1974 г. Декабрь *Том 114, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

522.2:535.317(023)

АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ В ОПТИКЕ

В. Н. Синцов, А. Ф. Запрягаев

ВВЕДЕНИЕ

Как в радиоастрономии, так и в оптической астрономии фактором, принципиально ограничивающим разрешающую способность телескопов, является диаметр апертуры главного зеркала телескопа. Попытки повышения разрешающей способности радиотелескопов путем сооружения гигантских механических конструкций имеют естественный предел, вытекающий из прочности конструкционных материалов и жесткости конструкции. Принципиально новые возможности повышения разрешающей способности радиотелескопов открыл апертурный синтез.

В радиоастрономии под апертурным синтезом в общем виде понимают *использование малых антенн, последовательно или стационарно занимающих* определенные относительные положения; обработка сигналов с выходов этих антенн с различными взаимными фазовыми отношениями приводит к получению информации, эквивалентной той информации, которая может быть получена при использовании сплошной апертуры, значительно превосходящей апертуры отдельных антенн [1, 2]. Основы метода апертурного синтеза в радиоастрономии были заложены Мартином Райлом *) (иностранный член Академии наук СССР с 1971 г.). Использование апертурного синтеза в радиоастрономии позволило достигнуть разрешения, близкого к разрешению крупных оптических телескопов и в некоторых случаях (для радиоинтерферометрии с большими базами) существенно превосходящего последнее [6, 7]. Применение принципа апертурного синтеза в радиолокации также привело к существенному увеличению разрешающей способности радиолокационных систем обзора местности [8].

Возможен апертурный синтез с помощью малых апертур, не меняющих взаимного положения внутри большой частично заполненной («разбавленной») апертуры (крест Миллза, Калгурский радиогелиограф, компаунд-интерферометр Ковингтона — Дрэйна и др.).

Эти радиоастрономические инструменты, как указано в книге Христиансена и Хёгбома [2], относятся к числу «новых инструментов, подобных которым в оптике нет». Однако это не совсем так. Принцип апертурного синтеза был использован в оптике Майкельсоном и Пизом намного раньше (в 1920 г.), чем в радиоастрономии (в 1946 г.). Вопросу апертурного синтеза

*) Независимо от Райла, идея апертурного синтеза была высказана в СССР Хайкиным и Парийским [3] и в Австралии Брэйсуэллом [4]; более подробно история вопроса изложена в книге [5].

© Издательство «Наука», «Успехи физических наук», 1974 г.

в оптическом диапазоне частот электромагнитного излучения уделяется в последнее десятилетие значительное внимание: в США состоялись две конференции по этой проблеме [9]; анализ материалов, доложенных на одной из этих конференций, был дан в статье [10]. В обзоре [11], написанном лауреатом Нобелевской премии по физике Деннисом Габором, указано, что наиболее интересной фундаментальной проблемой в голографии является синтез апертуры голографическим методом в оптическом диапазоне, аналогичный синтезу апертуры в радиодиапазоне, осуществленному Уайлдом на Калгурском радиогелиографе в Австралии.

Аналогично данному выше определению апертурного синтеза в радиоастрономии, условимся под апертурным синтезом в оптике понимать построение эквивалента оптической системы со сплошной апертурой, состоящего из совокупности элементов с меньшей апертурой и позволяющего получить то же разрешение, что и система с большей сплошной апертурой.

Потенциальные преимущества оптических систем с синтезированной апертурой заключаются в следующем:

1. Возможность дальнейшего увеличения размеров крупных астрономических телескопов за пределы, ограничиваемые существующей технологией оптико-механического производства (порядка 5—6 *м*), или снижение стоимости изготовления при сохранении диаметра главного зеркала.

2. Возможность создания составных телескопов с уменьшенным весом для астрономических наблюдений из космоса и с лунных станций в широком спектральном диапазоне.

3. Возможность управления оптической передаточной функцией путем подбора определенной формы синтезированной апертуры.

4. Возможность уменьшения влияния оптической неоднородности среды, через которую ведутся наблюдения.

Ниже будут рассмотрены методы апертурного синтеза в оптике, основанные на использовании как некогерентного, так и когерентного освещения наблюдаемого объекта.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

Этот метод синтеза впервые использован Майкельсоном и Пизом в обсерватории Маунт Вилсон в 1920 г. для измерения угловых диаметров звезд [12, 13]. Сам инструмент с синтезированной апертурой получил название звездного интерферометра Майкельсона. Подробное описание интерферометра и полученных с его помощью результатов приведено в статье [14].

Интерферометр измеряет модуль комплексной степени когерентности, хотя имеются указания о возможности восстановления фазы по измерениям модуля [15].

Наименьший угловой диаметр звезды, измеряемый с помощью интерферометра Майкельсона, определяется не величиной апертуры телескопа, а расстоянием между внешними зеркалами системы. Майкельсону и Пизу с помощью звездного интерферометра с максимальным расстоянием между двумя подвижными зеркалами (базой), равным 6 *м*, удалось измерить угловой диаметр шести звезд. Позднее был построен интерферометр с базой 15 *м*, однако трудности работы с ним не позволили получить достаточно надежных и воспроизводимых результатов измерений. Основной трудностью является необходимость практической реализации равенства оптических путей пучков света в обоих плечах интерферометра. При ширине спектральной полосы пропускания, равной 100 *нм*, в области 540 *нм*, необходимо, чтобы в интерферометре все разности хода между пучками не превышали одной длины волны [14]. Соответственно с такой же точностью

в плоскости изображения должно выполняться слежение за звездой. Сужéние ширины спектральной полосы уменьшает требования к механической стабильности, но оно возможно лишь для относительно ярких источников или объектов, освещаемых лучом лазера с плохой (или специально нарушенной) когерентностью [10]. Для автоматического поддержания равенства путей было предложено использование активной следящей системы с лазерным интерферометром [16].

Другим источником затруднений при работе на звездном интерферометре является оптическая неоднородность атмосферы [17]. Возможно некоторое устранение мешающего влияния оптической неоднородности атмосферы с помощью тройного интерферометра Дженнисона, предложенного им для радиоастрономии [18]; идея использования аналогичной схемы в оптической интерферометрии принадлежит Рогстэду [19].

В интерферометре Майкельсона свет, падающий на две раздельные апертуры, сводится в одной плоскости и затем детектируется. Возможен и другой путь: сначала детектировать световой поток на каждой из раздельных апертур и затем обрабатывать совместно два световых сигнала. Этот путь был предложен Хэнбери Брауном и Твиссом в 1956 г. и привел к созданию интерферометра интенсивностей [14,20].

Интерферометр интенсивностей обладает весьма существенными преимуществами перед звездным интерферометром Майкельсона. Во-первых, его зеркала служат только для концентрации энергии и не обязательно должны быть высококачественными. Во-вторых, умеренная оптическая неоднородность атмосферы почти не сказывается на результатах измерений. В-третьих, сочетание двух электрических каналов выполняется более простыми средствами и менее критично, чем сочетание двух оптических каналов с указанными выше исключительно высокими требованиями к механической части инструмента. Можно считать, что интерферометр интенсивностей примерно в миллион раз менее чувствителен к рассогласованию разности хода в обоих каналах, чем интерферометр Майкельсона. Недостатком интерферометра интенсивностей является то, что он обладает малой чувствительностью по сравнению с другими астрономическими инструментами. При диаметре зеркал 6,5 *м* предельная звездная величина близка к 2 при времени наблюдения около часа [14]; расчет предельной звездной величины для интерферометра Майкельсона дает величину порядка 12—14 [21].

В интерферометре интенсивностей, сооруженном в Наррабри (Австралия), диаметр каждого из зеркал, собранных из мозаики стеклянных шестиугольников, равен 6,5 *м*; расстояние между зеркалами может меняться от 10 до 188 *м*.

При использовании интерферометра интенсивностей для наблюдения объектов, освещенных лазерным излучением, отношение сигнал/шум может возрастать на 5—6 порядков.

При обсуждении вопроса об использовании интерферометра интенсивностей в оптической астрономии Твисс [22] указал, что вместо одного довольно грубого зеркала можно использовать N одинаковых меньших зеркал, свет от которых фокусируется на одном ФЭУ или же на N раздельных ФЭУ со своими линиями задержки, позволяющими выполнить условие когерентного сложения; иными словами, принцип синтеза апертуры может быть в интерферометре интенсивности распространен и на каждый отдельный элемент его.

Бёрд [23] использовал интерферометр интенсивностей, в котором вблизи регистрируемого объекта был размещен точечный когерентный источник. В пространственном спектре двумерной функции взаимной корреляции в этом случае возникают высокочастотные компоненты, смещенные

относительно автокорреляционной составляющей, амплитуда которых пропорциональна интенсивности этого опорного источника. Сигнал каждого приемника, пропорциональный флуктуациям интенсивности, детектировался и фильтровался, сигналы перемножались, усреднялись по времени и отображались на экране электронно-лучевой трубки. Сканирование поля излучения одним фотоприемником при неизменном положении второго приемника, фоторегистрация возникающей картины с электронно-лучевой трубки и ее фурье-преобразование в когерентном свете привели к восстановлению прямого и зеркального изображений объекта. Достигнутое разрешение определялось апертурой, сканируемой подвижным фотоприемником.

