



УДК 681.782.44

Интерферометрический метод формирования изображений как основа построения многозеркальных телескопов

В.В. Пугач, Ю.В. Корниенко

Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

В работе рассмотрена проблема преодоления мешающего влияния земной атмосферы при астрономических наблюдениях. Дан краткий обзор различных путей её решения и более подробно описан интерферометрический метод формирования изображений, основанный на измерении функции когерентности электромагнитного поля световой волны, приходящей от объекта. На компьютерной модели проведено сравнение традиционного телескопа и многозеркального телескопа, построенного по схеме многолучевого интерферометра. Показано преимущество интерферометрического телескопа перед традиционным.

ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЯК ОСНОВА ПОБУДОВИ БАГАТОДЗЕРКАЛЬНИХ ТЕЛЕСКОПІВ, Пугач В.В., Корниенко Ю.В. — В роботі розглянута проблема подолання завад земної атмосфери при астрономічних спостереженнях. Поданий короткий огляд альтернативних методів формування зображень та представлені результати дослідження інтерферометричного методу, заснованого на вимірюванні функції когерентності електромагнітного поля в оптичному діапазоні довжин хвиль. На комп'ютерних моделях продемонстровані його переваги перед традиційним способом спостереження астрономічних об'єктів за допомогою телескопу

INTERFEROMETRIC METHOD OF THE IMAGING AS THE BASIS OF CONSTRUCTION OF MULTIMIRROR TELESCOPES, by Pugach V. V., Kornienko Yu. V. — The given work is devoted to the problem of overcoming the Terrestrial atmosphere interference during astronomical observations. The interferometric imaging been proposed earlier is investigated in the work. This method is based on measuring the coherence electromagnetic field function in the optical wave band. The method advantages over the traditional method of astronomical observation using the telescope and the multi-mirror telescope of the same configuration is demonstrated on computer simulation.

Стремление исследовать всё более слабые астрономические объекты со всё более высоким угловым разрешением приводит к необходимости создания телескопов со всё большей площадью входной апертуры. Однако создание телескопов с диаметром зеркала более 10 м наталкивается на серьёзные технологические трудности. Поэтому возникла идея многозеркального телескопа, в котором входная апертура составляется из большого числа зеркал небольшого размера. При этом возникает проблема фазировки зеркал, то есть обеспечение синфазного сложения изображений, построенных каждым зеркалом в отдельности. Решение этой задачи может оказаться сложным из-за неконтролируемого перемещения зеркал под влиянием температурных колебаний, вибраций и старения материалов. Эта проблема заслуживает заблаговременного исследования. Возможны различные подходы к решению этой проблемы. Один из них состоит в построении телескопа по адаптивной схеме. Этот подход был предложен с целью преодоления мешающего влияния атмосферы путём компенсации быстро меняющихся со временем фазовых искажений волны, вызываемых атмосферой, в процессе наблюдений. Этот подход может быть с равным успехом применён и для компенсации медленно меняющихся фазовых искажений обусловленных неправильным положением зеркал. Другой возможный подход состоит в построении многозеркального телескопа по схеме многолучевого интерферометра, который является развитием идеи звёздного интерферометра Майкельсона. При таком подходе оптическая система телескопа строит не непосредственно изображение объекта, а его интерферограмму особого типа. Постдетекторная обработка этой интерферограммы позволяет воссоздать изображе-

ние объекта, из которого исключены искажения, вызываемые атмосферой и расфазировкой зеркал. Настоящая статья призвана показать целесообразность этого подхода.

1. Краткая история вопроса

Телескоп как астрономический инструмент возник в 1609 году, когда Галилей, по всей вероятности, уже знавший принцип устройства зрительной трубы, сам составил комбинацию из собирающего очкового стекла и рассеивающей линзы. Он давал всего лишь трёхкратное увеличение и, обладая всеми возможными недостатками оптической системы, конечно, не мог служить для сколько-нибудь серьёзных наблюдений. Постепенное улучшение качества оптики и развитие технологии изготовления оптических инструментов для наблюдения небесных объектов давало возможность строить инструменты всё большего диаметра. Значительных успехов в деле создания телескопов большого диаметра достиг Гершель [1]. Однако со временем он заметил, что земная атмосфера значительно ограничивает разрешающую способность телескопа при наблюдении астрономических объектов.

В 1877 г. во время великого противостояния Марса Скиапарелли открыл знаменитые «марсианские каналы». Однако Антониади в 1909 г., наблюдая Марс в более мощный телескоп, никаких каналов не увидел. Это было удивительно и вызвало бурную дискуссию в научных кругах. Сопоставление рисунков Скиапарелли с первыми фотографиями Марса, полученными Г.А.Тиховым в том же году показало, что на фотографиях неразличимы многие детали, видимые при визуальных наблюдениях. Тихов экспериментальным путём установил, что качество фотографии снижается с удлинением экспозиции и увеличением апертуры инструмента. Из этого был сделан вывод, что снижение качества является результатом усреднения по времени атмосферных искажений. Дальнейшие исследования подтвердили правильность такого понимания. Оказалось, что мгновенное изображение значительно меньше подвержено искажающему влиянию атмосферы. Это обстоятельство стали использовать для астрономической фотографии. Но несмотря на появление всё более крупных телескопов, позволяющих наблюдать всё более слабые объекты, ни изучение пространственной структуры объектов, ни разделение тесных звёздных пар с разрешением превышающим $1'' - 2''$ не было возможным, хотя в отсутствие атмосферы эти телескопы позволили бы обеспечить разрешение на два порядка более высокое.

