

**РОССИЙСКИЙ КОСМИЧЕСКИЙ
ЗВЕЗДНО-АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
«ЛИРА-Б» НА БОРТУ МКС**

М. Е. Прохоров, А. И. Захаров

*Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга Московского государственного
университета*

Описываются принципы и цели проведения космического эксперимента «Лира-Б» на борту МКС, разрабатываемого в ГАИШ МГУ. Основной задачей этого эксперимента является высокоточный многоцветный обзор звезд всего неба до 16^m . Подробно рассматриваются структура ожидаемых наблюдательных данных, их возможное научное использование и ряд технических проблем.

**RUSSIAN SPACE ASTRONOMICAL EXPERIMENT
“LIRA-B” ON BOARD THE ISS**

M. E. Prokhorov, A. I. Zakharov

Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University

The principles and objectives of the space experiment “Lira-B” on board the ISS, which is being developed at the SAI MSU, are described. The main objective of this experiment is a high-precision multi-color survey of stars on the whole sky up to 16^m . The structure of the expected observational data, their possible scientific use and a number of technical problems are discussed.

В настоящее время в ГАИШ МГУ ведется подготовка к космическому эксперименту «Лира-Б» на борту МКС. В ходе этого эксперимента предполагается провести фотометрический обзор всего неба, для чего на МКС предполагается установить 0.5 м оптический телескоп. В некотором смысле эксперимент «Лира-Б» является продолжением и расширением *WBVR*-обзора ярких звезд северного неба [1], выполненного в 1976–1984 гг. на Алма-Атинской обсерватории ГАИШ МГУ. Расширение многостороннее: объем каталога возрастет на четыре порядка, число фотометрических полос более чем удвоится, в несколько раз возрастет число повторных наблюдений отдельной звезды, появятся ультрафиолетовые наблюдения, обзор станет всенебесным. При этом сохранятся такие качества

WBVR-обзора, как высокая точность, однородность и одновременность многоцветной фотометрии. Обзор будет высокоуровневым фотометрическим дополнением астрометрического обзора Gaia [2], поскольку в нем будут наблюдаться те же звезды, для которых Gaia даст астрометрию высокой точности.

Если КЭ «Лира-Б» будет выполнен, то это будет самый большой оптический обзор, выполненный в России, первый российский астрономический эксперимент на МКС и одновременно самый крупный астрономический эксперимент за всю историю пилотируемой космонавтики.

Цели космического эксперимента «Лира-Б»

Целью эксперимента является проведение высокоточного многоцветного фотометрического обзора всех объектов от 3^m до 16^m на небесной сфере. В ходе эксперимента (длительностью от 3 до 5 лет) предполагается произвести многократные фотометрические измерения объектов в 9–10 спектральных полосах примерно от 200 до 1 000 нм. По результатам обзора должны быть созданы следующие каталоги:

- каталог непременных звезд ярче 12^m с погрешностью не хуже 0.1–0.2 % (0.001–0.002 m) (будут приняты специальные меры, чтобы измерить с высокой точностью наиболее яркие звезды, до 3^m в полосах *B* и *V* включительно);
- каталог (атлас) непременных звезд ярче 16^m в полосах *B* и *V* с погрешностью не хуже 1 % (0.01 m);
- многоцветный фотометрический каталог астероидов ярче 14^m ;
- каталог переменных звезд ярче 16^m ;
- каталог положений звезд с погрешностью порядка 100–200 μ as для ярких звезд и 1 mas для остальных;
- многоцветный каталог протяженных объектов с высокой поверхностной яркостью;
- будет предпринята попытка создания атласа фона неба во всех спектральных полосах обзора. Возможность проведения этих измерений зависит от характеристик приемников излучения, которые будут использованы в телескопе «Лира-Б».

Наибольшее число звезд, которые будут регистрироваться в ходе обзора, являются красными. Максимум их излучения приходится на длинноволновую часть видимого и ближний инфракрасный диапазона спектра. Данные инфракрасного обзора 2MASS [3] говорят, что

в эксперименте «Ли́ра-Б» будет зарегистрировано не менее 100 млн звезд. Обзор Gaia [2] указывает на несколько большее число звезд.

