

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.391 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.20.36

**Многоапертурная оптическая система счета фотонов
в изображении для безабберационных наблюдений
космического мусора через турбулентную атмосферу
(Часть II)**

К. Н. Свиридов, д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Е. Тюлин, д. э. н., к. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются принципы построения и стратегии применения наземной оптической системы мониторинга космического мусора, защищенные патентом РФ на изобретение. Целью данного изобретения являлось увеличение дифракционного разрешения формируемых изображений малоразмерного космического объекта и повышение точности восстановления неискаженных атмосферой модуля и фазы его пространственного спектра. Для достижения поставленной цели формирование искаженных атмосферой изображений космического объекта осуществляют когерентной матрицей из M подвижных телескопов диаметра D в процессе пространственно-временного апертурного синтеза, при котором направляют комбинируемые субпучки от подвижных телескопов вдоль рельсовых путей к центру матрицы, где размещают неподвижную базовую станцию, в которой осуществляют как когерентное комбинирование субпучков, так и детектирование сформированных серий из N изображений с их последующей регистрацией и обработкой. При статистической обработке модулей и фаз пространственных спектров зарегистрированных изображений учитывают островной характер ОПФ матрицы вдоль эллипсов когерентности и ее полуострова в радиальном направлении, простирающиеся от центра пространственно-частотной области до частоты отсечки синтезируемой апертуры диаметра D_3 . Положительный эффект от использования данного изобретения заключается в том, что когерентная работа матрицы обеспечивает выигрыш в дифракционном разрешении в D_3/D раз ($D_3/D \gg 1$), а повышение в D/r_0 раз, где r_0 — пространственный радиус корреляции атмосферных флуктуаций, точности восстановления неискаженных атмосферой модуля и фазы пространственного спектра от объекта предложенной процедурой сглаживания позволяет во столько же раз ($D/r_0 \gg 1$) сократить требуемое число N регистраций в серии, сокращая общее время мониторинга.

Ключевые слова: апертурный синтез, фотоотсчетное детектирование, цифровая корреляционная обработка

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Multi-Aperture Optical System of Photon Counting in the Image for Aberration-Free Space Debris Observations through a Turbulent Atmosphere (Part II)

K. N. Sviridov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. E. Tyulin, *Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers the principles of construction and application strategies of the ground optical system for space debris monitoring protected by the patent of the Russian Federation for the invention. The aim of this invention was to increase the diffraction resolution of the formed images of a small space object and improve the accuracy of restoration of the module undistorted by the atmosphere and phase of its spatial spectrum. To achieve this goal, formation of atmospherically distorted images of a space object is carried out by a coherent matrix of M moving telescopes of the diameter D in the process of space-time aperture synthesis, which directs the combined subbeams from moving telescopes along the tracks to the center of the matrix, where the stationary base is placed, which performs both coherent combination of subbeams and detection of formed series of N images with their subsequent registration and processing. During statistical processing of moduli and phases of spatial spectra of registered images, the island nature of the optical transfer function (OTF) of matrix along the ellipses of coherence and its semi-island in the radial direction extending from the center of the spatial frequency domain to the cutoff frequency of the synthesized aperture of the diameter D_s is taken into account. The positive effect of using this invention is that the coherent operation of the matrix provides a gain in the diffraction resolution of D_s/D times ($D_s/D \gg 1$), and an increase of D/r_0 times, where r_0 is the atmospheric fluctuations correlation radius, the accuracy of restoration of the undistorted by the atmosphere module and phase of the space spectrum from the object by the proposed smoothing procedure allows reducing by the same factor ($D/r_0 \gg 1$) the required number of N registrations in series reducing the total monitoring time.

Keywords: aperture synthesis, photocount detection, digital correlation processing

Введение

В части I данной статьи была предложена концепция построения наземной оптической системы контроля космического мусора. Предложенные для ее реализации перспективные технологии защищены патентом РФ на изобретение [1], в котором изложены принципы построения и стратегии применения данной концепции. Рассмотрим это изобретение.

Изобретение [1] относится к области оптического приборостроения и может быть использовано в астрономии и оптической локации для получения неискаженных атмосферой изображений малоразмерных космических объектов.

Известные технологии

Известен способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, основанный на телескопическом формировании искаженного атмосферой длинноэкспозиционного изображения космического объекта и его последующей пространственной фильтрации для получения неискаженного атмосферой изображения. Этот способ описан в работе [2].

Недостатком способа [2] является потеря мелких деталей изображения при усреднении атмосферных искажений в процессе регистрации изображений за время, большее интервала временной корреляции атмосферных флуктуаций. Этот способ, предложенный в астрономии, используется для получения изображений протяженных пространственно-инвариантных областей космического пространства.

Известен способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, основанный на регистрации голограммы с опорным пучком, прошедшим через ту же турбулентность, что и свет от объекта, и последующем восстановлении из голограммы неискаженного изображения объекта. Этот способ описан в работе [3].

Недостатком способа [3] является необходимость наличия в одной с объектом области изопланатичности опорного точечного источника, а также

необходимость когерентного лазерного подсвета как наблюдаемого объекта, так и опорного точечного объекта, например уголкового отражателя.

Известен способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, основанный на регистрации в телескопе серии спектрально-фильтруемых, короткоэкспозиционных изображений объекта, искаженных турбулентной атмосферой, преобразовании их по Фурье в область пространственного спектра, квадратичном детектировании пространственных спектров, усреднении их по серии и получении неискаженного атмосферой квадрата модуля пространственного спектра от объекта при нормировании среднего квадрата модуля пространственного спектра изображения на квадрат модуля оптической передаточной функции системы «атмосфера-телескоп». Этот способ описан в работе [4].

Недостатком способа [4] является то, что при обратном фурье-преобразовании от квадрата модуля пространственного спектра объекта восстанавливается только автокорреляция изображения объекта, а не само изображение. Невозможность получения изображения объекта обусловлена потерей при обработке фазы пространственного спектра, что ограничивает класс объектов, наблюдаемых этим способом, только центрально-симметричными. Этим способом в астрономии определены угловые диаметры многих звезд и разрешены двойные звездные структуры.

Указанный недостаток потери фазы устранен в способе получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, описанном в работе [5], взятой здесь в качестве прототипа.

Этот способ [5] основан на формировании наземным телескопом искаженного атмосферой изображения объекта, его спектральной фильтрации и квадратичном детектировании за время, меньшее интервала временной корреляции атмосферных флуктуаций, регистрации серии из N таких спектрально-фильтруемых, короткоэкспозиционных изображений, преобразовании их по Фурье в область пространственного спектра и статистической обработке компонент пространственных спектров зарегистрированных изображений серии, при которой восстановление неискаженного квадрата

модуля пространственного спектра от объекта осуществляют методом А. Лабегье (предыдущий аналог [4]), а для восстановления фазы пространственного спектра от объекта формируют двойные корреляции пространственных спектров изображений и восстанавливают разностные фазы, «сшивая» которые от начала пространственно-частотной области, восстанавливают неискаженную атмосферой фазу пространственного спектра наблюдаемого космического объекта. Комбинируя далее восстановленные модуль и фазу формируют пространственный спектр, при обратном фурье-преобразовании от которого получают неискаженное атмосферой изображение наблюдаемого космического объекта.

Недостатком прототипа [5] является дифракционное ограничение достигаемого разрешения $\bar{\lambda}/D$, определяемое диаметром приемной апертуры телескопа D . Действительно, преодолев в прототипе ограничения на разрешение, накладываемые турбулентностью атмосферы $\bar{\lambda}/r_0$, где r_0 — пространственный радиус корреляции атмосферных флуктуаций (так называемый параметр Фрида), сталкиваемся с проблемой ограниченного углового разрешения апертуры формирующего телескопа. Это ограничение препятствует получению информативных изображений малоразмерных космических объектов.

Новые технологии

Заявленный способ [1] получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, в отличие от известных способов и прототипа, основан на решении проблемы ограниченного углового разрешения одноапертурных оптических систем на базе технологий апертурного синтеза при формировании и регистрации изображений с последующим решением проблемы «видения» через турбулентную атмосферу на базе статистической обработки модулей и фаз пространственных спектров зарегистрированных изображений.

Техническим результатом (целью) заявленного изобретения являлось увеличение дифракционного разрешения формируемых изображений

малоразмерного космического объекта и повышение точности восстановления неискаженных атмосферой модуля и фазы его пространственного спектра.

Признаки и суть заявляемого изобретения поясняются в последующем детальном описании, иллюстрируемом рис. 1–6, где показано следующее.

На рис. 1 представлена возможная схема реализации предлагаемого способа.