2. Простейшая теория

Предположим, мы имеем плоскопараллельный слой статистически однородной среды с показателем преломления

$$n(\mathbf{r}) = n_0 + \nu(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $\nu(\mathbf{r})$ — случайная добавка, зависящая от точки в пространстве и представляющая собой реализацию стационарного гауссова процесса с нулевым средним значением, среднеквадратичным значением ν_0 и радиусом корреляции l . На этот слой падает плоская монохроматическая волна с волновым вектором \mathbf{k}_0 , направленным по нормали к его границе, т.е. вдоль оси z . При $\nu(\mathbf{r})$ волна проникает в слой, оставаясь плоской, и продолжает распространяться в нем в направлении оси z . В среде ее волновой вектор \mathbf{k} равен $n_0\mathbf{k}_0$, поэтому ее полная фаза равна $n_0\mathbf{k}_0z$. Выходя из слоя, эта волна имеет фазу, отличающуюся от фазы на верхней границе на величину $n_0\mathbf{k}_0h$, где h — толщина слоя.

При малом отличии $n(\mathbf{r})$ от n_0 волновой вектор \mathbf{k} мало отличается по направлению от первоначального. Поэтому каждый луч можно приближенно считать прямой, параллельной оси z . Тогда набег фазы волны при прохождении сквозь слой можно считать равным интегралу вдоль луча

$$\Delta\varphi = n_0k_0h + k_0 \int_0^h \nu(z) dz. \quad (2)$$

Чтобы оценить значение этого интеграла, разобьем интервал интегрирования на участки длиной l . Тогда интеграл по одному такому участку представляет собой случайную гауссову величину с нулевым средним значением и дисперсией порядка $(\nu_0 l)^2$. Значения этой случайной величины на разных участках интегрирования почти независимы между собой, поэтому их сумма представляет собой случайную гауссову величину с нулевым средним значением и дисперсией $(\nu_0 l)^2 h/l$, т.е. со среднеквадратичным значением $\nu_0 \sqrt{lh}$. Поэтому при выходе из слоя фаза волны будет содержать случайные возмущения величиной порядка $k_0 \nu_0 \sqrt{lh}$ и горизонтальным размером l . В результате фазовый фронт волны, т.е. поверхность с постоянным значением фазы, будет искривлен таким образом, что его отклонение от первоначального положения составит величину порядка $\nu_0 \sqrt{lh}$, наклон порядка $\nu_0 \sqrt{h/l}$, а кривизна — порядка $\nu_0 \sqrt{h/l^3}$. Типичное значение радиуса кривизны фронта составит при этом величину порядка $(\nu_0 \sqrt{h/l^3})^{-1}$.

3. Влияние фазовых искажений на изображение при наблюдении с помощью телескопа малого диаметра

Телескопом малого диаметра мы будем называть такой телескоп, размер апертуры которого мал по сравнению с типичным размером атмосферных неоднородностей. Пусть телескоп с диаметром $D \ll R$ расположен непосредственно за искажающим слоем, а толщина слоя мала по сравнению с радиусом кривизны искаженного волнового фронта. Предположим, что мы наблюдаем с его помощью звезду (т.е. точечный объект), расположенную в направлении оси z . Фазу в некоторой точке x, y на апертуре телескопа можно приближенно представить с помощью ряда Тейлора в виде

$$\varphi(x, y) \approx \varphi(0) + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=0, y=0} \Delta x + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{x=0, y=0} \Delta y + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right|_{x=0, y=0} \Delta x^2 + \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right|_{x=0, y=0} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right|_{x=0, y=0} \Delta y^2 \quad (3)$$

В этой формуле нулевой член $\varphi(0)$ определяет фазу на оси телескопа, слагаемые первого порядка описывают наклон фазового фронта, а второго — его кривизну. Поскольку $x \ll D/2$, $y \ll D/2$, то для достаточно малых D можно пренебречь вторым и более высокими членами ряда. Тогда получается, что влияние фазовых искажений в этом приближении проявляется только в наклоне фазового фронта, т.е. эквивалентно изменению направления на звезду. Это явление принято называть атмосферным дрожанием.

4. Формирование изображения большим телескопом

Большим телескопом мы будем называть телескоп, размер апертуры которого значительно больше типичного размера атмосферных неоднородностей. При этом в пределах апертуры помещается большое количество атмосферных неоднородностей. В этом случае подход к описанию математической ситуации несколько иной.

