

Об эффективности метода накопления полных фаз при наблюдении объекта с помощью многозеркального орбитального телескопа

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

Институт радиофизики и электроники им.А.Я. Усикова НАН Украины, Украина, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12, vlap@ukr.net

Радикальным методом борьбы с мешающим влиянием земной атмосферы на результаты астрономических наблюдений представляется вынесение телескопа в космическое пространство. В данной работе обсуждаются причины возможного возникновения фазовых искажений при наблюдении орбитальным телескопом. Предложено использование метода накопления полных фаз для борьбы с этими искажениями. С помощью компьютерного моделирования продемонстрирована его эффективность при обработке результатов наблюдений многозеркальным орбитальным телескопом. В результате анализа погрешности реконструкции выявлен немонотонный характер её зависимости от числа накопленных кадров.

Ключевые слова: многозеркальный орбитальный телескоп, накопление полных фаз, фазовые искажения, погрешность реконструкции.

The radical technique for overcoming the destructive influence of Earth's atmosphere on the astronomical observation results is moving the telescope into space. We discuss reasons of possible phase distortions appearing while observing with an space telescope. Using of complete phase accumulation technique is proposed for overcoming these distortions. We use computer modeling to demonstrate its effectiveness for processing the results of observations with a multi-mirror space telescope. The analysis of reconstruction errors results in establishment of non-monotonous behavior of the error dependence on the number of accumulated frames.

Keywords: multi-mirror space telescope, complete phase accumulation, phase distortions, reconstruction error.

1. Введение

Причиной стремления создавать телескопы большого диаметра является желание собрать как можно больше света от наблюдаемого объекта и таким образом получить возможность наблюдать всё более слабые объекты. Другой стимул к увеличению диаметра телескопа – желание уменьшить диаметр дифракционного изображения точки и тем самым повысить разрешающую способность телескопа. Однако на практике ситуация оказывается несколько иной. Ещё Гершель отметил, что земная атмосфера снижает реальное разрешение телескопа относительно ожидаемого. При сопоставлении результатов наблюдений Марса Скиапарелли [1] (наблюдавшего в телескоп диаметром 22 см и открывшего каналы на Марсе) и Антониади [2] (наблюдавшего в телескоп диаметром 83 см и желавшего подтвердить или опровергнуть это открытие) выяснилось, что разрешение у Антониади на большем телескопе было хуже, чем у Скиапарелли на меньшем. Это оказалось закономерностью: из-за влияния турбулентной атмосферы увеличение диаметра телескопа часто приводит к снижению его разрешения.

Снижение разрешения под влиянием турбулентной атмосферы происходит из-за искажения фронта волны, приходящей от наблюдаемого объекта, случайными неоднородностями показателя преломления [3]. Предлагались различные методы борьбы с мешающим влиянием атмосферы: выбор места и времени наблюдений [4], различные методы постдетекторной обработки изображений [5], использование адаптивно-оптических систем [6], интерферометрические методы [7, 8]. Однако

существует иной подход к этому вопросу – вместо борьбы с влиянием атмосферы можно его избежать.

2. Орбитальные телескопы

Первое упоминание идеи орбитального телескопа встречается в книге Германа Оберта «Ракета в межпланетном пространстве», изданной в 1923 году [9]. Она была разбита на три части: общая теория ракеты, описание конструкции ракеты и проблемы биологии, безопасности, а также перспективы использования ракет. Таким образом, в весьма сжатом изложении было дано всестороннее обоснование будущей ракетно-космической техники. Однако Циолковский, желая подтвердить первенство создания теории космического полета на основе использования ракет, переиздал свою работу 1903 [10], после чего немецкий ракетчик признал первенство русского ученого в разработке теории космического полета.

В 1946 Лайман Спитцер отметил главные преимущества космического телескопа (оригинальная статья была переиздана, [11]). Предполагалось, что его угловое разрешение будет ограничено лишь дифракцией. Кроме того, космический телескоп способен вести наблюдение в недоступных диапазонах, в частности в инфракрасном, ультрафиолетовом, гамма диапазонах. Очевидны также ограничения, накладываемые на орбитальные телескопы. Масса и размер приборов, возможность доставки на требуемую орбиту, сложности с обслуживанием, ограниченное время жизни, а также высокая стоимость в совокупности ставили под сомнение скорое появление подобных телескопов.