Высокая точность обзора подразумевает, что все *непеременные звезды* ярче 12^m , включая самые яркие, будут измерены с результирующей погрешностью не более 0.001^m , а более слабые объекты — с погрешностью не более 0.01 – 0.02^m . Будут приняты специальные меры, чтобы с высокой точностью измерить блеск ярких звезд до 3^m включительно.

Важнейшими особенностями обзора «Ли́ра-Б» являются:

- квазиодновременное (на интервале 15–20 с) проведение многоцветных фотометрических измерений объектов в широком спектральном диапазоне;
- высокая однородность фотометрических измерений, которая обеспечивается тем, что повторные измерения объектов происходят через интервалы времени много меньшие, чем характерные времена изменения параметров аппаратуры;
- ограниченный динамический диапазон фотоприемника требует применения специальных мер для точного измерения блеска звезд от 3^m до 16 – 17^m (см. раздел «Наблюдение ярчайших звезд»).

Еще одна существенная особенность космического эксперимента «Ли́ра-Б» состоит в том, что он будет проводиться на борту Международной космической станции (МКС) [4]. Причины, по которым в качестве места размещения комплекса научной аппаратуры эксперимента «Ли́ра-Б» была выбрана МКС, описаны ниже. Ограничения, налагаемые размещением научной аппаратуры на борту МКС, определяют характеристики эксперимента и технические решения, используемые в комплексе научной аппаратуры для его проведения.

Принципы проведения эксперимента «Ли́ра-Б»

МКС обращается вокруг Земли с сохранением так называемой «орбитальной ориентации» [4]. В этой ориентации МКС всегда одной стороной (условно «нижней») обращена к Земле. На этой стороне устанавливаются приборы для наблюдения Земли. Противоположная сторона, обращенная в местный зенит, предназначена для приборов наблюдения космического пространства.

При орбитальной ориентации продольная ось станции направлена приблизительно вдоль вектора ее орбитальной скорости. Российский сегмент МКС располагается в «хвосте» станции.

Метод наблюдения небесной сферы

На МКС реализовать сканирующие наблюдения гораздо проще, чем режим прямого наведения. Для этого достаточно зафиксировать положение оптической системы телескопа относительно корпуса станции. При обращении МКС вокруг Земли телескоп будет поворачиваться вместе со станцией, звезды будут пересекать поле зрения инструмента, а их изображения — перемещаться по фокальной плоскости телескопа. Изменять положение телескопа придется примерно раз в месяц.

В качестве приемников излучения для фотометрии в эксперименте будут использоваться матричные ПЗС, работающие в режиме с временной задержкой и накоплением (ВЗН) [5]*, или новые разработки, так называемые CMOS TDI (КМОП ВЗН).

В режиме ВЗН пакеты электронов, накапливаемые в ходе экспозиции, перемещаются по матрице с той же скоростью и в том же направлении, в котором перемещаются изображения звезд. Это накладывает требования на ориентацию матричных ПЗС в фокальной плоскости и на точность задания скорости перемещения зарядов.

Считывание накопленных зарядов происходит, когда изображение достигает края матричного ПЗС. Получаемый кадр имеет вид полосы, ширина которой равна числу пикселей в строке матричного ПЗС, а длина определяется продолжительностью сеанса наблюдения и скоростью перемещения звезд по фокальной плоскости.

ВЗН-режим имеет целый ряд преимуществ, важных для получения высокоточной фотометрии: усреднение неоднородности чувствительности и термогенерации вдоль столбцов ПЗС; стабильные тепловые и электрические режимы функционирования матрицы.

Для проведения многоцветной фотометрии в фокальной плоскости располагается несколько матричных ПЗС, каждая со своим фильтром. Они реализуют разные спектральные полосы фотометрической системы. В сканирующем режиме изображение объекта последовательно проходит по всем ПЗС и мы получаем квазиодновременные многоцветные измерения его блеска. Похожая конструкция приемника излучения была использована в телескопах проекта SDSS [6].

*Заметим, что этот режим можно реализовать только для матричных ПЗС, в стандартных матрицах КМОП он невозможен.

Телескоп

Параметры телескопа, используемого в эксперименте «Лира-Б», обусловлены целями эксперимента и техническими ограничениями со стороны МКС.