В варианте метода, предложенном Гудменом [24] и названном им «интерферометрическим методом записи изображения», вблизи регистрируемого объекта размещается некогерентный квазимонохроматический точечный источник света, а регистрация поля производится с помощью квадратичного детектора через два отверстия (точечных или протяженных) в схеме, аналогичной схеме звездного интерферометра Майкельсона. Измерение квадрата видности полос, возникающих при взаимодействии излучения объекта и опорного источника, в функции расстояния между отверстиями, дает запись модуля и фазы пространственной несущей, аналогично методу голографии с внеосевым опорным источником. Этот метод может быть применен для наблюдения через неоднородные среды и получения трехмерных изображений; к нему применим рассмотренный ниже принцип минимальной избыточности при синтезе апертуры.

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

В последние годы значительное внимание уделяется разработке систем, в которых осуществлен оптико-механический апертурный синтез, иногда называемых также «активными оптическими системами» или «оптическими системами с обратной связью».

Сущность такого синтеза заключается в построении крупного составного зеркала с помощью большого количества малых зеркал, форма поверхности которых соответствует общей поверхности большого зеркала [25–29]. В этом случае большая апертура полностью заполняется тесно прилегающими друг к другу малыми апертурами. Принципиальная схема подобной системы приведена на рис. 1. Работа ее основана на том, что поддержание взаимного положения отдельных сегментов так, чтобы они образовывали единую поверхность, производится с помощью специальных юстировочных механизмов, управляемых автоматической системой; сигналы коррекции поступают в систему от оптико-электронных датчиков.

Выполненные в лабораториях фирмы «Перкин — Элмер», (США) «испытания лабораторного макета системы показали возможность технической реализации принципа [25–27]. В опытах использовалось зеркало диаметром 508 *мм*, изготовленное путем распиливания сплошного зеркала на три сегмента. Для количественной оценки изменения формы составного зеркала (наклон сегментов, их смещение вдоль оси) использовался интерферометр Тваймана — Грина с лазерным освещением. Неоднозначность в определении направления смещения сегментов устранялась путем использования второй интерферометрической системы с источником белого света. Сигналы фотоприемников интерферометрических систем использовались для автоматической юстировки сегментов зеркала. Достигнутая точность измерений была близка к $\lambda/100$, время отработки сервосистемы — к 3,5 *с*, точность юстировки — к $\lambda/50$.

На рис. 2 приведена интерферограмма поверхности составного зеркала после юстировки, демонстрирующая высокое качество поверхности. Аналогичная автоматическая система может быть использована для деформационной юстировки монолитного тонкого зеркала; эта возможность была экспериментально проверена [27, 28] для зеркала диаметром 300 *мм* и толщиной 3 *мм*. В дальнейшем предполагалось провести испытания зеркала диаметром 760 *мм* и толщиной 12 *мм*.

По опубликованным данным, разработку двух описанных систем (составное и деформируемое зеркало) в США финансировало Национальное агентство по аэронавтике и освоению космического пространства

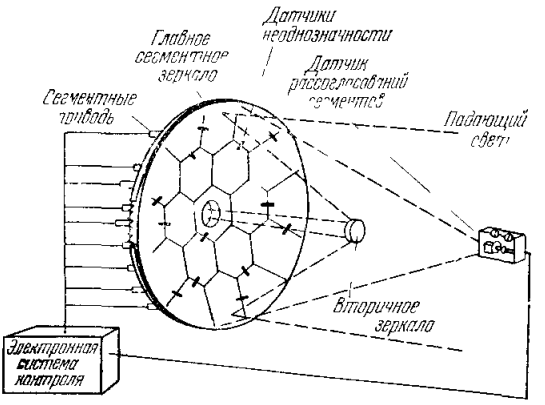

Рис. 1. Принципиальная схема составного телескопа [25].

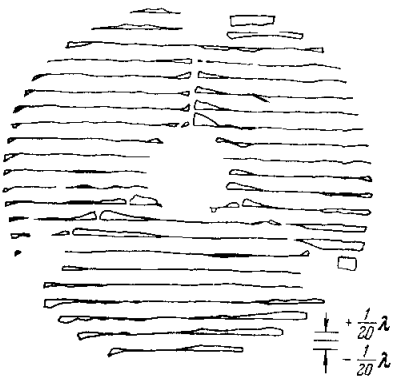

Рис. 2. Интерферограмма поверхности зеркала, состоящего из трех элементов, после фазировки [25].

(НАСА). Использование подобных зеркал для орбитальных телескопов позволит существенно уменьшить вес зеркала (так как толщина отдельного сегмента может быть меньше толщины монолитного зеркала) и производить автоматическую коррекцию формы поверхности зеркала, если она будет искажена из-за термических воздействий или вследствие перехода от гравитационного поля Земли к невесомости в космосе.

ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННЫЕ АПЕРТУРЫ

Можно синтезировать апертуру с помощью совокупности не прилегающих друг к другу малых апертур, образующих разреженную апертуру. При этом в принципе существуют два пути синтеза: одновременная регистрация изображения с использованием всех малых апертур при их фиксированном положении в пространстве («пространственный синтез») и последовательная регистрация совокупности изображений через набор апертур с изменением пространственной конфигурации этого набора между экспозициями («временнóй синтез»). Функция рассеяния и оптическая передаточная функция системы с разреженной апертурой определяются геометрией малых апертур и их взаимным расположением. Простейшим случаем системы с разреженной апертурой является звездный интерферометр Майкельсона, рассмотренный выше. (Не следует забывать, однако, что звездный интерферометр служит для измерения комплексной степени когерентности, а не для регистрации оптического изображения.) Классические оптические системы редко имеют частично заполненную апертуру; исключение составляют зеркальные и зеркально-линзовые системы с экранированием входного зрачка. Влиянию степени экранирования

и геометрии экрана на оптическую передаточную функцию посвящена обстоятельная работа [30].

Для регистрации оптического изображения все элементы составной апертуры должны иметь общую фокальную плоскость. Преимуществом систем с частично заполненной апертурой по сравнению с системами со сплошной апертурой является возможность уменьшения веса; недостатки заключаются в потерях энергии (так как не вся апертура заполнена) и в трудностях совместной фазировки отдельных элементов. Предельное разрешение частично заполненной апертуры близко к разрешению сплошной апертуры, однако промежуточные пространственные частоты передаются хуже или могут быть полностью утеряны. На рис. 3 приведены одномерные функции рассеяния и оптические передаточные функции (коэффициенты передачи контраста) для сплошной апертуры (*а*) и двух разреженных апертур (*б*), отличающихся формой. Видно, что по мере увеличения «разреженности» апертуры боковые максимумы функции рассеяния возрастают, а ширина центрального максимума уменьшается (что приводит, например, к ухудшению передачи множества точечных объектов, однако может улучшить раздельную передачу двух точек, расстояние между которыми менее ширины центрального максимума функции рассеяния сплошной апертуры). Коэффициент передачи контраста для частот, близких к предельной, несколько возрастает, но для промежуточных частот падает до нуля. Количественное рассмотрение влияния «разбавления» апертуры для одномерного случая двух апертур выполнено в работе [31], двумерный анализ для шестиэлементного зеркала проведен в работе [32] с использованием программы расчета на ЭВМ, описанной в работе [33]. На рис. 4 приведена проекция двумерного распределения коэффициента передачи контраста для постепенно «разбавляемой» шестиэлементной апертуры; черным цветом выделены области, в которых коэффициент передачи контраста превышает 10%. Видно, что с ростом «разбавления» двумерная оптическая передаточная функция искажается и в ней возникают провалы. Этот нежелательный эффект может быть частично устранен путем простран-

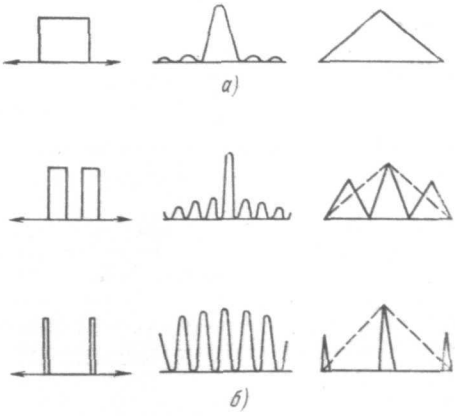

Рис. 3. Функции рассеяния и передаточные функции для сплошной (*а*) и частично заполненных (*б*) апертур.

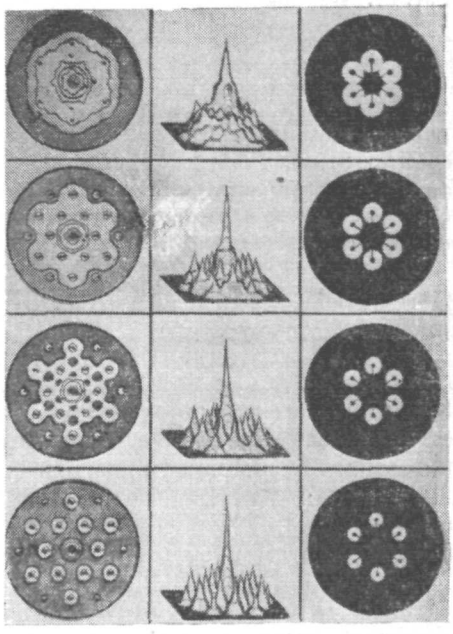

Рис. 4. Двумерное распределение коэффициента передачи контраста шестиэлементной апертуры с ростом степени разбавления [32].