Первым успешным орбитальным телескопом стал советский спутник Космос-215 [12], запущенный 19 апреля 1968 г. Американский спутник «ОАО-1», запущенный двумя годами ранее, вышел из строя через три дня после старта из-за отказа аккумуляторов. 7 декабря 1968 года состоялся успешный запуск спутника «ОАО-2», а в августе 1972 г. на круговую околоземную орбиту высотой 750 км был выведен спутник «ОАО-3» с 80-сантиметровым телескопом системы Кассегрена. Он проработал 8,5 лет и получил впоследствии название «Копперник».

Отдельно в ряду орбитальных обсерваторий стоит космический телескоп им. Хаббла с диаметром зеркала 2,4 м. Запуск планировался на 1983 г., однако был отложен на 7 лет, вначале из-за задержки проекта, а затем из-за катастрофы космического корабля «Челленджер» в 1986 г. Вскоре после вывода его на орбиту космическим кораблём «Дискавери» 25 апреля 1990 выяснилось, что зеркало телескопа имеет сильную сферическую аберрацию и дает размытые изображения. Были и другие серьезные проблемы [13]. Для технического обслуживания телескопа было организовано пять экспедиций, связанных с заменой солнечных батарей и систем управления их приводами, заменой гироскопов, установкой новых аккумуляторов, починкой теплоизоляции и прочим обновлением бортовой аппаратуры. Последнее обслуживание было произведено 11-24 мая 2009 г. в рамках миссии «Атлантис» STS-125. Свёртывание программы полётов многоразовых кораблей привело к прекращению пилотируемых полётов для обслуживания и поддержания в работоспособном состоянии «Хаббла», но орбитальный телескоп продолжает свою работу.

На смену орбитальному телескопу Хаббл готовится космический телескоп им. Джеймса Уэбба (JWST) с диаметром зеркала 6,5 м [14]. Зеркало состоит из сегментов, которые будут раздвинуты на орбите. Размер каждого из 18-ти шестигранных сегментов зеркала составляет 1,32 м от ребра до ребра, а масса – 20 кг. На данный момент зеркало изготовлено и проходит стадию испытания. Телескоп будет размещён в точке Лагранжа L2 системы Солнце – Земля и оснащён солнечным щитом. Запуск планируется в 2021 году. Срок работы телескопа составит не менее пяти лет.

Тем не менее, на смену JWST уже планируется новый орбитальный телескоп ATLAST. Одна из рассматриваемых конструкций подразумевает телескоп с главным зеркалом 16,8 м, построенным из множества гексагональных сегментов. Он также будет размещён в точке L2. Запуск предполагается в 2029 г.

3. Фазовые искажения и методы борьбы с ними

Исследование космических объектов как естественного, так и искусственного происхождения в значительной степени основано на анализе их изображений, получаемых в тех или иных участках спектра электромагнитных волн. Обычно имеют дело с некогерентным изображением, т.е. с функцией $I(x, y)$, характеризующей интенсивность излучения с единицы площади объекта как функцию координат в плоскости объекта. Возможность извлечь информацию об объекте из приходящей от него электромагнитной волны основана на теореме ван Циттерта - Цернике, которая гласит, что функция когерентности поля волны $C(\xi, \eta)$ является фурье-образом изображения объекта $I(x, y)$. Это позволяет, измеряя тем или иным способом функцию когерентности и выполняя над ней преобразование Фурье, реконструировать изображение объекта. В оптическом диапазоне преобразование Фурье выполняется аналоговым способом с помощью объектива телескопа, а его результат представляет собой изображение в фокальной плоскости телескопа.

При наблюдениях с поверхности земли данная простая картина осложняется искажениями фазы волны, приходящей от объекта, на неоднородностях атмосферы. Как уже говорилось выше, одним из преимуществ выведения телескопов в космическое пространство является исключение влияния атмосферы, т.е. достижение дифракционного предела разрешения телескопа. Казалось бы, данное обстоятельство позволяет в полной мере реализовать преимущество большого диаметра апертуры без использования сложной адаптивно-оптической системы, которая понадобилась бы при наблюдении аналогичным инструментом с поверхности Земли.

Однако и здесь есть свои сложности. Как видно из случая JWST, зеркало большого диаметра невозможно вывести на орбиту «целиком», и единственным вариантом является использование составного зеркала. При этом, однако, возникают вопросы, связанные с жёсткостью конструкции, её деформацией под действием теплового расширения, а также ударов микрометеоритов. Перечисленные факторы приводят к возникновению фазовых искажений на апертуре телескопа, которые, однако, носят несколько иной характер в сравнении с искажениями, вызванными земной атмосферой (см. рис. 1, б, в).

