

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ. МОДУЛЬНЫЕ ПЛОСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ



К.А. Занин¹,
доктор технических наук,
zaninka@laspace.ru;
K.A. Zanin

Рассматривается возможность применения составных адаптивных оптических систем (ОС) в космических системах оптико-электронного наблюдения. Анализируются преимущества и недостатки основных способов синтеза апертуры. Показана возможность создания крупногабаритных ОС на основе интерферометрического синтеза апертуры. Приведена оценка основных ограничений и достижимых характеристик такого способа.

Ключевые слова:
адаптивная оптическая система;
синтезирование апертуры;
интерферометр;
дистанционное зондирование Земли;
функция передачи модуляции;
разрешающая способность;
линейное разрешение на местности.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.009

¹ АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

DEVELOPMENTAL POTENTIAL OF SPACE OPTICAL-ELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEMS. MODULAR FLAT IMAGE DETECTORS WITH INTERFEROMETRIC APERTURE SYNTHESIS



Н.Н. Клименко¹,
кандидат технических наук,
klimenkonn@laspace.ru;
N.N. Klimenko

The article covers a possibility of composite adaptive optical systems implementation in space optical-electronic surveillance systems. An analysis of advantages and disadvantages of the main aperture synthesis methods is given. The development feasibility of large optical systems based on interferometric aperture synthesis is shown. An assessment of the main limitations and achievable characteristics is given.

Keywords:
self-adaptive optical system;
aperture synthesis;
interferometer;
Earth remote sensing;
modulation transmission function;
resolution;
in-situ linear resolution.

Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

1. Основные методы оптического синтеза апертуры

Производство крупногабаритных ОС связано с большими трудностями. Задачу увеличения апертуры можно решить созданием модульной конструкции ОС. Существует несколько основных подходов к созданию таких ОС:

- оптико-механический синтез апертуры путем построения крупного адаптивного составного зеркала с оптико-механической системой сведения волновых фронтов от большого количества малых зеркал;
- интерферометрический синтез апертуры с использованием интерферометров различных типов, регистрирующих комплексную степень когерентности, а не само изображение.

Рассмотрим эти способы подробнее.

Оптико-механический синтез осуществляется при помощи крупногабаритного составного зеркала, состоящего из большого количества малых зеркал, форма поверхности которых соответствует общей поверхности большого зеркала. Сведение волновых фронтов осуществляется при помощи элементов адаптивной оптики и оптико-механических систем. Система управления элементами составного зеркала осуществляет коррекцию их углового и линейного положения с целью совмещения отдельных изображений в единое целое. К точности поддержания относительного положения зеркал предъявляются жесткие требования, обычно не более десятой длины волны. В системе управления положением зеркал используются оптические датчики, прецизионные приводы управления и лазерные юстировочные устройства.

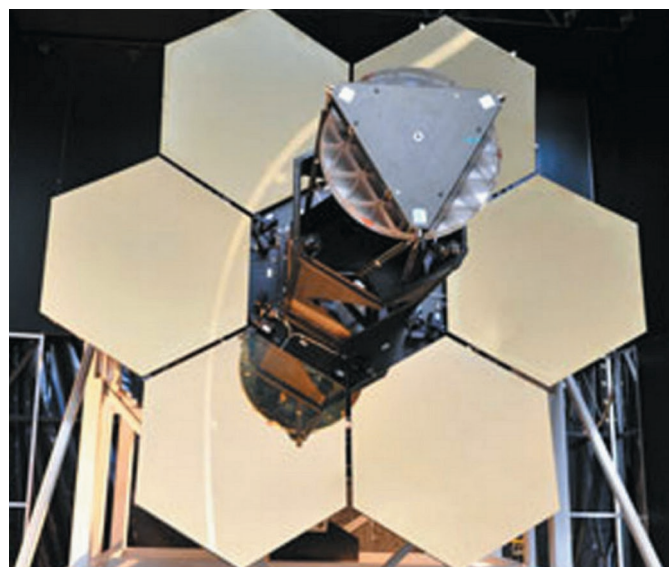


рисунок 1. Раскрываемая адаптивная оптическая система Giant Segment Telescope Mirror

Такие системы могут быть реализованы как на основе жёсткого основания, так и разворачиваемыми после выведения на орбиту (*DARPA developing giant folding space telescope*).