ственной фильтрации полученного изображения в системе когерентной оптической обработки [34].

Схема апертурного синтеза была положена в основу проекта шестиобъективного составного зеркального инфракрасного телескопа диаметром 5,6 *м* [35]. Шесть идентичных, конструктивно связанных телескопов имеют общий фокус. Каждая из шести кассегреновских зеркальных систем через отверстие в главном зеркале и два плоских зеркала строит изображение в фокальной плоскости, находящейся во внутренней части конструкции. Для совместной фазировки каналов предложено применение оптических компенсаторов, расчет которых приведен в работе [35]. Использование телескопа в сравнительно длинноволновой области спектра (10—12 *мкм*) должно уменьшить критичность фазировки.

Была предложена также другая конструкция многоканального составного телескопа, каждый канал которого представляет собой телескопическую систему Мерсенна, для сведéния и фазировки каналов использованы поворотные ромбические призмы, а параллельные пучки лучей каждой секции с помощью призм направляются на общее зеркало, фокус которого совмещен с фокусом окуляра [36]. Использование шести каналов позволяет снизить вес зеркал примерно в 4,5 раза. Для фазировки 18-элементного составного зеркала был успешно применен голографический метод коррекции аберраций [37]. Метод основан на том, что первоначально на голограмме записывали аберрационный волновой фронт, возникший при прохождении плоского волнового фронта через составной объектив. Эта голограмма после установки в прежнее место оптической системы в дальнейшем при наблюдении в узкой спектральной полосе некогерентного света выполняет функции коррекционного оптического элемента. Предварительно составное зеркало сравнительно грубо юстировалось до получения величины суммарного пятна рассеяния, близкого к 0,5 *мм*. На рис. 5 приведены распределения интенсивностей в фокальной плоскости составного объектива, освещенного плоской монохроматической волной до (*а*) и после коррекции (*б*), а также распределение интенсивности (*в*) для аналогичного монолитного зеркала, перед входным зрачком которого помещали маску, расположение и размер отверстий в которой соответствовали расположению и размеру зеркал в составном объективе. Если голограмма-корректор записывается с использова-

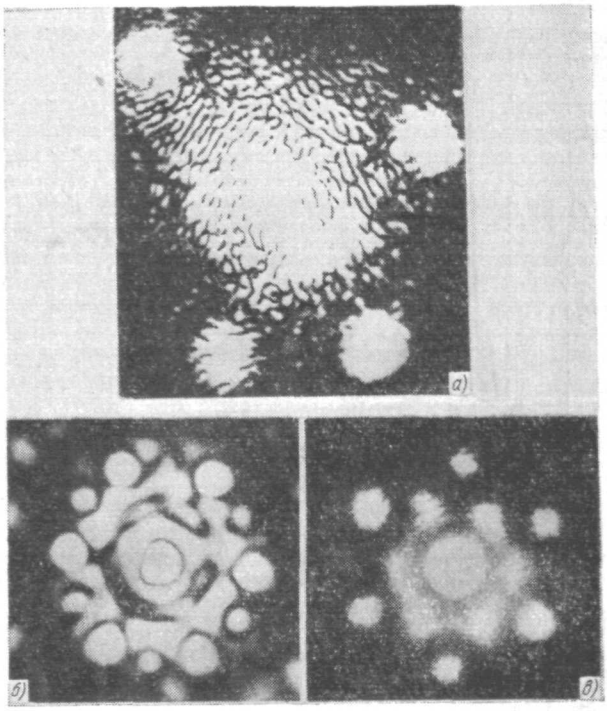

Рис. 5. Распределение интенсивности в фокальной плоскости составного зеркала до коррекции (*а*), после коррекции (*б*) и монолитного зеркала с маской (*в*) [37].

нием нескольких длин волн во встречных пучках (аналогично объемной голограмме Ю. Н. Денисюка), то такая голограмма может быть использована для коррекции аберраций в широком диапазоне длин волн.

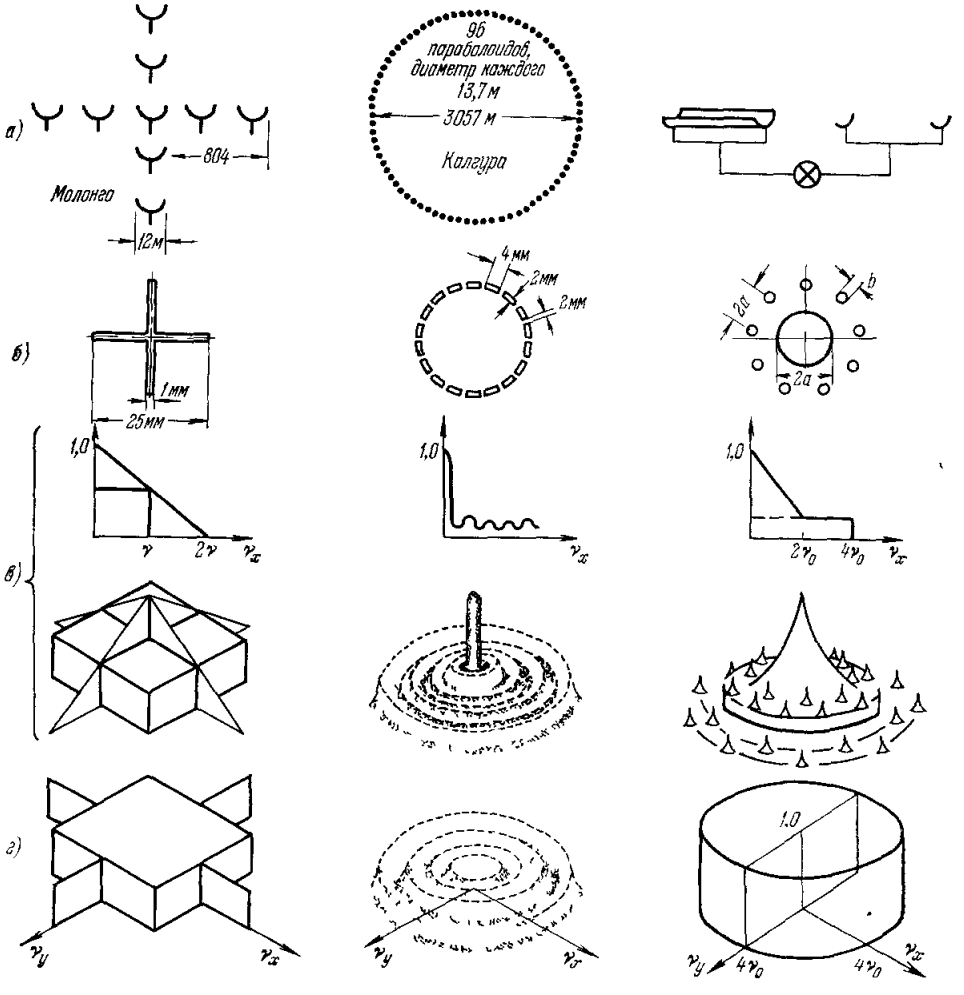

Рис. 6. Конфигурации антенных решеток некоторых радиотелескопов (*а*), формы синтезированных апертур их оптических аналогов (*б*), одномерные и двумерные передаточные функции этих апертур (*в*) и передаточные функции после инверсной фильтрации (*г*).

К более сложным конфигурациям частично заполненных апертур относятся хорошо известные в радиоастрономии крест Миллза (радиотелескоп в Молонго) [2, 6] и кольцеобразная апертура Калгурского радиогелиографа [2, 6, 38]. Последний тип апертуры по сравнению с Т- и Y-образными составными апертурами дает возможность регистрации более широкой полосы пространственных частот [39]. Чрезвычайно живописные картины функций рассеяния 96-элементной кольцеобразной апертуры Калгурского радиогелиографа при изменении количества, взаимного расположения и взаимной фазировки каналов, полученные электронными методами, приведены в работе [38].

Изучению оптических аналогов креста Миллза, кольцеобразной апертуры (близкой по свойствам к апертуре Калгурского радиогелиографа) и интерферометра Ковингтона — Дрэйна были посвящены работы [40–45]. Оптическое моделирование выполнялось путем наложения на входной зрачок фотографического объектива маски, форма и взаимное расположение отверстий в которой соответствовали форме апертуры, и с помощью объектива в сочетании с этой маской регистрировали оптическое изображение тест-объекта (миры), освещенной некогерентным светом. Использование объектива с маской (а не отдельных оптических элементов) было вызвано стремлением сохранить в модельном эксперименте условие взаимной фазировки элементов апертуры. На рис. 6 приведены конфигурации решеток антенн радиотелескопов, формы синтезированных апертур их оптических аналогов и одномерные и двумерные передаточные функции, соответствующие этим апертурам.

Для устранения избыточности низкочастотной части пространственного спектра была использована оптическая обработка зарегистрированных изображений в когерентном свете в схеме, представленной на рис. 7.

