

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

УДК 621.391 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.2.11.19

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

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. В статье рассматривается проблема мониторинга космического мусора для решения задач по обеспечению безопасности освоения космического пространства. Фрагменты космического мусора являются малоразмерными объектами контроля с угловыми размерами до 0,002 угловых секунд, поэтому для их локации (поиска, обнаружения, измерения и идентификации) необходимы оптоэлектронные системы высокой разрешающей и проникающей способности, позволяющие с заданной точностью и вероятностью измерять координаты и распознавать эти слабые объекты контроля, обладающие интегральной яркостью до +18 звездной величины. Для решения проблем оптической локации космического мусора в Части I статьи предложена концепция построения наземной оптоэлектронной системы контроля, состоящей из трех последовательных и взаимосвязанных информационных каналов: канала формирования изображений на базе матрицы отдельных телескопов и технологий апертурного синтеза, канала детектирования изображений на базе детекторов сканируемого раstra и технологии счета фотонов в изображении; канала обработки изображений на базе цифровых технологий корреляционной компенсации атмосферных искажений. Отмечены достоинства матрицы отдельных телескопов, фотоотсчетного детектирования и корреляционной обработки. Предложенная концепция защищена патентом РФ, детально рассмотренным в Части II.

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

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

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 solves the problem of space debris monitoring to ensure the safety of space exploration. Space debris fragments are small-sized control objects with angular sizes up to 0.002 arcsecond. Therefore, optoelectronic systems of high resolution and permeability allowing one to measure the coordinates and recognize these weak control objects with a given accuracy and probability having integral brightness up to +18 stellar magnitude are necessary for the location (search, detection, measurement, and identification) of space debris fragments. To solve the optical location problems of space debris the Part I of the article proposes the concept of building a ground-based optoelectronic control system. The system consists of three consecutive and interrelated information channels: an image formation channel based on the matrix of individual telescopes and aperture synthesis technology; image detection channel based on scanning raster detectors and photon counting technology in the image; and image processing channel based on digital correlation compensation technology of atmospheric distortions. Advantages of a matrix of separate telescopes, photodetection and correlation processing are noted in the article. The proposed concept is protected by a patent of the Russian Federation, which is discussed in detail in Part II.

Keywords: aperture synthesis, photocount detection, digital correlation processing

Введение

В связи с возможной милитаризацией космоса [1] и появлением искусственных спутников Земли (ИСЗ) стратегического назначения [2], а также в связи с засорением околоземного космического пространства нефункционирующими ИСЗ и их фрагментами, так называемым космическим мусором [3, 4] техногенного происхождения, проблема мониторинга околоземного космического пространства приобрела особую актуальность как с позиций обороны [5–8], так и с позиций экологической [9, 10] безопасности.

В соответствии с Концепцией национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента № 24 от 10.01.2000 г., важнейшим направлением государственной политики РФ является «...решение острых экологических проблем глобального характера...». Одной из таких проблем безопасного освоения околоземного космического пространства является международная экологическая проблема космического мусора. Возрастающая опасность случайных столкновений ИСЗ и пилотируемых космических кораблей (КК) с различными нефункционирующими объектами и их фрагментами искусственного происхождения как результатом техногенных катастроф прошлых лет так же, как и опасность неконтролируемого падения космического мусора на Землю в районы крупных городов и атомных станций, свидетельствует об актуальности и необходимости изучения и решения этой международной экологической проблемы для снижения риска и уменьшения последствий техногенных катастроф в будущем.

В целом проблема космического мусора как искусственного (техногенного), так и природного (астероидно-кометного) происхождения включает его контроль и уничтожение (удаление). Технологии ее решения соответствуют «Перечню критических технологий Российской Федерации», а именно «Технологиям предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». В данной статье мы рассмотрим возможные пути решения проблемы мониторинга космического мусора, а вопросы его удаления (выметания) будут предметом наших дальнейших исследований.

Среди комплекса задач, решаемых системами мониторинга космического пространства, одной из главных является задача распознавания космических объектов по их изображениям высокого углового разрешения [11, 12].