Так, в результате работы по созданию раскрываемых адаптивных ОС в интересах National Reconnaissance Office (NRO) был создан Giant Segment Telescope Mirror диаметром три метра (рисунок 1), состоящий из шести зеркал (*NPS New Home for Giant Segmented-Mirror Space Telescope*).

Задачей реализации этих проектов являлась оценка возможности адаптивной коррекции оптических осей телескопа в условиях имитации космического полёта. Однако, по оценкам специалистов, раскладные крупногабаритные телескопы видимого диапазона имеют существенные трудности обеспечения точности сведения волновых фронтов в условиях космического полета и микровозмущений со стороны КА.

Раскладное сегментированное зеркало диаметром 6,5 м удалось реализовать в космическом телескопе «Джеймс Уэбб» (JWST) для среднего и дальнего инфракрасного диапазона, где требования к линейным точностям перемещения существенно ниже, чем для видимого диапазона.

Подобные сегментированные ОС за рубежом предполагается применять и для передачи энергии инфракрасных лазеров на расстояние.

Развитие адаптивных сегментированных зеркал для видимого диапазона спектра продолжилось в направлении нераскладных конструкций, где сегменты и система адаптации расположены на едином размеростабильном основании.

Например, был создан демонстратор Adaptive Large Optics Technologies (ALOT) с диаметром сегментированного зеркала 4 м (рисунок 2). Каждый сегмент имел диаметр 2,6 м. Система адаптации обеспечивала точность волнового фронта не хуже 35 нм (менее одной десятой длины волны) и состояла из 144 активаторов главного зеркала и 43 вторичного. Удельный вес главного зеркала составил 70 кг/м².

Конструкция была рассчитана на запуск ракетой «Титан-4». Вероятно, исследования по созданию крупногабаритной ОС ALOT проводились не только в интересах передачи лазерной энергии, но и для программы КС ОЭН типа KeyHole (Клименко Н.Н., Занин К.А., 2024; Занин К.А., Клименко Н.Н., 2023).

Таким образом, в начале нового XXI века были созданы действующие макеты ОС с оптико-механическим синтезом апертуры. Они убедительно показали возможность применения адаптивных сегментированных зеркал для КС ОЭН и других приложений.

С учётом известных трудностей с обеспечением точности ОС с оптико-механическим сведением волнового фронта изображения имеют ограничение

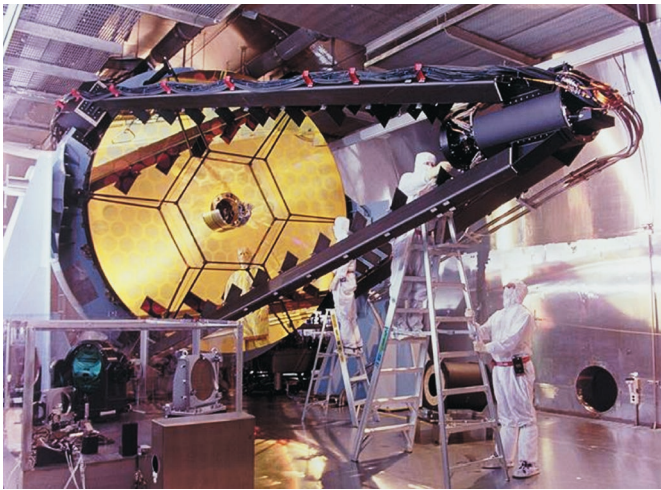


рисунок 2. Демонстратор Adaptive Large Optics Technologies

по наращиванию диаметра. Их применение в КС ОЭН в основном обусловлено снижением массы путём возможности компенсации погрешностей изготовления конструкции и механических воздействий на нее после выведения на орбиту.

Потенциальные преимущества для космических сверхбольших телескопов могут иметь оптические системы с частично заполненной апертурой. По сравнению со сплошной апертурой они позволяют существенно уменьшить массу ОС.

Американский физик Gerard O'Neill в 70-х годах предложил концепцию космического составного телескопа с эквивалентным диаметром апертуры, равным 125 м, из 200 элементов диаметром 1 м. При массе каждого сегмента 200 кг общий вес зеркала составлял 40 т, что соответствовало нагрузке имеющихся и перспективных космических ракет.