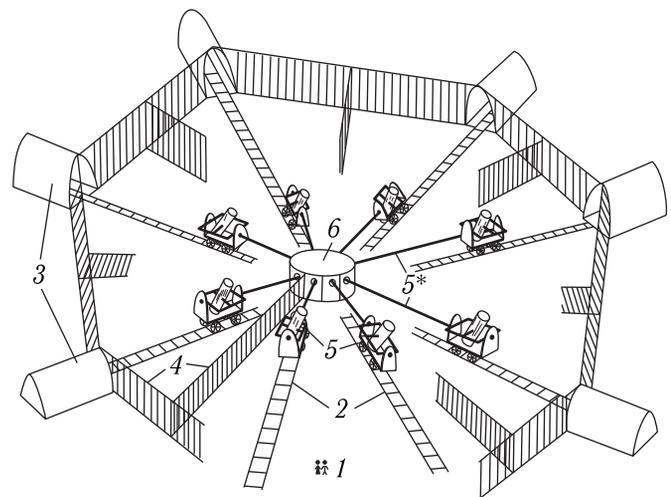


Рис. 1. Схема реализации способа получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу

- 1 — ровная площадка в горной местности (диаметра 100 м и более) для размещения матрицы апертурного синтеза;
- 2 — рельсовые пути для радиального движения подвижных телескопов матрицы;
- 3 — укрытия для подвижных телескопов матрицы, защищающие телескопы от неблагоприятных погодных условий;
- 4 — ветровая защита матрицы и ее отдельных элементов, уменьшающая ветровые нагрузки на телескопы матрицы в процессе их работы вне укрытий;
- 5 — подвижные телескопы матрицы, диаметром $D = 3-5$ м на двухосной альт-альт монтировке;
- 5* — комбинированные субпучки от подвижных телескопов;
- 6 — неподвижный центральный элемент (базовая станция) матрицы

На рис. 2 представлены эллипсы когерентности взаимного расположения подвижных телескопов матрицы при формировании изображений апертурного синтеза.

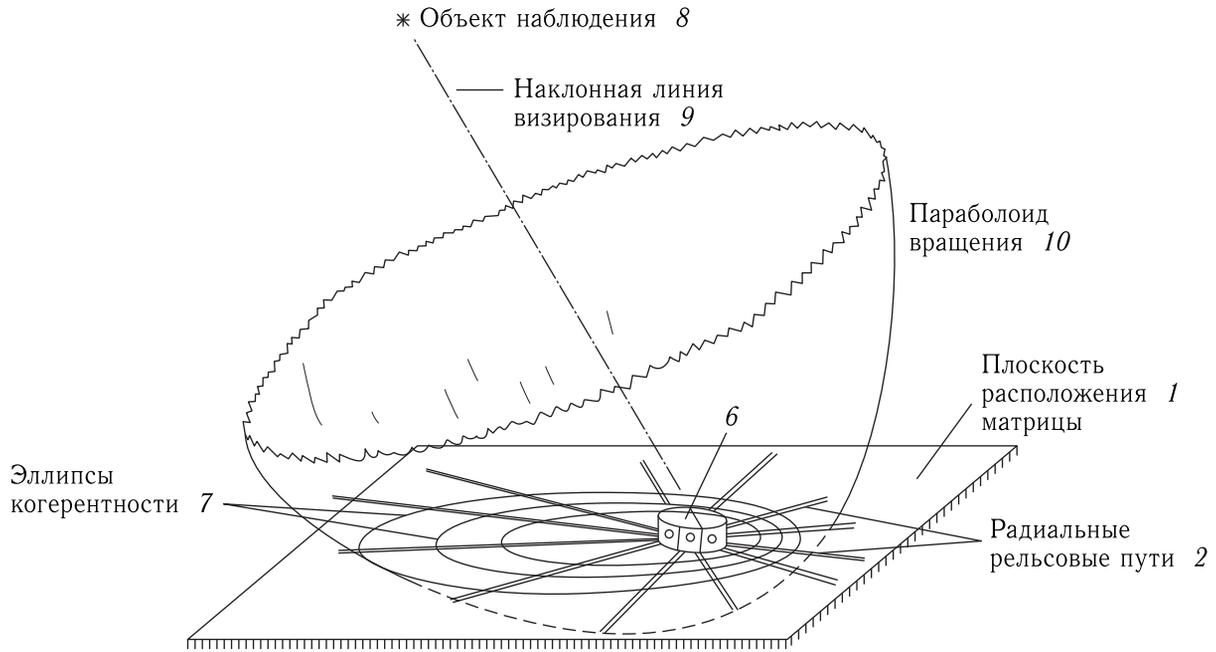


Рис. 2. Эллипсы когерентности взаимного расположения подвижных телескопов: 7 — эллипсы когерентности; 8 — объект наблюдения; 9 — наклонная линия наблюдения; 10 — параболоид вращения

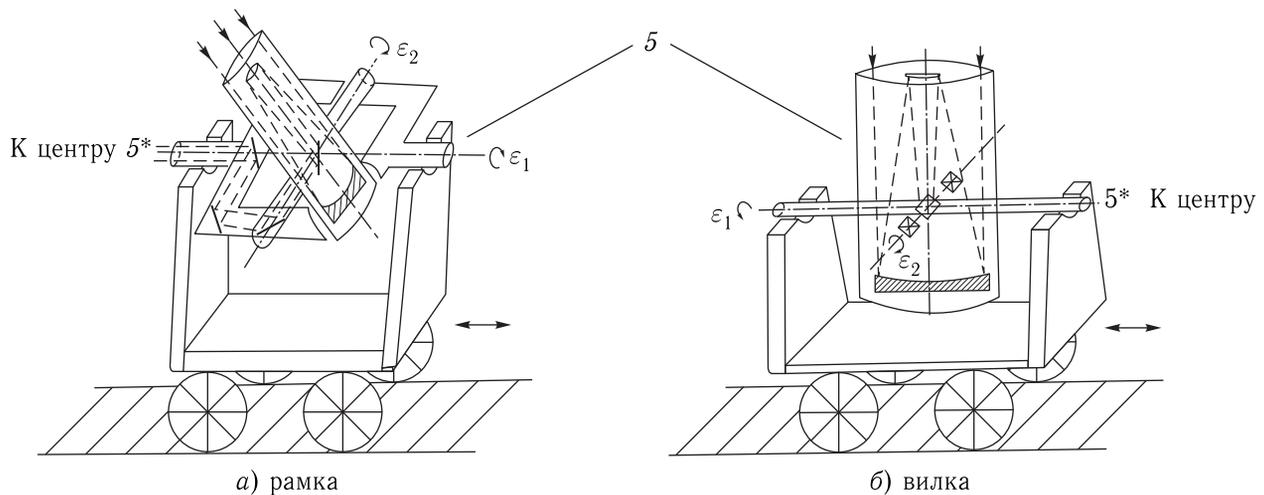


Рис. 3. Возможные варианты альт-альт монтировок подвижных телескопов матрицы: а) рамка; б) вилка

На рис. 3 представлены возможные варианты альт-альт монтировок подвижных телескопов матрицы 5.

На рис. 4 представлена схема построения оптико-механического тракта (ОМТ) подвижного элемента — 5 матрицы апертурного синтеза.

На рис. 5 представлена схема построения оптико-механического тракта (ОМТ) неподвижной базовой станции 6 матрицы апертурного синтеза.

Блок-схема алгоритма обработки зарегистрированных изображений и получения неискаженного атмосферой изображения наблюдаемого космического объекта будет дана на рис. 6 при описании реализации предлагаемого способа.

Дадим обоснование предлагаемого способа и рассмотрим его реализацию в соответствии со схемами, представленными на рис. 1–6.

