

УДК 004.056.53

Перспективы развития оптических телескопов наземного и космического базирования

Зиновьев Ю.С.¹, Мишина О.А.^{2*}, Глущенко А.А.^{1}**

¹*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

²*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
имени Д.Ф. Устинова, 1-ая Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия*

**e-mail: olga_a_mishina@mail.ru*

***e-mail: andrglu@mail.ru*

Аннотация

Представлен обзор перспектив развития оптических телескопов наземного и космического базирования за рубежом и в России. Рассмотрены результаты проводимых в настоящее время работ по применению наземных телескопов контроля космического пространства, разработанных в США, и по созданию крупных космических телескопов с управляемыми составными (сегментными) апертурами, которые разрабатываются кооперацией ряда стран во главе с NASA. Анализируются принципы построения телескопов с синтезируемой апертурой, а также результаты создания в России широкоугольных наземных многоканальных телескопов высокого временного разрешения, позволяющих регистрировать быстропеременные (транзитные) во времени и пространстве космические явления.

Ключевые слова: оптические телескопы, проникающая способность, звездная величина, дальность телескопа, разрешающая способность, телескоп с синтезированной апертурой, быстропеременные (транзиентные) оптические явления.

Введение

Одной из основных задач современной астрономии является изучение Солнечной системы (в т.ч. астероидов и комет), удаленных Галактик (переменных, новых и вспыхивающих звезд), а также исследование Метагалактики (ядра активных галактик, вспышек сверхновых, оптических компаньонов гамма-всплесков и т.п.) [1]. Актуальным является также исследование ближнего космического пространства в связи с увеличением количества космических аппаратов и космического мусора [2, 3].

Для решения этих задач требуются наземные и космические телескопы нового поколения, обладающие повышенными характеристиками. Особую роль эти характеристики приобретают при решении проблемы защиты Земли от астероидной опасности [1]. Первой из этих характеристик является проникающая способность, которая характеризуется предельной звездной величиной m , которая может быть зарегистрирована телескопом:

$$m = 7,1 + 0,5\mu + 2,5 \lg \frac{\sqrt{S\eta T_H}}{K\Delta}, \quad (1)$$

где S – эффективная площадь главного зеркала телескопа (см^2);

η – квантовая эффективность фотоприёмного устройства на ПЗС-матрице;

T_H – время накопления (сек);

Δ – поперечник изображения звезды (в секундах дуги);

K – отношение сигнал/шум;

μ – величина фона неба (в звездных величинах на секунду дуги).

Оценки, выполненные в работе [1] показывают, что для регистрации звезд 22-ой величины могут использоваться телескопы с диаметром главного зеркала 1,2...1,5 метра. Как будет ясно из дальнейшего, такие телескопы могут быть выполнены в монолитном исполнении.

В тоже время, для регистрации таких объектов Солнечной Системы, как астероиды, требуется дальность действия телескопа не менее 300 млн. километров [1]. Дальность работы телескопа может быть определена из выражения:

$$L_{\max} = \left(\frac{S_{\text{eff}}}{4\pi q} \eta J_o A \sqrt{\frac{\tau}{n_T}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где S_{eff} – эффективная площадь рассеяния объекта;

q – пороговое отношение сигнал/шум;

η – коэффициент суммарных потерь (учитывающий, в том числе, квантовую эффективность приёмника);

J_o – поток солнечного излучения, освещающего астероид;

A – площадь апертуры телескопа;

n_T – число шумовых (темновых) переходов одном пикселе ПЗС за 1 секунду.

Квантовая эффективность и темновой ток в современных ПЗС-матрицах достигли своего оптимального значения (см.табл.1).

Таким образом, размер апертуры телескопа приобретает главное значение.

Следующей важной характеристикой телескопа является его разрешающая способность. Она, как известно, определяется дифракционным пределом (критерий Рэлея):

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ (рад)}, \quad (3)$$

где λ – средняя длина волны рабочего диапазона телескопа;

D – диаметр главного зеркала;

α – угловой радиус диска Эри.

Из выражения (3) следует, что если угловое расстояние между двумя объектами меньше α , то дифракционные диски накладываются друг на друга.

Здесь размер главного зеркала также имеет определяющее значение.

Перейдем теперь к основным направлениям развития телескопостроения и рассмотрим основные перспективы их развития.

1. Оптические телескопы наземного базирования

Рассмотрение начнём с телескопов, которые применяются при исследовании ближнего космического пространства. Нас будут интересовать, прежде всего, оптоэлектронные средства, используемые США в сети контроля космического пространства (сеть SSN). Эти средства обнаруживают космические объекты, заносят их в единый каталог и поддерживают его (каталог NORAD). Помимо измерения координатных параметров и набора орбитальных элементов указанные средства получают фотометрическую информацию (сигнатуры) и изображения космических объектов ближнего космоса. Так, например, фотометрические сигнатуры, которые несут информацию о состоянии космических аппаратов, получает наземная сеть системы GEODSS [4, 5].