Габариты инструмента определяются способом его доставки и монтажа на МКС. Научная аппаратура на МКС доставляется грузовым космическим кораблем «Прогресс», который выводится на околоземную орбиту и стыкуется со станцией. Затем через внутренние люки транспортные секции научной аппаратуры вносятся внутрь российского сегмента МКС. После часть этих блоков выносятся в космическое пространство и монтируются на внешней поверхности станции. Самые сильные ограничения на габариты телескопа накладывают диаметры люков и процесс перемещения транспортных секций из «Прогресса» внутрь МКС. Максимально допустимый диаметр транспортного блока составляет 0.6 м при длине 1.2 м. Таким образом, с учетом толщины корпуса телескопа и транспортной упаковки диаметр главного зеркала не может превышать 0.5 м. За бортом МКС телескоп будет собираться из трех секций: 1) основной секции, содержащей собственно телескоп, фокальную плоскость с приемниками излучения и блоки электроники, 2) бленды с крышкой и 3) устройства позиционирования, с помощью которого телескоп крепится к поверхности МКС и изменяет свою ориентацию. Поскольку сборка и юстировка оптической системы силами экипажа на борту МКС невозможна, то телескоп доставляется на орбиту в собранном виде.

Размер поля зрения телескопа определяется несколькими факторами. Для проведения обзора всего неба нужен инструмент с достаточно широким полем зрения. С другой стороны, по мере увеличения поля зрения становится все труднее удовлетворить требования к абберациям оптической системы телескопа [7, 8]. Одновременно более сложными и дорогими становятся процессы изготовления и юстировки оптики. Поэтому размер исправленного поля зрения был выбран компромиссным: $2\omega = 2^\circ$. При этом угловой размер основной фокальной плоскости (по диагонали) составляет 1.5° , а ширина полосы сканирования $W = 1^\circ$. Оставшаяся часть исправленного поля зрения используется для размещения фотоприемников устройства стабилизации изображения.

Предельное угловое разрешение телескопа «Лира-Б» должно быть не менее $1''$. Это одно из основных требований технического

задания на эксперимент. Тогда при использовании матричных приемников с оптимальным в технологическом смысле размером пикселя 12×12 мкм мы приходим к минимальному фокусному расстоянию $F \approx 3$ м. При этом для успешного перемещения внутри МКС длина телескопа вместе с фокальной плоскостью (без бленды) не должна превышать 1.2 м.

Есть также ряд других требований, которым должен удовлетворять телескоп. Так как в качестве приемника излучения будут использоваться матричные приемники, то инструмент должен обладать плоским полем изображения.

Далее, диаметр изображения точечного источника по половине интенсивности должен быть порядка 1.5–2 пикселей по всей фокальной плоскости. Это требование вытекает из необходимости точного определения положения фотоцентров изображений и блеска.

Наконец, поскольку телескоп работает в сканирующем режиме, к нему предъявляются достаточно жесткие требования по относительной дисторсии ($< 0.1\%$). В противном случае изображения звезд на фокальной плоскости будут отклоняться от столбцов матриц и смазываться.

Всем этим требованиям удовлетворяет широко используемая сегодня оптическая схема Ричи—Кретьена с афокальным линзовым корректором, которая и была выбрана. Более детально характеристики телескопа «Ли́ра-Б» рассмотрены в [9, 10].

В качестве материала для изготовления зеркал телескопа предполагается использовать карбид кремния. Для такого выбора существуют две причины [11]. Во-первых, карбид кремния обладает высокой жесткостью, что позволяет изготовить из него более тонкие и легкие зеркала и уложиться в конструктивные ограничения по массе. Во-вторых, он обладает очень высокой температуропроводностью, т. е. зеркала из этого материала обладают малыми нелинейными температурными искажениями формы и быстро приходят в состояние теплового равновесия.

