

УДК 629.7.086:681.5183:524.491

**П. П. Сухов, С. К. Волков, Г. Ф. Карпенко**

Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»  
Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛЬНЫХ ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

---

*Експериментально показано можливість застосування широкопольної лінзової оптики для моніторингу високоорбітальних космічних об'єктів. Для об'єктива «Таїр 19500/3» при проникній здатності 15.5<sup>m</sup> за 10 с накопичення середня квадратична похибка координат малорухомих геостационарних супутників не перевищує 2". Приблизно 90 % вимірювань мали середню квадратичну похибку менше 1". При огляді геостационарної зони від 10° E до 37.5° W шириною 5°, площею 500 град<sup>2</sup> віднайдені всі 46 активних каталогізованих ГСС, що мають нахил до екватора, менший за 2.5°. Показано можливість використання широкопольної лінзової оптики для моніторингу низькоорбітальних КО висотою до 2000 км. З 39 космічних об'єктів, зафіксованих протягом 1 год у режимі нерухомого телескопа, 35 були ототожені за каталогом NORAD.*

---

Для мониторинга околоземного космического пространства с целью обнаружения каталогизированных, некаталогизированных низко-(НОКО) и высокоорбитальных космических объектов (ВОКО), включающих геостационарные (ГСС) и высокоэллиптические спутники (ВЭО) блеском до 15<sup>m</sup>; комет, астероидов, опасно сближающихся с Землей, необходимо использовать поле зрения телескопа в десятки или сотни квадратных градусов. При малых размерах светочувствительной поверхности приемников излучения типа ПЗС увеличить поле зрения можно одним из следующих способов.

1. Изготовление линзового редуктора поля для зеркальных телескопов (преобразователя, укорачивающего фокусное расстояние).
2. Изготовление новой зеркально-линзовой, линзовой оптики с большим полем зрения.
3. Использование ПЗС с большим размером рабочей поверхности.
4. Использование широкоугольных линзовых, зеркально-линзовых объективов, изготовленных ранее специально для фотографических наблюдений ИСЗ.
5. Одновременное использование нескольких объективов с перекрытием соседних площа-

док небесной сферы (принцип многокамерного астрографа).

С 2001 г. служба контроля космического пространства США приступила к проекту развития интегрированного набора систем обнаружения с широкими полями зрения. Было решено перепроектировать и «воскресить» оригинальные, светосильные фотографические камеры «Бейкер-Нана 500/1», изготовленные в 1955—1957 гг. и оснащенные зеркально-линзовой системой Шмидта [6]. С использованием ПЗС (4096×4096, пиксел 15 мкм, квантовая эффективность 90 %) при нескольких секундах накопления на этой камере достигнута проникающая способность до 16<sup>m</sup> в поле зрения до 6°.

В странах СНГ увеличение поля зрения телескопа при мониторинге геостационарной области (ГСО) достигается применением линзовых редукторов и изготовлением новых малоразмерных светосильных линзовых, зеркально-линзовых оптических систем [1, 3].

Как и авторы работы [6], мы считаем, что наиболее доступный и экономичный метод получения большого поля зрения — «реанимировать» и использовать широкоугольные объективы с высокими оптическими характеристиками, которыми были оснащены инструменты, изготовленные для позиционных фотографичес-

ких наблюдений ИСЗ. Это АФУ-75 (объектив «Уран-16750/3.5»), СБГ (зеркально-линзовый объектив Шмидта), ВАУ («Астродар»), модификации НАФА («Уран-9250/2.5», «Индустар-52», «Уран-16»), КПП («Уран-12 500/2.5»), КТС-30, КТ-50 и др. Их использование позволяет получать астрометрические результаты, практически одинаковые с системами [1, 3].

Для эксперимента были отобраны объективы «Зенитар-М», «Гелиос-40», «ВариоГоир Т-1-М», ОФ-233, «Уран-9», «Таир-19» [4, 5] (см. табл. 1). Объектив сочленялся с ПЗС-камерой фирмы FLI IMG 1001E (1024×1024, размер пиксела 24 мкм).

При обзорных наблюдениях ГСО преследовались следующие цели.