В реальных условиях атмосферных наблюдений информационные возможности наземной оптической локации по формированию изображений и распознаванию космических объектов существенно ограничиваются низким качеством атмосферной оптики и, в частности, наличием двух проблем: проблемы «видения» через турбулентную атмосферу [13] и проблемы «изопланатичности» контролируемого космического пространства [14]. Проблема «видения» определяет минимальный размер различаемых деталей объекта контроля и ограничивает реальное разрешение системы «атмосфера–телескоп» в среднем величиной порядка одной угловой секунды [15], а проблема «изопланатичности» определяет максимальный размер контролируемого космического пространства, который еще является пространственно инвариантным к атмосферным искажениям и ограничивает мгновенное поле зрения системы «атмосфера–телескоп» в среднем величиной порядка десяти угловых секунд [16].

Занимаясь решением этих проблем атмосферной оптики [17], мы создали технологии, обеспечивающие в условиях атмосферных наблюдений инструментальное качество изображений ярких и протяженных объектов мониторинга ближнего космоса ($R \leq 1000$ км), — так называемых низкоорбитальных космических объектов (НОКО) [18].

Для расширения класса объектов мониторинга слабыми и малоразмерными объектами дальнего космоса ($R \geq 36\,000$ км), т. е. для эффективного наблюдения и распознавания так называемых высокоорбитальных космических объектов (ВОКО), а также космического мусора, необходимы новые перспективные технологии.

Опыт разработки и создания технологий построения и применения одноапертурных оптических систем мониторинга ближнего космоса [18] свидетельствует о том, что увеличение их разрешающей и проникающей способности в интересах мониторинга малоразмерных ($\Theta_0 = 10^{-8}$ рад) и слабых ($m = +18^m$ звездной величины) объектов

дальнего космоса и космического мусора реально возможно в трех направлениях:

- по пути увеличения размеров приемной апертуры телескопа [19, 20];
- путем повышения чувствительности и уменьшения элемента разрешения детектора [21];
- путем компенсации атмосферных искажений [22].

Опираясь на этот опыт, мы предложили [23] концепцию построения наземной оптической системы мониторинга дальнего космоса, состоящую из трех последовательных и взаимосвязанных информационных каналов:

- канала формирования изображений на базе технологий апертурного синтеза,
- канала детектирования изображений на базе технологий счета фотонов в изображении (СФИ),
- канала обработки изображений на базе параллельной архитектуры организации вычислительных средств и цифровых технологий корреляционной и адаптивной обработки изображений.

Рассмотрим кратко особенности построения каждого из трех упомянутых выше информационных каналов предложенной системы мониторинга ВОКО и космического мусора.

Канал формирования

На основании сравнительного анализа существующих концепций построения оптических систем апертурного синтеза, а именно:

- сегментного телескопа (рис. 1, а),
- многозеркального телескопа (рис. 1, б),
- матрицы телескопов (рис. 1, в),

показано [24], что сегодня, в силу технологических, эксплуатационных и финансовых проблем, только матрица отдельных телескопов с базами L до 100 м и более пригодна для эффективного мониторинга дальнего космоса и космического мусора.

В результате рассмотрения теоретических основ апертурного синтеза [24] нами предложена конфигурация матрицы, состоящая из N подвижных телескопов диаметра D , приобретающих световое излучение от объекта контроля в процессе пространственно-временного апертурного синтеза, и одного неподвижного элемента матрицы, комби-