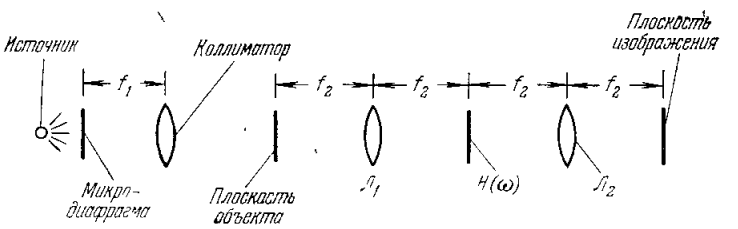

Рис. 7. Схема оптической обработки снимков, полученных с помощью синтезированных апертур [41, 2].

Для получения инверсного фильтра формы $1/\tau(\mu_x, \mu_y)$, позволяющего получить одинаковый коэффициент передачи контраста (см. рис. 6) для всех пространственных частот (что́ для обычных оптических систем невозможно), записывали изображение некогерентно освещенной точки (т. е. импульсный отклик системы), полученное с помощью синтезированной апертуры (объектива с маской), обрабатывали фотослой до значения коэффициента контрастности $\gamma = -2$, получали фурье-образ функции рассеяния в оптической когерентной системе и обрабатывали последнюю регистрограмму до получения значения $\gamma = 1$. При помещении изображения, зарегистрированного с помощью синтезированной апертуры, во входную плоскость оптической системы когерентной обработки информации распределение амплитуды в плоскости первого фурье-преобразования описывается произведением фурье-образа распределения интенсивности в объекте и передаточной функции системы. Введение инверсного фильтра в эту плоскость приводит к тому, что в плоскости второго фурье-преобразования возникает отфильтрованное изображение с равномерным спектром пространственных частот (рис. 8 и 9). Разрешение выходного изображения было таким же, как у оптической системы с круглой сплошной апертурой, диаметр которой был равен половине длины одного из плечей крестообразной апертуры (т. е. в полном соответствии с теоретическими предсказаниями), хотя площадь крестообразной апертуры уступала площади равной ей по разрешению сплошной апертуры в 3,2 раза [42], а разрешение этой апертуры по сравнению с разрешением отдельного элемента, диаметр которого был равен ширине плеча креста, возросло в шесть раз. В экспериментах было также подтверждено, что передаточная

функция такой системы, носящая кросс-корреляционный характер, поддается значительно более легкому управлению, чем автокорреляционные передаточные функции систем со сплошной апертурой. Аналогичные результаты были получены при оптическом моделировании интерферометра Ковингтона — Дрэйна [43]. Наконец, было выполнено моделирование тонкой дискретной кольцеобразной апертуры, аналогичной многоэлементной апертуре Калгурского радиогелиографа. Хотя для регистрации фотографических изображений через синтезированные разреженные апертуры требовалось увеличить в несколько раз экспозицию, сообщаемую фотоматериалу, по сравнению со съемкой через оптическую систему со сплошной апертурой, было предложено в первом случае подвергать фотоматериал дополнительной равномерной предварительной засветке, что позволило

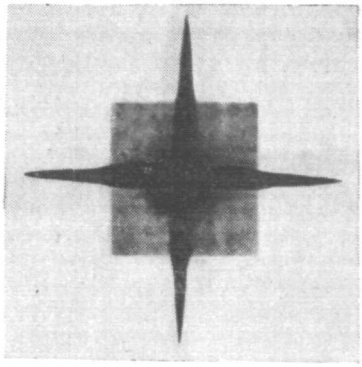

Рис. 8. Фоторегистрограмма двумерной передаточной функции креста Миллза [41, 42].

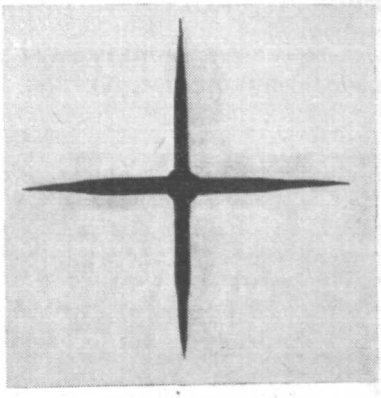

Рис. 9. Инверсный фильтр [41,42].

в обоих случаях добиться примерно одинаковой суммарной фотографической чувствительности [41]. Наряду с использованием инверсных фильтров, для оптической обработки полученного изображения могут быть применены голографический метод, метод фильтрации при записи через различно ориентированные дифракционные решетки (т. е. метод фотографирования с несущей частотой), оптико-электронные методы в реальном времени и методы обработки сигналов с помощью ЭВМ [44]. Было изучено также влияние продольных и поперечных разъюстировок на качество изображения во всех указанных системах [40, 45], а также определена величина отношения сигнал/шум в изображениях при изменении параметров апертуры и показано, что это отношение возрастает с увеличением отношения площади боковых элементов к площади центрального (для интерферометра Ковингтона — Дрэйна) или с увеличением ширины плечей креста Миллза.

Оптическая система с Т-образной апертурой при длине каждого плеча 2,5 *м* была предложена Миллером [46] для использования в аэрофотоаппаратах. Для астрономических наблюдений была разработана принципиальная схема телескопа [47], аналогичного системе Ковингтона — Дрэйна, с разрешением, эквивалентным разрешению телескопа с диаметром главного зеркала 2,3 *м*. Частотно-контрастная характеристика этого телескопа при 20%-ном заполнении апертуры не имеет провалов во всей передаваемой полосе частот.

О'Нейлл [48] выполнил анализ предельных возможностей заатмосферного составного телескопа с эквивалентным диаметром апертуры, равным

125 *м*. При диаметре отдельного элемента 1 *м* и весе 200 *кг* общий вес зеркала, состоящего из 200 элементов, будет равен 40 *т*, что соответствует транспортной нагрузке перспективных космических ракет. Коэффициент заполнения апертуры такого телескопа будет близок к 1%. Хотя вопрос выбора оптимального взаимного размещения элементов с целью получения наиболее выгодной передаточной функции и нуждается в дальнейшем исследовании, О'Нейлл приводит данные о разрешении такого телескопа, равного в угловой мере $4 \cdot 10^{-9}$ *рад*, сведённые в табл. I.

Таблица I

Пространственное разрешение	Расстояние, *км*	Наблюдаемый объект
1 *мм*	250	ИСЗ
1,6 *м*	$4 \cdot 10^5$	Поверхность Луны
240 *м*	$6 \cdot 10^7$	Марс и его спутники
350 *м*	$9 \cdot 10^7$	Меркурий, кометы
2,6 *км*	$6{,}3 \cdot 10^8$	Юпитер и его спутники
24 *км*	$5{,}8 \cdot 10^9$	Плутон
$4 \cdot 10^5$ *км*	10 световых лет	Планеты ближайших звезд

По мнению О'Нейлла, создание такого орбитального телескопа связано с серьезными политическими и этическими проблемами, и страна, собирающаяся вывести этот телескоп в космическое пространство, должна обещать, что не будет использовать его для наблюдения поверхности Земли.

При построении оптических систем с разреженной апертурой весьма важен выбор как формы и размера отдельных элементов, так и их взаимного расположения. Эта проблема длительное время изучалась для одномерных решеток в радиоастрономии [49, 50]. Гудмен [51] в 1968 г. впервые обратил внимание на то обстоятельство, что равномерное распределение элементов внутри оптической апертуры (предельным случаем которого является сплошная апертура) порождает высокую избыточность передаточной функции в области низких пространственных частот; этого нежелательного явления можно избежать, используя конфигурации с минимальной избыточностью. Позднее обширная работа в этом направлении применительно к синтезу оптических апертур была выполнена Гори и Гуаттари [52]. Для линейной решетки эти авторы предложили и экспериментально исследовали конфигурации с неравноотстоящими элементами (рис. 10). Так, теоретический расчет показывает, что линейная апертура из 16 равномерно расположенных отверстий в состоянии после фильтрации дать информацию о 31 точке; при неравномерном расположении, приведенном на рис. 10, *б*, то же количество элементов дает информацию уже о 169 точках. Эксперимент, выполненный путем помещения щелей перед входным зрачком объектива в соответствии с конфигурацией, приведенной на рис. 10, *в*, показал, что предельное разрешение частично экранированной апертуры не уступало предельному разрешению сплошной апертуры, обладающей избыточностью по сравнению с экранированной.

Аналогичный опыт с другой одномерной конфигурацией, также дающей минимальную избыточность, был сделан Расселом и Гудменом [53], которые провели также детальный математический анализ метода регистрации изображений с помощью оптических систем с «разреженными» апертурами с последующей фильтрацией.

Анализ величины отношения сигнал/шум в выходном изображении показал, что чем больше аберрации системы, тем выгоднее использование синтезированной апертуры.

Некоторые расчетные результаты приведены на рис. 11 и 12. Видно, что аберрации мало влияют на передачу пространственных частот синтезированной апертурой и коэффициент передачи контраста аберрационной синтезированной апертуры существенно выше, чем сплошной.

