

## КОСМИЧЕСКИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ

*А.С. Позаненко<sup>1</sup>, А.Н. Липатов<sup>1</sup>, В.В. Румянцев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Крымская астрофизическая обсерватория (КРАО)

### Постановка задачи

Рассматривается возможность использования приборов служебной бортовой аппаратуры в научных целях, а именно звездных датчиков (ЗД) как регистраторов быстрых оптических транзиентов (ОТ), в частности, ярких оптических вспышек, сопровождающих космические гамма-всплески, и фрагментов «космического мусора» (КМ). Показана возможность включения широкоформатной оптической камеры в состав служебной и научной аппаратуры, где одним из результатов является непрерывное определение ориентации космического аппарата. Обсуждаются требования к таким приборам и аспекты бортовой обработки данных, снижающей информационную нагрузку на телеметрию.

Нередко приборы служебной бортовой аппаратуры, с одной стороны, являются прототипами разнообразных научных приборов, с другой стороны, применение бортовой служебной аппаратуры для научных исследований позволяет повысить эффективность использования космических аппаратов (КА). Например, на основе звездных датчиков разрабатывалась оптическая камера для эксперимента ÉCLAIR [1]. В то же время возможно использование ЗД для обзора или выбранной площадки, или даже всего неба, в зависимости от ориентации и типа стабилизации КА. Действительно, систематические обзоры всего неба в оптическом диапазоне интересны для решения таких задач, ставших уже классическими (1), как поиск Сверхновых, мониторинг переменных звезд, поиск астероидов, сближающихся с Землей, а также новых задач (2), связанных с поиском быстрых транзиентов,

таких, например, как поиск оптических компонентов космических гамма-всплесков, и, наконец, прикладных (3) — задач каталогизации «космического мусора». Преимущества оптических наблюдений из космоса очевидны — возможность постоянного наблюдения вне зависимости от погодных условий и смены день/ночь, лучшее пространственное разрешение из-за отсутствия атмосферы, меньший фон неба, постоянно увеличивающийся на Земле из-за техногенного загрязнения атмосферы и светового загрязнения окружающей среды и, наконец, возможность наблюдений в ультрафиолетовой области спектра. Не случайно, что широкоформатные камеры космического базирования для научных исследований рассматривались еще на заре космической эры [2]. Для решения классических астрономических задач (1) разрабатываются космические телескопы (см. сайт <http://astro.estec.esa.nl/GAIA/>), для поиска быстрых транзиентов также предложены или реализуются эксперименты космического базирования [1, 3] (см. также сайт эксперимента Swift <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/swift/>).

Однако все это эксперименты, использующие специально сконструированные оптические телескопы. Естественно, параметры таких орбитальных телескопов адекватны задаче, в частности, экспозиция кадров выбирается достаточно большой (10–1000 с), так как предполагается, что характерное время переменности наблюдаемых объектов превышает время экспозиции. Задачи (2) и (3) требуют, напротив, меньшего времени экспозиции при как можно более широком поле зрения, что, как правило, реализовано в ЗД.

Конечно, ЗД не могут конкурировать по проникающей силе со специализированными орбитальными телескопами, однако новые задачи по поиску ярких и быстрых оптических транзиентов (2) и прикладные задачи (3) оказываются уже доступными для решения с использованием штатных звездных датчиков, в частности, разработанных в ИКИ [4, 5] и НПЦ «Астросистемы» [6]. При разработке новых датчиков можно учитывать требования к условиям решения таких задач, имея в виду доработку системы обработки данных и/или разрабатывая многофункциональные оптические камеры, предназначенные для решения как задач ориентации, так и научных задач (2) и (3).

### Требования к многофункциональным камерам

Задачи поиска и каталогизации в общем не ограничивают область наблюдений, так как, например, оптический источник от космических гамма-всплесков или же фрагмент КМ может находиться в произвольной точке пространства. Таким образом, в отличие от штатного режима, ЗД должен работать в непрерывном режиме. Непрерывный режим оптимален для поиска быстрых оптических транзиентов. Скважность работы существующих ЗД должна соотноситься с ресурсом самого ЗД. При разработке новых многофункциональных камер необходимо рассчитывать ресурс ЗД с учетом непрерывного функционирования.