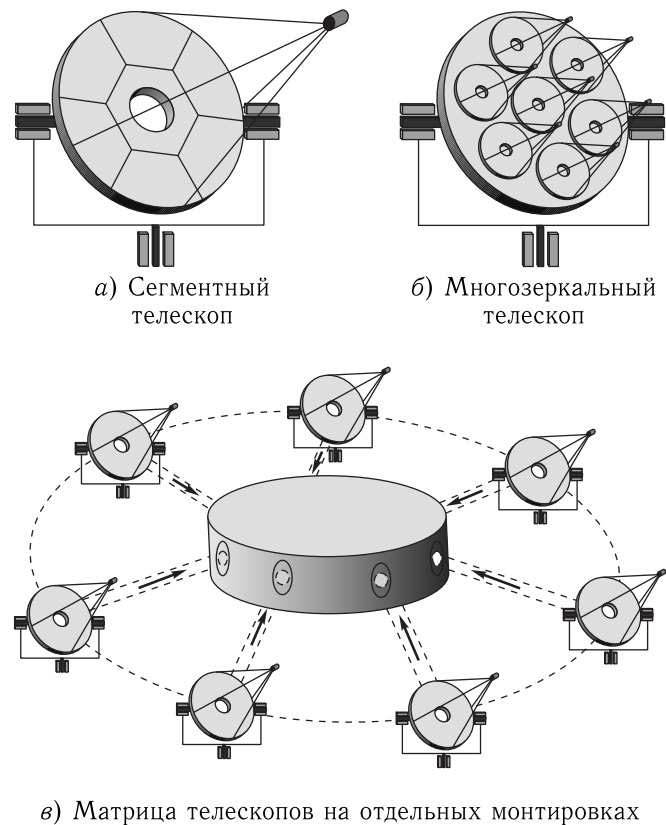


Рис. 1. Концепции построения оптических систем апертурного синтеза

нирующего субпучки и электрические сигналы от подвижных элементов и формирующего синтезируемое изображение.

Рассмотрены возможные законы перемещения подвижных элементов матрицы в процессе пространственно-временного апертурного синтеза

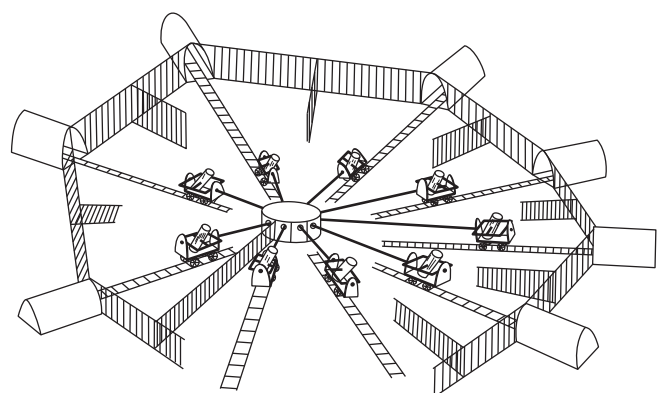


Рис. 2. Конфигурация матрицы апертурного синтеза [35]

и выбрано их радиальное перемещение относительно центрального неподвижного элемента с взаимным расположением подвижных элементов вдоль эллипсов когерентности, ориентированных на объект контроля (рис. 2).

В работе [25] предложены варианты аппаратурной реализации подвижных (выставленных к ветру) и неподвижного (укрытого) элементов матрицы апертурного синтеза и получены аналитические выражения на допуски их когерентного взаимодействия при наведении, фазировании и фигуризации субапертур и субпучков в процессе формирования изображения.

К достоинствам матрицы апертурного синтеза можно отнести следующее:

- «матрица позволяет осуществлять одновременное независимое сопровождение многих объектов мониторинга в широком поле зрения ее отдельных телескопов и/или их групп. Так, если объект один и далеко, то по нему когерентно работает вся матрица телескопов, а если объектов много и они близко, то по каждому из них независимо могут работать отдельные когерентные группы телескопов матрицы и/или даже отдельные телескопы в зависимости от угловых размеров объектов мониторинга и их количества;

- матрица отдельных телескопов обеспечивает возможность наведения лазерного излучения под света одновременно в разных направлениях, так же, как и наблюдение подсвеченных объектов контроля одновременно с разных направлений» [24];

- когерентная матрица отдельных телескопов является идеальной системой для доставки мощного лазерного излучения и/или другого вида лучевой энергии к объекту мониторинга, так как она позволяет решить проблему лучевой прочности оптико-механического тракта системы, осуществляя комбинирование пучков энергии, выходящих из отдельных телескопов, на трассе распространения излучения к объекту.

В настоящее время в ряде стран уже существуют и активно разрабатываются матрицы апертурного синтеза, состоящие из отдельных телескопов (см. таблицу).