Коэффициент заполнения апертуры такого телескопа был невелик и близок к 1%, однако он мог бы обладать рекордной разрешающей способностью. При размещении такого телескопа на геостационарной орбите даже учитывая недостатки, связанные с малым коэффициентом заполнения апертуры, разрешающая способность составила бы лучше 0,5 м.

Gerard O'Neill отмечал, что создание большого 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 (Синцов В.Н., Запругаев В.Ф., 1974). Ранее наблюдение Земли в космический телескоп описал К.Э. Циолковский: «Что было видно в телескоп и молвить страшно» (Циолковский К.Э., 1920).

Недостатки ОС с частично заполненной апертурой заключаются в потерях энергии (так как не вся апертура заполнена). Предельное разрешение частично

заполненной апертуры теоретически может быть близко к разрешению сплошной апертуры, однако реализуемое соотношение сигнал – шум невелико.

Трудности совместной юстировки отдельных элементов приводят к возрастанию aberrаций ОС в целом и потере её разрешения. В результате разрешающая способность может быть хуже предельно возможного дифракционного предела. Промежуточные пространственные частоты передаются хуже или полностью теряются.

Указанные выше недостатки компенсируются недоступным в других способах большим линейным размером синтезируемой апертуры и перспективами её дальнейшего неограниченного наращивания. Тем не менее реализовать предложенный 125 м телескоп при помощи оптико-механических способов синтеза апертуры в настоящее время не представляется возможным.

2. Интерферометрический синтез апертуры

Одним из путей преодоления трудностей оптико-механического сведения изображений составных элементов является интерферометрический синтез апертуры. В этом случае регистрируется не оптическое изображение, а интерференционная картина, по которой измеряется комплексная степень когерентности излучения, полученного с двух разнесенных в пространстве апертур (Токовинин А.А., 1988).

Основной задачей составных апертур в интерферометре является собирание потока излучения для улучшения отношения сигнал – шум. При этом требования к качеству поверхности составных зеркал существенно упрощаются. Однако в интерферометре сохраняется необходимость сведения волнового фронта с ошибкой не хуже четверти длины волны.

Суть интерферометрического синтеза апертуры состоит в измерении комплексной функции когерентности $\eta(u, v)$ для каждой пары зеркал с вектором базы с координатами (x, y) . Комплексная функция когерентности $\eta(u, v)$ равна преобразованию Фурье от распределения интенсивности излучения $I(u, v)$ на пространственной частоте $u=x^{-1}$ и $v=y^{-1}$.

Необходимо провести измерение $\eta(u, v)$ для большого количества баз (x, y) , заполняющих область апертуры D . Распределение интенсивности изображения в этом случае рассчитывается обратным преобразованием Фурье. Разрешающая способность полученного распределения яркости определяется дифракцией на синтезированной апертуре с размерами области D .

Для построения изображения с высоким качеством требуется большое количество измерений с различным размером и ориентацией баз. На практике

полное заполнение апертуры базами невозможно и синтез проводится в условиях неопределённости. Влияние неполного заполнения воздействует на функцию передачи модуляции и ухудшает разрешающую способность.

3. Перспективная оптическая система с интерферометрическим синтезом изображения SPIDER

Существенный прогресс в оптике произошёл на рубеже 1980-х годов в результате появления одно-модовых световодов из кварцевого волокна, которые могут сохранять когерентные свойства передаваемого по ним излучения на значительное расстояние.

Это свойство волоконных световодов привело к бурному развитию лазерных систем передачи данных. В результате были созданы надёжные и компактные волоконно-оптические элементы: делители спектра, линии задержки, фазовращатели, делители и сумматоры сигналов и др.

Применение оптоволоконных технологий позволило создать высокочувствительные волоконные интерферометры и различные датчики физических величин на их основе.