1. Достичь проникающей способности по ГСС до  $15^m$  при поле зрения телескопа  $3-7^\circ$  и времени накопления 10–15 с.
2. Исследовать возможность использования широкопольной оптики (ШПО) с полем зрения  $30 \times 30^\circ$  для мониторинга НОКО на низких орбитах.
3. Определить погрешность вычисляемых экваториальных координат КО для прогноза движения КО.
4. Определить оптимальные характеристики доступной ШПО для задач мониторинга низких и высокоорбитальных КО.

Ниже даны наиболее удачные результаты наблюдений на разных объективах.

**Обзор ГСО за 25.12.2006 с объективом ОФ-233.** С полем зрения  $7 \times 7^\circ$  проведен обзор геостационарной области от  $44^\circ \text{ E}$  —  $40^\circ \text{ W}$ . В течение 1 ч площадь около  $600 \text{ град}^2$  была просканирована дважды. Из 85 каталогизированных ГСС с наклоном к экватору менее  $3.5^\circ$  было обнаружено 80 объектов. Достигнута проникающая способность  $14^m$  по малоподвижным ГСС за 10 с накопления. Типичная СКО вычисления экваториальных координат ГСС составила  $1-2''$ .

**Обзор ГСО за 11.07.2007 г. с объективом «Таир-19».** При поле зрения  $3 \times 3^\circ$  проведен обзор ГСО шириной  $5^\circ$  от  $10^\circ \text{ E}$  до  $37.5^\circ \text{ W}$ . В течение 1 ч площадь более  $500 \text{ град}^2$  была просканирована дважды. В итоге были обнаружены все 46 каталогизированных активных ГСС с наклоном к экватору менее  $2.5^\circ$ , 12 пассивных, два высоко-

эллиптических КО. Из 450 измерений 90 % имели СКО менее  $1''$ , остальные — в пределах  $1-2''$ . Проницающая способность составила  $15.5^m$  по малоподвижным ГСС за 10 с накопления. При СКО  $1-2''$  прогнозирование (расчет эфемерид) движения объекта вполне достаточно для наведения на него узкопольных телескопов системы Кассегрена, Ричи-Кретьена с полем зрения до  $1^\circ$ . В табл. 2 приведены оптимальные характеристики малоразмерной линзовой ШПО, удовлетворяющей требованиям идентификации ГСС.

**Мониторинг низкоорбитальных космических объектов.** Использовался объектив «Зенитар-М», поле зрения  $30 \times 30^\circ$  ( $900 \text{ град}^2$ ), угловое разрешение —  $99''/\text{пкл}$ . Проницающая способность по звездам — до  $11^m$  за 1 с, по НОКО — до  $10.0^m$  (в зависимости от угловой скорости движения КО). Наблюдения велись при неподвижном телескопе. В течение 1 ч через поле зрения прошло 39 КО. Количество полученных фреймов за время прохождения спутников через поле зрения составляло от 3–9, время нахождения КО во фрейме составляло 16–120 с. Идентификация КО по орбитальным параметрам проводилась в ОНИИ МО (Харьков) А. Ткаченко и В. Ямнищким. Использовались два метода отождествления: 1) по элементам построенной орбиты; 2) по отдельным измерениям. Результаты практически идентичны. Двумя методами по каталогу NORAD из 39 КО уверенно идентифицировано 35 (90 %) объектов. Оценки невязок параметров идентифицированных орбит находились в пределах:

наклонение орбиты — от  $0.04$  до  $0.14^\circ$ ,  
долгота восходящего узла — от  $0.06$  до  $0.26^\circ$ ,  
аргумент широты — от  $0.08$  до  $0.25^\circ$ ,  
период — от  $0.02$  до  $0.82$  мин.

Камера IMG 1001E имеет время считывания фрейма объемом в 1 Мб около 8 с. А использование ПЗС-матрицы площадью более  $6 \text{ см}^2$  при времени считывания фрейма 1 с, позволит увеличить поле зрения, количество обнаруженных НОКО, повысить точность расчета орбит. Характеристики ШПО для наблюдений НОКО (как и для иных задач) должны удовлетворять требованиям решаемой задачи. Для прогнозирования опасных сближений низкоорбитальных КО требуется оптика более высокого разреше-

ния. Для идентификации НОКО требования к ШПО менее критичны (см. табл. 3).