В связи с тем, что существующие и разрабатываемые матрицы апертурного синтеза предназначены для приема светового излучения, необходимы

Таблица. Матрицы апертурного синтеза, состоящие из отдельных телескопов

Наземные матрицы апертурного синтеза	Число и диаметр субапертур $N \times D$, м	Длина базовой линии L , м	Плановый срок создания, годы
I2T, CERGA, France	$2 \times 0,25$	5–76	1975
GI2T, CERGA, France	$2 \times 1,5$	10–75	1984
–//–	–//–	300	1985
–//–	$4 \times 1,5$	–//–	1987
–//–	$8 \times 1,5$	–//–	1989
Sydney U., Australia	$2 \times 0,1$	10	1985
Mt. Wilson, USA	$2 \times 0,15$	3	1980
–//–	–//–	30	1986
Georgia U., USA	$2 \times 1,5$	300	1988
Erlangen U., GFR	$2 \times 0,2$	10	1985
VLT, ESO, Europe	$2 \times 1,5$	300	1995
–//–	4×8	60	1995
UK, England	4×5	300	1995
Canada	2×4	300	1990

дополнительные исследования принципов построения подобных систем для их работы на передачу.

Канал детектирования

В работе [24] рассмотрены требования к детектору изображений в матрице и показано, что необходимость детектирования интерференционных полос в формируемом изображении и в каждом дифракционном пятне ужесточает требования как к величине минимального элемента разрешения детектора, так и к их числу. Предложены возможные пути удовлетворения этих требований, в том числе на базе использования режима счета фотонов в изображении [21].

Рассмотрена оптимизация процесса детектирования по шумам и показано, что для обеспечения квантово-ограниченного детектирования выбран-

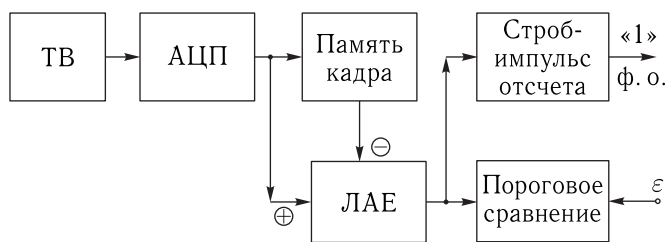


Рис. 3. Блок-схема электронных цепей временной локализации фотоотсчетов к кадру: ТВ — телевизионный детектор, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ЛАЕ — логическая арифметическая единица, ф.о. — фотоотсчет

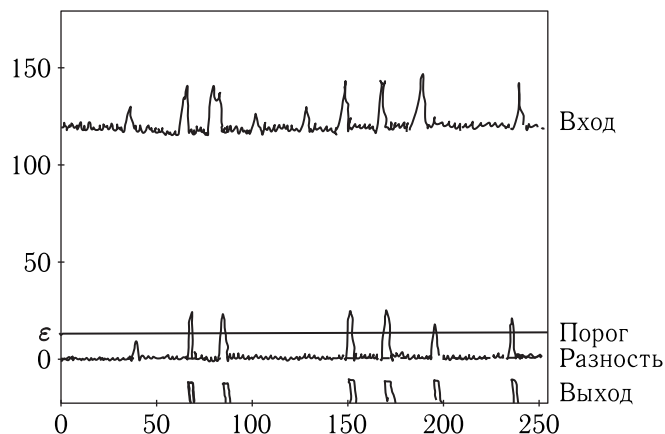


Рис. 4. Пример работы электронных цепей временной локализации отсчетов к кадру с дискриминацией шума и бинарным кодированием

ному детектору телевизионного типа должен предшествовать усилитель изображений типа электроно-оптического преобразователя (ЭОП) с надлежащим выбором его элементов и охлаждением.

В результате оптимизации процесса детектирования по разрешению предложены алгоритмы и схемы временной локализации фотоотсчетов к кадру (рис. 3, 4) и пространственной локализации фотоотсчетов в кадре (рис. 5, 6).