Оптический телескоп системы GEODSS обладает следующими техническими параметрами [4, 5]:

- Рабочий диапазон – видимый и ближний ИК (0,4...1,0 мкм);
- Оптическая система – зеркально-линзовая по схеме Ричи-Кретьена;
- Фокусное расстояние – 2,18 м;
- Угол поля зрения – 2,1 град;
- Диаметр входной апертуры – 1,02 м;
- Проницающая способность – $19^m,0$;

Телескоп оснащён фотоприёмным устройством (ФПУ) на базе матрицы SSID-16 [6], основные параметры которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры матрицы SSID-16

№ п/п	Параметры	Координатный канал	Фотометрический канал
1	Размер матрицы (количество пикселей)	2 560 x 1 960	32 x 32
2	Размер пикселя(мк)	24 x 24	24 x 24
3	Скорость переключения кадров (фреймов) (fp / s)	2,7	1 000
4	Пик квантовой эффективности (%)	>80	>80
5	Емкость потенциальной ямы (\bar{e})	> 140 000	> 140 000
6	Средний темновой ток (пиксель / сек)	< 6	–
7	Динамический диапазон (bit)	13	13
8	Анти-блюминг	>1,000x	>1,000x

Перечисленные выше параметры позволяют оценить мгновенное поле зрения телескопа в 2,26 угловых секунд, что и определяет его угловую разрешающую способность. Как видно из таблицы 1, матрица фотометрического канала является «быстрой» со скоростью переключения фреймов 1 000 fr / s, что позволяет получить время экспозиции в пределах 0,01 – 0,001 сек и фиксировать быстрые изменения блеска космического аппарата. Отметим, что время интегрирования сигнала в координатном канале в режиме обнаружения сигнала составляет $1/2,7 = 0,37$ сек.

Таким образом, телескоп GEODSS позволяет получать фотометрические сигнатуры, которые могут быть использованы при решении задач «характеризации» космического аппарата [7]:

- определение класса и типа космического аппарата, состояния (рабочее / нерабочее) и функций выполнения задания (основное / побочное);
- наличие изменений в облике космического аппарата (например, разворот солнечной батареей);
- наличие нештатных ситуаций (например, отказ системы ориентации и стабилизации).

В свою очередь телескопы AEOS комплекса AMOS (система SSN), снабженные адаптивной оптикой (АО) с апертурой $D = 3,5$ метра, позволяют получать изображения низкоорбитальных космических аппаратов [7]. В телескопе с АО, несмотря на влияние турбулентной атмосферы, можно довести угловое разрешение до дифракционного предела. Для AEOS оно составит

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 0,27 \times 10^{-6} \text{ рад (при } \lambda = 0,8 \text{ мкм)}.$$

Анализ, приведенный в работе [7] показал, что для реализации технологии характеристики космических аппаратов более эффективно использование фотометрических сигнатур, чем использование оптических изображений, ввиду того, что при обработке сигналов используются менее затратные вычислительные методы. Это, в свою очередь, позволяет получать результаты в режиме времени, близком к реальному.

Подводя итоги обсуждения возможностей наземных телескопов системы SSN, можно сделать вывод о том, что указанные оптоэлектронные системы являются перспективными, так как используют методы адаптивной оптики и самые современные методы обработки некоординатной информации. Увеличение апертуры телескопов может понадобиться только в случае, если потребуется получить разрешающую способность, достаточную для получения изображений космических аппаратов на геостационарных орбитах.

К недостаткам телескопов GEODSS следует отнести малое поле зрения и, как следствие, сложность поиска объектов, а также малый сектор обзора, что не позволяет им регистрировать быстропеременные (транзиентные) во времени и пространстве космические события. Эта задача решается с помощью телескопических систем нового типа (см. раздел 4).

2. Крупногабаритные оптические космические телескопы

Подробный анализ данного направления телескопостроения дан в работе [8]. В ней показано, что в современных проектах космических телескопов JWST (диаметр апертуры 6,5 метра) и ATLAST (апертуры 9 и 16 метров) осуществляется

переход от монолитной поверхности главного зеркала к управляемой составной или сегментной апертуре.

Это позволяет уменьшить вес главного зеркала, а также решить вопрос о его размещении под обтекателем ракеты при выводе телескопа на орбиту. Так, главное зеркало телескопа JWST (диаметр 6,5 метра) состоит из 18 гексагональных сегментов массой 20 кг каждый, и общий вес зеркала составляет 360 кг. Одна из возможных схем построения телескопа ATLAST (диаметр 9,2 метра) включает уже 36 гексагональных сегментов, и общий вес зеркала составляет 720 кг.