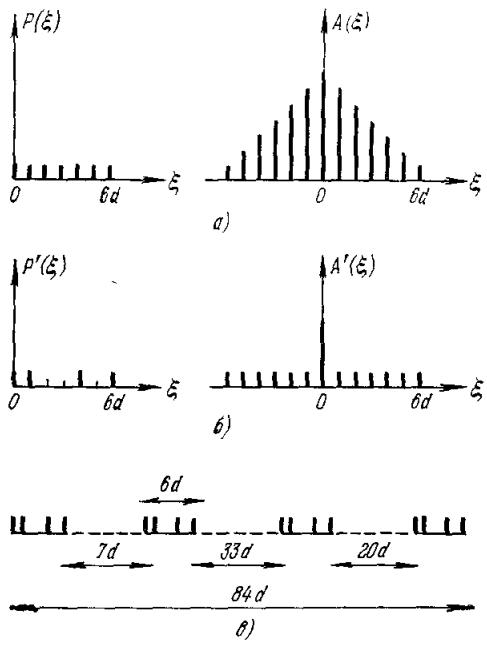

Рис. 10. Зрачковая и автокорреляционная функции для 7-элементной синтезированной апертуры с равномерным расположением элементов (*а*), для 4-элементной апертуры с неравномерным расположением элементов (*б*) и оптимальная конфигурация 16-элементной апертуры (*в*) [52].

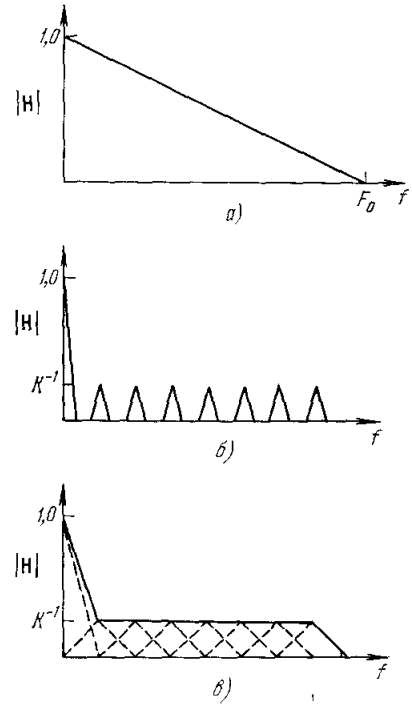

Рис. 11. Передаточная функция безаберрационной системы со сплошной (*а*) и синтезированной апертурой при $2\Delta f < \delta f$ (*б*) и при $\Delta f = \delta f$ (*в*) [53]. Δf — линейный размер элемента апертуры; δf — расстояние между элементами.

В таблице II приведены некоторые значения координат a_i для одномерных апертур с минимальной избыточностью, полученных при некоторых приближениях [51].

Таблица II

Количество элементов, K	Коэффициент близости к идеальной неизбыточной апертуре, D	Координаты центров элементов a_i
4	1	0, 1, 4, 6
5	0,91	0, 2, 7, 8, 11
6	0,88	0, 1, 8, 11, 13, 17
8	0,80	0, 7, 10, 16, 18, 30, 31, 35
9	0,80	0, 3, 9, 16, 20, 21, 35, 43, 45

Коэффициент близости D, приведенный в табл. II, определяется как

$$D = \frac{K(K-1)}{2a_K},$$

где a_K — максимальное количество целых чисел в интервале от $-K(K-1)/2$ до $+K(K-1)/2$.

На рис. 13 приведены нормализованные пространственные спектры величины отношения сигнал/шум для сплошной апертуры и различных

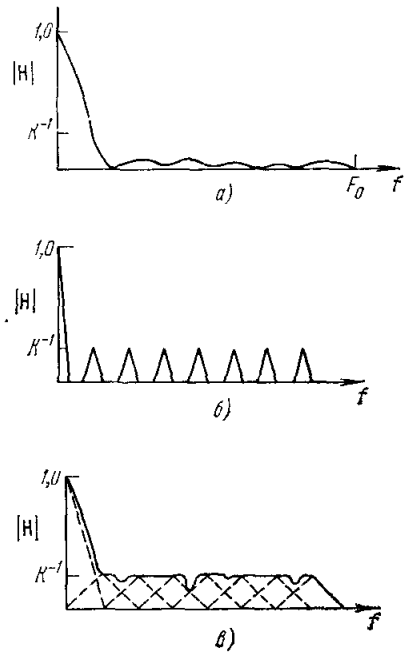

Рис. 12. Передаточная функция аберрационной системы со сплошной (*а*) и синтезированной апертурой при $2\Delta f < \delta f$ (*б*) и $\Delta f = \delta f$ (*в*) [53].

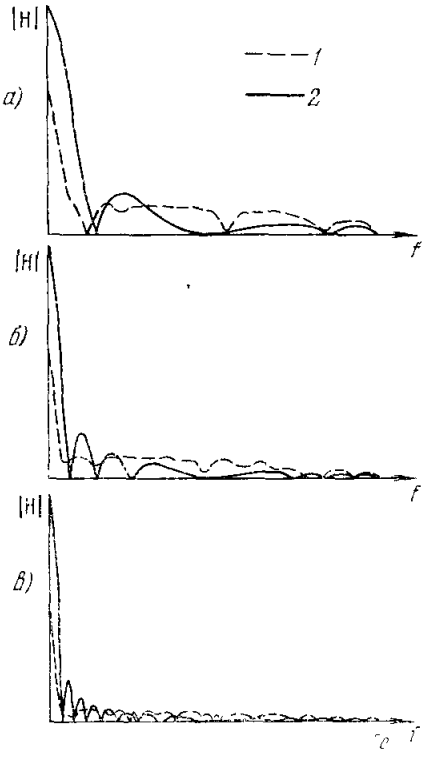

Рис. 13. Нормализованные пространственные спектры отношения сигнал/шум для пятиэлементной апертуры с дефокусировкой, равной λ (*а*), шестиэлементной с дефокусировкой 2λ (*б*) и восьмиэлементной с дефокусировкой 4λ (*в*).

1 — синтезированная, *2* — сплошная апертура

синтезированных апертур при различной дефокусировке; использование синтезированных апертур более выгодно и при дефокусировке.

Если функция пространственного распределения поля подвергается неравномерной выборке дважды с пространственным сдвигом между операциями выборки, то возможно полное восстановление поля голографическим методом вычитания [54].

ВРЕМЕННОЙ СИНТЕЗ

При временно́м синтезе апертуры накапливание и обработка информации происходят последовательно и изображение возникает в результате совместной обработки данных серии последовательных независимых друг от друга измерений.

Аналогичный подход к синтезу апертуры в оптическом диапазоне электромагнитных колебаний был предложен Вилчинским [55] в 1967 г. для создания заатмосферного телескопа с диаметром апертуры 25—50 *м*. Два внеосевых гиперболоида с общей фокальной плоскостью (рис. 14) последовательно занимают в пространстве положения, позволяющие обеспечить сбор информации с минимальной избыточностью в низкочастотной части пространственного спектра; для этого, например, может быть использовано вращение этих элементов вокруг оптической оси системы по окружности с последовательным набором всех значений векторов между элементами, удовлетворяющих требованиям минимальной избыточности. Телескоп должен обладать апланатизмом; тонкая коррекция

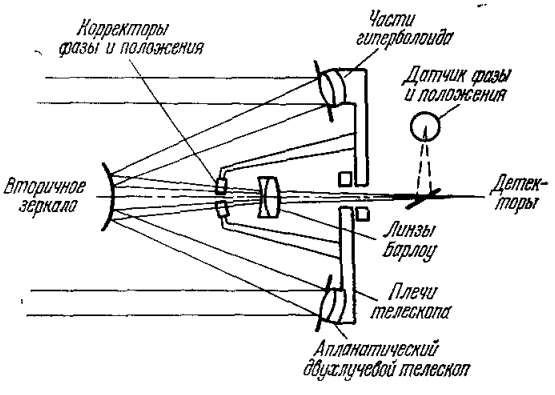

Рис. 14. Схема двухлучевого телескопа с временным синтезом апертуры [55].

взаимной фазировки зеркал и точного совмещения изображения выполняется с помощью специальных корректирующих элементов. В каждом из последовательных взаимных положений выполняется проверка совмещения изображений звезды, создаваемых отдельно каждым каналом, затем выравнивание оптического пути в каналах с помощью интерферометра сдвига с точностью до 0,05 λ. В том случае, когда требуется получение информации о сравнительно небольшом количестве точек изображения (например, наблюдение звезды или космического аппарата), вместо фотографической регистрации целесообразнее использовать фотоэлектрическую.

Время, необходимое для проведения всего цикла наблюдений, возрастает с ростом эквивалентной апертуры в следующем отношении:

Эквивалентный рост апертуры	3	5	7	9	11
Количество наблюдений	9	30	63	108	165

Иными словами, для достижения предельного разрешения, эквивалентного разрешению телескопа со сплошной апертурой, для телескопа с временным синтезом требуется значительно большее время, однако оценка отношения сигнал/шум для высоких пространственных частот (более 0,7 от предельной) дала более высокие значения для последнего случая. Наряду с обработкой сигналов ФЭУ на быстродействующей ЭВМ может быть использована когерентная оптическая обработка последовательности фотоснимков с помощью схемы на рис. 15, работа которой основана на сложении и вычитании комплексных амплитуд с помощью фурье-голограмм [56].

Оценка параметров телескопа с зеркалами диаметром 2,5 *м*, установленного на Луне, показывает, что при наблюдении звезды первой величи-

ны при 20 × 20 элементах изображения звезды (общее количество элементов 10^4) и 100 градациях сигнала потребное время наблюдения при квантовой эффективности 4% составляет 0,1 *сек*. Экспериментальная проверка правильности предложенных принципов для одномерной апертуры с обработкой микрофотограмм изображений на ЭВМ подтвердила возможность восстановления изображения с равномерной передаточной функцией и фильтрацией низкочастотной избыточности. Подобный двухлучевой телескоп может быть использован также для построения рентгеновских изображений [57].