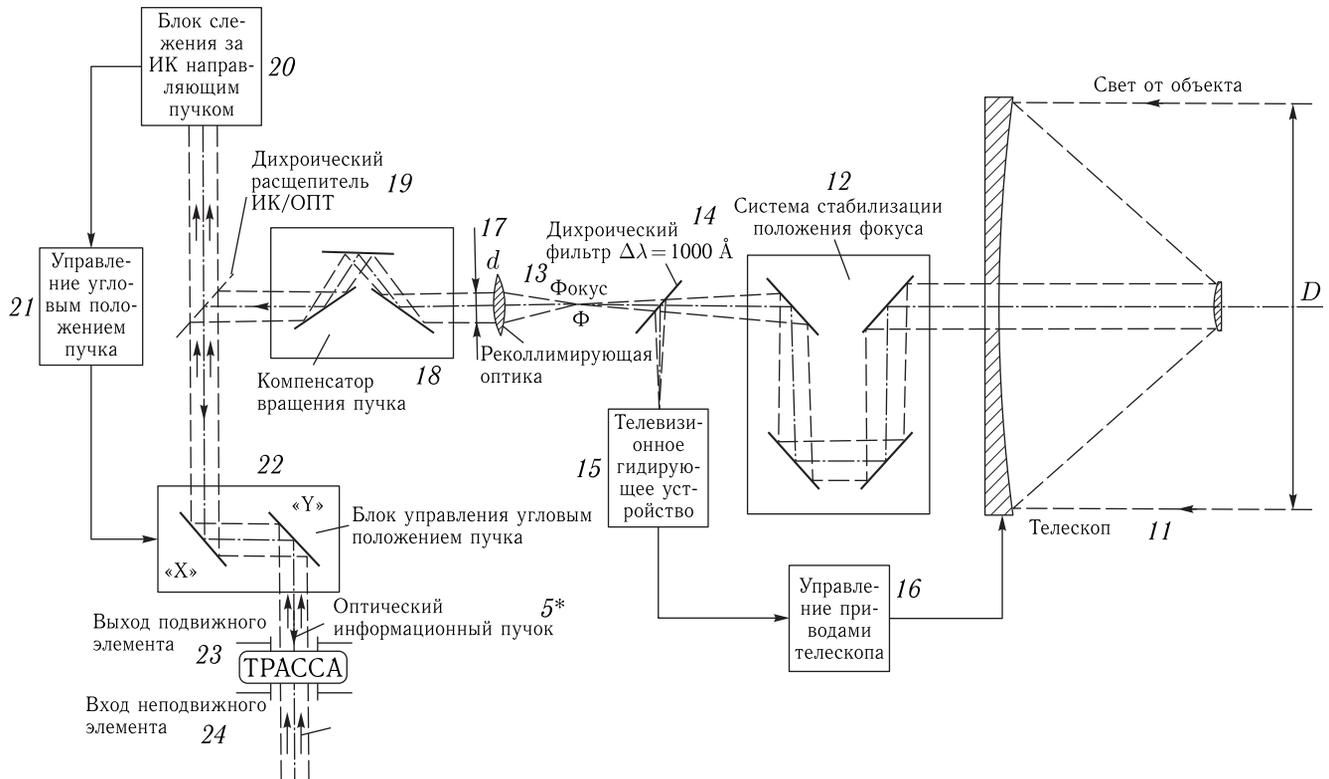


Рис. 4. Схема построения оптико-механического тракта (ОМТ) подвижного элемента — матрицы апертурного синтеза:

- 11 — телескоп подвижного элемента матрицы диаметра D ;
- 12 — система стабилизации положения фокуса 13;
- 13 — фокус;
- 14 — дихроичный фильтр с полосой пропускания $\Delta\lambda = 1000 \text{ \AA}$;
- 15 — телевизионное гидрирующее устройство;
- 16 — управление приводами телескопа 11;
- 17 — реколлимирующая оптика;
- 18 — компенсатор вращения пучка;
- 19 — дихроичный расщепитель;
- 20 — блок слежения за ИК направляющим пучком от центральной станции 6;
- 21 — управление угловым положением пучка;
- 22 — блок управления угловым положением пучка 5*;
- 23 — выход подвижного элемента матрицы

Принципы построения многоапертурной оптической системы

Проведенные ранее исследования [6] свидетельствуют о том, что для эффективного распознавания объектов наблюдения с вероятностью $P = 0,998$ при отношении сигнал/шум в элементе разрешения $q = 10$ требуемое число пространственных

элементов разрешения в изображении (или, что то же, на объекте наблюдения) должно быть равно 100, то есть для объекта с размерами $S_0 = (2 \times 2) \text{ м}^2$ величина δ пространственного элемента разрешения приемной апертуры телескопа диаметра D_3 на дальности до объекта R , определяемая как

$$\delta = \frac{\bar{\lambda}}{D_{\text{тр}}} \cdot R, \quad (1)$$

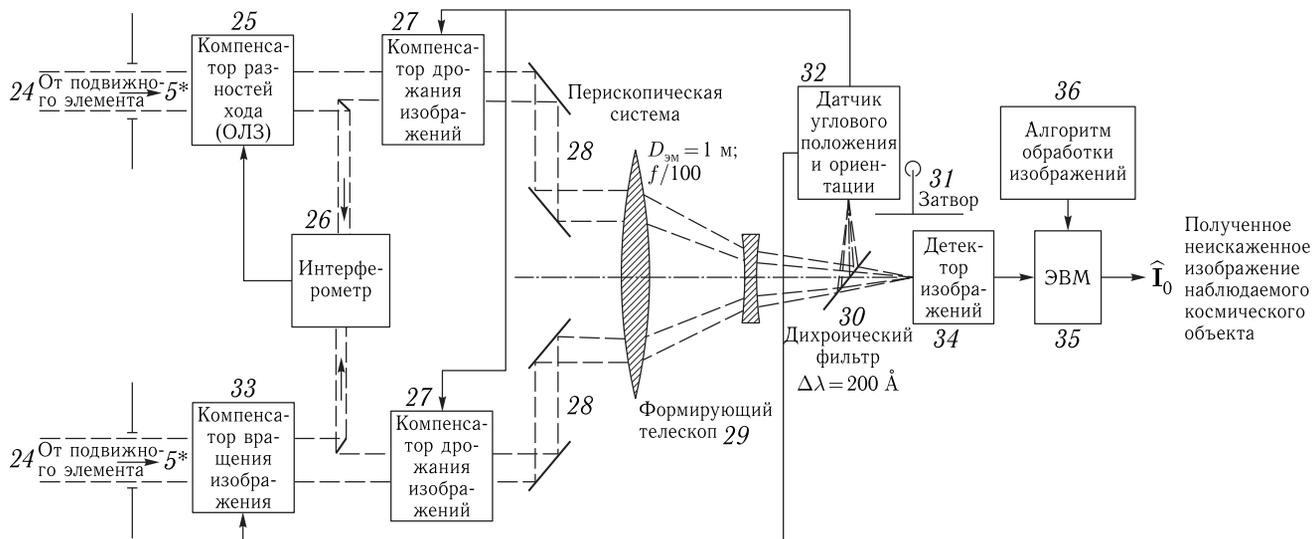


Рис. 5. Схема построения оптико-механического тракта (ОМТ) неподвижной базовой станции 6 матрицы апертурного синтеза:

- 24 — оптический вход неподвижного элемента матрицы;
- 25 — компенсатор разностей хода (оптическая линия задержки);
- 26 — интерферометр;
- 27 — компенсатор дрожания изображений;
- 28 — перископическая система;
- 29 — формирующий телескоп;
- 30 — дихроический фильтр с полосой пропускания $\Delta\lambda = 200 \text{ \AA}$;
- 31 — затвор;
- 32 — датчик углового положения и ориентации;
- 33 — компенсатор вращения изображений;
- 34 — квадратичный детектор изображений;
- 35 — ЭВМ для регистрации и обработки изображений;
- 36 — алгоритмическое обеспечение предлагаемого способа — последовательность операций над зарегистрированными сериями спектрально-отфильтрованных коротко-экспозиционных изображений, обеспечивающих компенсацию атмосферных искажений

должна быть порядка $\delta \leq \delta_{\text{тр}} = 20$ см. Подобное разрешение высокоорбитального космического объекта на дальности $R = 36\,000$ км при средней длине волны оптического излучения Солнца, подсвечивающего объект, $\bar{\lambda} = 0,55$ мкм требует размера приемной апертуры телескопической системы $D_{\text{тр}} = 100$ м.

Очевидно, что сегодня и ближайшем обозримом будущем приемная апертура оптической системы с подобным диаметром может быть создана только на базе апертурного синтеза, способного путем соответствующего комбинирования информации от двух и более малых субапертур с диаметром $D < D_{\text{тр}}$ извлекать информацию об объекте с дифракционным разрешением, характер-

ным для одной большой синтезированной апертуры $D_{\text{э}} \geq D_{\text{тр}}$.

На основании сравнительного анализа существующих концепций построения оптических систем апертурного синтеза, а именно: сегментного телескопа, многозеркального телескопа (МЗТ) и матрицы отдельных телескопов, описанных, например, в [7], очевидно, что в силу технологических, эксплуатационных и финансовых проблем сегодня только матрица отдельных телескопов с базами до 100 м и более способна обеспечить требуемое разрешение малоразмерных космических объектов наблюдения.

Достижение высокого углового разрешения $\sim \bar{\lambda}/D_{\text{э}}$ основано здесь на комбинировании

преддетекторной динамической обработки поля светового информационного сигнала искаженного атмосферой изображения, формируемого при пространственно-временном апертурном синтезе в наземной матрице, и последетекторной статистической обработки модулей и фаз пространственных спектров зарегистрированных в матрице изображений для восстановления модуля и фазы неискаженного атмосферой пространственного спектра наблюдаемого космического объекта.

Рассмотрим особенности формирования и обработки изображений в предлагаемом способе, иллюстрируемом рис. 1–6.

Здесь подвижные телескопы матрицы 5 предназначены для приема светового излучения от объекта наблюдения 8 с любых направлений 9 небесной полусферы, формирования субпучков 5* и сведения их в неподвижный центральный элемент (базовую станцию) 6, который, в свою очередь, предназначен для когерентного комбинирования субпучков 5* и формирования изображений объекта наблюдения 8 при различных положениях подвижных элементов матрицы 5.