В [8] также показано, что наиболее перспективным материалом для изготовления главного зеркала является карбид кремния, что объясняется его высокой жесткостью, термической стабильностью и низкой плотностью. Для перспективных 9-ти и 16-ти метровых телескопов ATLAST в качестве материала для главного зеркала рассматривается карбид кремния.

В настоящее время для решения современных задач наземной астрономии актуальным является создание телескопа, эквивалентного по характеристикам телескопу с 25- метровым главным зеркалом [9].

3. Телескопы с синтезированной апертурой

Под синтезированной апертурой понимается [9] замена непрерывной отражающей поверхности главного зеркала несколькими сегментами этой поверхности (субапертурами), или массив отдельных телескопов, сигналы от которых когерентно объединяются (рис. 1, рис. 2).

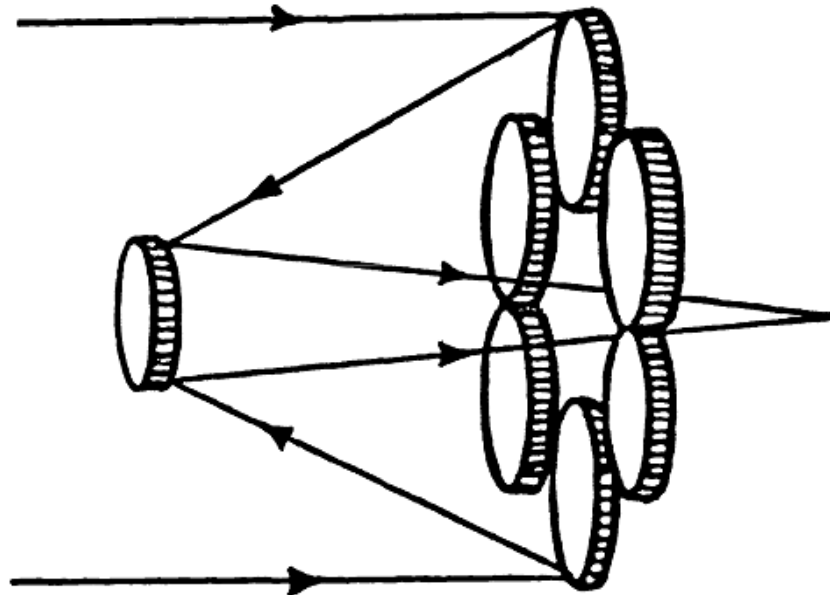


Рисунок 1 – Телескоп с заменой главного зеркала субапертурами

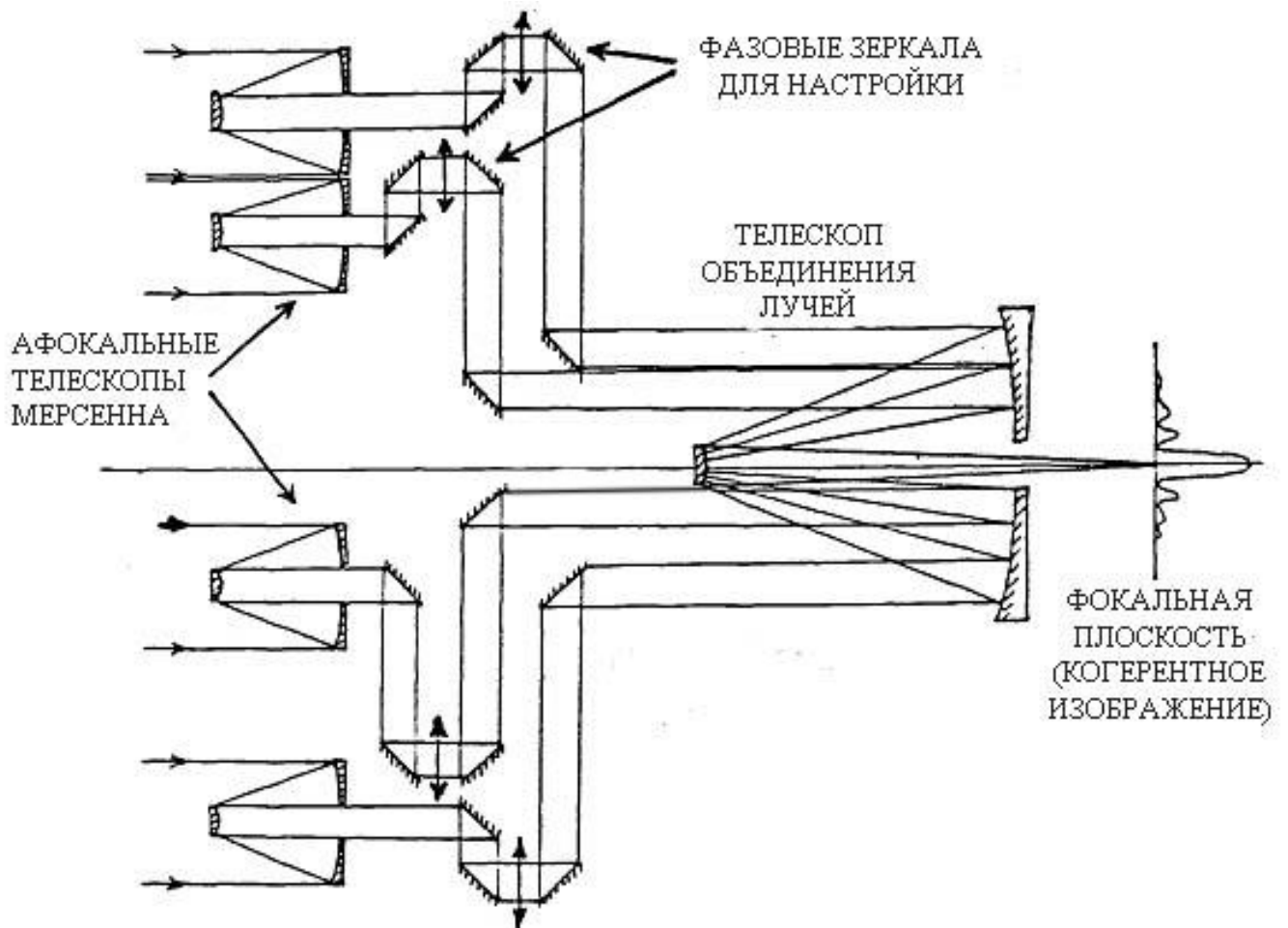


Рисунок 2 – Телескоп с отдельным вторичным зеркалом в каждой субапертуре

Вопросам создания телескопа с синтезированной апертурой посвящено много работ, как отечественных [9], [10], [11], [12], [13], так и зарубежных авторов [14], [15], [16], [17].

Первым телескопом, реализующим концепцию синтезированной апертуры, был наземный телескоп МЗТ (многозеркальный телескоп Смитсоновской астрофизической лаборатории и Аризонского университета [18]). Он был сформирован из 6-ти зеркал диаметром 1,83 м, расположенных на окружности диаметром 5,04 метра. Пучки света от этих зеркал достигали общего фокуса. По светособирающей площади МЗТ эквивалентен телескопу с монолитным зеркалом диаметром 4,5 м, а по разрешающей способности телескопу диаметром 6,86 метра.







Исследования последующих лет привели к пяти возможным конструкциям телескопа нового поколения:

1. Большой космический телескоп [9].
2. Телескоп с разреженной апертурой «Голэй-6» [17].
3. Проект «Cosmic» [19].
4. Когерентный массив «Голэй-9» [9].
5. Космический многозеркальный телескоп [20].

Проводились также исследования таких конструкций, как «Голэй-12», «CIRCLE-9», «CIRCLE-13» и «REDUNDANT» [14].

