970. 6. № 1. P. 85—87.
18. Oberth H. *The rocket into planetary space*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG. 2014. 108 p. ISBN: 9783110367560.
19. Roddier F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays. *J. Opt. Soc. Amer. Ser. A.* 1987. 4. № 8. P. 1396—1401.
20. *Scientific Discovery with the James Webb Space Telescope. Artic. Hist. Compiled*, July 17. 2018. URL: <https://www.jwst.nasa.gov>.
21. Spitzer L., Jr. Astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory. *Astron. quarterly*. 1990. 7. № 3. P. 131—142.
22. Zimmerman R. *The universe in a mirror: The saga of the Hubble Space Telescope and the visionaries who built it*. Princeton Univ. Press. 2010. 336 p. ISBN 0691146357 / 9780691146355.

REFERENCES

1. Anisimov N. F., Berdina R. N., Nechayeva N. N., et al. (1968) The probability of obtaining good images of stars when photographing with short exposures. *Proceedings of the Atmosfernaya optika: trudy soveshchaniy po atmosfernoy optike komissii po opticheskoy nestabil'nosti atmosfery Astrosoveta AN SSSR*, Moscow. 37—44. (In Russian).
2. Danzhon A., Kude A. (1940) Atmospheric excitement. *Astron. J.* 17(1). 77—89. (In Russian).
3. Kanev F. Yu., Lukin V. P. (2005) Adaptive optics. Numerical and experimental studies. Tomsk. (In Russian).
4. Kaner E. A. (1959) On the theory of wave propagation in a medium with random inhomogeneities. *University News. Radiophysics.* 2(5). 827—829.
5. Korniyenko Yu. V. (2008) Image processing in the IRE NAS of Ukraine. *Radiophysics and Electronics: collection of scientific papers IRE NAS of Ukraine*. Kharkiv. 13, special issue, 423—445.
6. Korniyenko Yu. V., Skuratovskiy S. I. (2010) On reconstruction of an undistorted image of an object from a series of its images distorted by a medium with random inhomogeneities of the refractive index. *Reports of NAS of Ukraine*. № 2. 83—89.
7. Korniyenko 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). 304—310.
8. Korniyenko Yu. V., Skuratovskiy S. I. (2012) Mechanism of information degradation in observations through a randomly inhomogeneous medium. *Radiophysics and*

- Radioastronomy*. 17(1). 39—48.
9. Korniyenko 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). 77—84.
 10. Korniyenko Yu. V., Uvarov V. N. (1987) Signal accumulation when observing an astronomical object through a turbulent atmosphere. *Reports of NAS of USSR, Ser. A*. № 4. P. 60—63.
 11. Petrov G. I. (1969) Development of space research. *Bull. Acad. Sci. USSR*. № 5. 65-71.
 12. Sodin L. G. (1976) On the possibility of achieving the diffraction limit of resolution when the telescope operates in a turbulent atmosphere. *Letters to the Astron. J.* 2. 554—558.
 13. Tikhov G. A. (1954-1960) *Major works: in 5 volumes*. Alma-Ata: Izdatel'stvo AN Kazakhskoy SSR. (in Russian).
 14. Tsiolkovskiy K. E. (1924) *Rocket in outer space*: Second edition. Kaluga. (In Russian).
 15. Shcheglov P. V. (1980) *Problems of optical astronomy*. Moscow: Nauka. (In Russian).
 16. Bennett J. A. (1976) On the power of penetrating into space: the telescopes of William Herschel. *J. Hist. Astron.* 7(2). 19. 75—108.
 17. Labeyrie A. (1970) Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. *Astron. and Astrophys.* 6(1). 85-87.
 18. Oberth H. (2014) *The rocket into planetary space*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
 19. Roddier F. (1987) Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays. *J. Opt. Soc. Amer. Ser. A*, 4(8). 1396-1401.
 20. *Scientific discovery with the James Webb Space Telescope. Article history compiled*, July 17. 2018. URL: <https://www.jwst.nasa.gov>
 21. Spitzer L., Jr. (1990) Astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory. *Astron. quarterly*. 7(3). 131—142.
 22. Zimmerman R. (2010) *The Universe in a Mirror: The Saga of the Hubble Space Telescope and the Visionaries Who Built It*. Princeton University Press.