Рассмотрена оптимизация процесса детектирования по динамическому диапазону линейности

и быстродействию, дана оценка границы перехода от аналогового к фотоотсчетному режиму детектирования, которая оказалась соответствующей яркости объекта наблюдения в $m_{гр.}^* = +10^m$ звездных величин.

Показано [24], что режим счета фотонов в изображении как перспективная технология детектирования слабых световых локационных сигналов:

- повышает проникающую и разрешающую способность наземных систем мониторинга околоземного космического пространства,

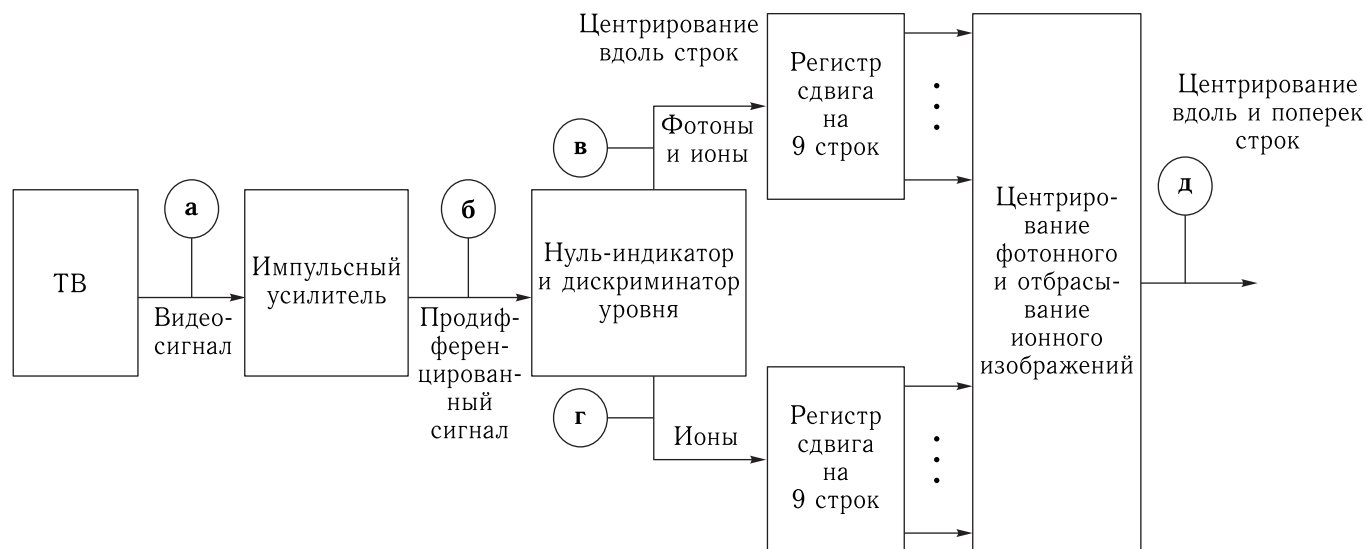


Рис. 5. Блок-схема электронных цепей пространственной локализации детектируемых фотоотсчетов в кадре