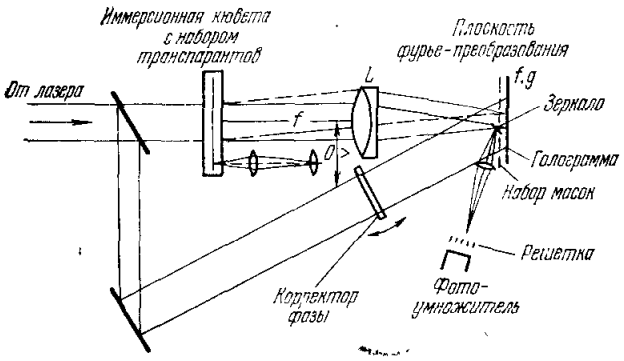

Рис. 15. Схема голографического суммирования изображений, полученных с помощью двухлучевого телескопа [55].

Модельный эксперимент по двумерному временно́му синтезу апертуры был выполнен Строуком [58]. Перед фотографическим объективом размещался набор масок, имитирующих последовательно по двум осям координат синтезированные одномерные апертуры. Регистрировались как «частичные» (в смысле спектра пространственных частот) изображения, полученные при экспонировании через одну из комбинаций пар отверстий, так и «суммарное» изображение (на одной и той же пластинке), зарегистрированное с помощью всех наборов масок. Хотя Строук не использовал фильтрацию для устранения избыточности низких пространственных частот, ему удалось при соблюдении условий линейности фотографической записи зарегистрировать весь синтезируемый спектр пространственных частот. Для устранения зернистости фотослоя можно также экспонировать «частичные» изображения на различных участках фотопластинки с последующим голографическим суммированием [56]. Строуком с сотрудниками [59] был также выполнен модельный эксперимент по голографическому суммированию 2500 изображений, полученных последовательно с помощью 2500 различно расположенных перед фотопластинкой малых отверстий (камера-обскура); этот эксперимент открывает новые возможности для повышения отношения сигнал/шум при регистрации изображений в рентгеновской области спектра, где невозможно создать объективы на основе преломляющих сред.

К описанным методам временно́го синтеза апертуры близки по подходу метод получения безаберрационного изображения звезд при наблюдении через плохие телескопы, предложенный Лабейри [60-61] и развитый Дейнти [62], и квазиголографический метод оптического «размазывания» изображения на протяженный участок фотоматериала в процессе экспонирования, предложенный Новиком [63, 64]. Первый метод основан на том, что производят серию кратковременных (0,01 *сек*) экспонирований изображений

звезды на независимые участки фотослоя через узкополосный спектральный фильтр, получают фурье-образы этих снимков и производят усреднение модулей фурье-образов. Если ввести в оптическую систему рассеиватель и смещать его между операциями экспонирования, в принципе становится возможным достижение дифракционного предела разрешения. Второй метод использует усреднение статистически независимой зернистой структуры фотоматериала при псевдошумовом кодировании последовательности временных импульсов, на которые разбивается суммарная экспозиция, с последующей расшифровкой регистрограммы с помощью сканирующего микрофотометра, снабженного оптимальным согласованным фильтром — многоэлементной апертурой, причем вводится также операция подавления избыточности (фильтрации) низкочастотной составляющей.

«АКТИВНЫЙ» СИНТЕЗ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Синтез апертуры может быть проведен и при когерентной подсветке наблюдаемых объектов с помощью луча лазера. Простейшим примером такого синтеза, получившего в литературе название «активного», может служить интерферометр Майкельсона с лазерным освещением [65] (рис. 16). При прохождении наблюдаемого объекта с постоянной угловой скоростью через поле лазерного излучения на фотоприемнике возникает осциллирующий сигнал, соотношение между постоянной и переменной составляющими которого зависит от угловых размеров объекта и может использоваться для его опознавания. Преимуществами этого инструмента перед обычным телескопом являются низкие требования к качеству зеркала системы регистрации отраженного сигнала, несколько меньшая чувствительность к оптической неоднородности атмосферы и повышенная разрешающая способность. По-видимому, на характер отраженного сигнала в сильной степени влияет пространственный шум («зернистость»), возникающий вследствие когерентного характера освещения [66]. Приведенная в [65] оценка дальности действия интерферометра (200 *км*) по объекту диаметром 2 *м* с коэффициентом отражения 0,25 при вероятности обнаружения 0,99 была получена при следующих параметрах: мощность непрерывного излучения лазера 100 *вт*, длина волны 10,6 *мкм*, диаметр приемной апертуры 1 *м*, время наблюдения 1 *сек*.

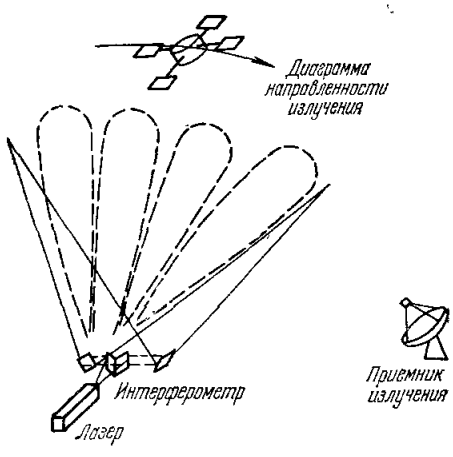

Рис. 16. Схема активного интерферометра Майкельсона [10, 66].

Для получения информации об удаленном вращающемся объекте может быть использован способ наблюдения, основанный на эффекте Допплера [67].

Вместо регистрации оптического изображения объекта при некогерентном освещении может успешно применяться регистрация его голограммы при когерентном освещении [68–72]. Для детектирования поля голограммы используется матрица телескопов с телевизионными трубками, а восстановление изображения в реальном времени производится с помощью быстродействующей ЭВМ. Опорный пучок получают, размещая на объекте

световозвращатель, либо используя в качестве опорной волны часть объектной (после пространственной фильтрации), либо используя излучение освещающего лазера после прохождения через линию задержки. Использование импульсного освещения может оказаться выгодным для наблюдения объектов, перемещающихся в поле зрения. Этот метод в принципе может привести к существенному уменьшению влияния атмосферной турбулентности, так как фазовые искажения, вносимые атмосферой, идентичны для объектного и опорного пучков (если источник опорной волны — световозвращатель — расположен на объекте или вблизи него) и могут быть компенсированы при восстановлении изображения. Возможности метода существенно ограничиваются небольшим динамическим диапазоном приемников изображения (фотослой, телевизионная трубка) [71-72], не соответствующим динамическому диапазону поля голограммы, резко возрастающему при перераспределении энергии, возникающем вследствие турбулентности атмосферы.

В модельных экспериментах удалось зарегистрировать голограмму и восстановить различимое изображение в тех условиях, когда турбулентность атмосферы сделала невозможной обычную фотографическую регистрацию изображения.

Для случая сканирования волнового поля голограммы оптической системой произвольной апертуры, в центре входного зрачка которой расположен точечный опорный приемник, а в плоскости изображения — фотоприемник, было показано, что увеличение апертуры выгодно лишь до тех пор, пока угол дифракции оптической системы становится равным углу поля зрения [73].

При детектировании поля голограммы апертурой, синтезированной во времени, путем записи на последовательности различных голограмм некоррелированных между собой реализаций волнового фронта, также можно исключить влияние оптически неоднородной среды. Путем последовательного просвечивания голограмм волновые фронты складываются с сохранением амплитудно-фазовых соотношений; при этом случайные знакопеременные помехи подавляются, а регулярный полезный сигнал усиливается [74]. Возможно и осреднение некоторого числа голограмм объекта, для чего N распределений интенсивности в плоскости голограмм складываются, а полученный результат делится на N (фотоэлектрическим или фотографическим методом) и записывается на фотослой; полученная осредненная голограмма используется для восстановления изображения[75].

При наблюдении объекта, освещенного когерентным светом (например, восстановленного из голограммы изображения) через оптическую систему с изменяющейся во времени апертурой, например, с малым входным зрачком, перемещающимся внутри большого зрачка, происходит пространственная фильтрация усредненного во времени изображения, что может привести к уменьшению когерентного оптического шума. Теоретический анализ, выполненный в работе [76, 77], показал, что свойства получаемого в этом случае изображения эквивалентны свойствам изображения объекта, наблюдаемого через оптическую систему со стационарной апертурой и освещенного квазимонохроматическим некогерентным кольцеобразным источником.

Значительные успехи, достигнутые при использовании принципа синтеза апертуры в радиолокации [8, 78], а также близость методов радиолокационного наблюдения с синтезированной апертурой и методов оптической голографии [79-82] вызывают большой интерес к возможности построения системы бокового обзора с синтезированной апертурой в оптическом диапазоне спектра. Модельный эксперимент [83] по регистрации сигнала от зеркал, освещаемых движущимся относительно них лучом

гелий-неонового лазера и лазера на CO_2, показал такую возможность; достигнутая разрешающая способность была существенно выше, чем сечение пучка лазера, освещающего объект. Был выполнен расчет параметров системы бокового обзора на основе лазера на CO_2 для наблюдений земной поверхности с самолетов или со спутников [84]. Однако уменьшение длины волны при переходе из радиочастотного в оптический диапазон спектра составляет четыре порядка величины, что накладывает весьма жесткие требования к стабильности движения носителя; так, смещение его вследствие вибрации на 2—3 *мкм* приведет к невозможности регистрации голограммы.