Как известно, в отсутствие искажающей среды электрическое поле входящей световой волны в апертурной плоскости телескопа представляет собой фурье-образ поля на поверхности объекта, а влияние среды проявляется в добавлении к фазе волны случайной добавки δ . Поэтому искаженное электрическое поле волны $\tilde{E}(\mathbf{p})$ в апертурной плоскости связано с неискаженным полем $\tilde{E}_0(\mathbf{p})$ соотношением

$$\tilde{E}(\mathbf{p}) = \tilde{E}_0(\mathbf{p}) e^{i\delta(\mathbf{p})}. \quad (4)$$

Поле в фокальной плоскости телескопа $E(\mathbf{r})$ является фурье-образом поля в передней фокальной плоскости, поэтому:

$$E(\mathbf{r}) = e^{i\alpha} \int \tilde{E}_0(\mathbf{p}) e^{i\delta(\mathbf{p})} \tilde{a}(\mathbf{p}) e^{i\mathbf{p}\mathbf{r}} dS_x, \quad (5)$$

где фазовый множитель перед интегралом в случае объекта малого углового размера можно считать постоянным. Зная, что интенсивность поля

$$I(\mathbf{r}) = \langle E^*(\mathbf{r}) \cdot E(\mathbf{r}) \rangle, \quad (6)$$

(где треугольные скобки обозначают усреднение по статистическому ансамблю), подставляя в него (4), получим равенство, учитывающее атмосферные искажения фазы:

$$I(\mathbf{r}) = \iint \tilde{I}_0(\mathbf{p}) \tilde{A}(\mathbf{p}) e^{i\mathbf{p}\mathbf{r}} dS_x, \quad (7)$$

где

$$\tilde{A}(\mathbf{p}) = \int \tilde{a}(\mathbf{p}') \tilde{a}(\mathbf{p}' + \mathbf{p}) e^{i[\delta(\mathbf{p}'+\mathbf{p}) - \delta(\mathbf{p}')]} dS_x \quad (8)$$

— пространственно-частотная характеристика системы телескоп–атмосфера. Она является фурье-образом аппаратной функции системы телескоп–атмосфера $A(\mathbf{r})$. Изображение, сформированное телескопом при наличии атмосферных искажений, является сверткой идеального изображения $I_0(\mathbf{r})$ с этим ядром

$$I(\mathbf{r}) = \int A(\mathbf{r} - \mathbf{r}') I_0(\mathbf{r}') dS_{\mathbf{r}}. \quad (9)$$

Это ядро имеет весьма сложную форму; его общий размер порядка величины дрожания, а размер мелких деталей равен дифракционному разрешению телескопа.

5. Пути решения проблемы мешающего влияния атмосферы

Их условно можно разделить на два направления — пассивный и активный. К пассивному направлению можно отнести, например, выбор места наблюдения. Давно известно, что есть места, как правило, высоко в горах, где состояние атмосферы позволяет получить очень хорошие условия наблюдения. Такие места с рекордным астроклиматом и используются для строительства астрономических обсерваторий (Пик Дю-Миди во Франции, Майданак в Узбекистане, Паранал в Чили.) Другим вариантом выбора места наблюдения можно считать вывод инструмента за пределы атмосферы (или, по крайней мере, тропосферы). Дешевле всего это делать на аэростатах или самолётах. И подобный подход давал свои результаты. Так в марте 1977 года специалисты Корнельского университета, наблюдая с борта самолёта с помощью 36-дюймового телескопа затмение звезды для определения диаметра Урана и толщины его атмосферы, открыли пять колец. Самым радикальным способом решения проблемы влияния атмосферных искажений путём выбора места наблюдения является вывод телескопа за пределы атмосферы. Единственный на сегодняшний день такой телескоп (космический телескоп имени Хаббла) был выведен на орбиту в апреле 1990 года. Кроме проблем с оптикой телескопа обнаружились трудности с его стабилизацией — при пересечении границы света и тени панели солнечных батарей из-за неравномерного нагрева несущей конструкции совершают колебания, что вызывает сдвиги изображения звёзд в фокальной плоскости до $0.1''$ (ранее заявленная точность стабилизации — $0.007''$) [2]. Таким образом, кроме чрезвычайно высокой стоимости, как самого проекта так и дальнейшей эксплуатации, к недостаткам следует отнести присутствие фазовых искажений, природа возникновения которых и масштаб иные.

К активным методам следует отнести прежде всего различные виды обработки полученных изображений. По-видимому, первым подобную обработку предложил Б.Лио. Он предложил делать один отпечаток с нескольких хороших негативов. Все негативы поочерёдно печатались на один лист фотобумаги с тщательным совмещением изображений. В результате всё случайное на негативах печаталось с многократной недодержкой, а всё общее, что есть на всех негативах, выявлялось. Качество отпечатка возрастает пропорционально корню квадратному из количества негативов. В разное время был предложен и ряд других способов обработки астрономических изображений средствами фотографии, но появление в 40-х годах электронной вычислительной техники открыло возможность цифровой обработки изображений. В 1967 году И.К.Коваль [3] одним из первых предложил описывать атмосферное замытие астрономического изображения интегральным уравнением и восстанавливать изображения путем решения этого уравнения. В работе [4] была показана некорректность этой задачи и указан путь ее регуляризации, приводящий к винеровскому фильтру. Несколько ранее [5] без специального обоснования было предложено применение винеровского фильтра для решения

подобных задач; эта возможность была реализована с помощью когерентно-оптической установки [6]. Однако возможности этого способа устранения искажений оказались весьма ограниченными из-за сильного подавления высших пространственных частот при усреднении изображения по промежутку времени, большому по сравнению со временем замороженности атмосферы.