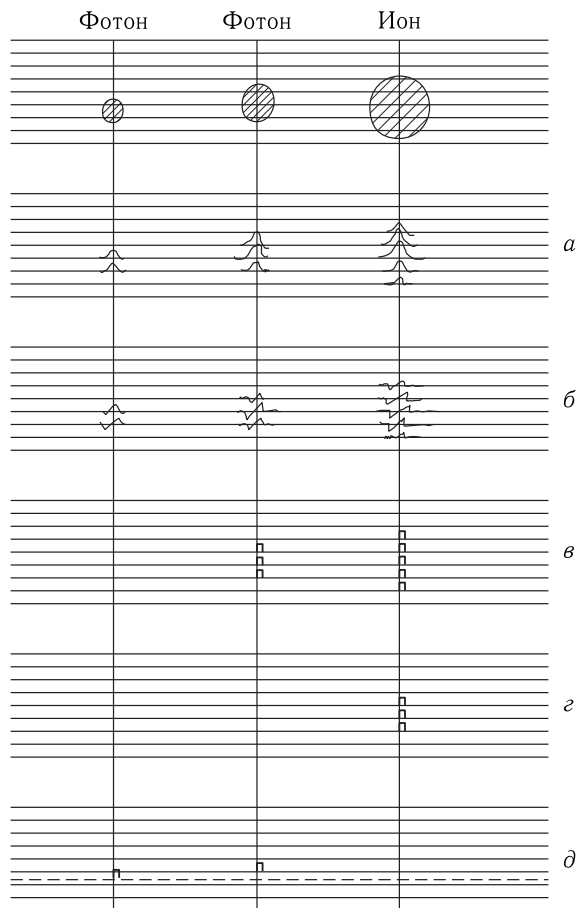


Рис. 6. Последовательность преобразования бинарных пятен в импульсы положения геометрических центров сигнальных фотоотсчетов

- увеличивает динамический диапазон и производительность процесса детектирования,
- позволяет унифицировать алгоритмы обработки изображений для пассивного и активного режимов лазерно-оптической локации,
- обеспечивает возможность обработки изображений и распознавания объектов мониторинга в реальном масштабе времени,
- защищает детектор от возможного воздействия лазерного излучения.

Для исследования перспективных технологий фотоотсчетного детектирования разработан и создан стенд на базе детектора счета фотонов в изображении (СФИ) параллельного действия типа Ranicon [26], позволяющего детектировать не только координаты каждого фотона, но и момент времени его прибытия. Эта информация является осно-

вой для создания и реализации алгоритмов обработки изображений и распознавания космических объектов в реальном масштабе времени.

Канал обработки

Предложены и исследованы алгоритмы обработки изображений в наземной матрице апертурного синтеза [27].

Показаны достоинства метода тройных корреляций и предложены его модификации для режима счета фотонов в изображении [28] и для малоразмерных объектов контроля [29]. Предложены и исследованы итерационные алгоритмы разворачивания уравнений замкнутых фаз в слабо и сильно разреженных матрицах апертурного синтеза [30].

Анализ эффективности данных алгоритмов показал, что для восстановления модуля пространственного спектра от объекта в матрице апертурного синтеза оптимальным является модифицированный нами вариант метода пятенной интерферометрии Лабейри [31], а для восстановления фазы пространственного спектра от объекта вдоль радиальных полуостровов оптимален безопорно-корреляционный метод (модифицированный нами вариант метода Нокса–Томпсона) [32], при этом для замыкания фазы между полуостровами вдоль эллипсов когерентности оптимален модифицированный нами вариант метода тройных корреляций и цифровой адаптации [33].

Методами физического и машинного моделирования проведено экспериментальное исследование перспективных технологий формирования и восстановления изображений в наземной матрице апертурного синтеза [27]. Результаты модельного эксперимента подтвердили эффективность предложенных перспективных технологий построения и применения информационных каналов наземных оптических локационных систем мониторинга околоземного космического пространства.

Заключение

Для дальнейшего развития и практической реализации предложенных перспективных технологий построения и применения оптико-электронных

систем мониторинга околоземного космического пространства необходимо проведение ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с разработкой и созданием:

- новых конструкционных материалов и покрытий для телескопов и зеркал;
- новой нетрадиционной конфигурации выставленных к ветру телескопов матрицы;
- облегченных зеркал диаметром 3–5 м с требуемыми профилями и радиусами кривизны высокой точности;
- лазерных интерферометров и дальномеров для высокоточных измерений длин оптических путей;
- автоматизированных систем контроля и управления положением оптических элементов матрицы, обеспечивающих наведение, фазирование и фигуризацию;
- детекторов счета фотонов в изображении оптического и инфракрасного диапазонов длин волн параллельного действия с высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном, малым элементом разрешения и большим их числом;
- алгоритмов и средств обработки изображений в реальном масштабе времени.

Это позволит создать прототип системы мониторинга ВОКО и провести натурные испытания.