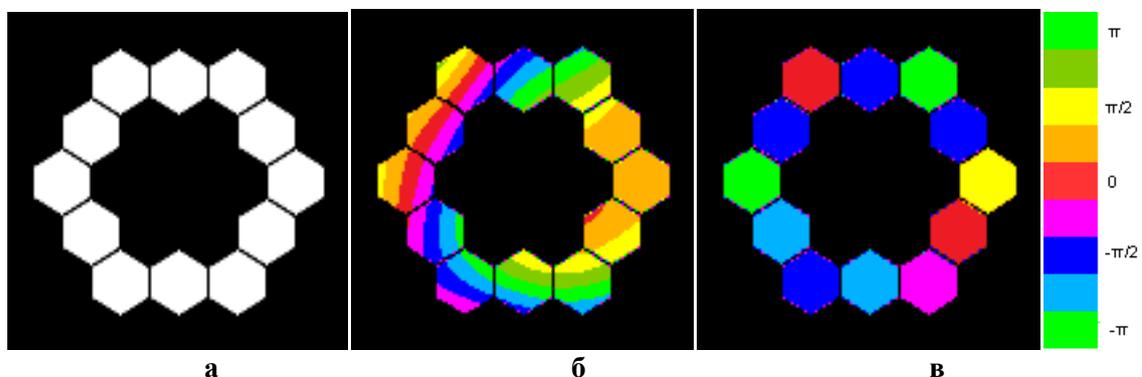


Рис. 1. Конфигурация апертуры многозеркального телескопа (а), а также фазовые искажения на апертуре при наблюдении с поверхности Земли (б) и с помощью орбитального телескопа (в).

Каждая составная часть апертуры многозеркального телескопа (будем называть её субапертура) сама по себе является достаточно жёсткой по сравнению с конструкцией, их соединяющей. Кроме того, размер субапертуры d значительно меньше полного диаметра апертуры D . Эти факты позволяют считать, что деформация апертуры связана исключительно с деформацией конструкции, соединяющей субапертуры, и отсутствует в пределах отдельной субапертуры. Таким образом, фазовое искажение в частотном окне, передаваемом парой субапертур, не меняется в зависимости от пространственной частоты и определяется смещением субапертур относительно их идеального положения (рис. 1).

Вопрос о фазовых искажениях в орбитальных инструментах развит значительно меньше, чем теория атмосферных фазовых искажений. Однако среди многообразия методов борьбы с мешающим влиянием атмосферы можно найти достаточно общие, не привязанные непосредственно к характеристикам искажений, которые могут оказаться полезными при обработке космических наблюдений. В качестве самого простого примера можно привести фильтрацию зарегистрированного изображения фильтром, обратным замыающему. Однако, во-первых, при короткоэкспозиционной съёмке замыающее ядро, как правило, недоступно измерению и, во-вторых, задача решения интегрального уравнения, связывающего зарегистрированное изображение с истинным, оказывается некорректной по Адамару.

Ещё одной продуктивной идеей является спекл-интерферометрия, предложенная А. Лабейри [15]. Она представляет собой накопление квадратов модулей фурье-компонент изображения и основана на том, что модули фурье-компонент менее подвержены искажениям. Однако получаемая в результате автосвёртка изображения позволяет восстановить само изображение лишь в некоторых простейших случаях. С математической точки зрения следовало бы ставить задачу более точно: по серии искажённых изображений объекта найти оптимальную статистическую оценку его истинного изображения. Таким образом, метод Лабейри необходимо дополнить оптимальной оценкой фаз фурье-компонент. В работе [16] было показано, что прямое накопление фаз, предложенное Л. Г. Содиным [17], при наблюдении в оптическом диапазоне неэффективно. Усреднять следует не главное значение искажённой фазы, получаемое как аргумент фурье-компоненты, а неизвестную полную фазу. Для её определения предлагается применить метод отслеживания, вычисляя её значение с учётом главного значения фазы в текущем кадре и полной фазы, найденной в предыдущем кадре. Предложенный метод был назван методом накопления полных фаз [16]. Особенности его применения к изображениям, искажённым влиянием атмосферы, были исследованы в [18], в данной же работе рассматривается обработка с его помощью изображений, полученных орбитальным многозеркальным телескопом.