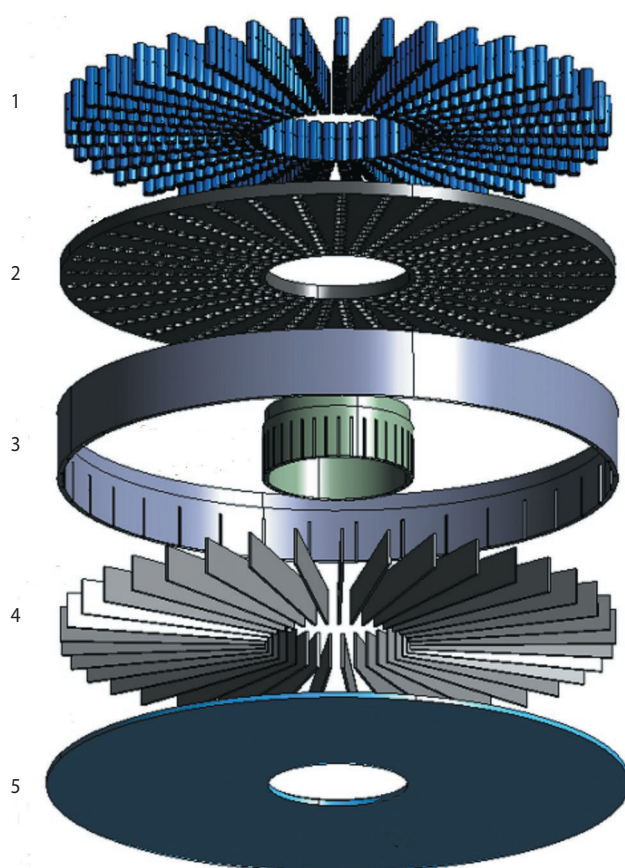
На основе оптоволоконных технологий фирмой Lockheed Martin Advanced Technology Center был создан прототип инновационной оптико-электронной системы с интерферометрическим синтезом апертуры (*SPIDER: Next generation chip scale image sensor*). Масштабируемая оптико-электронная система (ОЭС) называется Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance (модульный плоский детектор изображений для электронно-оптической разведки) SPIDER.

Применение такой ОЭС предполагается в проекте DARPA SPIDER Zoom program (*Brainstorm with DARPA on a «100x Zoom Lens»*) (рисунок 3). Вариант её конструкции показан на рисунке 4.

Объединение субапертур интерферометра и детектирование излучения проводится на специально разработанных фотонных чипах.



рисунок 3. Варианты конструктивного исполнения ОЭС SPIDER



- 1 — массив бленд;
- 2 — массив микролинз;
- 3 — корпус;
- 4 — интегральные фотонные чипы;
- 5 — основание.

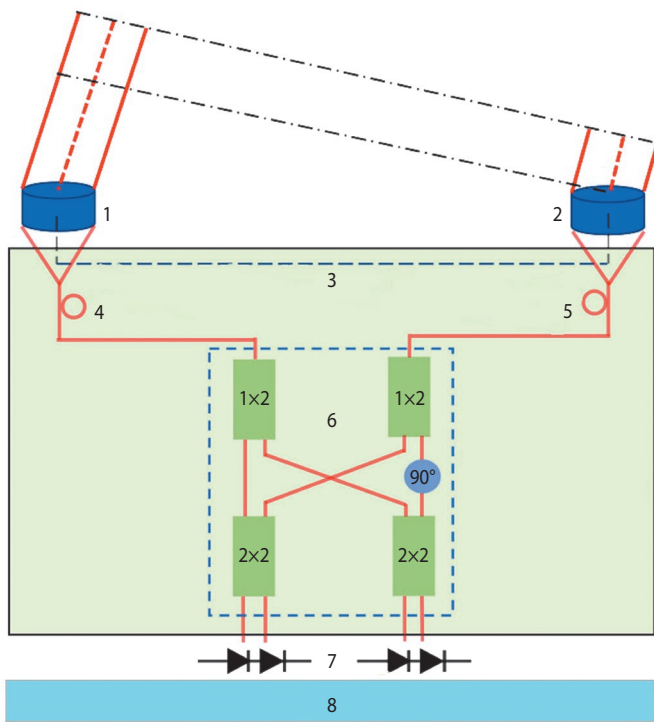
рисунок 4. Пример конструкции ОЭС SPIDER

На рисунке 5 приводится принципиальная схема ОЭС SPIDER.

Плоский детектор типа SPIDER (рисунок 4) основан на множестве оптических элементов 1, 2, которые предназначены для собирания энергии электромагнитного излучения. Оптические элементы попарно соединяются оптоволоконными линиями, образуя интерферометрические базы 3.

Пространственное распределение баз определяется исходя из требования равномерности заполнения *uv* плоскости пространственных частот. Базовые линии должны иметь различную длину и ориентацию в пространстве (рисунок 6, 7), образуя так называемую «безызыбычную конфигурацию» (Токовинин А.А., 1988).