Подвижный элемент матрицы 5 телескоп диаметра $D = 3\text{--}5$ м на двухосной альт-альт монтировке размещен на подвижном основании, которое должно непрерывно двигаться по рельсовому пути 7 от центра матрицы к ее периферии со скоростью, определяемой диаметром апертуры телескопа и количеством отдельных коротко-экспозиционных регистраций изображений, производимых для каждой пространственной частоты. Так, например, при времени экспонирования $\tau_s = 10^{-2}$ с, меньшем времени «замороженности» турбулентностей атмосферы, и требуемом числе регистраций в серии $N = 10^2$ или 10^3 номинальная скорость непрерывного движения телескопа диаметра $D = 3$ м должна быть соответственно 3 м/с или 0,3 м/с.

Схема построения оптико-механического тракта (ОМТ) подвижного телескопа матрицы 5 представлена на рис. 4. Из нее видно, что пучок света от телескопа 11 подвижного элемента матрицы 5, выведенный к фокусу Φ 13, расщепляется дихроическим фильтром 14 и часть излучения отражается в приемник 15 системы слежения за объектом наблюдения 16, а часть излучения полосы $\Delta\lambda \sim 1000 \text{ \AA}$ около $\bar{\lambda} \sim 5500 \text{ \AA}$ пропускается ди-

хроическим фильтром 14 в неподвижный элемент матрицы 6 для последующего формирования изображения апертурного синтеза. Эта часть света реколлимируется в 17 до диаметра $d = 0,15$ м при $D = 3$ м, то есть масштаб принимаемого телескопом светового излучения χ уменьшается в поперечном сечении в 20 раз. Вследствие ряда отражений, испытываемых субпучком при его доставке к неподвижному фокусу Φ 13, сжатый пучок диаметра $d = 0,15$ м при сопровождении объекта наблюдения 8 вращается вокруг своей оси. Величина поворота пучка однозначно определяется ориентацией телескопа и может быть скомпенсирована надлежащим поворотом К-образного зеркала — компенсатора вращения пучка 18. В единице подвижного элемента 5 К-образное зеркало должно осуществлять грубую компенсацию вращения субпучка. Тонкая коррекция эффектов вращения субпучков 5* выполняется при их комбинировании в неподвижном элементе матрицы 6, рассматриваемом ниже. После компенсатора вращения реколлимированный параллельный субпучок отражается от зеркал двухосевого стабилизатора его углового положения 22 и передается через выходной порт подвижного элемента матрицы 23 вдоль направления его рельсового движения к входному порту центрального неподвижного элемента 6. Чтобы обеспечить точное попадание субпучка во входной порт единицы неподвижного элемента, из этого входного порта 24 к выходному порту подвижного элемента 23 передается направляющий пучок ИК-диапазона, наблюдаемый в подвижном элементе через стабилизатор углового положения пучка 22 одновременно с реколлимированным субпучком оптического диапазона, который совмещается с ним системой управления стабилизатором углового положения, состоящей из устройств 20 и 21.

Неподвижный элемент матрицы является ее основной и наиболее сложной частью. Именно здесь отдельные субпучки 5* от подвижных телескопов матрицы 5 сводятся вместе, выравниваются в 27 друг относительно друга по углу (поперечно), обеспечивая их наведение, и по длине трассы в 25 (продольно), обеспечивая их фазирование, а затем комбинированы в 28, 29 на общей фокальной плоскости, обеспечивая их фигуризацию при формировании изображения. Центральный элемент (базовая

станция) матрицы 6 определяет и устанавливает положение подвижных элементов матрицы 5 вдоль упомянутого ранее эллипса когерентности 7 в зависимости от углового положения 9 наблюдаемого объекта 8. Эти установки пар подвижных элементов, расположенных диаметрально противоположно относительно центрального элемента матрицы, стремятся в обеспечение когерентности матрицы уравнивать длину трасс между двумя комбинируемыми субпучками. Для обеспечения этого грубого выравнивания расстояния между неподвижными и подвижными элементами постоянно измеряются. Точное выравнивание длин оптических путей комбинируемых субпучков 5* осуществляется с помощью оптических линий малой задержки 25.

В целом схема построения оптико-механического тракта (ОМТ) неподвижного элемента матрицы представлена на рис. 5. Из нее видно, что оптическая линия задержки 25 располагается в одном из двух комбинируемых субпучков, а сигнал для ее управления формируется с помощью интерферометра белого света 26. Этот интерферометр запитывается двумя узкими пучками света, выделенными из комбинируемых субпучков. Диаметры выделенных субпучков имеют порядок $r_0/2$ на приемных апертурах 11 подвижных элементов матрицы 5, а с учетом коэффициента масштабирования χ субпучков они равны $r_0/2\chi = 2,5$ мм, при $\chi = 20$ и $r_0 = 10$ см.

Стратегия применения многоапертурной оптической системы

Исходное фазирование субпучков оптической линией задержки 25 должно быть выполнено при неподвижном состоянии подвижных элементов матрицы 5 после их грубого установочного расположения вдоль минимального эллипса когерентности 7. При достижении выравнивания для всех пар субпучков матрицы 5 подвижные телескопы матрицы начинают свое движение в обеспечение апертурного синтеза. Для формирования изображений объектов дальнего космоса в системе апертурного синтеза диаметра $D_{\text{тр}} = 100$ м и $f/100$ необходимо при фигуризации осуществлять масштабное

моделирование в том смысле, что реально апертура 29, фокусирующая субпучки и формирующая изображения, имеет диаметр $D_{\text{эм}} = 1$ м, то есть в 100 раз меньше, с эквивалентным фокусным расстоянием $F_3 = 100$ м. Для обеспечения надлежащего масштабного моделирования комбинируемые субпучки, сжатые в реколлиматорах 17 подвижных элементов матрицы 5 в 20 раз, должны быть еще дополнительно уменьшены в поперечном сечении в 5 раз. Уменьшенные в неподвижном элементе 6 до диаметра 0,03 м субпучки направляются через компенсаторы их дрожания 27 в соответствующие плечи перископической системы 28, обеспечивающей масштабирование их взаимного расположения, а с нее направляются в упомянутую выше зеркальную фокусирующую систему 29 (рис. 5) диаметра $D_{\text{эм}} = 1$ м с эквивалентным фокусом $F_3 = 100$ м.

Для обеспечения правильного поперечного комбинирования субпучков и наложения их субизображений, а также для их правильной ориентации относительно друг друга неподвижный элемент матрицы содержит в каждом плече компенсатор дрожания изображений 27 и компенсатор вращения изображений 33. Для обеспечения работы этих компенсаторов часть фокусируемого излучения отделяется дихроическим фильтром 30 и направляется в фокальную плоскость системы слежения за угловым положением субизображений и их ориентацией 32. При этом дихроический фильтр осуществляет спектральную фильтрацию и пропускает для формирования изображения узкую полосу $\Delta\lambda = 200 \text{ \AA}$, а остаток излучения в полосе 1000 \AA отклоняется к детектору следящей системы 32. Используя около детектора следящей системы высокоскоростной затвор 31, позволяющий попеременно наблюдать каждый из комбинируемых субпучков, а точнее их субизображения, можно оценить ошибки углового положения каждого из субизображений, а затем скомпенсировать их подстройкой зеркал компенсатора дрожания 27 в канале данного субпучка.

Для обеспечения правильной ориентации комбинируемых субпучков и формируемых субизображений необходимо скорректировать ошибки любого остаточного вращения субпучков около их оси в процессе слежения за объектом наблюдения 8. Для этого осуществляют медленное пока-

чивание подвижных телескопов 5 и, попеременно блокируя затвором 31 фокусируемые субпучки, наблюдают качания соответствующих субизображений. Амплитуда качаний может быть небольшой (в пределах нескольких угловых секунд), а направление качания субизображения управляется соответствующим компенсатором вращения изображений К-образным зеркалом 33 неподвижного элемента матрицы 6 так, чтобы качания субизображений от различных подвижных телескопов осуществлялись вдоль одной и той же или хотя бы параллельных линий. После выполнения указанных коррекций ориентации и положения субпучков рассматриваемая система апертурного синтеза в целом готова к детектированию сформированных изображений в квадратичном детекторе 34 и их регистрации и обработке в ЭВМ 35.

Заметим здесь, что особенности фотоотсчетного детектирования в телевизионном детекторе сканируемого раstra были рассмотрены в Части I данной статьи.

При пространственно-временном апертурном синтезе происходит непрерывное изменение взаимного положения подвижных телескопов матрицы 5 друг относительно друга и по отношению к неподвижному элементу 6. Рассмотрим динамику этого изменения в процессе формирования искаженных атмосферой изображений.

