

УДК 520.88

## РЕГУЛЯРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ В ТИРАСПОЛЕ, КИСЛОВОДСКЕ И МОСКВЕ В 2012–2013 ГГ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Лукьянов А. П.<sup>1</sup>, Лагуткин В. Н.<sup>2</sup>, Мальцев А. В.<sup>3</sup>, Колесса А. Е.<sup>4</sup>, Ким А. К.<sup>5</sup>, Равдин С. С.<sup>6</sup>, Пругло А. В.<sup>7</sup>, Молотов И. Е.<sup>8</sup>, Выхристенко А. М.<sup>9</sup>, Андрианов Н. Г.<sup>10</sup>*

REGULAR OPTICAL OBSERVATIONS OF LEO IN TIRASPOL, KISLOVODSK AND MOSCOW IN 2012–2013. FIRST RESULTS AND PROSPECTS

Lukyanov A. P., Lagutkin V. N., Maltsev A. V., Kolessa A. E., Kim A. K., Ravdin S. S., Pruglo A. V., Molotov I. E., Vyhristenko A. M., Andrianov N. G.

The main results of the optical network of JSC Interstate Corporation “Vympel” for observation of LEO, some problems and approaches to their solution, and achieved success at the present time.

Keywords: low-orbit satellites, high elliptical satellites, a network of telescopes, image processing, task management.

### Введение

Наблюдения околоземных космических объектов, как спутников, так и фрагментов запусков и разрушений, важны для предупреждения опасных сближений, несущих угрозу столкновений в космосе, схода с орби-

ты и падения на Землю. Проблема космической безопасности в последнее время приобрела особую остроту [1]. Одним из определяющих аспектов этой проблемы является информационное обеспечение, необходимое для ее решения, то есть проведение наблюдений космических объектов и их каталогизация.

<sup>1</sup> Лукьянов Александр Петрович, д-р техн. наук, доцент кафедры информационных систем Московского физико-технического института, начальник сектора по сбору и обработке оптических наблюдений ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kikkolo@mail.ru.

<sup>2</sup> Лагуткин Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем Московского физико-технического института, начальник сектора анализа сигналов ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: vlagutkin@mail.ru.

<sup>3</sup> Мальцев Антон Владимирович, аспирант ОАО «МАК “Вымпел”», инженер ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: maltsevanton@yandex.ru.

<sup>4</sup> Колесса Алексей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информационных систем Московского физико-технического института, начальник научно-технического отдела ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kolessa@yandex.ru.

<sup>5</sup> Ким Андрей Климентьевич, начальник сектора по технологии моделирования ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kimkum@yandex.ru.

<sup>6</sup> Равдин Сергей Семенович, канд. техн. наук, преподаватель кафедры информационных систем Московского физико-технического института, старший научный сотрудник ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: wurf@yandex.ru.

<sup>7</sup> Пругло Алексей Витальевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: my@dinfo.ru.

<sup>8</sup> Молотов Игорь Евгеньевич, руководитель группы планирования и координации работ научной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН), старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М. В. Келдыша; e-mail: imb2@mail.ru.

<sup>9</sup> Выхристенко Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры теоретической физики Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко, директор Центра астрономии Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко; e-mail: astrovam1@gambler.ru.

<sup>10</sup> Андрианов Николай Григорьевич, аспирант, преподаватель кафедры информационных систем Московского физико-технического института, инженер ОАО «МАК “Вымпел”», старший научный сотрудник ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: andrianovng@gmail.com.

Традиционно оптико-электронные средства наблюдения наряду с исследованиями звезд, галактик, планет, астероидов, комет и других естественных небесных тел применяются для наблюдения геосинхронных космических объектов. Возможности радиолокационного наблюдения геосинхронных объектов весьма ограничены из-за большой высоты их полета, что делает оптико-электронные средства практически незаменимыми в этом деле.

Низкоорбитальные и высокоэллиптические космические объекты достаточно надежно наблюдаются радиолокационными средствами, однако их возможности также не беспредельны. Применение оптико-электронных средств может расширить возможности радиолокационных в следующих направлениях. Во-первых, они обладают принципиально более высокой точностью угловых измерений, что создает предпосылки для значительного повышения точности определения орбитальных параметров. Во-вторых, оптико-электронные средства способны наблюдать очень маленькие космические объекты, не уступая наиболее мощным радарам, количество которых в мире явно недостаточно для контроля всех космических объектов. В-третьих, оптико-электронные средства способны видеть высокоэллиптические объекты с апогеем в северном полушарии, которые оказываются на больших удалениях от радаров северного полушария, и не всегда могут ими наблюдаться. В-четвертых, оптико-электронные средства позволяют получать фотометрическую и спектрофотометрическую информацию.