Не имея возможности в рамках одной статьи проанализировать все указанные проекты, приведём результаты проектирования [14] телескопа с синтезированной апертурой, эквивалентного по пределу разрешения телескопу с монолитным зеркалом диаметром 24 метра (таблица 2).

Характеристики конфигураций телескопа с синтезированной апертурой

						
	Monolith	Golay-6	Circle-9	Golay-12	Circle-13	18-Element (Redundant)
Число сегментов	1	6	9	12	13	18
Минимальный диаметр сегмента	24.0	5.4	4.2	3.1	2.9	3.2
Единичное расстояние		9.3	8.4	5.5	5.8	5.5
Минимальная собирающая площадь	452	136	125	91	86	145
Общий диаметр	24	33.8	29	45	27	39

Из таблицы следует, что размер массивов субапертур может в 1,8 раза превышать размер монолитного зеркала. В то же время полученные размеры субапертур в настоящее время могут быть реализованы при использовании карбида кремния.

К недостаткам телескопов с синтезированной апертурой относится снижение минимальной собирающей площади по сравнению с монолитной структурой.

К преимуществам телескопов с субапертурами необходимо отнести тот факт, что, исходя из интерференционного характера процесса формирования изображения, они более подходят для минимизации искажений, вносимых турбулентной атмосферой, по сравнению с монолитной апертурой [20], [21], [22].

Из изложенного следует, что телескопы с синтезированной апертурой целесообразно рассматривать как крупные наземные телескопы следующего

поколения, решающие задачи по обнаружению и сопровождению опасных астероидов на больших дальностях.

4. Многоканальные широкопольные наземные телескопы с субсекундным временным разрешением

Как уже отмечалось в разделе 1, современные наземные телескопы для наблюдения объектов ближнего космоса имеют малое поле зрения, что значительно усложняет поиск объектов и делает практически невозможным обнаружение быстропеременных (транзиентных) во времени и пространстве источников оптического излучения. Для их обнаружения необходимы принципиально новые широкоугольные телескопы (с полем зрения в сотни квадратных градусов), использующие «быстрые» ФПУ с субсекундным временным разрешением.