В исходном для наблюдения положении подвижные телескопы матрицы 5 устанавливаются вдоль эллипса когерентности 7, определяемого положением 9 объекта 8 относительно матрицы апертурного синтеза. Перемещение подвижных телескопов матрицы из исходного положения должно осуществляться так, чтобы они, двигаясь радиально, постоянно находились вдоль соответствующих эллипсов когерентности 7, что обеспечивает грубое фазирование и позволяет уменьшить диапазон подстройки оптических линий задержки 25. Поэтому движение телескопов матрицы 5 должно быть синхронным и в одном направлении. Учитывая, что при восстановлении изображения разворачивание фазы пространственного спектра осуществляют из области низких пространственных частот в область высоких пространственных частот для обеспечения возможности одновременного осуществления процессов получения изображений и их обработ-

ки движение телескопов матрицы осуществляют от центра матрицы к ее периферии. Выбрав направление движения, определив направление 9 на объект 8 и расположив подвижные элементы матрицы вдоль эллипса когерентности 7 с минимальным расстоянием до неподвижного элемента матрицы 6, равным диаметру апертуры D подвижного элемента ($L_{\min} = 2D$) при наличии когерентности субпучков, характеризуемой наличием интерференционных полос в изображении, начинают детектирование в 34 серии спектрально-фильтруемых в 30 коротко-экспозиционных изображений наблюдаемого космического объекта.

Если говорить о дискретных установках подвижных элементов матрицы, то, например, для системы наблюдения объектов дальнего космоса их должно быть столько, чтобы в восстанавливаемом изображении геостационарного ИСЗ иметь не менее 100 упомянутых выше элементов разрешения. Учитывая, что требуемое число выборок пространственного спектра равно требуемому числу элементов разрешения восстанавливаемого изображения, получаем, что для рассматриваемой матрицы диаметра $D_0 = 100$ м должно быть не менее 10 выборок вдоль любого диаметра, то есть не менее 5 выборок вдоль каждого радиуса. Для получения этих выборок положения подвижных элементов матрицы можно было бы устанавливать дискретными шагами с промежутками 10 м. Однако во избежание толчков при изменениях режимов движения целесообразно работать с непрерывно движущимися телескопами 5 и постоянным контролем эллиптичности связывающей их линии 7, определяемой положением 9 объекта 8. Оценим характеристики этого движения.

Подвижные элементы матрицы 5 будут непрерывно двигаться, чтобы в каждом кадре изображения детектировался немного отличный набор пространственных частот. В связи с тем, что для каждой пространственной частоты требуется в среднем $N = 10^5$ экспозиций, чтобы достичь предельного разрешения при обработке, скорость подвижных телескопов матрицы должна соответствовать смещению на $D = 5$ м в ста тысячах экспозиций продолжительностью 10 мс каждая, то есть эта скорость равна $5 \cdot 10^{-3}$ м/с. С этой скоростью подвижные элементы матрицы 5 будут совершать свое движение

из исходного положения вдоль минимального эллипса когерентности 7 у неподвижного элемента 6 в центре матрицы к ее периферии до тех пор, пока разделение между парами подвижным элементов 5 , расположенных диаметрально противоположно относительно неподвижного элемента 6 , не достигнет величины $L_{\ell m}$, соответствующей требуемому разрешению, определяемому угловым размером объекта наблюдения и допустимым временем апертурного синтеза. Следует заметить, что при непрерывном движении матрица имеет непрерывную полуостровную ОПФ в радиальных направлениях, что снижает уровень боковых лепестков ее ФРТ и увеличивает поле зрения матрицы, и островную ОПФ вдоль эллипсов когерентности, что облегчает замыкание фазы методом тройных корреляций, рассматриваемым ниже.

Общее время экспонирования приобретаемых в матрице изображений определяется предельно достижимым разрешением и скоростью движения подвижных телескопов матрицы. Предельно достижимое разрешение в рассматриваемом случае наблюдения малоразмерных космических объектов устанавливает максимальное расстояние в 50 м, которое должна пройти каждая подвижная апертура матрицы, при максимальном расстоянии между диаметрально противоположными апертурами $L_{\max} = 100$ м. При скорости движения подвижного телескопа матрицы 5 , равной $V_T = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с при $N = 10^5$ экспозиций на каждой пространственной частоте, также определяемых предельным разрешением, общее время апертурного синтеза и приобретения изображений объекта составит

$$T = L_{\max}/2V_T = 10^4 \text{ с} = 2,8 \text{ ч} \quad (2)$$

(при $N = 10^7$, $V_T = 5 \cdot 10^{-5}$ м/с, $T = 280$ ч = ~ 12 сут).

Для геостационарных ИСЗ на синхронных орбитах вследствие их малой видимой угловой скорости перемещения мы можем теоретически иметь неограниченное время для наблюдения, а следовательно, и приобретения требуемого числа N коротко-экспозиционных изображений. Таким образом, требуемое время апертурного синтеза (2) не является ограничивающим фактором в решении проблемы наблюдения малоразмерных объектов дальнего космоса.

Итак, сформировав и зарегистрировав в детекторе 34 и ЭВМ 35 серии искаженных изображений объекта наблюдения, рассмотрим особенности обработки зарегистрированных изображений в предлагаемом способе для восстановления неискаженных атмосферой фазы и модуля пространственного спектра малоразмерного космического объекта и получения его неискаженного атмосферой безабберационного изображения.

Цифровая обработка изображений в многоапертурной оптической системе

Упомянутый выше метод тройных корреляций является перспективным методом восстановления фазы пространственного спектра от объекта по серии его искаженных атмосферой коротко-экспозиционных изображений в наземных многоапертурных оптических системах. Этот метод описан в работе [8] и основан на формировании тройной корреляции изображений, определяемой

$$I_i^{(3)}(\vec{\ell}_1, \vec{\ell}_2) = \int I_i(\vec{\ell}) \cdot I_i(\vec{\ell} + \vec{\ell}_1) \cdot I_i(\vec{\ell} + \vec{\ell}_2) d\vec{\ell} \quad (3)$$

и получении при фурье-преобразовании от (3) пространственного спектра тройной корреляции, называемого биспектром:

$$\tilde{I}_i^{(3)}(\vec{f}_1, \vec{f}_2) = \tilde{I}_i(\vec{f}_1)\tilde{I}_i(\vec{f}_2)\tilde{I}_i(-\vec{f}_1 - \vec{f}_2), \quad (4)$$

где $\tilde{I}_i(\vec{f})$ — пространственный фурье-спектр изображения $I_i(\vec{\ell})$, а пространственные частоты \vec{f}_1 , \vec{f}_2 и $-\vec{f}_1 - \vec{f}_2$ образуют замкнутую тройку.

Усредняя биспектр по серии зарегистрированных изображений и выделяя его фазу, получаем уравнение замкнутых фаз в виде

$$\begin{aligned} \arg\{\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m})\tilde{I}_0(\vec{f}_{mn})\tilde{I}_0(\vec{f}_{n\ell})\} &= \tilde{\theta}_0^{\ell m} + \tilde{\theta}_0^{mn} + \tilde{\theta}_0^{n\ell} = \\ &= \arg\{\tilde{I}_i(\vec{f}_{\ell m})\tilde{I}_i(\vec{f}_{mn})\tilde{I}_i(\vec{f}_{n\ell})\} = \tilde{\theta}_i^{\ell m} + \tilde{\theta}_i^{mn} + \tilde{\theta}_i^{n\ell}. \end{aligned} \quad (5)$$

Это уравнение позволяет, используя алгоритм разворачивания уравнений замкнутых фаз, восстановить фазу пространственного спектра объекта

по измеренной фазе биспектра изображения, как описано в работе [9].

Рассмотрим модификацию метода тройных корреляций, предлагаемую в данном способе для наблюдения малоразмерных космических объектов.

Типичной ситуацией для задач наблюдения космоса является такая, когда угловые размеры объекта θ_0 оказываются меньшими углового разрешения отдельных субапертур, определяемого как $\bar{\lambda}/D$. При этом (когда $\theta_0 < \bar{\lambda}/D$) пространственный спектр от объекта $\tilde{I}_0(\vec{f})$ практически не изменяется в пределах островов, создаваемых параметрами субапертур при каждом коротко-экспозиционном измерении, и для $D > r_0$ можно существенно (в $N_\theta = (D/r_0)^2$ раз) повысить точность оценки фазы $\tilde{\theta}_0(\vec{f})$ методом тройных корреляций, а также улучшить оценку модуля $|\tilde{I}_0(\vec{f})|$ пространственного спектра от объекта, получаемую по методу Лабейри (аналог [4]).

Действительно, рассмотрим три безызбыточно расположенные, но избыточно большие субапертуры такие, что на каждой из них укладывается по $N_\theta = \left(\frac{D}{r_0}\right)^2$ областей корреляции атмосферных искажений.