Отсутствие в настоящее время регулярного применения телескопов для наблюдения низкоорбитальных и высокоэллиптических космических объектов связано с рядом объективных трудностей, в частности, погодной зависимостью оптических наблюдений, более жесткими по сравнению со случаем наблюдения геостационарных объектов геометрическими ограничениями (освещенность объекта Солнцем при ночи в пункте наблюдения) из-за относительно малой высоты полета, относительно узкими полями зрения стандартных телескопов, ограничивающими поисковые возможности, до недавнего времени — отсутствием крупноформатных фотоприемных матриц и их невысокой чувствительностью.

Однако эти трудности можно преодолеть или, по крайней мере, уменьшить, ес-

ли в наблюдениях космических объектов будет принимать участие не один телескоп, а пространственно-разнесенная сеть. При этом основные трудности — погодная и геометрическая зависимости, существенно ослабляются. Применение светосильных широкопольных телескопов и оптимизация управления обзором увеличивают способность сети обнаруживать новые космические объекты.

В настоящее время в ОАО «МАК «Вымпел»» ведутся работы по созданию оптико-электронной сети, способной проводить наблюдения и каталогизировать низкоорбитальные и высокоэллиптические космические объекты, которая должна дать вклад в решение проблемы борьбы с космическими угрозами. Главными особенностями создаваемой сети являются:

- 1) широкое использование недорогой аппаратуры: телескопов, монтировок, вычислительных средств, средств связи и др., что оправдано относительно малыми дальностями наблюдений низкоорбитальных космических объектов;

- 2) применение автоматических метеостанций и устройств контроля состояния неба для оптимизации управления наблюдениями с учетом текущих условий;

- 3) использование современных фотоэлектронных устройств на базе ПЗС матриц с высокой квантовой эффективностью, низким уровнем системного шума, с электронным затвором, позволяющим управлять временем экспозиции в широком диапазоне;

- 4) реализация режима высокоточного сопровождения, дающая возможность наблюдения высокоскоростных малоразмерных спутников, обладающих малым блеском;

- 5) реализация высокочувствительных алгоритмов обнаружения космических объектов в реальном масштабе времени, устойчивых к неоднородности фона неба и другим мешающим факторам;

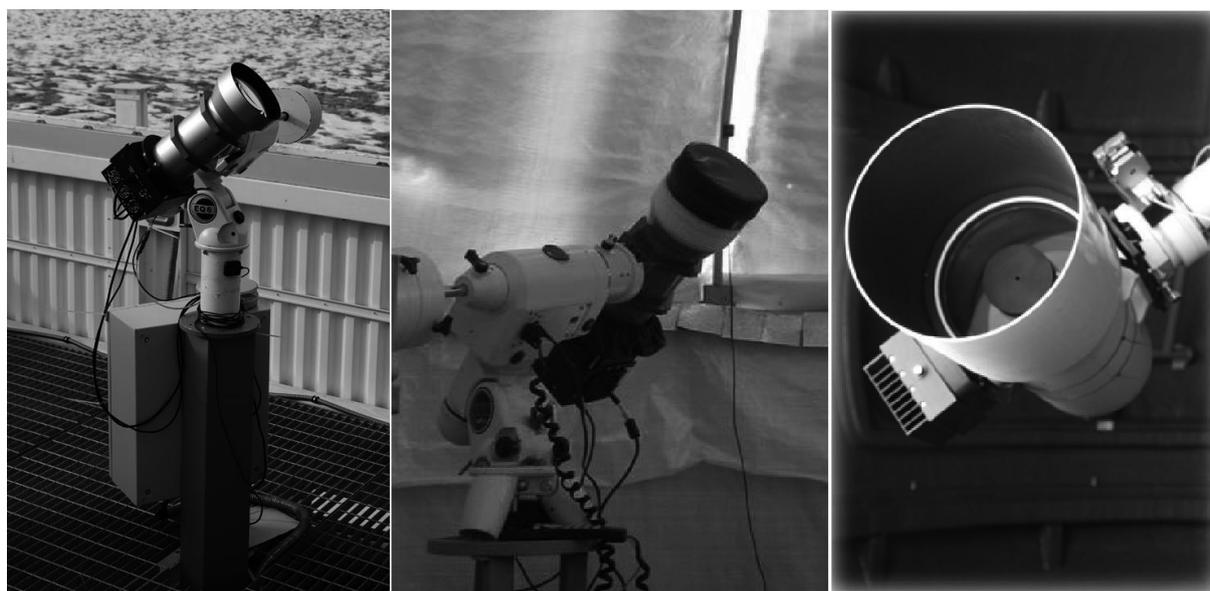
- 6) максимальная автоматизация работы сети, с минимальным участием человека при планировании, проведении наблюдений и обработке их результатов.