Нельзя обойти вниманием совсем иное направление преодоления мешающего влияния атмосферы. В 50-е годы для компенсации влияния атмосферной турбулентности в наземных телескопах появилась идея адаптивных зеркал, то есть зеркал с управляемой в реальном времени формой поверхности. Адаптивная оптика, впервые предложенная Бэбкоком [7], представляла собой семейство методов для измерения и коррекции в реальном времени вызванных турбулентностью искажений до того как изображение будет зарегистрировано. Работа адаптивной оптической системы обеспечивается наличием датчика волнового фронта, который измеряет величины, связанные с мгновенными искажениями в плоскости зрачка телескопа. Основным элементом является деформируемое зеркало, изменяющее свою форму в соответствии с прилагаемым напряжением так, чтобы скомпенсировать в реальном времени вызванные турбулентностью искажения. По словам одного из ведущих специалистов по проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу, М.Рогеманна [8], реальная эффективность АОИ системы «колеблется в довольно широком диапазоне, от почти полного отсутствия улучшения до достижения почти дифракционного качества». Основная причина здесь в большом диапазоне изменения параметров атмосферы, ответственных на искажение изображения удаленного источника, среди которых — статистика размеров и времени жизни турбулентных неоднородностей, эффективная высота и толщина слоя, вносящего основной вклад в возмущения фронта волны на апертуре телескопа, и другие. Существует и другие факторы, снижающие полезность адаптивных оптических систем. Например, для датчика волнового фронта требуется достаточно яркая опорная звезда. Недостаток естественных опорных источников в видимом диапазоне существенно ограничивает применимость адаптивных систем. Этот момент явился стимулом для разработок искусственных опорных источников, основанных на рассеянии света лазера на различных молекулярных и атомных смесях в атмосфере. В ИК диапазоне количество естественных опорных источников заметно больше, однако, в этом диапазоне существенно меньше дифракционное разрешение. Далее, адаптивная система не может полностью устранить вызванные турбулентностью искажения из-за конечности размера субапертуры датчика волнового фронта и расстояния между соседними субапертурами, конечного числа степеней свободы деформируемого зеркала и из-за шума измерительного устройства датчика. Неизопланатизм, связанный с конечным угловым расстоянием между объектом и опорной звездой, ограничивает корректируемое поле зрения адаптивной системы до нескольких десятков микроардиан в видимом диапазоне. И всё же некоторые результаты наблюдений [9] с использованием адаптивных систем в сравнении с данными, полученными с орбитального телескопа, говорят о перспективности данного направления.

К концу 1960-х годов было осознано, что фурье-компоненты мгновенного изображения значительно меньше подавлены атмосферой, чем после усреднения их по времени, и главное влияние атмосферы состоит в искажении их фаз. На этом факте основан метод Лабейри (спеклинтерферометрия) [10], позволяющий путем накопления больших серий мгновенных изображений восстановить неискаженный пространственный спектр и, следовательно, автокорреляционную функцию объекта. В простейших случаях это позволяет даже восстановить изображение объекта, однако вопрос о том, насколько широк класс таких случаев, оставался открытым.

6. Новые способы формирования изображений

Одновременно с усовершенствованием процедуры регистрации изображений с помощью традиционного телескопа и методов их постдетекторной обработки развивались и новые способы формирования изображений, представляющие собой более радикальный путь борьбы с мешающим влиянием атмосферы. В 1958 г. Дженисон [11] обратил внимание на то, что если три пространственные частоты, векторная сумма которых равна нулю, передаётся с помощью трёх антенн, то произведение

соответствующих им фурье-компонент изображения не подвержено влиянию фазовых искажений. Это обстоятельство теперь широко используется в радиоастрономии. В 1973 г. Родс и Гудмен [12] показали, как можно распространить этот принцип на оптический диапазон. С этой целью они предложили диафрагмировать телескоп безызбыточной маской и формировать изображения объекта последовательно с разными масками из некоторого набора. Последующая обработка этих изображений позволяет сформировать по ним неискаженное изображение объекта. Этот метод, будучи безупречным в принципиальном отношении, оказывается крайне неэффективным практически, так как каждая такая маска выделяет на апертуре телескопа лишь малую часть площади, в результате чего большая часть светового потока безвозвратно теряется. В работе [13] было предложено техническое усовершенствование этого метода, состоящее в одновременном размещении всех необходимых масок на апертуре одного телескопа и позволяющее получить все необходимые изображения за одну экспозицию без потери светового потока.