КОЛЬЦЕВАЯ АПЕРТУРА И ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРАДОКС ГАБОРА

В 1968 г. Габор [85] обратил внимание на то, что получение изображения некогерентных объектов при помощи синтезированной кольцевой апертуры с дискретными элементами, практически осуществленное в радиодиапазоне Уайлдом [6, 86] с помощью Калгурского радиогелиографа (см. рис. 6), заставляет по-новому подойти к применению принципов теории информации в оптике. Парадоксально то, что информация может быть передана (если отвлечься от фотонного шума) через сколь угодно малый элемент составной апертуры; при этом количество *почти* независимых элементов *изображения* может существенно превзойти количество *столь же малых* элементов кольцеобразной *апертуры*.

Существо работы Уайлда [86] заключается в нахождении и успешной практической реализации особого метода обработки информации, получаемой от множества расположенных по кольцу антенн. Если без обработки кольцеобразная апертура синтезирует «плохую» полярную диаграмму распределения мощности

$$F_0(r) = J_0^2(2\pi ar),$$

где J — функция Бесселя, то метод Уайлда позволяет получить «хорошую» диаграмму вида

$$F(r) = J_k^2(2\pi ar),$$

где k — целое число, и осуществить в силу круговой симметрии функции $F(r)$ суммирование

$$F(r) = \sum_{k=0}^{\infty} t_k J_k^2(2\pi ar).$$

Этот метод, основанный на подборе фазовых соотношений при совместной обработке информации от всех антенн кольца, приводит к тому, что *тонкая* кольцевая апертура, которая может рассматриваться как реализация *одномерной* функции, создает хорошее изображение, т. е. реализацию двумерной функции. В Калгурском радиогелиографе 96 антенн (диаметр отдельной антенны 13 *м*, диаметр кольца 3000 *м*, длина волны 3,75 *м*) формируют изображение, состоящее не из 96, а из приблизительно 3000 независимых элементов!

В связи с этим противоречием Габор указал, что ранее считавшееся незыблемым положение о равенстве количества элементов, передаваемых оптической системой, и количества элементов изображения, строгое в математическом смысле, должно быть пересмотрено под влиянием успехов, достигнутых на практике. Хотя в N-мерном пространстве можно математически строго провести N взаимно перпендикулярных осей, однако если говорить о *приблизительно* перпендикулярных осях (при среднем

значении $\cos^2$ угла между ними, равном $1/N$), то их число, по Габору, равно

$$\frac{N!}{(N/2)!} \approx \frac{2^N}{\sqrt{\pi N/2}}.$$

В таком приближении получение N^2 почти независимых элементов изображения при использовании N элементов апертуры, по мнению Габора, не должно вызывать удивление. (Позднее Мертц [87] отметил, что еще одной иллюстрацией этого парадокса является практически реализованная возможность восстановления трехмерного изображения, содержащего N^3 элементов, из плоской N^2-элементной голограммы. Заметим, что последнее положение относится к случаю *когерентного* освещения.)

В 1969 г. Торальдо ди Франчиа[88] теоретически показал, что количество информации, передаваемой бесконечно тонкой кольцевой апертурой при некогерентном освещении, полностью эквивалентно количеству информации, передаваемой сплошной круглой апертурой.

Анализ Торальдо ди Франчиа был основан на применении вытянутых сфероидальных волновых функций к подсчету числа степеней свободы оптического изображения. При когерентном освещении кольцеобразной апертуры число степеней свободы такое же, как и для линейной (т. е. одномерной) апертуры. При некогерентном освещении это число эквивалентно числу, получаемому для сплошной круглой апертуры, поскольку в этом случае вместо зрачковой функции P в уравнение входит его автокорреляционная функция $P*P$, близкая к автокорреляционной функции для сплошной апертуры. Хотя возникшую в связи с этим дискуссию [89, 90] нельзя считать законченной, все же результаты, полученные с помощью Калгурского радиогелиографа, однозначно указывают на то, что синтез апертуры позволяет в некогерентном случае получить намного больше информации, чем в когерентном.

Анализ системы построения изображения с дискретной кольцевой синтезированной апертурой, выполненный Гори и Гуаттари [90] с применением аппарата теории частичной когерентности, привел к получению следующего приближенного соотношения между количеством элементов изображения $N_и$ и количеством элементов апертуры $N_а$ (в предположении равенства интенсивности для всех $N_а$):

$$N_и = \frac{1}{2} N_а^2 + 1.$$

Численный расчет для Калгурского радиогелиографа ($N_а = 96$) дает $N_и = 4609$, что превышает экспериментально полученное количество точек (3000) более чем в полтора раза. В случае когерентного освещения

$$N_и = 2N_а - 1$$

и составляет для Калгурского гелиографа всего $N_и = 191$.

При некогерентном освещении поле в плоскости зрачка оптической системы может рассматриваться как обладающее частичной когерентностью, и число степеней свободы изображения равно числу элементов функции автокорреляции зрачковой функции, независимо от весовой функции. Число степеней свободы не обязательно совпадает с числом различных элементов изображения; связь между этими двумя величинами нуждается в дальнейшем исследовании *).

---

*) Анализ числа степеней свободы был недавно выполнен Гори и Гуаттари также и для апертуры из точечных элементов [91].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-видимому, принцип апертурного синтеза применим к большему числу оптических систем по сравнению с описанным в обзоре. Так, дифракционная решетка может рассматриваться как многоступенчатое (до 10^5 ступеней) составное зеркало [92]. Фасеточные глаза насекомых, ракообразных и членистоногих, состоящие из множества (до $3 \cdot 10^4$) структурных единиц, также могут рассматриваться как синтезированные апертуры. Не исключено, что принцип синтеза апертуры реализован в зрительном аппарате пауков, состоящем из восьми глаз. Наконец, возникшая недавно на страницах журнала «Applied Optics» дискуссия [93] отчетливо показывает, что принцип синтеза апертуры был использован Архимедом для сожжения римского флота во время осады Сиракуз в 212 г. до н. э.

Ни один из рассмотренных выше методов синтеза апертуры в оптическом диапазоне не дает системам с синтезированной апертурой *абсолютных* преимуществ перед системами со сплошной апертурой, если последние могут быть изготовлены.

Применение синтезированных апертур может несколько улучшить разрешающую способность или передаточную функцию оптической системы, позволит управлять передаточной функцией, уменьшить вес оптической системы и снизить стоимость ее изготовления. Однако применение синтезированных апертур одновременно ведет к уменьшению освещенности изображения, к необходимости апостериорной оптической обработки информации либо к усложнению конструкции системы и применению дополнительных датчиков и сервомеханизмов.

Методы синтеза апертуры будут находить применение в тех случаях, когда по каким-либо причинам нельзя использовать систему со сплошной апертурой или когда необходимо уменьшить влияние неоднородной среды, через которую ведутся наблюдения, на качество изображения.

Наиболее важные задачи, которые будут решаться с помощью оптических систем с синтезированной апертурой, будут заключаться, по-видимому, в фотографических и спектроскопических исследованиях с космических станций и лунных обсерваторий, в условиях, когда предел разрешения накладывается не оптической неоднородностью атмосферы, как при наблюдениях с Земли, а только дифракцией на апертуре.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. W. Swenson, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 7, 353 (1969); Н. М. Цейтлин, Радиотехн. и электрон. 15, 427 (1970).
2. У. Христиансен, И. Хёгбом, Радиотелескопы, М., «Мир», 1972.
3. С. Э. Хайкин, Ю. Н. Парийский, Изв. ГАО АН СССР 21 (№ 164), 27 (1960).
4. R. N. Bracewell, Austr. J. Phys. 9, 23 (1956).
5. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский, Радиотелескопы и радиометры, М., «Наука», 1973.
6. Дж. Уайлд, УФН 92, 701 (1967).
7. Б. Бэрк, УФН 101, 537 (1970).
8. А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко, Радиолокационные станции бокового обзора, М., «Сов. радио», 1968; Н. И. Буренин, Радиолокационные станции с синтезированной апертурой, М., «Сов радио», 1972.
9. *а*) Synthetic Aperture Optics. Proc. of Woods Hole Summer Study, Nat. Ac. Sci. U.S.A., Washington, D.C., 1967, v. 1, AD 680806; v. 2, AD 680797; *б*) Proc. of the Symposium on Synthetic Aperture Optics (Opt. Sci. Center, Univ. of Arizona, Tucson, Ariz., 1970). Opt. Sci. Center Techn. Rept. 58.
10. J. W. Goodman, сборник «Progress in Optics», v. 8, Ed. E. Wolf, Amsterdam, North-Holland, 1970, p. 1.
11. D. Gabor, Rept. Progr. Phys. 32, 395 (1969).