Благодаря этим особенностям создаваемая сеть позволит с минимальными затратами людских и материальных ресурсов обеспечить регулярные наблюдения большого числа низкоорбитальных и высокоэллиптических космических объектов и внести, таким образом, свой вклад в решение проблемы космического мусора.

Количество измерений сети ОАО «МАК «Вымпел»»

ИП	НОЧИ	ПРОВ	ЗАС	КО
Кисловодск	83	2323	17072	814
Тирасполь	100	6350	53434	1965
Москва	55	3134	25505	1189
Итого	238	11807	96011	3806

Указанное в последней строке таблицы суммарное количество КО является количеством различных КО, по которым сеть из трех ИП дала измерения, поэтому оно меньше простой суммы КО по трем ИП. Количество рабочих ночей (колонка «НОЧИ» в таблице) меньше количества ясных ночей по техническим причинам: реконструкции обсерватории в Тирасполе в течение месяца, обледенения обсерватории в Кисловодске с полным отключением электроснабжения в Кисловодске, проведения настройки аппаратуры и отладки программного обеспечения.



Телескопы оптической сети ОАО «МАК «Вымпел»»

В конце 2012 г. ОАО «МАК «Вымпел»» создал и ввел в эксплуатацию первый этап оптико-электронной сети, включающей 3 пункта наблюдения (Кисловодск, Тирасполь, Москва), измерения которых передаются и обрабатываются центром обработки данных (Москва).

Ниже представлены основные результаты работы сети, некоторые возникшие проблемы, подходы к их решению и достигнутые в настоящее время успехи.

### 1. Основные этапы создания и результаты работы сети ОАО «МАК «Вымпел»»

В 2012 г. были проведены автономные проверки функционирования этих комплексов в Тирасполе и Москве. Это позволило в конце 2012 г. произвести установку и

включение в состав привлекаемых к работе СККП три ИП — в Кисловодске, Тирасполе и Москве (рисунок).

Эти ИП осуществляют регулярную поставку измерений в ИПМ. Статистика работы ИП приведена в таблице за период с начала поставки измерений по настоящее время (около 9 месяцев). В таблице дано число рабочих ночей (НОЧИ), число проводок (ПРОВ), число засечек (ЗАС) и число различных измеренных КО (КО).

Суммарное количество КО является количеством различных КО, по которым сеть из трех ИП дала измерения, поэтому оно меньше простой суммы КО по трем ИП.

Количество рабочих ночей меньше количества ясных ночей по техническим причинам: реконструкции обсерватории в Тирасполе в течение месяца, обледенения обсерватории в Кисловодске с полным отключением

ем электроснабжения в Кисловодске, проведения настройки аппаратуры и отладки программного обеспечения.

Созданные оптические комплексы со специализированным программным обеспечением позволяют реализовать 4 принципиально различающихся режима наблюдения космических объектов:

– режим наблюдения ярких КО по ЦУ (съемка при остановленном телескопе) (предельная звездная величина по НОКО и ВЭО —  $11^m$  для телескопа с апертурой 125 мм);

– режим наблюдения тусклых КО (имеющих слабый блеск) по ЦУ (съемка при прецизионном сопровождении телескопом движения КО) (предельная звездная величина по НОКО и ВЭО —  $15^m$  для телескопа с апертурой 250 мм);

– барьерный режим обнаружения ярких КО по неточным ЦУ (имеющим большую область неопределенности орбитальных параметров);

– режим обнаружения новых КО, проходящих через заданную область пространства, с «подхватом» обнаруженных КО и их сопровождением для уточнения орбитальных параметров.