Фазирование волнового фронта для образования интерференционной картины производится при помощи оптических фазовращателей и линий задержки 4, 5. Для получения мультиспектрального изображения и уменьшения потерь в оптоволоконных линиях передачи в системе применяются спектроделители.



- 1, 2 – оптические элементы, образующие интерферометр;
 3 – базовая линия;
 4, 5 – фазовращатели и линии задержки;
 6 – оптический четырёхквadrатурный демодулятор с делителями 1×2 и 2×2 и фазовращателем на 90°;
 7 – балансные фотозлектронные преобразователи;
 8 – аналого-цифровой преобразователь и быстродействующая вычислительная система.

рисунок 5. Принципиальная схема устройства ОЭС SPIDER

Интерференция оптического излучения происходит в гибридном оптическом четырёхквadrатурном демодуляторе 6. Для преобразования сигнала в электрический ток применяется балансный твёрдотельный преобразователь 7 на основе твёрдотельных фотозлектронных умножителей (кремниевых лавинных диодов).

Применяемый тип демодулятора позволяет вычесть амплитудную и фазовую зависимость сигнала от времени и измерить функцию когерентности сигналов двух апертур. Принцип работы когерентного оптического детектора и его математическая модель подробно описан в (Khachaturian A., Fatemi R., Hajimiri A., 2021).

В результате интерференции в сумматоре получается суперпозиция интенсивностей различных волн, которую в общем виде можно представить выражением:

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) + 2\eta(I_1(t)I_2(t))^{0.5} \cos(\psi_1(t) - \psi_2(t) + \Delta\psi),$$

где I_1 , I_2 – интенсивность сигнала, получаемая с первой и второй апертуры; ψ_1 , ψ_2 – фаза, зависящая от времени (ширины полосы и частоты сигнала); $\Delta\psi$ – постоянная разность фаз; η – степень когерентности излучения.

На выходе демодулятора формируется два квадратурных сигнала общего вида:

$$I(t) = 2\eta(I_1(t)I_2(t))^{0.5} \sin(\Delta\psi),$$

$$Q(t) = 2\eta(I_1(t)I_2(t))^{0.5} \cos(\Delta\psi).$$

Они позволяют оценить разность фаз и степень когерентности излучения, формируемого двумя элементарными апертурами.

Оцифровка, накопление и дальнейшая обработка сигнала происходит в быстродействующей вычислительной системе 8.

Принципы обработки и синтеза изображения схожи с применяемыми в радиолокации и радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой. В силу технических ограничений полного заполнения плоскости апертурами достигнуть невозможно. Поэтому синтезирование изображения осуществляется по не полным данным.

Для улучшения качества конечного изображения применяются дополнительные алгоритмы, в том числе основанные на нейронных сетях (рисунок 8).

В настоящее время технология SPIDER проходит экспериментальную отработку. В ряде фирм созданы