Было предложено много других способов формирования астрономических изображений, отличных от традиционного. К наиболее распространённым можно отнести такие: метод сдвига суммы [14]; усреднение фазы [15]; методы, основанные на измерении градиента фазы [16]; спекл-маскирование (тройные корреляционные функции, биспектральный анализ) [17]; метод экспоненциальных множителей [18]. Все они были основаны на использовании традиционного телескопа в сочетании с теми или иными дополнительными приспособлениями, носили, как правило, компромиссный характер и давали частичный эффект без претензий на достижение принципиально возможного предела.

Радикальным решением вопроса стал предложенный в работах [19, 20] интерферометрический метод формирования изображений, основанный на введённом понятии пространственного накопления сигнала. Суть этой идеи состоит в следующем.

7. Интерферометрический подход к формированию изображения

Формирование изображения объекта с помощью линзы возможно потому, что в природе имеет место теорема Ван-Циттерта–Цернике [21], в силу которой некогерентный свет, пришедший от удалённого объекта к наблюдателю сквозь однородную среду, несёт на себе информацию о распределении яркости по поверхности объекта. Эта информация закодирована в виде функции когерентности приходящей волны, которая равна фурье-образу яркости как функции точки на поверхности объекта. Линза осуществляет обратное преобразование Фурье этой функции когерентности и, таким образом, формирует в фокальной плоскости исходную функцию яркости. В радиоастрономии, где до настоящего времени изображающие оптические системы, как правило, не применяются, понимание этого факта открыло возможность для формирования изображения исследуемого объекта путём прямого измерения функции когерентности и последующего выполнения над ней фурье-преобразования. Попутно при этом открывается возможность исключить фазовые искажения атмосферного происхождения, основанная на следующем. В отсутствие искажающей среды результат измерения функции когерентности для некоторой пары точек в плоскости, где расположен наблюдатель, не изменится, если эту пару точек сдвинуть как целое, сохраняя значение соединяющего их вектора. Поскольку её значение равно фурье-компоненте яркости, это означает, что яркость объекта закодирована в приходящей от него волне многократно, т.е. с избыточностью. Как и обычно, эта избыточность создаёт возможность при частичном разрушении информации восстановить её в неискажённом виде. Это достигается путём накопления сигнала, т.е. многократного измерения функции когерентности для разных пар точек с одинаковым значением соединяющего их вектора. Такое накопление вполне аналогично обычному накоплению сигнала, однако осуществляется не во времени, а в пространстве и потому было названо в работе [19] пространственным накоплением сигнала. Если приходящая от объекта волна подвергается случайным фазовым искажениям под влиянием атмосферы, измеренное значение функции когерентности отличается от истинного, в отсутствие искажений. Накопление сигнала позволяет уменьшить или исключить вли-

яние искажений. Успех этой попытки зависит от процедуры накопления, т.е. от способа, которым вычисляется оценка истинного значения по результатам измерений. При этом должна существовать некоторая оптимальная процедура накопления, эффект от которой нельзя превзойти никакими усовершенствованиями и которую можно либо реально осуществить, либо, по крайней мере, хорошо приблизить с помощью другой, реально осуществимой процедуры. Такая процедура должна быть найдена путём теоретического анализа задачи. Этот подход можно было бы успешно использовать и в оптическом диапазоне, если бы удалось найти эффективный способ прямого измерения функции когерентности, не сопряжённый с существенными потерями светового потока и пригодный в условиях фазовых искажений от турбулентной атмосферы.

В 1921 году Майкельсон предложил двухлучевой интерферометр [22] для измерения диаметров звёзд, не разрешимых при обычных астрономических наблюдениях. В фокальной плоскости этого инструмента значение измеряемой функции когерентности представлено контрастностью полос, возникающих при интерференции световых потоков от двух объективов. Аргументом функции когерентности является вектор, соединяющий центры объективов. Развитием этой идеи и является многолучевой интерферометр, предложенный в работах [19,20] и более подробно описанный в работе [23]. Входная апертура этого интерферометра состоит из большого числа субапертур, и интерференционная картина создаётся всеми парами, которые образуются субапертурами. Поэтому она представляет собой наложение многих систем полос, каждая со своим периодом и своей ориентацией, аналогичная системе полос в интерферометре Майкельсона. Благодаря применённому в схеме интерферометра преобразованию избыточной входной апертуры в безыбыточную все эти картины различны и могут быть разделены с помощью фурье-преобразования интерферограммы. Таким образом осуществляется измерение функции когерентности по контрасту интерференционных полос. В работах [19, 20] описана процедура оптимального пространственного накопления сигнала при наблюдении с помощью такого интерферометра. При отсутствии шума регистрации, когда единственным видом шума является фазовый шум атмосферы, оптимальное накопление состоит в геометрическом усреднении результатов измерения функции когерентности по парам точек в плоскости наблюдателя. (В неявной форме оно было предложено в работе [18], но как временное накопление сигнала. Оно также присутствует, опять-таки в неявном виде, и при измерениях с помощью интерферометра Майкельсона.) Сравнение многолучевого интерферометра с традиционным телескопом показывает, что телескоп осуществляет оптическим путём пространственное накопление сигнала другого типа, а именно, арифметическое усреднение. Такое накопление является оптимальным при наличии аддитивного гауссова шума регистрации, но при отсутствии фазовых искажений. Если имеют место слабые фазовые искажения, при которых возмущение фазы мало по сравнению с единицей, такое накопление является приближённо оптимальным. Однако для реального состояния атмосферы, когда возмущение фазы превышает 2π и может достигать 6π и более, такое накопление резко отличается от оптимального. Это объясняет неэффективность традиционного телескопа при наблюдении сквозь реальную атмосферу.