Если теперь в соответствии с малоразмерностью объекта считать, что $\tilde{I}_0(\vec{f})$ является постоянным в пределах каждого острова размера $2D/\bar{\lambda}$ и равным $\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m}^0)$, где $\vec{f}_{\ell m}^0$ — центральная частота острова, то перед корреляционным усреднением (5) можно сгладить все тройные произведения (4) в пределах островов по всем возможным тройкам замкнутых частот, то есть осуществить интегрирование вида

$$\int \int d\vec{f}_{\ell m} d\vec{f}_{mn} \tilde{I}_i(\vec{f}_{\ell m}) \tilde{I}_i(\vec{f}_{mn}) \tilde{I}_i(\vec{f}_{nl}), \quad (6)$$

где интегрирование производится по соответствующим островам области пространственных частот. Тогда уравнение замкнутых фаз метода тройных корреляций с учетом (6) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_0^{\ell m} + \tilde{\theta}_0^{mn} + \tilde{\theta}_0^{nl} = \\ = \arg \left\langle \int \int d\vec{f}_{\ell m} d\vec{f}_{mn} \tilde{I}_i(\vec{f}_{\ell m}) \tilde{I}_i(\vec{f}_{mn}) \tilde{I}_i(\vec{f}_{nl}) \right\rangle, \quad (7) \end{aligned}$$

где $\tilde{\theta}_0^{\ell m} = \tilde{\theta}_0(\vec{f}_{\ell m}^0)$ — фазы пространственного спектра от объекта на ℓm островах.

Оценим точность известного (5) и предлагаемого (6) способов в рамках модели атмосферных искажений Колмогорова–Обухова. Точность оценки есть величина обратная отношению сигнал/шум, характеризующему эффективность восстановления и определяемому следующей величиной

$$Q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = \sqrt{N} \times \frac{\langle |\tilde{I}_i(\vec{f}_{\ell m}^0) \tilde{I}_i(\vec{f}_{mn}^0) \tilde{I}_i(\vec{f}_{nl}^0)| \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_i(\vec{f}_{\ell m}^0) \tilde{I}_i(\vec{f}_{mn}^0) \tilde{I}_i(\vec{f}_{nl}^0)|^2 \rangle - \langle |\tilde{I}_i(\vec{f}_{\ell m}^0) \tilde{I}_i(\vec{f}_{mn}^0) \tilde{I}_i(\vec{f}_{nl}^0)|^2 \rangle \right]^{1/2}}, \quad (8)$$

где N — число обрабатываемых коротко-экспозиционных изображений в серии, а угловые скобки $\langle \cdot \rangle$ обозначают полное статистическое усреднение как по квантовой статистике процесса детектирования, так и по статистике атмосферных искажений.

Для известного метода тройных корреляций (5), осуществляя усреднение в (8) по статистике квантов и по атмосферным искажениям в асимптотике $D \gg r_0$, получаем выражение для точности восстановления фазы

$$Q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = 0,9 \cdot \sqrt{N} \frac{r_0}{D} \cdot \frac{q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0)}{1 + q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0)}, \quad (9)$$

где параметр $q(\cdot)$ имеет смысл отношения сигнал/шум в одном изображении и определяется

$$q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = \frac{\eta^{3/2}}{M^{3/2}} \cdot \frac{|\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m}^0) \tilde{I}_0(\vec{f}_{mn}^0) \tilde{I}_0(\vec{f}_{nl}^0)|}{\tilde{I}_0^3(0)}, \quad (10)$$

а параметр η характеризует количество квантов, приходящих на один «спекл» изображения или, что то же, на область корреляции искажений в плоскости апертуры, и определяется

$$\eta = 0,435 \left(\frac{r_0}{D}\right)^2 \frac{\langle K \rangle}{M}, \quad (11)$$

где $\langle K \rangle$ — среднее число детектируемых фотонов на одно изображение, а M — число подвижных телескопов в матрице.

Очевидно, что здесь можно выделить два крайних случая наблюдений:

- 1) ярких объектов $\eta \gg 1$ ($q \gg 1$) и
- 2) слабых объектов $\eta \ll 1$ ($q \ll 1$),

а) тогда в классическом случае наблюдения ярких космических объектов имеем

$$Q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = 0,9 \cdot \sqrt{N} \cdot \frac{r_0}{D}; \quad (12)$$

б) в квантово-ограниченном случае наблюдения слабых объектов имеем

$$Q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = 0,9 \cdot \sqrt{N} \frac{r_0}{D} \cdot \frac{\eta^{3/2}}{M^{3/2}} \cdot \frac{|\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m}^0) \tilde{I}_0(\vec{f}_{mn}^0) \tilde{I}_0(\vec{f}_{nl}^0)|}{\tilde{I}_0^3(0)}. \quad (13)$$

Оценим эффективность предлагаемой модификации (6) метода тройных корреляций по сравнению с традиционным методом тройных корреляций (5). На основании модели N_θ фазовых ячеек $N_\theta = \left(\frac{D}{r_0}\right)^2$ нетрудно видеть, что в тройном произведении (5) порядка N_θ^3 полезных членов на замкнутых частотах и около N_θ^3 шумовых слагаемых со случайной фазой. Поэтому отношение сигнал/шум в (12) и (13) было пропорционально $N_\theta^{-1/2} = r_0/D$.

Теперь же интегрирование в предлагаемом способе (6) эквивалентно суммированию по N_θ^2 тройным произведениям спектров и в результате полезных членов становится $\sim N_\theta^3$, и случайных шумовых $\sim N_\theta^5$, а отношение сигнал/шум в (12) и (13) становится пропорциональным $N_\theta^3/N_\theta^{5/2} = N_\theta^{1/2} = \frac{D}{r_0}$ и может быть представлено в виде:

а) для ярких космических объектов ($\eta \gg 1$)

$$Q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = 0,9 \cdot \sqrt{N} \cdot \frac{D}{r_0}; \quad (14)$$

б) для слабых космических объектов ($\eta \ll 1$)

$$Q(\vec{f}_{\ell m}^0, \vec{f}_{mn}^0, \vec{f}_{nl}^0) = \sqrt{N} \cdot \frac{D}{r_0} \frac{\eta^{3/2}}{M^{3/2}} \cdot \frac{|\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m}^0) \tilde{I}_0(\vec{f}_{mn}^0) \tilde{I}_0(\vec{f}_{nl}^0)|}{\tilde{I}_0^3(0)}. \quad (15)$$

Заметим, что аналогичное (6) сглаживание в пределах островов необходимо осуществлять и для получения оценки квадрата модуля пространственного спектра от объекта, которая при этом определяется как

$$|\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m}^0)|^2 = \left(\frac{D}{r_0}\right)^2 \frac{\int d\vec{f}_{\ell m} \langle |\tilde{I}_m(\vec{f}_{\ell m}^0)|^2 \rangle}{\int d\vec{f}_{\ell m} \tilde{I}_m(\vec{f}_{\ell m}^0)}. \quad (16)$$

Здесь $\tilde{I}_m(\vec{f})$ — дифракционная ОПФ матрицы, интегралы берутся в пределах островов, а отношение сигнал/шум (8) преобразуется к виду:

а) для ярких объектов ($\eta \gg 1$)

$$Q = \sqrt{N} \frac{D}{r_0}; \quad (17)$$

б) для слабых объектов ($\eta \ll 1$)

$$Q = \sqrt{N} \frac{D}{r_0} \frac{\eta}{M} \cdot \frac{|\tilde{I}_0(\vec{f}_{\ell m}^0)|^2}{\tilde{I}_0^2(0)}. \quad (18)$$

На основании полученных результатов (12)–(18) можно сделать вывод, что при наблюдении малоразмерных объектов эффективность функционирования матрицы возрастает в $(D/r_0)^2$ раз. Повышается точность восстановления модуля и фазы пространственного спектра от объекта, что позволяет уменьшить в N_θ раз требуемое число приобретаемых изображений. Точность восстановления увеличивается с ростом диаметра субапертуры D , но до тех пор, пока удовлетворяется неравенство $\theta_0 < \bar{\lambda}/D$.

Положительный эффект от использования заявленного способа заключается в обеспечении когерентного комбинирования (наведения, фазирования и фигуризации) субпучков от отдельных субапертур диаметра D подвижных телескопов матрицы для достижения высокого углового разрешения $\bar{\lambda}/D_3$, определяемого размером синтезируемой апертуры D_3 .

Когерентная работа матрицы подвижных телескопов в процессе апертурного синтеза обеспечивает выигрыш в дифракционном разрешении в D_3/D раз ($D_3/D \gg 1$) по сравнению с одноапертурной оптической системой наблюдения космоса диаметра D .

Например, при наблюдении объектов дальнего космоса с $D_3 = 100$ м и $D = 5$ м этот выигрыш в разрешении составляет 20 раз.

Другой положительный эффект от использования заявляемого способа заключается в повышении точности восстановления неискаженных атмосферой модуля и фазы пространственного спектра от объекта в $(D/r_0)^2$ раз предложенной процедурой сглаживания в островах по сравнению с традиционными методами восстановления модуля методом Лабейри (аналог [4]) и фазы методом тройных корреляций.