При выборе или изготовлении ШПО следует учитывать следующий важный фактор. Оптимальный размер поля зрения необходимо адекватно сочетать с имеющимся математическим обеспечением. Технически легче изготовить светосильную оптику с полем зрения десяткисотни квадратных градусов, чем разработать алгоритм и программное обеспечение, способное апостериорно, оперативно (несколько секунд на фрейм) и с максимально возможной степенью вероятности производить селекцию КО на участке изображения звездного неба, содержащего несколько тысяч звезд. Задача создания оперативного, «умного» алгоритма обработки ПЗС-изображения крайне сложна. Ввиду отсутствия достоверных моделей такого типа изображений, невозможно с высокой надежностью на первоначальном этапе на фоне многочисленных арте-

фактов программно выделить малоконтрастные, малоразмерные (соизмеримые с размером пиксела) изображения КО [2]. Достоверность автоматизированного выделения также снижают многочисленные случайные помехи от «космических частиц», разного рода шумов, величина которых в фрейме также соизмерима с размером изображения КО. В итоге программное выделение КО может затянуться на длительное время [http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv10i3.pdf]. Для повышения вероятности селекции КО можно предложить увеличение количества фреймов в серии.

Очевидна перспективность использования ШПО для следующих задач мониторинга околоземного космического пространства.

1. Обнаружение высокоорбитальных КО, имеющих блеск до  $16^m$ . На базе ШПО с полем зрения несколько десятков квадратных градусов реально проводить обзор узкого геостацио-

Таблица 1. Характеристики объективов с использованием ПЗС-камеры IMG1001E

Характеристика	«Зенитар-М»	«Гелиос-40»	ОФ-233	«ВариоГоир Т-1-М»	«Уран-9»	«Таир-19»
$D$ , мм	35	55	85	140	100	170
$f$ , мм	50	85	210	40—400	250	500
$f/D$	1.7	1.5	2.5	4	2.5	3
Разрешение, "/пкл	99	56	23	12—124	19.8	9.9
Поле зрения	30×30°, 900 град <sup>2</sup>	16.4×16.4°, 270 град <sup>2</sup>	6.7×6.7°, 45 град <sup>2</sup>	от 3.5×3.5° до 35.4×35.4°, от 12.4 до 1244 град <sup>2</sup>	5.2×5.2°, 27 град <sup>2</sup>	3×3°, 9 град <sup>2</sup>
Проницательная способность по звездам ( $t = 1$ с)	$11^m$	$12^m$	$13.5^m$ — $13.9^m$	$11.5^m$ — $12^m$	$13^m$	$14^m$
Оптимальная $T_{\text{нак}}$ для обнаружения ГСС	30—40 с до $12.5^m$	20—30 с до $13.5^m$ — $14^m$	15—20 с до $14^m$	10—15 с до $12.5^m$	10—15 с до $14.3^m$	10 с до $15.5^m$

Таблица 2. Оптимальные характеристики малоразмерной линзовой ШПО, удовлетворяющей требованиям идентификации ГСС (с использованием ПЗС IMG 1001E)

$D$ , мм	$f/D$	Разрешение, "/пкл	Поле зрения	Оптимальное $T_{\text{накоп}}$ для обнаружения ГСС	Проницательная способность по звездам
150—220	1:2—1:3.5	20—10	5×5°—3×3°	10—15 с	$13^m$ — $14^m$ за 1 с накопления

Таблица 3. Оптимальные характеристики линзовой малоформатной ШПО, удовлетворяющей требованиям идентификации НОКО

$D$ , мм	Относительное отверстие $f/D$	Угловое разрешение, "/пкл	Поле зрения	$m_{\text{max}}$
90—150	1:1.2—1:2	50—70	40×40°—50×50°	$12^m$ — $13^m$ (за 1 с)

- нарного кольца в контролируемой зоне пункта наблюдения ( $110^\circ$ — $130^\circ$ ) в течение 1—2 ночей.
2. Выполнение целевых наблюдений для анализа возможных опасных сближений КО с фрагментами космического мусора, выявление маневров ГСС.
  3. Обнаружение комет, регистрация метеоров, астероидов, опасно сближающихся с Землей. Выявление нестационарных во времени и пространстве астрофизических объектов (оптические транзиенты, вспыхивающие, новые, сверхновые звезды).

Широкопольная оптика с полем зрения сотни-тысячи град<sup>2</sup> позволит в течение ночи обнаруживать несколько сотен проходов НОКО с вычисляемой ошибкой орбитальных параметров, достаточной для уверенного отождествления и прогнозирования движений НОКО.