Предложенные нами перспективные технологии построения и применения информационных каналов оптических систем мониторинга ВОКО могут быть эффективно использованы для мониторинга низкоорбитальных фрагментов космического мусора с размерами от 1 см до 10 см на дальностях до $R = 1000$ км, а также для астрофизических наблюдений высокого углового разрешения.

При необходимости повышения точности локационных измерений рассмотренная оптоэлектронная система может быть использована как источник целеуказаний для обеспечения активного лазерного подсвета, а ее элементы могут служить для доставки лазерного излучения в космос. При этом необходимо решить проблему когерентного комбинирования передаваемых субпучков как от отдельных телескопов, так и от различных лазерных модулей. В основу таких исследований можно положить принцип «взаимности» [34] и использовать результаты когерентного комбинирования

субпучков, полученные при работе на прием. Предложенная система мониторинга околоземного космического пространства после когерентной работы на прием и соответствующего наведения, фазирования и фигуризации ее элементов по сформированному изображению объекта может быть эффективно использована для доставки к объекту мощного лазерного излучения. Заметим, что в качестве объекта может рассматриваться как фрагмент космического мусора, так и переотражающее энергию зеркало, расположенное в космосе.

Опираясь на упомянутый выше принцип «взаимности» распространения, лежащий в основе построения наземных приемно-передающих лазерных систем, можно утверждать, что достижение высокого углового разрешения в предложенной перспективной системе мониторинга космического пространства является гарантией достижения малой угловой расходимости передаваемого через нее лазерного излучения.

В заключение следует отметить, что в Части I данной статьи мы рассмотрели концепцию построения наземной оптической системы мониторинга околоземного космического пространства и, в частности, контроля космического мусора. В результате исследований данной концепции, представленных в цитируемой здесь литературе, оформлена заявка АО «Российские космические системы» на изобретение и получен патент РФ [35] на «Способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу», в котором изложены принципы построения и стратегия применения системы мониторинга космического мусора. Детально это изобретение будет рассмотрено в Части II данной статьи.

Список литературы

1. Велихов Е.П., Васильев А.А., Арбатов А.Г. Космическое оружие: Дилемма безопасности / Под ред. Е.П. Велихова, Р.З. Сагдеева, А.А. Кокошина. М.: Мир, 1986. 182 с.
2. Bloembergen N., Patel C.K., Avizonis P. et al. Science and Technology of Directed Energy Weapons // Report of the American Physical Society Study Group, April, 1987. 424 p.