С целью проверки функционирования пилотного образца оптического комплекса обнаружения были проведены эксперименты по автоматическому обнаружению космических объектов как в автономном режиме так и по целеуказанию, а также по проверке всего комплекса программно-алгоритмического обеспечения, включая этапы привязки кадра к опорным звездам (редукция звездного поля), обеления кадра (подавление мешающего фона), выделения отметок КО в обеленных кадрах, завязки выделенных отметок в трек, оценки параметров орбиты космического объекта, идентификации выделенной орбиты с орбитами каталога NORAD.

Для получения надежной оценки точности измерения угловых координат было проведено сопоставление с данными лазерных измерений орбит по эталонным КО [6]. Было установлено, что угловая ошибка вдоль направления движения спутника имеет величину в несколько раз меньше размера пикселя фотоприемника (9 угловых секунд), то есть точность измерений углов удовлетворительна.

## 2. Проблема программной реализации усовершенствованных алгоритмов обработки изображений

Алгоритмы обнаружения космических объектов, используемые в настоящее время в сети Вымпела, синтезированы с привлечением упрощений, необходимых для обеспечения их реализуемости на современных компьютерах. Для повышения чувствительности алгоритма часть этих упрощений необходимо исключить. Один из вариантов совершенствования алгоритмов представлен в [7]. Однако при этом происходит усложнение алгоритма и затруднена его программная реализация в реальном масштабе времени.

Для решения этой проблемы был выбран путь использования графических процессоров, суммарная производительность которых существенно выше производительности многопроцессорных комплексов при одинаковой стоимости. «Платой» за ускорение вычислений является наличие ряда ограничений графических процессоров, усложнившее программирование на них алгоритмов обработки изображений. Тем не менее, с учетом этих ограничений, удалось достигнуть следующих показателей: на старых неспециализированных видеокартах (8800 GTS) время обработки удалось сократить в 10–20 раз, а на новых неспециализированных видеокартах (GTX 580) — до 100 раз. Использование специализированных графических карт (Tesla) позволяет сократить время обработки в 300–500 раз.

В настоящее время проводятся исследования, направленные на использование возможностей программной реализации усовершенствованных алгоритмов обнаружения космических объектов с использованием современных видеокарт.

### Литература

1. Шустов Б. М., Рыжкова Л. В. О концепции комплексной программы «Создание российской системы противодействия космическим угрозам (2012–2020)». Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. Вып. 6 (39), Красноярск 2011. С. 4–8.
2. Юрасов В. С., Шаргородский В. Д. Локализация зон обзора космического мусора на низких орбитах при наблюдениях оптическими средствами // Доклад на конф. «Околоземная астрономия», г. Казань, 2009. С. 70–76.

3. Колесса А. Е., Репин В. Г. Робастный адаптивный алгоритм выделения отметок от целей в цифровом изображении // Космические информационно-управляющие системы. 2009. Вып. 3. С. 47–52.
4. Гладиллин А. А., Лагуткин В. Н., Лукьянов А. П., Шилин В. Д. Моделирование космической системы оптического наблюдения за космическими объектами // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2006. Вып. 1. С. 69–77.
5. Пругло А. В., Колесса А. Е., Равдин С. С. Восстановление орбит по угловым измерениям // Радиотехника. 2005. № 10. С. 5–9.
6. International Laser Ranging Service. [Электронный ресурс]: Current Missions. Режим доступа: [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/missions/satellite\\_missions/current\\_missions/index.html](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/missions/satellite_missions/current_missions/index.html), свободный. Загл. с экрана (дата обращения: 29.11.2013).
7. Колесса А. Е., Кузовов К. Д. Выделение в цифровом изображении следов тусклых космических объектов с неизвестными орбитами // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. Т. 17. № 5. С. 32–39.

Ключевые слова: низкоорбитальные спутники, высокоэллиптические спутники, сеть телескопов, обработка изображений, задача управления.

---

Статья поступила 5 октября 2013 г.

Московский физико-технический институт, г. Москва  
ОАО «МАК «Вымпел»»

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, г. Москва

Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, Молдова, г. Тирасполь

© Лукьянов А. П., Лагуткин В. Н., Мальцев А. В., Колесса А. Е., Ким А. К., Равдин С. С., Пругло А. В., Молотов И. Е., Выхристенко А. М., Андрианов Н. Г., 2013