В настоящее время в России создана широкопольная 9-канальная система оптического мониторинга ближнего космоса с субсекундным временным разрешением Mini-Mega TORTORA (ММТ – 9) [23], [24], [25], [26], [27]. Эта система позволяет наблюдать небесную сферу с размерами до 900 квадратных градусов, проводить фотометрические измерения в цветовых полосах (BVR), а также измерять поляризационные характеристики выбранных объектов или площадок в 100 – 300 квадратных градусов. Временное разрешение системы составляет 0,1 секунду при проницании около 11-ой звездной величины (в фильтре V).

Система позволяет регистрировать быстропеременные (транзиентные) во времени и пространстве оптические источники. В астрономии – это оптические вспышки, сопровождающие гамма - всплески, передние фронты вспышек новых и

сверхновых звезд. В ближнем космосе – это вспышки, сопровождающие столкновения космических аппаратов между собой и с космическим мусором.

Система состоит из 9-ти отдельных каналов-объективов, установленных попарно на 5 экваториальных монтировках.

Каждый канал снабжен ФПУ в виде «быстрого» детектора с высоким временным разрешением Andor Neo sCMOS размером 6,5 x 6,5 мкм с разрешением 2 560 x 2 160 пикселей при частоте считывания до 30 Гц (временное разрешение 0,03 сек). Детекторы охлаждаются до температуры $t = -40^{\circ}\text{C}$; квантовый выход ФПУ составляет 0,55 при $\lambda = 550\text{ нм}$; шум считывания не более $1,2 \bar{e}$ на пиксель. Одиночный канал имеет поле зрения около 100 кв. градусов.

Программно – вычислительный комплекс системы ММТ – 9 реализован на базе 12 компьютеров, объединенных в общую локальную сеть. Программное обеспечение позволяет осуществлять быстрый переход (за 2-3 секунды) от режима обнаружения объекта (в секторе 900 кв. градусов) к узкопольному исследовательскому режиму (100 – 300 кв. градусов), либо к режиму цветowych фильтров (BVR) и поляризационных фильтров, что дает возможность проводить идентификацию объекта.

Начиная с 2014 года, система ММТ – 9 ведёт регулярный мониторинг небесной сферы с целью регистрации как транзитных событий разных классов, так и космических аппаратов. Высокое временное разрешение позволяет достаточно детально исследовать сигнатуры космических аппаратов (рисунок 3) [24].

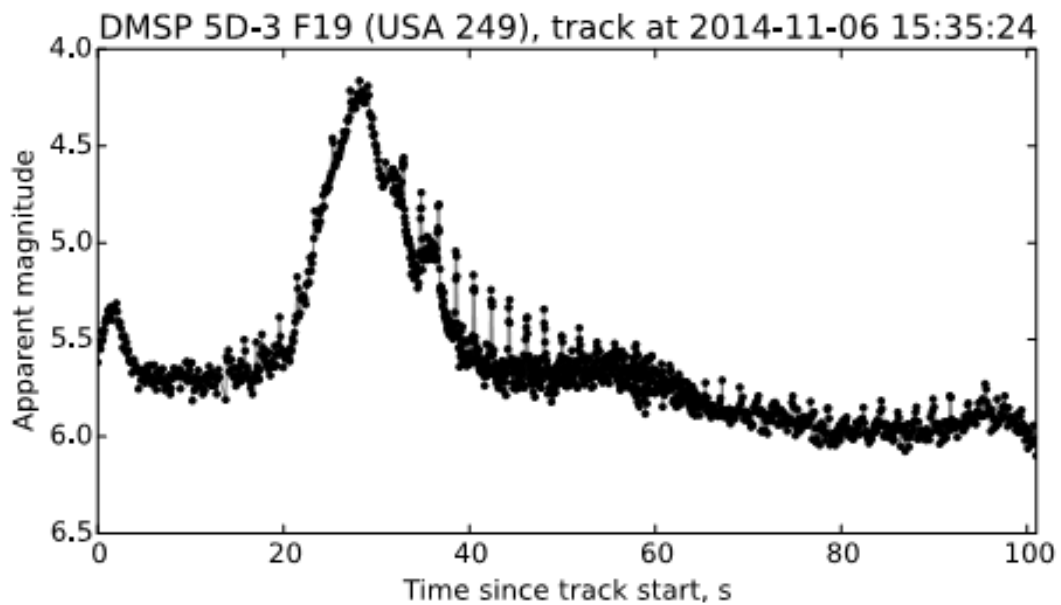


Рисунок 3 – Осцилляции с периодом 1,9 секунды и нерегулярные вариации блеска, связанные с формой и подвижностью элементов конструкции космического аппарата

Отождествление объектов происходит за счет сопоставления их характеристик с характеристиками космического аппарата из базы данных NORAD (рисунок 4) [24].