Реальная возможность уменьшить влияние атмосферных искажений при наблюдении с помощью многолучевого интерферометра (в отличие от интерферометра Майкельсона) даже превышает то, что может дать геометрическое усреднение. Это связано с тем, что фазовое искажение в атмосфере является функцией точки в плоскости наблюдателя. Поэтому каждой субапертуре интерферометра можно поставить в соответствие в данный момент времени некоторое значение фазового искажения. Это значение оказывает влияние на все фурье-компоненты изображения, передаваемые с участием данной субапертуры. Поэтому связь между истинными фазами фурье-компонент изображения и измеренными значениями фаз функции когерентности становится более жёсткой, и появляется возможность исключить фазовые искажения из результатов измерения путём решения системы уравнений:

$$\varphi_\nu + \delta_i - \delta_k = \psi_\mu, \quad (10)$$

где φ_ν — истинное значение, а ψ_μ — измеренное значение фазы фурье-компоненты функции ко-

герентности на паре субапертур с номерами i, k ; δ_i и δ_k — фазовые искажения на соответствующих субапертурах. Если апертура интерферометра состоит из n субапертур и передаёт m пространственных частот, эта система содержит $n(n-1)/2$ уравнений с $m+n$ неизвестными (m фаз фурье-компонент изображения и n фазовых искажений). Легко видеть, что с ростом n появляется возможность таких конфигураций апертуры, для которых эта система содержит достаточно уравнений и становится определённой. Это даёт возможность полностью исключить фазовые искажения из результатов измерения и восстановить истинные значения фаз фурье-компонент изображения с точностью, ограниченной лишь величиной шума регистрации.

Однако при этом возникает вопрос, требующий отдельного рассмотрения. Существует много идей, как получить хорошее изображение, безусловно правильных и дающих желаемый эффект в воображаемом идеальном случае, когда шум регистрации отсутствует, однако теряющих эффективность даже в присутствии слабого шума. Необходимо выяснить, не принадлежит ли и данная идея к этой категории.

С этой целью была предпринята серия исследований [24, 25, 26]. В этих работах введены понятия информационной эффективности интерферометра и коэффициента устойчивости к фазовым искажениям. Показано, что атмосферные искажения лишь незначительно (на проценты) снижают информативность результатов измерения интерферометром, какой она была бы в отсутствие фазовых искажений.