Покрытие небесной сферы наблюдениями

В эксперименте «Ли́ра-Б» ориентация телескопа, при которой его оптическая ось лежит в плоскости орбиты МКС, является базовой. В этой ориентации центр поля зрения инструмента описывает большой круг, плоскость которого совпадает с плоскостью орбиты станции. Орбита МКС наклонена к экватору Земли примерно на 51.6° (накло-

нение изменяется со временем не более чем на 0.1°). Под действием гравитационного поля Земли орбита МКС прецессирует с периодом около 70 дней [4]. Такая скорость прецессии соответствует смещению поля зрения инструмента вдоль экватора на 0.3° за виток, т. е. каждый объект попадает в полосу сканирования телескопа, имеющую ширину 1° , не менее трех раз подряд на последовательных витках.

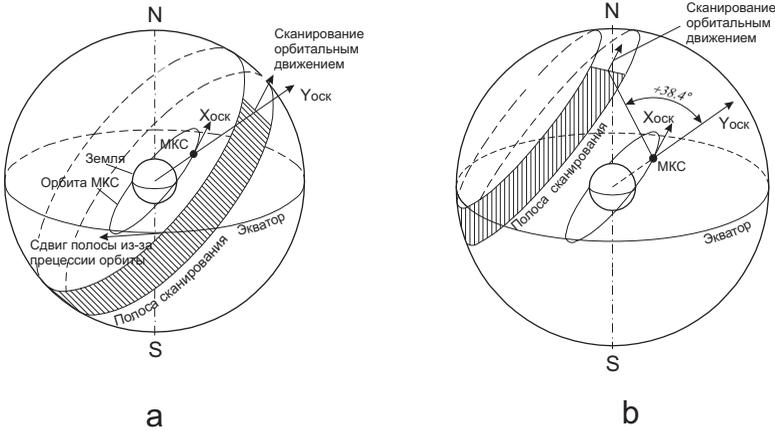


Рис. 1. Сканирование неба в основной ориентации инструмента — ось телескопа лежит в плоскости орбиты (a). Ось телескопа смещена на 38.4° к северу, полоса сканирования проходит через северный полюс мира (b)

Из-за прецессии поле зрения телескопа замечает на небе сферический пояс с координатами $|\delta| < 52^\circ$. (Ширина этого пояса равна удвоенному наклонению орбиты МКС ($2 \times 51.6^\circ$) плюс ширина полосы сканирования (1.0°).) При этом области вблизи полюсов мира не наблюдаются (рис. 1, a). Чтобы полоса сканирования проходила через северный полюс мира, необходимо отклонить ось телескопа на 38.4° к северу от плоскости орбиты (рис. 1, b). Для сканирования южного полюса мира — на такой же угол к югу.

Для покрытия наблюдениями всего неба достаточно двух полярных режимов. Сочетание трех режимов позволяет выбрать более равномерное покрытие неба наблюдениями. Возможно, для построения более эффективного плана сканирования небесной сферы будет необходимо включать еще и промежуточные ориентации телескопа. Отметим, что не следует использовать ориентации оси телескопа с

большими, чем 38.4° , отклонениями от плоскости орбиты МКС, так как при этом резко возрастают проблемы, связанные с кривизной траекторий, по которым в фокальной плоскости движутся изображения звезд.

Наблюдения возможны только в той части орбиты, где отсутствует или слаба засветка рассеянным солнечным излучением. Наилучшей для наблюдения объектов предельной звездной величины является ситуация, когда наблюдения ведутся во время нахождения МКС в тени Земли. На освещенном Солнцем участке орбиты минимальный угол между оптической осью инструмента и направлением на Солнце определяется эффективностью бленды. В настоящее время можно гарантировать ослабление ею рассеянного излучения в 10^6 раз. Это означает, что наблюдения объектов предельной звездной величины можно будет вести в отсутствие прямой засветки входной апертуры телескопа, т. е. когда ось телескопа отстоит от края солнечного диска более чем на 90° . На остальной части витка возможны только наблюдения самых ярких объектов.

Фотоприемные устройства и фотометрическая система

В качестве приемника излучения для фотометрии предполагается использовать сборку десяти-, одиннадцатиматричных ПЗС или КМОП ВЗН обратной засветки. Каждая матрица состоит из двух независимо управляемых частей размером 2250×300 пикселей. О возможности создания таких матричных ПЗС специально для космического эксперимента «Лира-Б» ведутся переговоры с рядом зарубежных производителей. Некоторые характеристики этих матриц приведены в табл. 1.