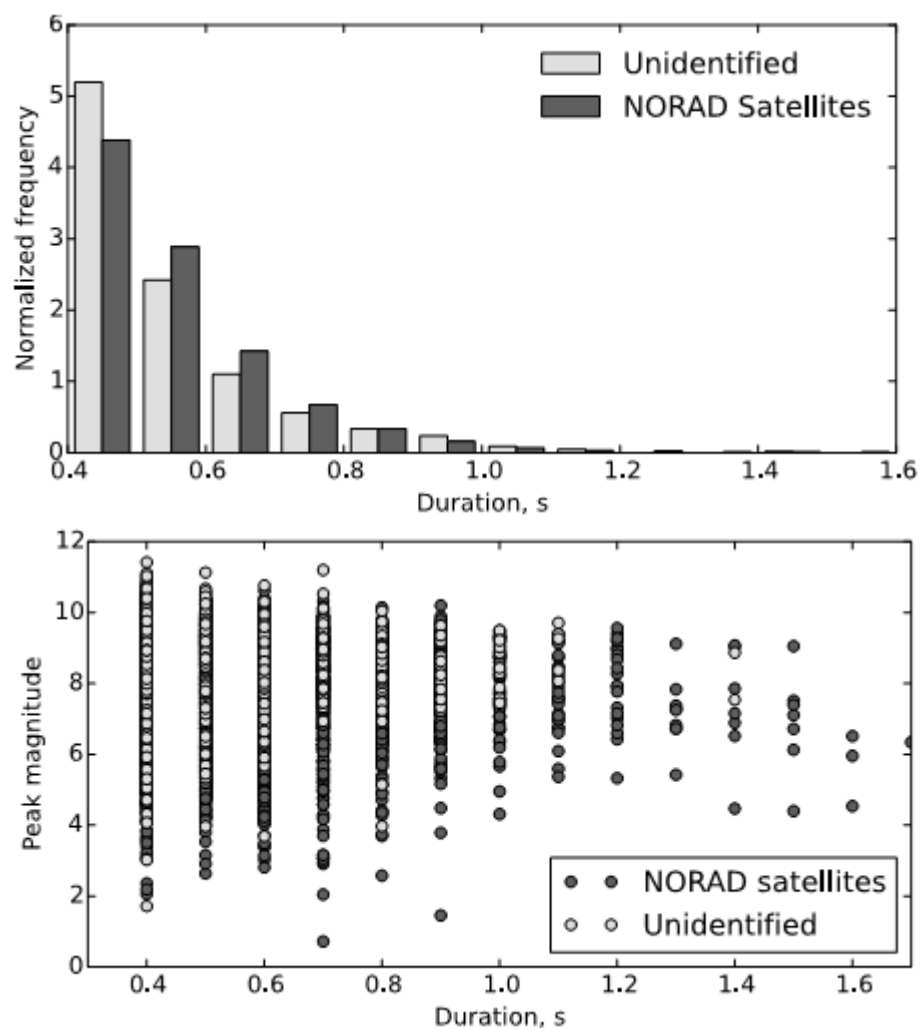


Рисунок 4 – Распределение по длительности и яркости 10 000 одиночных вспышек, обнаруженных в мониторинговом режиме. Доля событий, неотжествляемых со спутниками из каталога NORAD, составляет около 10%

На рисунке 5 [25] показаны траектории движения космических объектов, зарегистрированных системой ММТ – 9 ночью в августе 2014 года.