Ю. В. Корниенко, И. Ляшенко, В. В. Пугач, С. И. Скуратовский

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова
Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина

НАКОПЛЕНИЕ ФАЗ ФУРЬЕ-КОМПОНЕНТОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ОРБИТАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

При проведении астрономических наблюдений с поверхности Земли получение изображений с высоким разрешением осложняется искажающим влиянием атмосферы. Есть две группы методов для его преодоления. Первые не вмешиваются в процесс формирования изображения и связаны с обработкой уже зарегистрированных результатов наблюдений. Вторые представляют собой конструирование особых наблюдательных инструментов. Вынесение инструмента за пределы атмосферы также условно можно отнести к этой группе. В этом случае влияние атмосферы отсутствует, и предполагается, что получение изображения с дифракционным разрешением возможно без дополнительных усилий. В данной работе рассматриваются факторы, которые могут привести к возникновению фазовых искажений при проведении наблюдений с помощью орбитального многозеркального телескопа. В качестве метода борьбы с ними предлагается использовать метод накопления полных фаз. Он разработан для компенсации искажения фаз фурье-компонентов, вызванного влиянием земной атмосферы. Предположения о статистике фазовых искажений, сделан-

ные при его разработке, являются достаточно общими и не препятствуют его применению к результатам космических наблюдений. Демонстрация его эффективности и исследование возможностей при обработке изображений, полученных космическим многозеркальным телескопом, производится с помощью компьютерного моделирования. Необходимость применения моделирования в качестве инструмента исследования вызвана высокой стоимостью реального эксперимента, а также необходимостью информации об истинном изображении объекта для оценки погрешности метода. Для моделирования использована конфигурация апертуры строящегося телескопа им. Джеймса Уэбба. С помощью моделирования показаны различия характеристик фазовых искажений при земных и космических наблюдениях. Продемонстрирована необходимость накапливать полные фазы, а не их главные значения, в условиях космических наблюдений. Показана эффективность такого накопления. Выявлен немонотонный характер зависимости погрешности реконструкции от числа накопленных изображений.

Ключевые слова: космические наблюдения, многозеркальный телескоп, фазовые искажения, накопление полных фаз, обработка изображений.

Yu. V. Kornienko, I. Lyashenko, V. V. Pugach, S. I. Skuratovskiy
Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy
of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FOURIER COMPONENTS PHASE ACCUMULATION IN OBSERVATION OF AN OBJECT WITH AN ORBITAL TELESCOPE

In the case of astronomical observations from the surface of the Earth it is difficult to obtain high resolution images due to the distorting influence of the atmosphere. There are two groups of methods for overcoming this influence. First ones are not interfering into the process of image forming, they are related to the processing of already registered images. The methods from the second group represent the construction of specific observational instruments. Putting the instrument out of the atmosphere also may be considered as a method from this group. In this case there is no atmosphere influence, and it is assumed that obtaining the images with diffraction-limited resolution is possible without additional efforts. The factors that may lead to phase distortions while observing with an orbital multi-mirror telescope are discussed. As a method for removing them the total phase accumulation method is proposed. It is designed for compensating the distortion of Fourier component phases, caused by the Earth's atmosphere. Assumptions as to the statistics of phase distortions, used for its development, are quite general ones and not interfering for its application to space observations. Computer modeling is used to demonstrate the technique effectiveness and studying its possibilities in processing of images from a multi-mirror space telescope. Using of modeling as an instrument for research is motivated by the high cost and complexity of the real experiment, and the requirement of the correct image of an object for evaluating the method error. The aperture configuration of James Webb telescope under construction is used for modeling. The modeling was used to explain the different behavior of phase distortions between space observations and the observations from Earth's surface. It is demonstrated that in case of space observations the total phase accumulation is required instead of the main phase values accumulation either. It is found that the dependence of the reconstruction error on the number of accumulated images has not monotonous behavior.

Keywords: spaceborn observations, multi-mirror telescope, phase distortions, complete phases accumulation, image processing.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2019

Після доопрацювання 28.05.2019

Прийнята до друку 11.10.2019