3. Проблема загрязнений космоса (космический мусор): Сб. науч. тр. / Ин-т астрономии РАН; отв. ред. А. Г. Масевич. М.: Космосинформ, 1993. 150 с.
4. Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор): Сб. науч. тр. / Ин-т астрономии РАН; отв. ред. А. Г. Масевич. М.: Космосинформ, 1995. 322 с.
5. Волохатюк В. А., Кочетков В. М., Красовский Р. Р. Вопросы оптической локации. М.: Сов. радио, 1971. 256 с.
6. Курикса А. А. Квантовая оптика и оптические локации. М.: Сов. радио, 1973. 184 с.
7. Молебный В. В. Оптико-локационные системы: Основы функционального построения. М.: Машиностроение, 1981. 183 с.
8. Аблеков В. К., Колядин С. А., Фролов А. В. Высоко-разрешающие оптические системы. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
9. Чеботарев А. Осторожно, в космосе мусор // Военный парад, сентябрь–октябрь 1996. С. 139.
10. Иванов В. Л., Меньшиков В. А., Пчелинцев Л. А., Лебедев В. В. Космический мусор: Проблема и пути ее решения: В 3 т. Т. 1. М.: Патриот, 1996. 302 с.
11. Здор С. Е., Широков В. Б. Оптический поиск и распознавание. М.: Наука, 1973. 239 с.
12. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 297 с.
13. Fried D. L. Optical Resolution through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures // JOSA. 1966. Vol. 56, № 10. P. 1372–1379.
14. Fried D. L. Varieties of Isoplanatism, in Proc. of SPIE / Ed. J. C. Wyant / Imaging through the Atmosphere. 1976. Vol. 75. P. 20–29.
15. Fried D. L., Mevers G. E. Evaluation of r_0 for propagation down through the atmosphere // Applied Optics, 1974. Vol. 13. № 11. P. 2620–2622; Fried D. L., correction 1 // Appl. Opt. 1975. Vol. 14. № 11. P. 2567; Fried D. L., correction 2 // Appl. Opt. 1977. Vol. 16. № 3. P. 549.
16. Бакут П. А., Свиридов К. Н., Устинов Н. Д., Хомич Н. Ю. Проблема изопланатичности оптических систем, формирующих изображения через турбулентную атмосферу // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60, вып. 3. С. 611–616.
17. Свиридов К. Н., Бакут П. А., Троицкий И. Н., Устинов Н. Д. Методы обработки световых полей при наблюдении объектов через турбулентную среду // Зарубежная радиоэлектроника: В 3 ч. Ч. I. Интерферометрические методы. 1976. № 7. С. 15–42; ч. II. Голографические методы. 1976. № 9. С. 3–31; ч. III. Адаптивные методы формирования изображений. 1977. № 1. С. 3–29.
18. Свиридов К. Н. Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. М.: Знание, 2005. 451 с.
19. Goodman J. W. Synthetic-Aperture Optics // Progress in Optics / Ed. E. Wolf. North-Holland, Amsterdam. 1970. Vol. 8. P. 1–50.
20. Синцов В. Н., Запругаев А. Ф. Апертурный синтез в оптике // УФН. 1974. Т. 114, вып. 4. С. 655–676.
21. Бакут П. А., Колин В. В., Рожков И. А., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н. Классификация и характеристики детекторов фото отсчетных изображений // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. Т. 42, № 9. С. 14–37.
22. Бакут П. А., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н. К вопросу оптимальной обработки фотоотсчетных пятенных изображений // Радиоэлектроника и электроника. 1988. Т. 33, № 7. С. 1446–1452.
23. Свиридов К. Н., Белкин Н. Д. Наземная оптическая система для контроля космического мусора // Конверсия в машиностроении. 1997. № 3. С. 36–40.
24. Свиридов К. Н. Оптическая локация космического мусора. М.: Знание, 2006. 488 с.
25. Бакут П. А., Рожков И. А., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н. Допустимая погрешность апертурного синтеза телескопических систем // Оптико-механическая промышленность. 1989. № 3. С. 2–4.
26. Mertz L., Tarbell T. D., Title A. Low noise imaging photon counter for astronomy // Appl. Opt. 1982. Vol. 21, № 4. P. 628–634.
27. Свиридов К. Н. Атмосферная оптика высокого углового разрешения: В 3 т. Т. 3. Перспективные технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. М.: Знание, 2007. 254 с.
28. Бакут П. А., Плотников И. П., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н. Восстановление изображений в малоизбыточных многоапертурных системах // ОМП. 1988. № 9. С. 59–62.

29. Бакут П.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. Модификация метода усреднения фаз пятенной интерферометрии // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60, вып. 5. С. 1077–1078.
30. Бакут П.А., Пахомов А.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н., Устинов Н.Д. О восстановлении изображения по фазе его фурье-спектра // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64, вып. 1. С. 165–169.
31. Бакут П.А., Пахомов А.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. Модификация метода Лабейри // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. С. 199–200.
32. Бакут П.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. Без опорно-корреляционный метод восстановления стабилизированного объекта по серии его искаженных турбулентной атмосферой короткоэкспозиционных изображений // Оптико-механическая промышленность. 1987. № 2. С. 64–68.
33. Бакут П.А., Рожков И.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н. Восстановление астрономического изображения в синтезированном телескопе // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1, № 11. С. 55–61.
34. Fried D.L., Yura H. T. Telescope-Performance Reciprocity for Propagation in a Turbulent Medium // JOSA. 1972. Vol. 62. P. 600–602.
35. Патент № 2575538 Российской Федерации. Способ получения изображений космического объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу; № 2014134182; заявл. 21.08.2014; опубл. 26.01.2016. Свиридов К.Н.; заявитель и правообладатель АО «Российские космические системы». 24 с.