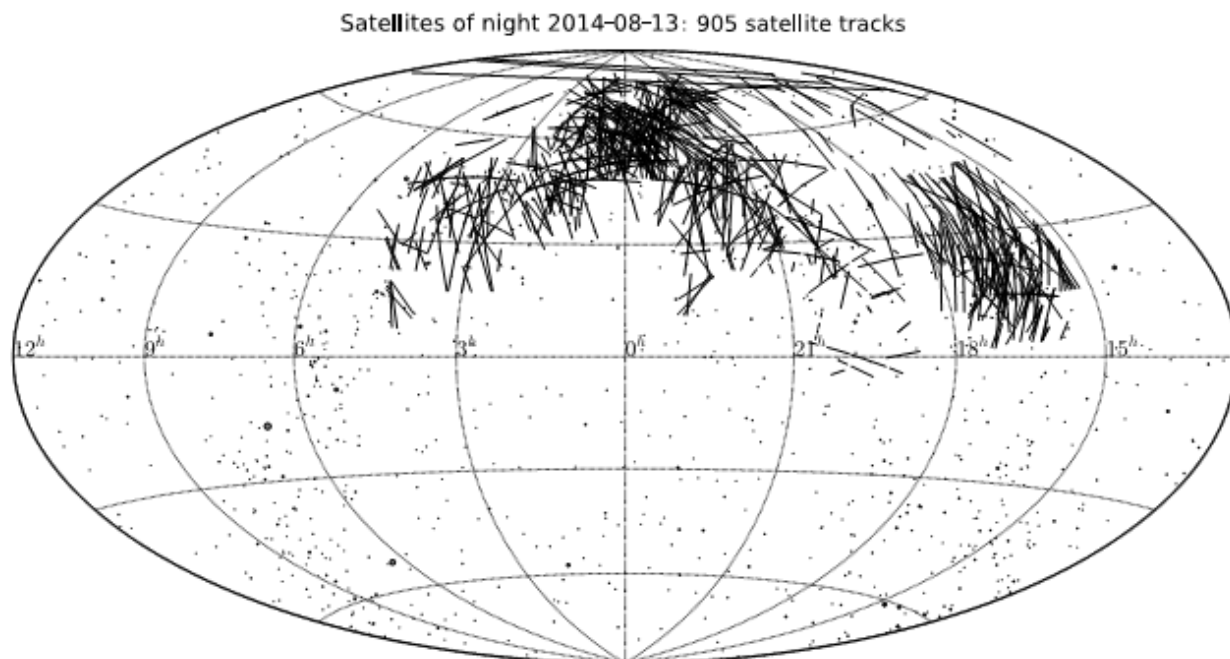


Рисунок 5 – Траектории движения космических аппаратов, зарегистрированные ММТ-9 ночью 13 августа 2014 года. Отображены траектории только с более чем 100 точками обнаружения

Перспективная система ММТ должна иметь возможность регистрировать как малые космические аппараты на геостационарной орбите, так и транзиентные объекты на той же орбите. К последним относятся взрывы космических аппаратов и ступеней выведения, которые происходят достаточно часто. В качестве прототипа системы может рассматриваться многоканальный оптический телескоп SAINT [26], [27].

Мы полагаем, что многоканальный оптический телескоп SAINT (Small Aperture Imaging Network Telescope) может быть весьма эффективным для обнаружения опасных космических тел любых размеров уже на больших расстояниях от Земли (в отличие от систем Mini-Mega TORTORA), конкурируя с Pan-STARRS и LSST. В то же время SAINT, обладающий высоким временным

разрешением и способностью работать как в мониторинговом, так и исследовательском (узкопольном) режимах, может превзойти эти телескопы при обнаружении и изучении внезапно появляющихся быстро движущихся объектов.

Перспективный телескоп должен иметь диаметр объектива каждого канала не менее 40 см с полем зрения около 1 кв. градуса, его полное поле зрения около 500 кв. градусов, а временное разрешение 0,1 сек. Количество каналов должно быть установлено дополнительно.

Предельное пропускание в V-фильтре для одного канала на временных шкалах:

0,1 сек – 16,8; 10 сек – 19,3; 1 000 сек – 21,8.

Математическое и информационное обеспечение – аналогично системе ММТ–9.

Заключение

Проведенный обзор перспектив развития оптических телескопов наземного и космического базирования позволил выявить основные тенденции развития современного телескопостроения. К ним следует отнести увеличение диаметра главного зеркала телескопа как за счет применения принципа управляемых составных (сегментированных) апертур, так и за счет методов синтезирования апертуры. Помимо увеличения проникающей способности и углового разрешения применение этого направления позволяет создать телескопы с большой дальностью действия, что чрезвычайно важно для решения проблемы астероидной опасности. К другому важному направлению следует отнести создание фотометрических каналов наземных телескопов (GEODSS, ММТ – 9) с большим быстродействием, что дает возможность получать сигнатуры космических объектов с большим временным

разрешением и решать задачу их идентификации. И, наконец, создание принципиально новой системы ММТ – 9 позволило обнаруживать и исследовать быстропеременные (во времени и пространстве) источники излучения заранее неизвестной локализации в огромных секторах обзора (до 900 квадратных градусов), что позволяет реагировать на чрезвычайные ситуации в космосе в близком к реальному.

Библиографический список

1. Дегтярь В.Г., Волков В.А. Ракетная концепция системы противоастероидной защиты Земли. – М.: Машиностроение, 2014. - 335 с.
2. Соколов Н.Л. Метод определения орбитальных параметров космического мусора бортовыми средствами космического аппарата // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=52950>
3. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
4. Space Surveillance Sensors: GEODSS (Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance) System (August 20, 2012), available at: <https://mostlymissiledefense.com/2012/08/20/space-surveillance-sensors-geodss-ground-based-electro-optical-deep-space-surveillance-system-august-20-2012>
5. C.Max Williams and Sam D. Redford. GEODSS Upgrade Prototype System Program Status. Proceedings of the 1996 Space Surveillance Workshop, Lincoln Laboratory, 1996, pp. 99 – 108.