Большой интерес для обзорных наблюдений ГСО представляют следующие светосильные отечественные объективы [5].

«Уран-16 750/3.5». Фокальная плоскость объектива рассчитана для использования фотоприемника размером  $30 \times 30$  см,  $D = 22$  см,  $f/D = 3.5$ , разрешающая сила — в центре 35 лин/мм, по полю 12 лин/мм,  $F = 750$  мм.

«Уран-12 500/2.5». При размере фотоприемника  $18 \times 24$  см поле зрения составляет  $33^\circ$ ,  $D = 20$  см,  $f/D = 2.5$ , разрешающая сила — в центре 38 лин/мм, по полю 11 лин/мм,  $F = 500$  мм.

**Преимущества использования линзовой широкопольной оптики.** Используется «готовая к употреблению» оптика. Для астрометрических работ, как известно, предпочтительней использовать рефракторы. Оптическая скамья проста в настройке и изготовлении. Недорогостоящие широкоугольные объективы (фото-, кино-, проекционные, специальные и др.) дают качество изображения, вполне удовлетворяющее требованиям задач мониторинга космического пространства.

К недостаткам следует отнести трудность фокусировки с объективами, имеющими относительное отверстие 1:1.2—1:2. Хроматическая аберрация, различного рода искажения присущи некоторым линзовым объективам (за исключением апохроматов), но они постоянны во времени, их можно исследовать и учитывать программно.

*Авторы выражают признательность А. В. Сергееву (МЦ АМЭИ, Терскол), Н. З. Стрыгину (АО ОНУ, Одесса), А. В. Багрову (ИНАСАН, Москва) за ценные замечания и советы при обсуждении материала.*

1. Багров А. В., Бескин Г. М., Бирюков А. и др. Широкоугольная высокоскоростная оптическая камера для обнаружения вспыхивающих и движущихся объектов // Окоземная астрономия-2003: Сб. тр. — М., ИНАСАН, 2003. — Т. 2. — С. 101—106.
2. Прокофьева-Михайловская В. В., Стрыгин Н. З., Сухов П. П., Карпенко Г. Ф. Некоторые современные проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем (АТВИС) для наблюдений за искусственными спутниками Земли // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2007. — **103**. — С. 238—245.
3. Теребиж В. Ю. Зеркально-линзовые телескопы дифракционного качества со сферическими поверхностями // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2001. — **97**. — С. 101—103.
4. Цветов Ю. П. Инструменты для оптических наблюдений искусственных спутников Земли // Наблюд. искусств. небес. тел. — 1976. — № 72. — С. 23—60.
5. Яковлев А. Ф. Каталог «Объективы» / Под ред. Д. С. Волосова. — М.: ОНТИ ГОИ, 1970. — Т. 1, 2.
6. Pravdo S. H., Rabinowitz D. L, Helin E. F., et al. An automated system for telescope control, wide-field imaging, and object detection // Astron. J. — 1999. — **117**. — P. 1616—1633.

*Надійшла до редакції 30.10.09*

*P. P. Sukhov, S. K. Volkov, G. F. Karpenko*

#### THE USE OF THE WIDE-FIELD LENS OPTICS FOR SPACE SURVEILLANCE SYSTEMS

On the basis of our observation results, it is shown that wide-field lens optics can be used for the monitoring of high-orbital artificial Earth's satellite objects with the aim of their orbital determination. With the wide-field lens optics «Tair-19 500/3», at a limited magnitude of  $15.5^m$  in an accumulation time of per 10 sec, the rms error for the coordinate measurements in the case of geostationary satellites moving slowly does not exceed 2 arcsec. For about 90 % measurements, the rms error is less than 1 arcsec. All of active 46 catalogued geostationary satellites with declinations less than  $2.5^\circ$  were detected during the survey of the geostationary zone from  $10^\circ$  E to  $37^\circ$  W (the zone width was  $5^\circ$  and zone area was  $500 \text{ deg}^2$ ). The possibility to use wide-field optics for the monitoring of LEOs with altitudes up to 2000 km is shown. Among the 39 objects observed during 1 hour in the «beam-park» mode with a field of view of  $30^\circ \times 30^\circ$  35 objects were identified in the NO-RAD catalogue.