Например, при $D = 5$ м и $r_0 = 0,1$ м этот выигрыш равен 2500 раз и позволяет во столько же раз сократить требуемое число N регистраций в серии, сокращая общее время наблюдения (2).

В соответствии с предложенным алгоритмом 36 обработки зарегистрированных в ЭВМ 35 серий из N искаженных атмосферой изображений наблюдаемого космического объекта осуществляют следующую последовательность операций:

1) выбирают из блока памяти ЭВМ 35 зарегистрированные серии из N искаженных атмосферой изображений наблюдаемого космического объекта

$$I_n^{jk}(\vec{\ell}) = \int I_0(\vec{r}) I_{A-M}^{jk}(\vec{\ell} - \vec{r}) d\vec{r}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (19)$$

полученных для каждого k -го взаимного расположения подвижных телескопов матрицы ($k = 1, 2, \dots, K$);

2) преобразуют каждое зарегистрированное изображение в серии по Фурье в область его пространственного спектра:

$$\int I_n^{jk}(\vec{\ell}) e^{i2\pi\vec{\ell}\vec{f}} d\vec{\ell} = \tilde{I}_n^{jk}(\vec{f}) = \tilde{I}_0(\vec{f}) \tilde{I}_{A-M}^{jk}(\vec{f}), \quad (20)$$

где $\tilde{I}_0(\vec{f})$ неискаженный атмосферой пространственный спектр объекта, а $\tilde{I}_{A-M}^{jk}(\vec{f})$ мгновенная ОПФ системы «атмосфера-матрица» для j -й регистрации и k -го расположения элементов матрицы;

3) формируют корреляционные произведения пространственных спектров изображений в «островах» вдоль эллипсов когерентности и вдоль радиальных полуостровов

$$\tilde{I}_n^{jk}(\vec{f}_1) \tilde{I}_n^{jk*}(\vec{f}_2); \quad (21)$$

4) усредняют корреляционные произведения (21) и формируют двойные корреляции пространственных спектров изображений

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{I}_n^{jk}(\vec{f}_1) \tilde{I}_n^{jk*}(\vec{f}_2) = \langle \tilde{I}_n^{jk}(\vec{f}_1) \tilde{I}_n^{jk*}(\vec{f}_2) \rangle_j; \quad (22)$$

5) выделяют фазу усредненных корреляционных произведений (22) и получают разностные фазы:

$$\arg \langle \tilde{I}_n^{jk}(\vec{f}_1) \tilde{I}_n^{jk*}(\vec{f}_2) \rangle_j = \tilde{\theta}_0^k(\vec{f}_1) - \tilde{\theta}_0^k(\vec{f}_2) = \Psi^k(\vec{f}_1, \vec{f}_2); \quad (23)$$

6) «сшивая» разностные фазы, восстанавливают неискаженную фазу пространственного спектра объекта в островах и полуостровах в соответствии с уравнением одномерного сшивания прототипа [5]

$$\hat{\theta}_0 = \sum_{p=1}^P \Psi(\vec{f}_{p-1}, \vec{f}_p), \quad (24)$$

где \vec{f}_p — узловые частоты на выбранном контуре «сшивания» ($\vec{f}_0 = 0$, $\vec{f}_p = \vec{f}$, $P = |\vec{f}|/\Delta\vec{f}$, $\Delta\vec{f}$ — «шаг сшивания»).

С помощью алгоритма одномерного сшивания (24) можно развернуть фазу пространственного спектра от объекта только в пределах каждого острова или радиального полуострова.

Для того, чтобы связать фазы островов или полуостровов по всей пространственно-частотной области апертурного синтеза предлагается использовать метод тройных корреляций (3) с уравнением замкнутых фаз вида (5)

$$\arg \langle \tilde{I}_n(\vec{f}_{\ell m}) \tilde{I}_n(\vec{f}_{mn}) \tilde{I}_n(\vec{f}_{nl}) \rangle_j = \tilde{\theta}_0^{\ell m} + \tilde{\theta}_0^{mn} + \tilde{\theta}_0^{nl}; \quad (25) \equiv (5)$$

7) учитывая малоразмерность объекта наблюдения ($\theta_0 < \bar{\lambda}/D$), перед корреляционным усреднением (25)≡(5) сглаживают все тройные произведения в пределах островов по всем возможным тройкам замкнутых частот, то есть осуществляют интегрирование (26) вида

$$\iint d\vec{f}_{\ell m} d\vec{f}_{mn} \tilde{I}_n(\vec{f}_{\ell m}) \tilde{I}_n(\vec{f}_{mn}) \tilde{I}_n(\vec{f}_{nl}); \quad (26) \equiv (6)$$

8) с учетом (26)≡(6) формируют уравнение замкнутых фаз (25) метода тройных корреляций в виде

$$\arg \left\langle \iint d\vec{f}_{\ell m} d\vec{f}_{mn} \tilde{I}_n(\vec{f}_{\ell m}) \tilde{I}_n(\vec{f}_{mn}) \tilde{I}_n(\vec{f}_{nl}) \right\rangle_j = \tilde{\theta}_0^{\ell m} + \tilde{\theta}_0^{mn} + \tilde{\theta}_0^{nl}, \quad (27) \equiv (7)$$

где $\tilde{\theta}_0^{\ell m} = \tilde{\theta}_0(\vec{f}_{\ell m}^0)$ — фазы пространственного спектра от объекта на ℓm островах;

9) восстанавливают фазу пространственного спектра от объекта $\hat{\theta}_0(f)$, разворачивая уравнение

замкнутых фаз (27) в соответствии с рекурсивным соотношением:

$$\widehat{\theta}_0(f_h) = \frac{1}{\left[\frac{h}{2}\right]} \sum_{S=1}^{\left[\frac{h}{2}\right]} [\widetilde{\theta}_0(f_s) + \widetilde{\theta}_0(f_h - f_s) - \widetilde{\theta}_B(f_s, f_h)], \quad (28)$$

где $\widetilde{\theta}_B(f_s, f_h)$ — фаза биспектра с учетом сглаживания (26), $\theta_B(f_s, f_h) = \arg\langle \widetilde{I}_n(f_h) \widetilde{I}_n(-f_s) \widetilde{I}_n(f_s - f_h) \rangle$, а скобки $[\cdot]$ обозначают целую часть.

На первом шаге фаза $\theta_0(f_1)$ полагается равной нулю, а на h -м шаге фаза $\widehat{\theta}_0(f_h)$ выражается через фазы, оцененные на предшествующих шагах с помощью $\left[\frac{h}{2}\right]$ соотношений типа (27);

10) одновременно с восстановлением фазы пространственного спектра от объекта $\widehat{\theta}_0$ восстанавливают квадрат модуля пространственного спектра от объекта $|\widehat{I}_0(\vec{f})|^2$, для чего сначала по зарегистрированным сериям искаженных изображений объекта, а точнее, по их пространственным спектрам, формируют средний квадрат модуля пространственных спектров изображений как

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\widetilde{I}_n^{jk}(\vec{f})|^2 = \langle |\widetilde{I}_n^{jk}(\vec{f})|^2 \rangle; \quad (29)$$

11) учитывая малоразмерность объекта наблюдения ($\theta_0 < \bar{\lambda}/D$), аналогично (6), осуществляют сглаживание в пределах островов средних квадратов модулей пространственных спектров изображений

$$\int d\vec{f}_{\ell m} \langle |\widetilde{I}_n^k(\vec{f}_{\ell m})|^2 \rangle; \quad (30)$$

12) формируют оценку неискаженного атмосферой квадрата модуля пространственного спектра объекта как

$$|\widehat{I}_0^K(\vec{f}_{\ell m}^0)|^2 = \left(\frac{D}{r_0}\right)^2 \frac{\int d\vec{f}_{\ell m} \langle \widetilde{I}_n^K(\vec{f}_{\ell m})|^2 \rangle}{\int d\vec{f}_{\ell m} \widetilde{I}_M^K(\vec{f}_{\ell m})}, \quad (31)$$

где $\widetilde{I}_M^K(\vec{f}_{\ell m})$ — дифракционная ОПФ матрицы для k -го расположения ее подвижных элементов, а интегралы берутся в пределах ℓm островов;

13) по восстановленным оценкам фазы и модуля пространственного спектра от объекта формируют оценку пространственного спектра объекта

$$\widehat{I}_0(\vec{f}) = |\widehat{I}_0(\vec{f})| \cdot \exp\{i\widehat{\theta}_0(\vec{f})\}; \quad (32)$$

14) получают неискаженное атмосферой изображение наблюдаемого космического объекта \widehat{I}_0 при обратном (20) фурье-преобразовании от $\widehat{I}_0(\vec{f})$

$$\int \widehat{I}_0(\vec{f}) e^{-i2\pi\vec{\ell}\vec{f}} d\vec{f} = \widehat{I}_0(\vec{\ell}). \quad (33)$$

Блок-схема описанного алгоритма обработки изображений 3б (рис. 5) представлена на рис. 6.