6. John R.Tower et al. Large Format Backside Illuminated CCD Imager for Space Surveillance // IEEE Transactions on Electron devices, 2003, vol. 50, no.1, pp. 218 - 224.
7. Турков В.Е., Ульянов С.А., Шаховской В.В., Поташов С.Ю. Технологии характеристики космических аппаратов для достижения космической ситуационной осведомленности США // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 11. С. 3 – 11.
8. Кириченко Д.В., Клейменов В.В., Новикова Е.В. Крупногабаритные оптические телескопы // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7. С. 589 – 602.
9. Филатов А.А. Анализ проблем выбора конфигурации массива субапертур в оптической системе с синтезированной апертурой: Дисс. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2003. – 123 с.
10. Зверев В.А. Структура волнового фронта, образованного телескопическими системами в составе синтезированной апертуры // Оптический журнал. 1993. Т. 60. № 6. С. 51 - 52.
11. Зверев В.А. Оптическая система с синтезированной апертурой // Оптико-механическая промышленность. 1986. Т. 53. № 12. С. 12 – 16.
12. Рябова Н.В. Системы многоапертурного синтеза телескопов с прямым формированием изображения // Оптический журнал. 1993. Т. 60. № 8. С. 10 - 12.
13. Родионов С.А., Еськов Д.Н., Бонштедт Б.Э., Домненко В.М. Моделирование формирования изображений оптическими системами с синтезированной апертурой // Оптический журнал. 1998. Т.65. № 10. С.45 - 48.
14. Harvey J.E., Rockwell R.A. Performance characteristics of phased arrays and thinned aperture optical telescopes // Reflective Optics, Proc. SPIE, 1987, vol. 751, pp. 62 – 71

15. Bunner A.N. Optical arrays for future astronomical telescopes in space // Adaptive and Synthetic Aperture Optical Systems. Proc. SPIE, 1986, vol. 643, pp. 180 – 188.
16. Meinel A.B. Aperture synthesis using independent telescope // Applied Optics, 1970, vol. 9, no.11, pp. 2501 - 2504.
17. Golay M.J.E. Point arrays having compact nonredundant autocorrelation // Journal of the Optical Society of America, 1971, vol. 61, pp. 272 – 273.
18. Пачини Ф., Рихтер В., Вильсона Р. Оптические телескопы будущего. – М.: Мир, 1981. – 432 с.
19. Traub W., Gursky W. Coherent Arrays for Space Astronomy // Proc. SPIE International Society for Optical Engineering, 1980, vol. 228, pp. 136 – 141.
20. Russel F.D., Goodman J.W. Nonredundant Arrays and Postdetection Processing for Aberrations Compensation in Incoherent Imaging // Journal of the Optical Society of America, 1971, vol. 61, pp. 182 – 191. URL: <https://www.osapublishing.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-61-2-182>
21. Филатов А.А. Структура изображения, образованного системой с синтезированной апертурой в присутствии атмосферной турбулентности // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 10. С. 29 - 35.
22. Rhodes W.T., Goodman J.W. Interferometric technique for recording and restoring images degraded by unknown aberrations // Journal of the Optical Society of America, 1973, vol. 63, pp. 647 – 657.
23. Карпов С.В., Бескин Г.М., Бирюков А.В. и др. Многоканальный мониторинговый телескоп с субсекундным временным разрешением // Сборник трудов конференции

"Околоземная Астрономия-2015". ММТ – 9. (Терскол, авг. 31 – 5 сент. 2015), 2016, С. 291 – 296.

24. Бескин Г.М., Карпов С.В., Бирюков А.В. и др. Широкоугольный оптический мониторинг с помощью многоканального телескопа высокого временного разрешения Мини-МегаТОРТОРА (ММТ) // Астрофизический бюллетень. 2017. Т. 72. № 1. С. 89 – 102.

25. Biryukov A., Beskin G., Karpov S., Bondar S. et al. The first light of Mini-MegaTortora wide-field monitoring system // Baltic Astronomy, 2015, vol. 24, pp. 100 – 108.

26. Бескин Г.М., Карпов С.В., Плохотниченко В.Л., Бондарь С.Ф. и др. Системы широкоугольного оптического мониторинга субсекундного временного разрешения для обнаружения и исследования космических угроз // Успехи Физических Наук. 2013. Т. 183. № 8. С. 888 – 894.

27. Бескин Г.М., Карпов С.В., Плохотниченко В.Л., Бондарь С.Ф., Перков А.В., Иванов Е.А., Каткова Е.А., Сасюк В.В., Шерер Э. Широкоугольный оптический мониторинг высокого временного разрешения как способ обнаружения опасных космических объектов // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2013. № 3 (79). С. 34 – 42.