На первую матрицу* наносится широкополосное просветляющее (панхроматическое) покрытие, на остальные матрицы — интерференционные светофильтры, реализующие фотометрическую систему «Лира-Б». Полосы пропускания фильтров этой фотометрической системы показаны на рис. 2 и в табл. 2. Заметим, если фотометрических полос будет 10 (включая панхроматическую), то полоса 1 000 нм не будет реализована.

Все полосы фотометрической системы «Лира-Б» лежат в области чувствительности обычных кремниевых матриц с обратной засветкой. Три первых ультрафиолетовых фильтра — 195, 218 и 270 нм — позволяют изучать горячие звезды и эффективно определять меж-

*Нумерация ПЗС ведется в направлении перемещения изображений звезд.

Таблица 1. Характеристики фотометрических ПЗС, предложенных e2v. ПЗС состоит из двух независимо управляемых секций размером $2\,250 \times 300$ пикселей каждая

Размеры матрицы	$4\,500 \times 312$ пикселей
Размеры пикселя	12×12 мкм
Емкость пикселя	$200\,000 e^-$
Толщина ПЗС для видимого диапазона	10–14 мкм
Максимальная квантовая эффективность панхроматической ПЗС	96 %
Шум считывания на частоте 1 МГц	$5e^-$ /пиксель
То же для дифференциального считывания	$7e^-$ /пиксель
Шум термогенерации при $T = -30^\circ\text{C}$	$120e^-$ /пиксель/с

звездное поглощение, так как фильтр 218 нм лежит в центре ультрафиолетовой полосы межзвездного поглощения, а два других фильтра — до и после нее. Четыре полосы — 350, 440, 555 и 700 нм — близки к полосам W, B, V и R модифицированной системы Джонсона. Эти полосы были использованы в Алма-Атинском фотометрическом обзоре [12, 13]. Фильтры 785 и 825 нм находятся на локальном максимуме между двумя полосами TiO в спектрах звезд спектрального класса M. Фильтр 930 нм соответствует атмосферной полосе воды и служит для определения параметров атмосферы при последующих наземных наблюдениях звезд каталога. Фильтр 1 000 нм охватывает наиболее длинноволновую область чувствительности кремниевых, может быть исключен из фотометрической системы.

Несмотря на то что предлагаемая фотометрическая система является широкополосной, она позволяет достаточно качественно проводить трехмерную классификацию звезд. Возможно, в характеристики фотометрических полос еще будут внесены изменения. Более подробное обоснование выбора именно этого набора полос для фотометрической системы «Лира-Б» см. в [14–16].

Интерференционные фильтры предполагается наносить непосредственно на поверхность матричных фотоприемников (для этого они обязательно должны быть с *обратной засветкой*). Такая технология была разработана в ФИАН [17] и успешно опробована в экспериментах серии «Коронас». Отметим, что применение такой технологии возможно лишь для матриц с обратной засветкой, обладающих гладкой и однородной передней поверхностью.