Предложенный способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через

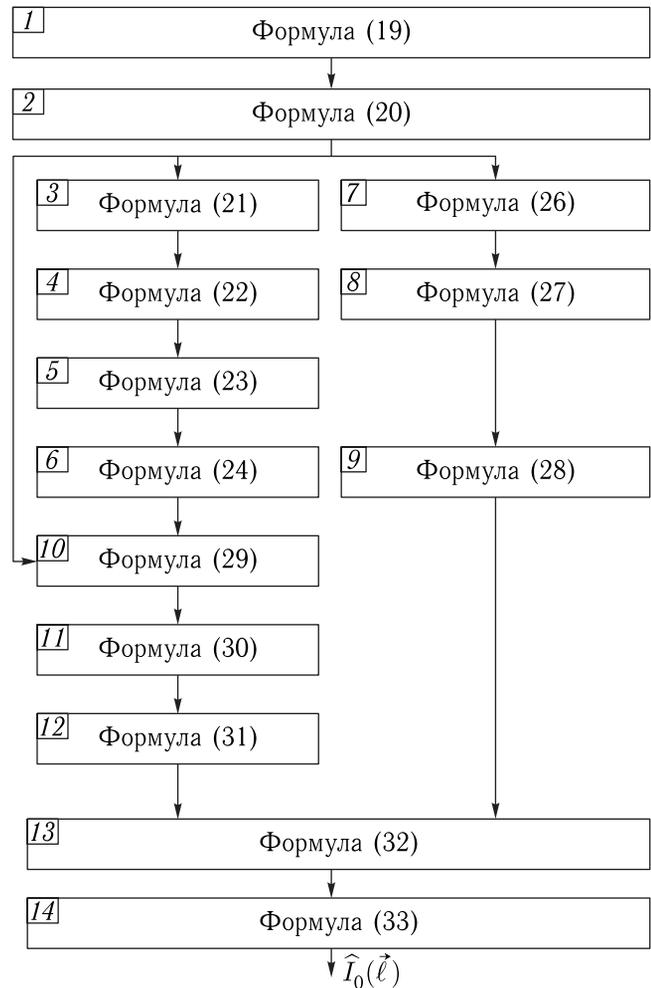


Рис. 6. Блок-схема алгоритма обработки изображений

турбулентную атмосферу, позволяет повысить дифракционное разрешение формируемых изображений в D_s/D раз и точность восстановления неискаженных атмосферой модуля и фазы пространственного спектра объекта в $(D/r_0)^2$ раз.

Этим обеспечивается возможность эффективного визуального контроля состояния геостационарных космических объектов в условиях возможного отказа телеметрических каналов связи, что также позволяет осуществлять контроль высокоорбитального космического мусора искусственного (техногенного) и природного (астероидно-кометного) происхождения.

Заключение

В результате проведенных здесь исследований и с учетом результатов, полученных в Части I данной статьи, можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная и исследованная концепция построения многоапертурной оптической системы счета фотонов в изображении для безабберационных наблюдений космического мусора через турбулентную атмосферу, состоящая из трех последовательных и взаимосвязанных информационных каналов:

- канала формирования изображений на базе матрицы телескопов и макротехнологий апертурного синтеза;

- канала детектирования изображений на базе детекторов сканируемого раstra или параллельного действия и микротехнологий счета фотонов в изображении (СФИ);

- канала обработки изображений на базе параллельной архитектуры организации вычислительных средств и программно-алгоритмического обеспечения технологий цифровой адаптивно-корреляционной обработки изображений, искаженных турбулентной атмосферой, может осуществлять эффективный контроль малоразмерных и слабых объектов космического мусора техногенного и природного происхождения, обеспечивая безопасное освоение околоземного космического пространства.

2. Для практического создания предложенной системы контроля космического мусора разработан

и представлен возможный вариант аппаратурной реализации концепции ее построения, содержащий:

- архитектуру построения наземной матрицы апертурного синтеза, включая подвижные телескопы матрицы и неподвижную базовую станцию;

- тип монтажных подвижных телескопов матрицы и их расположение вдоль эллипсов когерентности в процессе пространственно-временного апертурного синтеза;

- схему построения оптико-механического тракта (ОМТ) подвижных телескопов матрицы и схему построения ОМТ неподвижной базовой станции матрицы апертурного синтеза.

3. Предложена и исследована стратегия применения наземной матрицы апертурного синтеза в процессе формирования, детектирования и обработки искаженных атмосферой изображений космического мусора, в соответствии с которой формирование искаженных атмосферой изображений космического мусора осуществляют когерентной матрицей из M подвижных телескопов диаметра D в процессе пространственно-временного апертурного синтеза и направляют комбинируемые субпучки от подвижных телескопов матрицы вдоль рельсовых путей к центру матрицы, где размещают неподвижную базовую станцию, в которой осуществляют как когерентное комбинирование субпучков, включая их наведение, фазирование и фигурирование, так и детектирование сформированных серий из N изображений с их последующей регистрацией и обработкой.

4. При статистической обработке модулей и фаз пространственных спектров серий зарегистрированных изображений здесь учитывают островной характер оптической передаточной функции (ОПФ) матрицы вдоль эллипсов когерентности и ее полуострова в радиальном направлении, простирающиеся от центра пространственно-частотной области до частоты отсечки синтезируемой апертуры диаметра D_s . Предложенный алгоритм обработки серии из N зарегистрированных искаженных атмосферой изображений космического мусора, основанный на модифицированном нами методе тройных корреляций и процедуре сглаживания, позволяет повысить точность восстановления неискаженных атмосферой модуля и фазы пространственного спектра от объекта в D/r_0 раз, где r_0 — пространственный радиус

корреляции атмосферных флуктуаций, что позволяет во столько же раз ($D/r_0 \gg 1$) сократить требуемое число N регистраций в серии, уменьшая общее время мониторинга космического мусора, а когерентная работа матрицы апертурного синтеза обеспечивает выигрыш в дифракционном разрешении в D_Σ/D раз, где $D_\Sigma/D \gg 1$.

5. Проведенные исследования позволили развить следующие критические технологии, включенные в «Межведомственный перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, критических технологий, реализуемых в ракетно-космической промышленности в интересах создания перспективных космических средств различного целевого назначения»:

– п. 6.1.2. Система обеспечения безопасности космических полетов в условиях природных, техногенных и преднамеренных воздействий высокоскоростных частиц — в части системы контроля высокоскоростных частиц космического мусора;

– п. 6.1.4. Средства и мониторинг техногенного загрязнения околоземного космического пространства, включая геостационарные орбиты в режиме реального времени, — в части системы контроля космического мусора;

– п. 6.1.7. Технология защиты околоземного космического пространства от техногенного засорения — в части технологий контроля космического мусора.

6. Предложенная и исследованная в настоящей статье «Многоапертурная оптическая система счета фотонов в изображении для безабберационных наблюдений космического мусора через турбулентную атмосферу» защищена патентом Российской Федерации, что свидетельствует о ее новизне и полезности, а тот факт, что предложенные в ней технологии соответствуют критическим технологиям Российской Федерации, а именно «Технологиям

снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф», свидетельствует об актуальности проведенных исследований.

Список литературы

1. Патент РФ № 2575538 от 26.01.2016 на «Способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу» по заявке на изобретение № 2014134182 от 21.08.2014, заявитель и правообладатель — АО «Российские космические системы».
2. *Leighton R.B.* Concerning the problem of making sharper photographs of the planets // *Sci. Am.* 1956. Vol. 194. P. 156.
3. *Gaskill J.D.* Imaging through a randomly inhomogeneous medium wavefront reconstruction // *J. Opt. Soc. Am.* 1968. Vol. 58. P. 600.
4. *Labeyrie A.* Speckle interferometry and possible extensions // *Astron. and Astrophys.* 1974. Vol. 15. P. 464.
5. *Knox K.T.* Recovery of images from atmospherically degraded short exposure photographs // *Astron. J.* 1974. Vol. 193. P. L45.
6. *Бакун П.А., Свиридов К.Н., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д.* Исследование оптимальных условий регистрации голограмм интенсивности и оптических изображений // *Квантовая электроника.* 1975. Т. 2, № 8. С. 1688.
7. *Свиридов К.Н.* Атмосферная оптика высокого углового разрешения // *М.: Знание.* Т. III. Перспективные технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. 256 с.
8. *Lohmann A.W., Weigelt G., Wirtzner B.* Speckle masking in astronomy: triple correlation theory and applications // *Appl. Opt.* 1983. Vol. 22. P. 4028.
9. *Bartelt H., Lohmann A.W., Wirtzner B.* Phase and amplitude recovery from bispectra // *Appl. Opt.* 1984. Vol. 23. P. 3121.