4. Постановка задачи

Пусть выполнены следующие условия. Наблюдаемый объект удалён на бесконечность. Зеркала субапертур считаются идеально жёсткими, а деформации апертуры связаны с соединяющей их субапертуры конструкцией. Угловой размер объекта достаточно мал, чтобы его косинус считать равным единице. Зависимость изменения фазы на субапертуре от времени, а также совокупность этих изменений на субапертурах представляет собой стационарный гауссов процесс с известной дисперсией и спектральной плотностью. Объект остаётся неизменным на протяжении времени наблюдения. Фазы волны остаются неизменной на протяжении времени экспозиции, которая для упрощения будем полагать мгновенной. Шум регистрации является важным фактором, влияющим на успех реконструкции изображения, однако в рамках данного исследования будем считать, что он отсутствует. Апертурная функция

телескопа $a(\xi, \eta)$ также считается заданной, равной единице на апертуре и нулю за её пределами (рис. 1, а). Оптическая часть телескопа также предполагается идеальной.

Перечисленные выше предположения являются обоснованными с практической точки зрения и необходимыми с точки зрения теории метода накопления полных фаз (см. раздел 3 и [16]). Задача в рамках данной работы ставится как применение метода накопления полных фаз к изображениям, полученным в результате моделирования наблюдений многозеркальным орбитальным телескопом, и оценка полученных результатов. Подход к её решению изложен в следующем разделе.

5. Компьютерное моделирование и эксперимент

Применение отслеживания фазы, которое является необходимой составляющей метода накопления полных фаз, накладывает определённые требования на последовательность исходных изображений [16]. В частности, это касается времени экспозиции и временного интервала между кадрами последовательности. Получение подобных данных на практике, а тем более с использованием орбитального телескопа – весьма дорогостоящий и трудоёмкий процесс. Поэтому исследование метода целесообразно проводить с помощью компьютерного моделирования. В пользу такого подхода говорит и то, что при реальных наблюдениях истинное изображение объекта является неизвестным, следовательно, отсутствует возможность напрямую оценить погрешность метода. Таким образом, компьютерное моделирование процесса получения изображений орбитальным многозеркальным телескопом является необходимой составляющей решения задачи данной работы и первым этапом эксперимента.

Моделирование реализовано с помощью специальной системы компьютерного моделирования астрономических изображений, разработанной и развиваемой в ИРЭ НАНУ. Первый вариант этой системы был частично описан в [19]. Данная система содержит в себе функционал для моделирования псевдослучайных последовательностей с заданными характеристиками, в том числе поля фазовых искажений, формирования апертурной функции для традиционного и многозеркального телескопа, получения искажающего ядра, а также обработки изображений с помощью различных методов, в том числе спекл-интерферометрии и различных версий метода накопления фаз. В данной работе в силу отсутствия атмосферы нет необходимости моделировать поле фазовых искажений, необходимо получить лишь смещение фазы для каждой субапертуры. При этом, однако, не следует забывать, что смещения эти должны быть скоррелированы как между собой (поскольку субапертуры конструктивно связаны), так и во времени. Корреляция между субапертурами обеспечивается приданием случайному процессу заданных спектральных свойств напрямую (в частотной плоскости), в то время как корреляция во временной области обеспечивается l свёртками с прямоугольным ядром шириной L элементов. В рамках данной работы использовалось $l = 5$, а $L = 20; 40; 60$ (изменение корреляции во времени имитирует изменение интервала времени между съёмкой кадров). В остальном процесс моделирования изображений вполне классический и аналогичен описанному в [20].

Второй этап эксперимента состоит в обработке полученной серии изображений. При обработке отдельно накапливаются квадраты модулей и фазы фурье-компонент изображений. Модули фурье-компонент $\rho(k_x, k_y)$ получают непосредственно из результатов наблюдения (изображений), поэтому накопление их квадратов не отличается особой спецификой и полностью соответствует идее Лабейри [15]. Под \mathbf{k} мы здесь понимаем вектор пространственной частоты с компонентами k_x, k_y . Однако,

как уже упоминалось выше, из результатов наблюдений могут быть получены только главные значения фаз $\varphi(k_x, k_y)$. Полная фаза связана с ней выражением

$$\Phi(k_x, k_y) = \varphi(k_x, k_y) + 2\pi m, \quad (1)$$

где m – неизвестная константа.

Второе слагаемое в (1) не влияет на значение соответствующей фурье-компоненты, поскольку оно кратно 2π . Однако в [17] было показано, что при усреднении по n изображениям оно превращается в $2\pi m/n$, где отношение m/n не обязательно целое. При этом, как было показано в [17], накапливать необходимо именно полные фазы фурье-компонент.