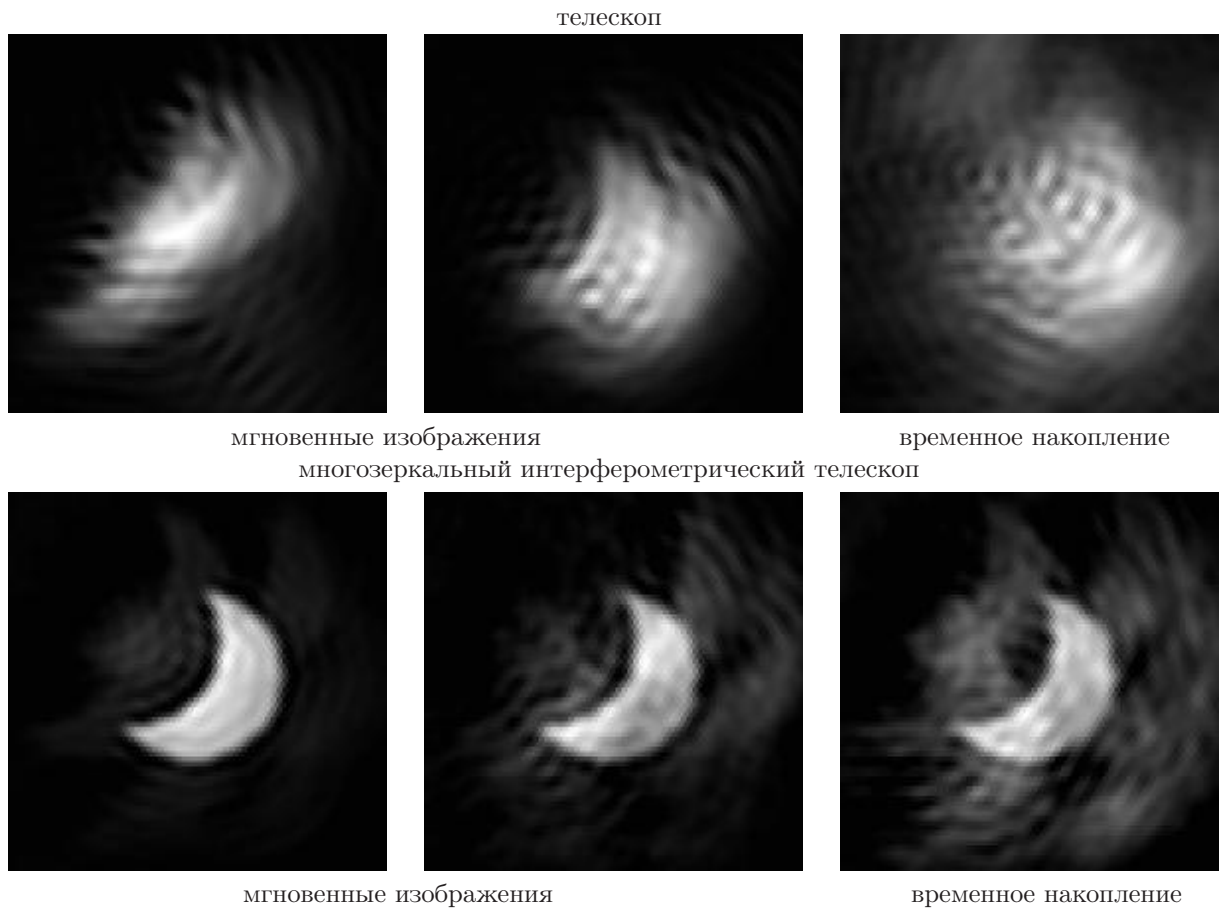


Рис. 1. Результаты моделирования телескопа и многозеркального интерферометрического телескопа (изображения инвертированы — прим. ред.)

Возникает также вопрос и о возможности использования интерферометра при наблюдении сквозь неизопланатичную атмосферу, поскольку большая часть рассмотрения проведена для случая изопланатичной атмосферы. Этот вопрос исследован в работе [19], где показано, что в случае слабой неизопланатичности атмосферы метод может быть успешно применён с условием некоторого усложнения процедуры обработки.

8. Моделирование наблюдений с помощью обычного телескопа

Компьютерное моделирование оптической системы является эффективным инструментом для её исследования и усовершенствования. На рис. 1 приводятся результаты моделирования системы идеальный телескоп–атмосфера, которые иллюстрируют сказанное выше о влиянии случайных искажений фазового фронта в атмосфере на изображение астрономического объекта.

На рис. 1 (верхний ряд) показана модель наблюдения затмения в двойной звёздной системе. Радиус корреляции фазовых искажений 30 см (эффективный размер неоднородностей 60 см), среднеквадратичная величина фазовых искажений $\pm 3\lambda$. Диаметр моделируемого телескопа равен трём метрам. Из результатов моделирования видно, что при большом диаметре смещение заметно не выражено, а от первоначальной дифракционной картины не остаётся ничего; она превращается в картину интерференции световых потоков, прошедших через разные атмосферные неоднородности.

9. Моделирование многозеркального интерферометрического телескопа

Для моделирования была выбрана конфигурация входной апертуры, приведенная на рис. 2а. Пунктиром показан контур апертуры обычного телескопа диаметром 3 м, с которым сравнивается многозеркальный интерферометрический телескоп. На этом же рисунке показана конфигурация выходной апертуры (закрашенные кружки) и схема отображения входной апертуры на выходную (рис. 2б). Размер субапертуры полагаем 50 см, что дает размер входной апертуры 3,5 м. Для большей наглядности в качестве функции, описывающей фазовые искажения, используется одна и та же реализация случайного процесса для модели телескопа и многозеркального интерферометрического телескопа. Такими образом, все изображения получаются в максимально сходных условиях, что позволяет получить убедительное доказательство превосходства интерферометрического метода формирования изображений над традиционным. Кроме того, это превосходство видно как на мгновенных изображениях, так и на изображениях, полученных путём временного накопления.

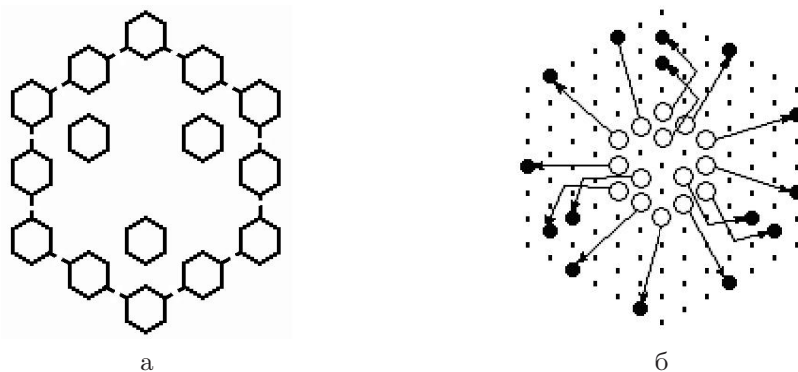


Рис. 2. Конфигурация входной (а) и выходной апертуры со схемой переноса частотных окон (б)

Закключение

Стремление построить телескоп с возможно большей площадью входной апертуры неизбежно приводит к необходимости использования многозеркальной конструкции независимо от того где будет расположен телескоп: на поверхности Земли или на околоземной орбите. Это порождает проблему преодоления фазовых искажений, вызываемых влиянием земной атмосферы или деформацией оптической конструкции. Эффективным способом решения проблемы является создание телескопа по схеме многолучевого интерферометра. Это имеет смысл принимать во внимание при разработке новых проектов больших астрономических телескопов.