Для обеспечения большей проникающей силы необходимо или увеличение экспозиции кадров или же суммирование отдельных кадров, получаемых при штатной работе ЗД. Увеличение экспозиции является оптимальным, так как по сравнению с суммированием отдельных кадров увеличение экспозиции позволяет уменьшить влияние шумов ПЗС-матрицы. Однако длительность экспозиции отдельных кадров ограничена стабилизацией КА и режимами штатной работы ЗД. Кроме того, количество суммируемых кадров ограничено как шумом считывания с ПЗС-матрицы, так и типом стабилизации/скоростью вращения КА. Действительно, суммирование становится бессмысленным, если за время суммирования поле зрения существенно смещается от первоначального. Поэтому реальный алгоритм суммирования должен выбираться с учетом типа стабилизации КА.

Метод штатной бортовой обработки данных, получаемых с датчиков, в целом близок к методу поиска новых объектов и состоит в сравнении списка выделенных звезд на кадре со звездным каталогом. Объекты, выделенные на нескольких последовательных кадрах, не совпадающие со звездами каталога, могут рассматриваться как оптические транзиенты, источниками которых могут быть переменные и вспыхивающие звезды, астероиды, фрагменты космического мусора, оптические компоненты гамма-всплесков и т. п. Идентификация новых объектов основана на анализе кривой блеска и собственного движения объекта. Большинство штатных программ вычисляют координаты и блеск объектов, таким образом уже получая необходимую информацию о свойствах нового объекта. Для поиска новых объектов также может использоваться метод попиксельного

сравнения последовательных кадров, реализованный, например, в широкоформатной камере для наземного поиска быстрых оптических транзиентов [7]. Такой метод оказывается эффективнее по соотношению время – процессорная мощность и позволяет обрабатывать данные в режиме реального времени при большом количестве объектов в поле зрения.

Обнаружение оптических транзиентов и их классификация влечет за собой необходимость передачи информации о них на Землю. Такая информация должна содержать время обнаружения, координаты объекта, фотометрические данные (оценка блеска с момента обнаружения и до тех пор, пока объект существует и/или не вышел из поля зрения ЗД, координаты КА). Существующая точность астрометрии (не хуже 30 угл. с) и привязка по времени к УТ заведомо достаточна для поиска астрофизических источников, таких как оптический компонент гамма-всплесков. Точность необходимой привязки обнаруженных в поле зрения движущихся объектов зависит от типа орбит таких объектов.

Таким образом, возрастает (незначительно) нагрузка на каналы передачи данных. Уместно заметить, что обработка информации по поиску новых оптических объектов так же, как и штатная работа самого ЗД на борту, является своеобразным методом «сжатия», заведомо более эффективным, чем алгоритмы сжатия без потери информации. Например, для камеры WFOC [7] этот коэффициент при поиске и классификации объектов достигает отношения  $10^5$ .

Для оперативного оповещения об объектах, классифицированных как астрофизический объект, необходима оперативная передача на Землю данных об этом событии. Такая передача может быть предусмотрена протоколом обмена служебной информацией, так как классифицированные события такого рода не должны быть частыми. Данные остальных событий необходимо хранить в долговременной памяти ЗД до сеансов передачи научной информации КА на Землю.

### **Оценки для звездных датчиков**

Для оценок ожидаемых результатов используем два ЗД, описания которых представлены в [5, 6]. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики широкоформатных телескопов, рас-

положенных на Земле (используются для поиска оптических транзиентов и обзоров неба), и этих двух ЗД. В табл. 2 приведены оценки количества ожидаемых одновременных наблюдений (в течение года) при регистрации космических гамма-всплесков телескопом ВАТ КА Swift<sup>1</sup> и соответствующим звездным датчиком, при условии непрерывной работы ЗД. Предел проникновения для ЗД при разных экспозициях оценивался на уровне трех стандартных отклонений путем моделирования с учетом характеристик штатных ПЗС-матриц и фона неба. Из данных табл. 1 и 2 видно, что, хотя по проникающей силе штатные ЗД уступают наземным инструментам, ожидаемый выход может быть сравним с наземными результатами за счет постоянной работы орбитальных ЗД и меньшего фона неба. Например, за прошедшие семь лет наблюдений наземными средствами произведено всего лишь четыре синхронных наблюдения области локализации гамма-всплесков с предельным прониканием от 5<sup>m</sup> до 13<sup>m</sup> (GRB990123 (8<sup>m</sup>.9), GRB030329 (>5<sup>m</sup>.1), GRB040825 (>10<sup>m</sup>), GRB041016 (>13<sup>m</sup>.1)).