Для решения этой проблемы там же был предложен алгоритм отслеживания фазы. Если временной интервал между соседними кадрами последовательности мал, то изменение фазы фурье компонент не велико. В случае наблюдения сквозь атмосферу величина этого интервала определялась временем заморозенности атмосферы [18]. При использовании орбитального телескопа его должна определять статистика факторов, вызывающих искажения фазы в космическом пространстве. В рамках данной работы такое исследование не проводилось, оценивалась лишь принципиальная возможность использования метода накопления полных фаз.

Таким образом, процедура отслеживания фазы предполагает, что разность фаз фурье-компоненты между соседними изображениями не превышает π :

$$\Phi_{i-1}(k_x, k_y) - (\varphi_i(k_x, k_y) + 2\pi m_i(k_x, k_y)) < \pi. \quad (2)$$

Неравенство (2) позволяет найти единственное значение m_i для каждой фурье-компоненты каждого кадра [18]. Полученные в результате значения полной фазы $\Phi_i(k_x, k_y)$ и подлежат накоплению.

После обработки всех кадров последовательности модули и фазы фурье-компонент объединяются для реконструкции полного изображения объекта. В идеальном случае оно должно быть идентично истинному изображению объекта. Однако рассмотренные в [18] обстоятельства приводят к разрушению информации об объекте при наблюдении сквозь атмосферу и, как следствие, к сбоям в отслеживании фаз. Качество реконструкции изображения объекта при этом существенно падает. В следующем разделе мы с помощью компьютерного моделирования рассмотрим подобные эффекты, возникающие при наблюдении с помощью многозеркального орбитального телескопа.

6. Полученные результаты

При моделировании результатов наблюдений в данной работе использовалась конфигурация апертуры многозеркального орбитального телескопа, приведенная на рис. 1, а. На рис. 2, а показано укрупнённое изображение неразрешимого объекта наблюдения, полученное этим телескопом в отсутствие каких-либо искажений (дифракционное изображение). Рис. 2, б иллюстрирует пример аналогичного изображения при наличии фазовых искажений на субапертурах (среднеквадратичное значение искажений $q = \pi$, параметр корреляции искажений между субапертурами $\alpha = 0.01$). На рис. 3, а показано истинное изображение протяжённого объекта, рис. 3, б иллюстрирует неискажённые фазы этого изображения, а на рис. 3, в, г представлен результат наблюдения этого объекта для аналогичных случаев. Сравнение изображений на рис. 2 и рис. 3, в, г наглядно иллюстрирует необходимость борьбы с фазовыми искажениями даже в условиях орбитальных наблюдений.

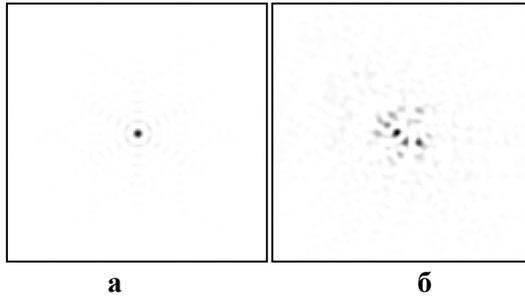


Рис. 2. Изображение неразрешимого объекта, полученное многозеркальным орбитальным телескопом при отсутствии фазовых искажений (а) и при их наличии (б).

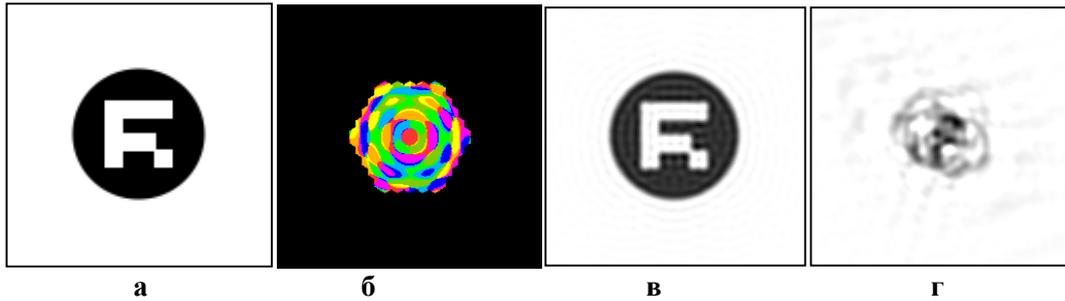


Рис. 3. Истинное изображение протяжённого объекта (а), неискажённые фазы фурье-компонент этого изображения (б), результат его наблюдения при отсутствии (в) наличии (г) фазовых искажений.