12. A. A. Michelson, Astrophys. J. **51**, 257 (1920); A. A. Michelson, F. G. Pease, ibid. **53**, 249 (1921); F. G. Pease, Ergeb. Exakt. Naturwiss. **10**, 84 (1931).
13. A. A. Michelson, Phil. Mag. **30**, 1 (1890).
14. Р. Хэнбери Браун, УФН **108**, 529 (1972).
15. E. Wolf. Proc. Roy. Soc. **80**, 1269 (1962); P. Roman, A. S. Marathay, Nuovo Cimento **30**, 1452 (1963); A. Walther, Optica Acta **10**, 41 (1963); C. L. Mehta, J. Opt. Soc. Amer. **58**, 1233 (1968).
16. R. H. Miller, Science **153**, 581 (1966).
17. D. G. Currie, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 79.
18. R. C. Jennison, Mon. Not. RAS **118**, 276 (1958); Introduction to Radio Astronomy. N.Y., Philosophical Library, 1967, p. 125; J. W. Goodman, сборник «Evaluation of Motion-degraded Images», NASA SP-193, Washington, D.C., 1969, p. 89.
19. D. H. Rogstad, Appl. Optics 7, 585 (1968); цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 85.
20. R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, Nature **177**, 27 (1956); Proc. Roy. Soc. **A242**, 300; **A243**, 291 (1957); **A248**, 199, 222 (1958); R. Hanbury Brown et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **137**, 375, 393 (1967); **148**, 103; **150**, 45 (1970); R. Hanbury Brown, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. **6**, 13 (1968).
21. R. H. Miller, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 95; D. G. Currie, ibid., p. 35.
22. R. Q. Twiss, Optica Acta **16**, 423 (1969).
23. T. D. Beard, Appl. Phys. Lett. **15**, 423 (1969).
24. J. W. Goodman, J. Opt. Soc. Amer. **60**, 506 (1970).
25. D. A. Markle, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 133.
26. R. Crane, IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. **AES-5**, 279 (1969); Appl. Optics **8**, 538 (1969).
27. J. F. Creedon, H. J. Robertson, IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. **AES-5**, 287 (1969).
28. M. J. Aucremanne, сборник «Cospar Space Research XII», v. 2, B., Akademie-Verlag, 1972, p. 1787.
29. М. И. Гвоздев, Н. А. Димов, П. Л. Жерпоклеев, В. С. Зуев, П. Д. Калачев, Ю. Л. Кокурин, Т. И. Марченко, Е. П. Орлов, В. А. Сауткин, УФН **111**, 558 (1973).
30. H. F. A. Tschunko, P. J. Shechan, Appl. Optics **10**, 1432 (1971).
31. S. H. Lerman, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 325.
32. R. V. Shack, J. D. Rancourt, H. Morrow, Appl. Optics **10**, 257 (1971).
33. R. R. Shannon, IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. **AES-5**, 273 (1969).
34. E. L. Dereniak, Appl. Optics **12**, 487 (1973).
35. A. B. Meinel, ibid. 9, 2501 (1970).
36. М. М. Русинов, Г. П. Цуканова, Авторское свидетельство СССР № 308402 от 31.10.1969 г., класс МПК G02b 17/06. Бюлл. изобр. № 21, 176 (1971).
37. Ю. Е. Кузилин, В. Н. Синцов, Опт. и спектр. **36**, 612 (1974).
38. K. V. Sheridan, D. J. McLean, Appl. Optics **10**, 2427 (1971).
39. Y. L. Chow, IEEE Trans. Antennas and Propag. **AP-18**, 567 (1970).
40. G. O. Reynolds, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 193.
41. G. O. Reynolds, D. J. Cronin, D. E. Yansen, цит. в [9б] сборник, p. 53.
42. G. O. Reynolds, D. J. Cronin, J. Opt. Soc. Amer. **60**, 634 (1970).
43. D. E. Yansen, G. O. Reynolds, D. J. Cronin, Optica Acta **18**, 167 (1971).
44. G. O. Reynolds, D. J. Cronin, U.S. Patent 3545842, GO2b 5/18, U.S. Class 350-162, 8.12.1970.
45. D. E. Yansen, D. J. Cronin, A. E. Smith, G. O. Reynolds, J. Opt. Soc. Amer. **62**, 643A (1972).
46. R. H. Miller, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 189.
47. J. L. Kreuzer, ibid., p. 401.
48. G. K. O'Neill, ibid., p. 169.
49. J. Arsac, C.R. Acad. Sci. **240**, 942 (1955).
50. A. T. Moffet, IEEE Trans. Antennas and Propag. **AP-16**, 172 (1968).
51. J. W. Goodman, *а*) сборник «Applications of Holography» (Proc. of the U.S.—Japan Seminar, October 1968), N.Y., Plenum Press, 1971, p. 49; *б*) цит. в [9б] сборник, p. 4.
52. F. Gori, G. Guattari, Phys. Lett. **A32**, 38, 446 (1971).
53. F. D. Russell, J. W. Goodman, J. Opt. Soc. Amer. **61**, 182 (1971).
54. F. Gori, G. Guattari, Opt. Comm. **3**, 147, 404 (1971).
55. J. S. Wilczynski, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 183, 211; цит. в [9б] сборник, стр. 17.
56. D. Gabor, G. W. Stroke, R. Restrick, A. Funkhouser, D. Brumm, Phys. Lett. **A18**, 116 (1965).
57. J. S. Wilczynski, Brit. Patent 1247446, 22.9.1971.

58. G. W. Stroke, цит. в [96] сборник, p. 40; Phys. Lett. **A30**, 485 (1969); Opt. Comm. **1**, 283, 287 (1970); цит. в [51a] сборник, стр. 35.
59. G. W. Stroke, G. S. Hayat, R. B. Hoover, J. H. Underwood, Opt. Comm. **1**, 138 (1969).
60. A. Labeyrie, Astron. and Astrophys. **6**, 85 (1970).
61. D. Y. Gezari, A. Labeyrie, R. V. Stachnik, Astrophys. J. **173**, 11 (1972).
62. J. C. Dainty, Opt. Comm. **7**, 129 (1973).
63. Д. А. Новик, Опт. и спектр. **34**, 554 (1973).
64. Д. А. Новик, ibid. **35**, 546.
65. B. C. Murray, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 239.
66. J. W. Goodman, ibid., p. 263.
67. R. E. Hufnagel, сборник «Restoration of Atmospherically Degraded Images» (Proc. of the Woods Hole Summer Study), Nat. Ac. Sci. U.S.A., Washington, D.C., 1967, v. 2 (AD 806879), p. 239.
68. J. W. Goodman, R. W. Lawrence, Appl. Phys. Lett. **11**, 77 (1967).
69. J. W. Goodman, W. H. Huntley, D. W. Jackson, M. Lehmann, ibid. **8**, 311 (1966).
70. J. W. Goodman, сборник Proc. of SPIE Seminar on Holography, San Francisco, Calif., 1968, p. 147.
71. J. W. Goodman, D. W. Jackson, M. Lehmann, J. Knotts, Appl. Optics **8**, 1581 (1969).
72. J. W. Goodman, цит. в [9a] сборник, v. 2, p. 273.
73. Ю. Н. Денисюк, С. И. Соскин, Опт. и спектр. **31**, 121 (1971).
74. Ю. Н. Денисюк, И. Н. Давыдова, ibid. **28**, 330 (1970).
75. А. Д. Гальперн, Ю. Н. Денисюк, ibid. **30**, 340 (1971).
76. J. C. Dainty, W. T. Welford, Opt. Comm. **3**, 289 (1971).
77. W. T. Welford, ibid. **4**, 275.
78. R. O. Harger, Synthetic Aperture Radar Systems, N. Y., Academic Press, 1970.
79. L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello, W. E. Vivian, Proc. IEEE **54**, 1026 (1966) (см. перевод: ТИИЭР **54** (8), 11 (1966)).
80. E. N. Leith, A. L. Ingalls, Appl. Optics **7**, 539 (1968).
80. W. M. Brown, L. J. Porcello, IEEE Spectrum **6** (9), 52 (1969).
82. E. N. Leith, A. A. Friesem, A. T. Funkhouser, IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. **AES-6**, 832 (1970).
83. T. S. Lewis, H. S. Hutchins, Proc. IEEE **58**, 587, 1781 (1970) (см. перевод: ТИИЭР **58** (4), 120; (11), 78 (1970)).
84. A. Waksberg, S. Sizgoric, D. Bennett, Canad. Aeronaut. and Space J. **17**, 423 (1971).
85. D. Gabor, Symposium on Applications of Coherent Light, Florence, 1968; Optica Acta **16**, 519 (1969).
86. J. P. Wild, Proc. Roy. Soc. **A286**, 499 (1965).
87. L. Mertz, Optica Acta **16**, 809 (1969); **18**, 51 (1971).
88. G. Toraldo di Francia, Meeting of European Physical Society, Florence, 1969; J. Opt. Soc. Amer. **59**, 799 (1969).
89. A. Walther, ibid. **60**, 141 (1970).
90. F. Gori, G. Guattari, Phys. Lett. **A31**, 131 (1970); J. Opt. Soc. Amer. **61**, 36 (1971); Optics Comm. **7**, 163 (1973).
91. F. Gori, G. Guattari, J. Opt. Soc. Amer. **64**, 453 (1974).
92. G. R. Harrison, Appl. Optics **12**, 2039 (1973).
93. A. C. Claus, Appl. Optics **12** (10), A14 (1973); O. N. Stavroudis, ibid., p. A16; K. D. Mielenz, ibid. **13** (2), A14 (1974); E. A. Phillips, ibid., p. A16; D. Deirmendjan, ibid. **13**, 452.