Таблица 1

*Сравнительные характеристики широкоформатных телескопов и звездных датчиков*

Наименование	Поле зрения, град	Экспозиция, с	Проникание, m	Объектив, см
WFOC [7]	17×20	0,13	11,5	F = 18,0 F/1,2
RAPTOR [9]	19,5×19,5	5	12	F = 8,5 F/1,2
Pi of the sky [10]	33×33	10	12	F = 5,0 F/1,4
BOOTES [11]	16×11	30	12	F = 5,0 F/1,4
WIDGET [12]	60×60	10	н/д	F = 2,4 F/1,4
ЗД платформы «Солнечный парус» [5]	40×40	10	11	F = 1,927 F/3
ЗД «Астросистемы» [6]	11×11	1	12	F = 8,0 F/1,25

Известно, что засоренность космического пространства постоянно увеличивается, и наземными средствами невозможно сопровождать все возрастающее количество фрагментов. Например, предел сопровождения объектов на низких орбитах со-

<sup>1</sup> Запущен 20 ноября 2004 г.

ставляет 5–10 см. Это означает, что каталог таких объектов размером менее 5 см не полон и может представлять непредсказуемую угрозу для КА [8]. В табл. 3 приведено расстояние, с которого будет виден такой обломок с использованием ЗД и программ поиска и идентификации оптических транзиентов. Задача увода от столкновения КА с некаталогизированными обломками может стать актуальной уже в ближайшее время. Потенциальное количество обломков размером до 5 см, находящихся в поле зрения ЗД космического аппарата на низкой орбите, также приведено в табл. 3. Для оценки использовались данные, представленные в работе [8]. Оценка является верхним пределом, реальную видимость объектов оценить сложно, так как отсутствует распределение обломков по размерам и орбитам.

Таблица 2

*Оценка количества ожидаемых одновременных наблюдений области локализации космических гамма-всплесков телескопом ВАТ космического аппарата Swift и звездным датчиком*

Наименование	Проницание, м		Количество в год, шт.
	трехосная стабилизация ЗД	гравитационная стабилизация ЗД	
ЗД платформы «Солнечный парус» + телескоп ВАТ	11	8	13
ЗД «Астросистемы» + телескоп ВАТ	12	10	3,4

Таблица 3

*Расстояние, с которого видно сферическое тело диаметром 1 см (альбедо принято равным 0, I); количество фрагментов «космического мусора» размером менее 5 см, потенциально наблюдаемых в поле ЗД*

Наименование	Поле зрения, град.	Проницание, м	Расстояние, км, с которого виден фрагмент размером 1 см	Количество фрагментов, шт.
ЗД платформы «Солнечный парус»	40×40	8	30	40 000
ЗД «Астросистемы»	11×11	10	100	400

И, наконец, постоянное вычисление точной ориентации КА, обеспечиваемое непрерывной работой датчиков, необходимо при проведении специализированных экспериментов, например, обзоров неба в гамма- и рентгеновском диапазоне. Таким образом, разработка специализированных ЗД, удовлетворяющих условиям решения задач (2), (3), и установка таких камер на серийные платформы сможет привести к повышению эффективности использования платформ и получению результатов, не достижимых в настоящее время на Земле.

### Литература

1. *Barret D.* // Proc. of AIP Conf. 2003. V. 662. P. 481–487.
2. *Courtes G., Cruvellier P., Detaille M.* et al. // Progress in optics. 1983. V. XX. P. 3.
3. *Tsarevsky G., Bisnovaty-Kogan G., Pozanenko A.* et al. // Proc. of the Conf. “Exploring the Cosmic Frontier”. Berlin, 2004.
4. *Яновский М.И., Кораблев О.И., Линкин В.М.* и др. Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении // Сб. докл. выездного семинара / Под ред. Р.Р. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 326.
5. *Антоненко С.А., Готлиб В.М., Захаркин Г.В.* и др. Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении // Сб. докл. выездного семинара / Под ред. Р.Р. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 256.
6. *Guskov G., Zakharchuk O.* // Proc. of the First IAA Symp. on Realistic Near-Term Advanced Scientific Space Missions. Torino, Italy, 1996. P. 183.
7. *Pozanenko A., Beskin G., Bondar S.* et al. // Proc. of ADASS XII ASP Conf. Series. 2003. V. 295. P. 457.
8. *Рыхлова Л.В.* Околосемная астрономия 2003 // Тр. конф. Т. 2. СПб.: ВВМ, 2003. С. 11.
9. *Vestrand W.T., Borozdin K., Brumby S.* et al. // SPIE, 2002. V. 4845. P. 126.
10. *Burdi A., Cwiok M., Czyrkowski H.* et al. // Astron. Nachr./AN 325 6/7, Potsdam, 2004.
11. *Castro-Tirado A.J.* // Astron. Nachr./AN 325, 6/7, Potsdam, 2004.
12. *Usui F., Tamagawa T., Terada Y.* et al. // COSPAR04-A-03740, 2004.