Рис. 4 демонстрирует пример реконструкции изображения точечного и протяжённого объекта. Накопленные модули как для неразрешимого (рис. 4, а), так и для протяжённого (рис. 4, б) объектов имеют типичную гауссову форму. На рис. 4, в, ж продемонстрирован результат накопления главных значений фазы фурье-компонент. Сравнивая картину на рис. 4, ж с истинными фазами (рис. 3, б), можно сделать вывод, что накопление главных значений фаз работает лишь на низких частотах. На более высоких частотах, где количество переходов фазы через границы диапазона $[-\pi; \pi]$ велико, результат усреднения стремится к нулю. Соответственно, реконструированное изображение протяжённого объекта (рис. 4, з) весьма близко к изображению точечного источника (рис. 4, г). Накопление полных фаз (рис. 4, д, и) позволяет получить более правдоподобные результаты реконструкции (рис. 4, е, к).

Полученные результаты реконструкции с применением метода накопления полных фаз (рис. 4, е, к) подтверждают его эффективность для обработки результатов наблюдений многозеркальным орбитальным телескопом и аналогичны полученным в [20] для случая наземного телескопа. Это позволяет считать актуальными также выводы о влиянии разрушения информации под действием фазовых искажений на накопление фаз [18] с поправкой на иную природу факторов, вызывающих искажения.

Однако в проведенных ранее исследованиях метода накопления полных фаз имеется вопрос, оставшийся «за кадром». Неравенство (2) включает в себя фазы фурье-компонент в текущем и предыдущем кадре. Таким образом, возникает вопрос начального значения для отслеживания. Поскольку иной информации нет, в качестве начальных значений полных фаз приходится полагать фазы фурье-компонент в первом кадре последовательности. При отсутствии сбоя отслеживания, описанных в [18], начальное приближение не оказывало бы влияния на результат накопления. Любое постоянное смещение сохраняется на протяжении всей последовательности, и после усреднения приводит к тому же самому смещению восстановленной фазы.

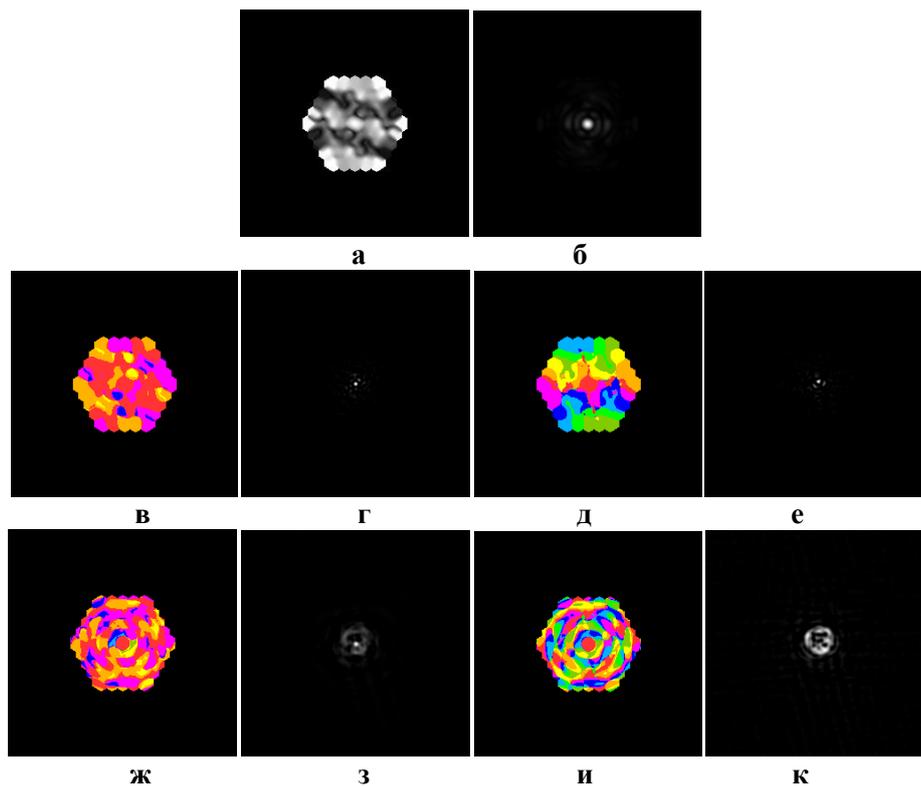


Рис. 4. Результаты накопления модулей (а, б), главных значений фаз (в, ж) и полных фаз (д, и), а также результаты реконструкции изображения объекта (г, з, е, к); представлена реконструкция изображения точечного объекта (а, в, г, д, е) и протяжённого объекта (б, ж, з, и, к); для реконструкции использованы главные значения фаз (г, з) и полные фазы (е, к).