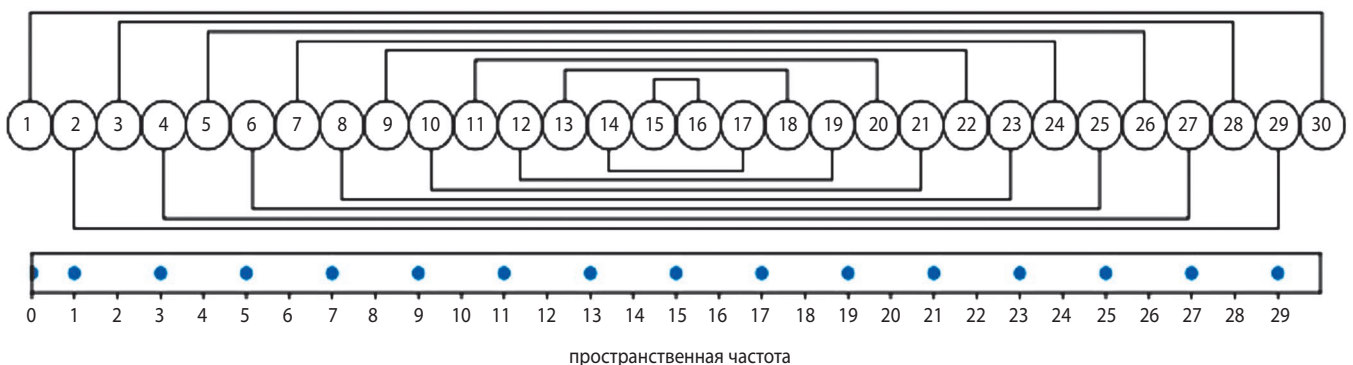
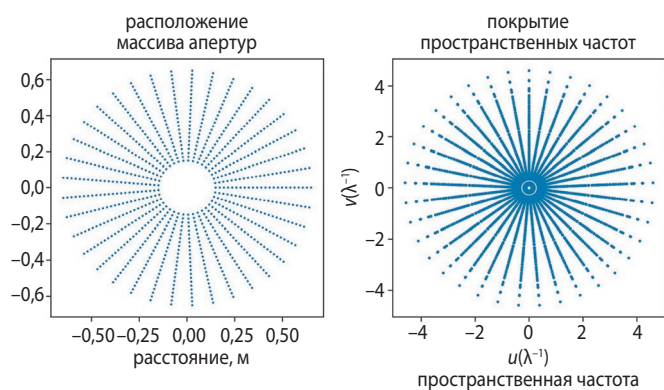
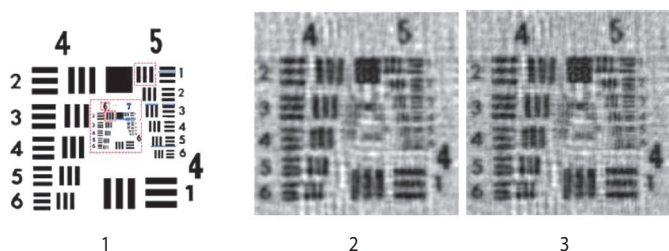


рисунок 6. Пример схемы коммутации баз массива интерферометров и покрытие пространственных частот



рисунки 7. Расположение массива апертур, образующих интерферометры и покрытие области пространственных частот



1 – тестовая мира;
2 – синтезированное изображение;
3 – улучшенное изображение.

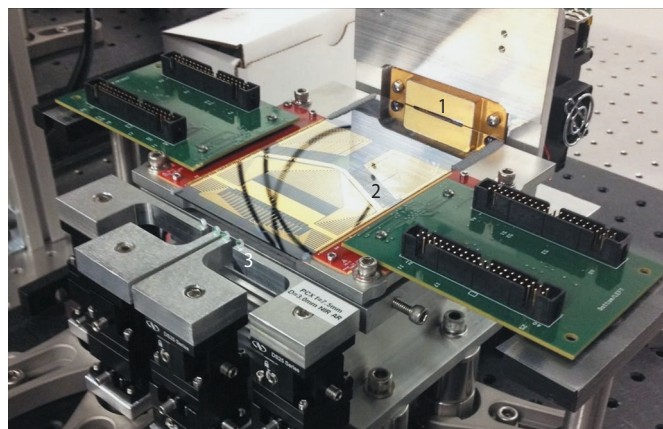
рисунки 8. Пример изображения ОЭС SPIDER

действующие образцы плоских интерферометрических детекторов и получены тестовые изображения (рисунки 9, 10). Отрабатываются различные способы оптимизации конструкции и обработки изображений. Таким образом, оптический интерферометрический синтез апертуры стал реальностью и в ближайшее время будут созданы образцы ОЭС, пригодные для практического использования.

Вместе с тем интерферометрический синтез апертуры имеет не только преимущества, но и недостатки.

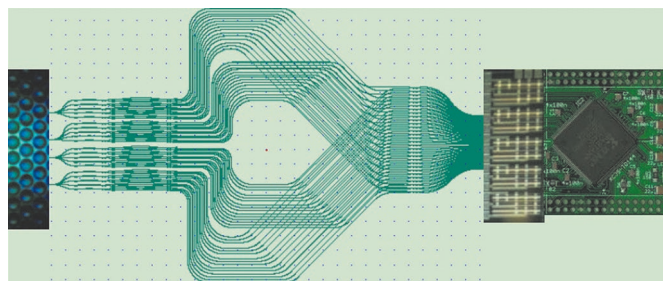
4. Анализ основных характеристик оптико-электронных систем с интерферометрическим синтезированием апертуры

Теория получения изображения некогерентных объектов при помощи синтезированной апертуры с дискретными элементами изложена в ряде работ (Gabor D., 1946; Gan W.S., 1971). Количество формируемых независимых элементов изображения определяется возможным сочетанием не коррелированных баз интерферометра.