1. *Herschel W.* The scientific papers. — London: The Royal Society and the Royal Astronomical Society, 1912.
2. *Fanberg R.T.* Space Telescope Hubble // *Sky & Telescope*. — 1990. — **79**. — P. 366–375.
3. *Коваль И.К.* О возможности восстановления изображения астрономического объекта, искаженного влиянием земной атмосферы // *Астрон. циркуляр*. — 1965. — № 317. — С. 1–20.
4. *Дудинов В.Н.* О возможности учета погрешностей, вызванных замытием изображения планет // *Астрон. журн.* — 1969. — **46**, вып. 5. — С. 1064–1073.
5. *Helstrom C.W.* Image reconstruction by the method of least squares // *J. Opt. Soc. Amer.* — 1967. — **57**, № 3. — P. 297–303.
6. *Дудинов В.Н., Цветкова В.С., Кришталь В.С. и др.* Когерентно-оптический вычислитель Харьковского университета // *Вестн. Харьк. ун-та*. — 1977. — **160**. — С. 65–76.
7. *Babcock H.W.* The possibility of compensating astronomical seeing // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 1953. — **65**. — P. 229–236.
8. *Roggemann M.C., Welsh B.M., Fugate R.Q.* Improving the resolution of ground-based telescopes // *Reviews of Modern Physics*. — 1997. — **69**. — P. 437–505.
9. *Brandner W., Rousset G., Lenzen R., et al.* NAOS+CONICA at YEPUN: First VLT Adaptive Optics System Sees First Light // *The ESO Messenger*. — 2002. — № 107. — P. 1–6.
10. *Labeyrie A.* Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images // *Astron. and Astrophys.* — 1970. — **6**. — P. 85–87.
11. *Jenison R.C.* A phase sensitive interferometer technique for the Fourier transform spatial brightness distributions of small angular extent // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1958. — **118**. — P. 278–384.
12. *Rhodes W.T., Goodman J.W.* Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration // *J. Opt. Soc. Amer.* — 1973. — **63**, № 6. — P. 647–657.
13. *Уваров В.Н.* О возможности получения изображений с дифракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную среду // *Докл. АН УССР, Сер. А*. — 1979. — № 10. — С. 839–841.
14. *Bates R.H.T.* A stochastic image restoration procedure // *Opt. Comm.* — 1976. — **19**. — P. 240–244.
15. *Содин Л.Г.* Возможности достижения дифракционного предела разрешения при работе телескопа в турбулентной атмосфере // *Письма в АЖ*. — 1976. — **2**. — С. 554–558.
16. *Knox K.T., Thompson B.J.* Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure photographs // *Astrophys. J. Letters*. — 1974. — **193**. — L45–L48.
17. *Bartelt H., Lohmann A.W., Wirmitzer B.* Phase and amplitude recovery from bispectra. // *Appl. Opt.* — 1984. — **23**. — P. 3121–3129.
18. *Плужник Е.А.* Применение метода экспоненциальных множителей при восстановлении дифракционно-ограниченных изображений протяженных астрономических объектов по данным спекл-интерферометрии. // *Астрон. Ж.* — 1996. — **73**. — С. 146–152.
19. *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.
20. *Roddier F.* Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays // *J. Opt. Soc. Amer.* — 1987. — A4, № 8. — P. 1396–1401.

21. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
22. *Michelson A.A., Piese F.G.* Measurement of the diameter of Alpha Orionis with interferometer // *Astrophys. J.* — 1921. — **53**. — P. 249–259.
23. *Корниенко Ю.В.* Интерферометрический подход к проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу // *Кин. и физ. неб. тел.* — 1994. — **2**, № 10. — С. 98–106.
24. *Корниенко Ю.В.* Устойчивость интерферометрического метода формирования изображений к фазовым искажениям волнового фронта // *Доповіді НАН України.* — 2000. — № 5. — С. 78–82.
25. *Корниенко Ю.В., Лейферов В.А., Пугач В.В.* Информационная эффективность многолучевого интерферометра при наблюдении объекта сквозь неоднородную среду // *Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* — 1997. — **2**, № 2. — С. 132–136.
26. *Kornienko Yu.V., Pugach V.V.* Informational Efficiency of a Multibeam Interferometer in the Observation of an Object through the Terrestrial Atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* — 2000. — № 3. — P. 302–304.

Поступила в редакцию 25.10.2002