Однако в [21] было показано, что одной из причин возникновения сбоев в отслеживании является приближение модуля фурье-компоненты к 0, что происходит при многократной передаче наблюдательным инструментом пространственной частоты вследствие воздействия на фурье-образ объекта фазовых искажений [18]. Это приводит к идее о возможной зависимости эффективности накопления от конкретной реализации фазовых искажений. Следующий эксперимент был направлен на её проверку.

Была сгенерирована последовательность из 2000 кадров при $l = 5$ и $L = 60$. Однако накопление фазы производилось лишь по 1000 кадров. При этом после добавления к накопителю каждого нового кадра производилась реконструкция изображения объекта, и измерялось среднеквадратичное отклонение реконструированного изображения от дифракционного. В качестве начального брался кадр с индексом от 1 до 1000 через 100 кадров. Таким образом, было получено 10 графиков зависимости среднеквадратичной погрешности реконструкции от количества накопленных кадров. Данные зависимости для среднеквадратичного отклонения фазовых искажений $q = 3\pi/4$ и π представлены соответственно на рис. 5, а, б. Обозначение E_j в легенде соответствуют изменению индекса первого кадра накопления $i = 100 * j$.

Анализируя полученные зависимости, можно сделать два важных заключения. Во-первых, графики для разных начальных кадров весьма подобны. Наблюдается прямая зависимость между смещением начального кадра относительно первого и смещением зависимости к началу координат. Особенно хорошо это видно на рис. 5, а. Данная ситуация подтверждает высказанную выше идею. «Неудачные» места в последовательности будут вызывать сбои в отслеживании не зависимо от точки начала накопления. Поэтому минимум кривой смещается к началу координат вместе с этим

«неудачным» местом до тех пор, пока оно не будет исключено из накопления, после чего характер кривой резко изменяется (можно сравнить кривые E-1 – E-4 с кривой E-5 на рис. 5, а). Вторым выводом является собственно наличие этого минимума, поскольку от накопления сигнала мы ожидаем монотонного убывания погрешности с увеличением длины последовательности. Изучение данного факта поставлено на повестку дня в будущих исследованиях.

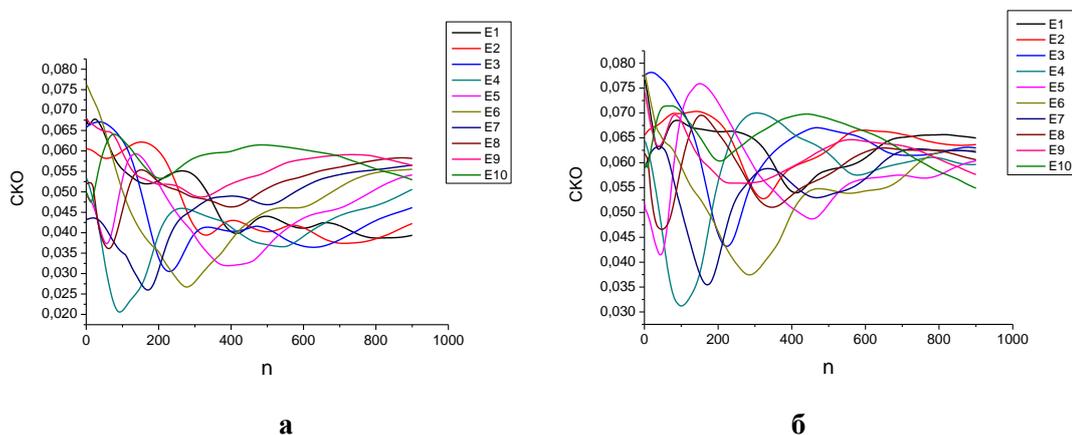


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичной погрешности реконструкции изображения от числа накопленных кадров при различном выборе начала накопления (E1 – E10) для среднеквадратичного отклонения фазовых искажений $3\pi/4$ (а) и π (б).