1 – фотоприёмник;
2 – интегральная фотонная микросхема;
3 – линзовый массив.

рисунки 9. Макет ОЭС SPIDER (DARPA)



рисунки 10. Интегральная фотонная микросхема (чип)

Общее количество элементов изображения по теореме Д. Габора (Gabor D., 1946) оценивается выражением:

$$N_{\text{и}} \approx 0,5N_{\text{а}}^2 + 1,$$

где $N_{\text{а}}$ – количество элементарных апертур.

Особенностью многоэлементного интерферометра является то, что информация теоретически может быть получена с использованием какого угодно малого диаметра элементов составной апертуры. Однако диаметр элементарных субапертур не может быть сколь угодно мал, так как он ограничивает возможность наблюдения слабых объектов. Площадь субапертуры определяет требуемое время накопления и отношение сигнал – шум с учётом фотонного шума и необходимости преодоления порога шума считывания и электронного тракта.

Угловая разрешающая способность ОЭС определяется максимальным размером базы:

$$\gamma \approx \lambda / D_{\text{max}},$$

где D_{max} – максимальный размер базы интерферометра.

Таким образом, для обеспечения требуемого количества элементов изображения необходимое количество апертур определяется выражением:

$$N_a \approx (2N_n - 2)^{0.5}.$$

Соответственно требуемое угловое поле зрения ОС с учётом количества элементов изображения определяется выражением:

$$\beta_{тр} \approx \gamma N_n^{0.5} \approx \lambda N_n^{0.5} / D_{max}.$$

Теоретически угловое поле зрения определяется минимальным размером, соответствующим элементарному угловому разрешению субапертуры:

$$\beta \approx \lambda / D_a,$$

где D_a – диаметр элементарной ОС, образующей интерферометр.

Данное ограничение устраняется путём регистрации сигнала с заданного углового размера:

$$\beta \approx M \lambda / D_a,$$

где M – условное количество элементов разрешения, содержащихся в поле зрения элементарной ОС.

Суммирование сигнала с заданной площади может быть реализовано различными способами, например, при помощи оптоволоконной матрицы с числом элементов $S = M^2$.

Предельно возможная площадь составной апертуры ограничена общей площадью, коэффициентом заполнения и количеством субапертур:

$$S_a \approx 0,25 \pi k_3 D_{max}^2 / N_a,$$

где k_3 – коэффициент заполнения.

Соответствующий предельный диаметр апертуры элементарной ОС:

$$D_a \approx 2(S_a / \pi)^{0.5} \approx D_{max}(\pi k_3 / N_a)^{0.5}.$$

Предельный диаметр элементарной ОС ограничен величиной:

$$D_a \leq k_3 D_{max} / N_a^{0.5}.$$

Приведённые выражения позволяют оценить основные характеристики ОЭС типа SPIDER.

В таблице приводится оценка, какие параметры мог бы иметь телескоп, предлагаемый O'Neill в 1970-х годах для наблюдения с геостационарной орбиты на основе ОЭС с интерферометрическим синтезом апертуры типа SPIDER.

Зададим требование обеспечения квадратного кадра с шириной 10000 пикселей с общим информационным объёмом изображения в 100000000 пикселей, что соответствует минимальным требованиям к современным КА ОЭН.

Число Штреля (концентрация энергии в радиусе дифракционного пятна) для ОЭС с интерферометрическим синтезом оценивается величиной не лучше 0,3...0,5. Таким образом, реальное пространственное разрешение такой ОЭС может быть в 2-3 раза хуже предельного возможного дифракционного ограничения. Однако возможность реализации большого

таблица – Оценка параметров гипотетической крупногабаритной ОЭС с интерферометрическим синтезом изображения

наименование параметра	оценка значения
диаметр апертуры, м	125
длина волны, мкм	0,65
дальность наблюдения, м	42000000
ширина кадра, пиксель	10000
объём изображения, пиксель	100 000 000
количество элементарных апертур	14142
угловая разрешающая способность, угл. с	0,001
угловое поле зрения, угл. с	11
коэффициент заполнения площади	0,3
диаметр составных апертур, м	1,0
количество элементов разрешения в поле зрения элементарной ОС	82
проекция элемента разрешения на местности, м	0,25
полоса захвата, м	2000

размера апертуры по сравнению с обычными ОС компенсирует этот недостаток.