7. Выводы

В данной работе была в общих чертах рассмотрена специфика фазовых искажений в многозеркальных орбитальных телескопах. Система компьютерного моделирования получения изображений сквозь атмосферу была адаптирована под новые задачи, и с её помощью были получены модели изображений, регистрируемых орбитальным телескопом. Эти изображения позволили подтвердить эффективность применения метода накопления полных фаз для борьбы с фазовыми искажениями при космических наблюдениях. Также была продемонстрирована возможность получения различных результатов реконструкции путём использования для накопления различных частей последовательности. В процессе экспериментов выяснился факт наличия ярко выраженного минимума в зависимости погрешности реконструкции от количества накопленных изображений. Будущие исследования будут направлены на выявление причин немонотонности этой зависимости и возможность выбора количества накапливаемых изображений при различных условиях наблюдения.

Литература

1. Баев, К. Л. Памяти Скиапарелли (к 100-летию со дня рождения) / К. Л. Баев // Мирознание. – 1935. – № 4. – С. 247-252.
2. Паннекук, А. История астрономии / А. Паннекук. – М.: Наука, 1966. – 590 с.
3. Канер, Э. А. К теории распространения волн в среде со случайными неоднородностями / Э. А. Канер // Изв. вузов. Радиофизика. – 1959. – Т. 2, № 5. – С. 827-829.
4. Щеглов, П. В. Проблемы оптической астрономии / П. В. Щеглов. – М.: Наука, 1980. – 272 с.
5. Корниенко, Ю. В. Обработка изображений в ИРЭ НАН Украины / Ю. В. Корниенко // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. ИРЭ им. А. Я. Усикова. – Харьков, 2008. – Т.13, спецвыпуск. – С. 423-445.

6. Канев, Ф. Ю. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования / Ф. Ю. Канев, В. П. Лукин. – Томск, 2005. – 250 с.
7. Корниенко, Ю. В. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, В. Н. Уваров // Доклады АН УССР. Сер. А. – 1987. – № 4. – С. 60-63.
8. Roddier, F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays / F. Roddier // Journal of the optical society of America. Series A. – 1987. – Vol. 4, No. 8. – P. 1396-1401.
9. Oberth, H. The rocket into planetary space / H. Oberth. – Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2014. – ISBN 9783110367560.
10. Циолковский, К. Э. Ракета в космическое пространство : Второе издание. Вступительная заметка на немецком языке А. Л. Чижевского / К. Э. Циолковский. – Калуга: 1-я Государственная типо-литография. Площадь Энгельса, № 3, 1924. – 32 с.
11. Spitzer, Lyman. Astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory // Astronomy quarterly, Vol. 7, No. 3 (1990), p. 131 – 142.
12. Петров, Г. И. Развитие космических исследований / Г. И. Петров // Вестник Академии наук СССР. – 1969. – № 5. – С. 65-71.
13. Zimmerman, R. The Universe in a Mirror: The Saga of the Hubble Space Telescope and the Visionaries Who Built It / R. Zimmerman. – Princeton University Press, 2010. – ISBN 0691146357 / 9780691146355.
14. Scientific Discovery with the James Webb Space Telescope [Электронный ресурс] / ARTICLE HISTORY Compiled July 17, 2018 Режим доступа: <https://www.jwst.nasa.gov/about.html>.
15. Labeyrie, A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images / A. Labeyrie // Astronomy and astrophysics. – 1970. – Vol. 6, No 1. – P. 85-87.
16. Содин, Л. Г. О возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере / Л. Г. Содин // Письма в астрономический журнал. – 1976. – Т. 2. – С. 554–558.
17. Корниенко, Ю. В. О реконструкции неискаженного изображения объекта по серии его изображений, искаженных средой со случайными неоднородностями показателя преломления / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Доповіді АН України. – 2010. – № 2. – С. 83-89.
18. Корниенко, Ю. В. Механизм разрушения информации при наблюдении сквозь неоднородную среду / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 39-48.
19. Корниенко, Ю. В. Обработка изображений в ИРЭ НАН Украины / Ю. В. Корниенко // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. ИРЭ им. А. Я. Усикова. – Харьков, 2008. – Т.13, спецвыпуск. – С. 423-445.
20. Корниенко, Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Кинематика и физика небесных тел. – 2011. – Т. 27, № 6. – С. 52-63.
21. Корниенко, Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу II / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Кинематика и физика небесных тел. – 2012. – Т. 28, № 2. – С. 45-58.