Тем не менее для практической реализации крупногабаритной ОЭС типа SPIDER необходимо обеспечить решение следующих проблем:

- фокусировки ОЭС путём сведения фаз оптоволоконных каналов с погрешностью не более четверти длины волны;
- компенсации температурных уходов и поддержание фокусировки на интервале времени экспонирования;
- совмещения полей зрения элементарных субапертур с высокой точностью;
- обеспечения ошибки угловой стабилизации не хуже элемента углового разрешения за интервал времени накопления сигнала;
- защиты крупногабаритной конструкции от вибраций;
- роботизированной сборки модульной конструкции в космосе.

Основным направлением обеспечения фазовой стабильности информационного тракта интерферометрической ОЭС является развитие интегральных оптоволоконных элементов (микросхем), которые выполняются на размеростабильном основании и содержат в себе линии задержки, управляемые фазовращатели, сумматоры и делители сигнала с детекторами изображения.

Управление фокусировкой и адаптация сложной ОЭС требует дальнейшего развития алгоритмического обеспечения.

Техническое решение проблем угловой стабилизации и наведения визирной оси возможно с применением адаптивных микромеханических систем.

заключение

Развитие оптоволоконных технологий и твёрдых детекторов излучения в настоящее время позволило объединить в единую систему множество элементарных ОС.

В результате был создан и новый тип ОЭС с интерферометрическим синтезом апертуры на основе множества интерферометров типа Майкельсона. Такие ОЭС лишены недостатков, связанных с необходимостью оптико-механического синтеза апертуры путем высокоточного сведения изображений. В ОЭС нового типа синтезирование изображения аналогично радиолокации и радиоастрономии осуществляется в цифровом виде программным путём.

За рубежом в настоящее время осуществляется практическая отработка различных конструкций таких ОЭС.

Наиболее перспективным является развитие метода интерферометрического синтезирования апертуры, что позволит существенно увеличить размер и разрешающую способность перспективных ОЭС с меньшей удельной массой по сравнению с существующими.

список литературы

Занин К.А., Клименко Н.Н. Применение космических аппаратов двойного назначения для решения военных задач. Часть 1. Космические аппараты оптико-электронного наблюдения нового поколения компаний Planet и Blacksky // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4. С. 20-28.

Клименко Н.Н., Занин К.А. Космические системы оптико-электронного наблюдения между прошлым и будущим. Часть 1. Трансформация концепции создания и применения космических средств оптико-электронного наблюдения на рубеже эпох // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 2. С. 69-83.

Синцов В.Н., Запругаев В.Ф. Апертурный синтез в оптике // Успехи физических наук. 1974. Т. 114, вып. 4. С. 655-676.

Токовинин А.А. Звездные интерферометры. М.: Наука, 1988. 160 с.

Циолковский К.Э. Вне Земли: повесть. Калуга, 1920. 118 с.

Brainstorm with DARPA on a «100x Zoom Lens» // URL: <http://www.darpa.mil> (дата обращения: 16.09.2024).

DARPA developing giant folding space telescope // URL: <http://www.darpa.mil> (дата обращения: 16.09.2024).

Gabor D. Theory of Communication // J. Inst. Elect. Eng., 93, Part III. 1946. P. 429-457.

Gan W.S. Generalizations of Gabor's Theory – The theory of Multi-Beam Holographic Interferency // Acoustical Holography. Boston: Springer, 1971. P. 363-396.

Khachaturian A., Fatemi R., Hajimiri A. IQ Photonic Receiver for Coherent Imaging with a Scalable Aperture // Open journal of solid-state circuits society. 2021. Vol. X, № Y.P. 1-8.

NPS New Home for Giant Segmented-Mirror Space Telescope // URL: <https://nps.edu/-/nps-new-home-for-giant-segmented-mirror-space-telescope> (дата обращения: 16.09.2024).

SPIDER: Next generation chip scale image sensor // URL: <https://amostech.com> (дата обращения: 16.09.2024).

Статья поступила в редакцию 16.09.2024

Статья после доработки 23.09.2024

Статья принята к публикации 27.09.2024