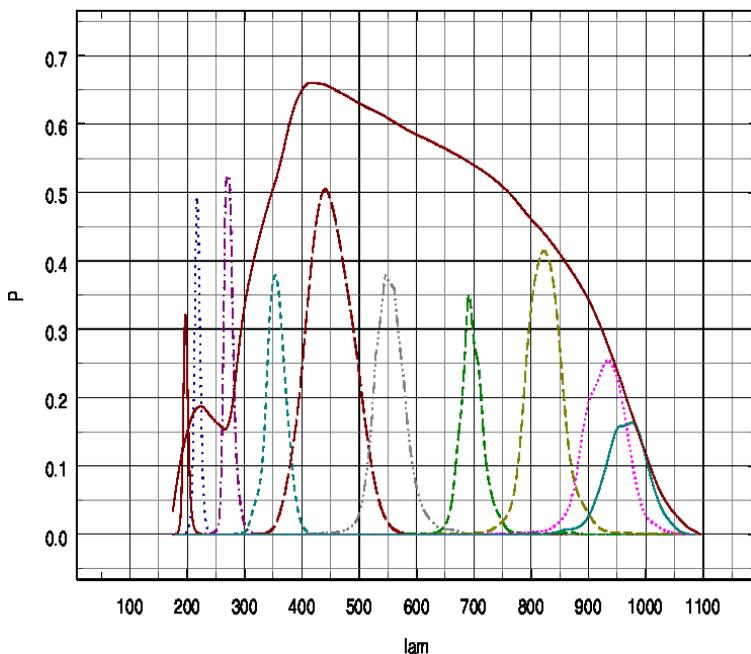


Рис. 2. Полосы пропускания фотометрической системы эксперимента «Ли́ра-Б». Центральные длины волн: 195, 218, 270, 350, 440, 555, 700, 825, 930, 1000 нм и широкополосный панхроматический фильтр. Кривые пропускания учитывают пропускание интерференционного фильтра, нанесенного на кремний, и квантовую эффективность ПЗС

Обычно интерференционный светофильтр представляет собой стеклянную пластину с нанесенным на нее интерференционным покрытием, установленную перед фотоприемником. Отражение света от обеих поверхностей стеклянной пластины и передней поверхности матричного ПЗС порождает многочисленные блики. Вышеописанная технология нанесения фильтров позволяет этого избежать.

Регистрация объектов

В эксперименте «Ли́ра-Б» не используется входной каталог для фотометрии точечных объектов (звезд и звездоподобных ядер компактных галактик). Существует только входной каталог протяженных объектов (туманностей, скоплений и близких галактик), для ко-

Таблица 2. Предельные звездные величины обзора «Ли́ра-Б» для звезд спектрального класса A0V

λ_0 (нм)	Предельные величины				Переполнение
	за одно наблюдение		за 5 лет ^{†,!!}		
S/N	0.01^m	0.1^m	0.01^m	0.1^m	ПЗС
	(1 %)	(10 %)	(1 %)	(10 %)	
	100	10	100	10	
195	8.5	13.2	13.2	16.3	3.6
218	9.0	13.6	13.6	16.8	4.2
270	9.4	14.1	14.1	17.3	5.4
350	10.6	15.3	15.3	18.4	6.5
440	12.6	17.3	17.3	20.4	8.5
550	11.6	16.3	16.3	19.5	7.4
700	11.1	15.8	15.8	18.9	6.0
825	10.8	15.5	15.5	18.5	7.2
930	10.3	14.9	14.9	18.0	6.8
1 000	9.7	14.3	14.3	17.4	6.3
Панхром	14.0	18.5	18.5	21.4	10.3

[†] Значения в колонках « 0.1^m за 1 наблюдение» и « 0.01^m за 5 лет» совпадают, поскольку среднее число наблюдений звезды за 5 лет считалось равным 100.

^{!!} Значения в колонке « 0.1^m за 5 лет» соответствуют 100-кратному усреднению звезд, регистрируемых в отдельном наблюдении с $S/N > 10$. Такая ситуация реализуется при наблюдении областей, регистрируемых попиксельно.

торых выполняются поверхностная фотометрия и каталог ярчайших звезд, вызывающих переполнение пикселей матриц.

Измерение точечных объектов производится следующим образом.

- а) Изображение, которое строит первая матрица с панхроматическим покрытием, обладающая наибольшей чувствительностью, считывается полностью. В получаемом изображении производится поиск объектов, которые значимо превышают уровень шумов. Для найденных объектов приближенно определяются координаты, блеск и другие параметры. На их основе предвычисляются места и моменты появления каждого найденного объекта на остальных фотометрических матрицах фокаль-

ной плоскости. Дополнительно в список найденных точечных объектов включаются протяженные объекты из соответствующего входного каталога. Для них также вычисляются моменты появления и положения на остальных матрицах.

- б) Для остальных матриц производится полное считывание предвычисленных фрагментов. Для точечных источников размер фрагмента берется постоянным, равным 7×7 пикселей (это значение может быть уточнено). Для очень ярких звезд, вызывающих переполнение пикселей изображения, а также для протяженных объектов фрагменты могут быть большего размера и иметь прямоугольную форму.

Сигналы в промежутках между границами фрагментов, содержащих изображения объектов, суммируются без считывания по частям строк матричных ПЗС длиной до 100–150 пикселей (т. е. по площадкам размерами до 1×100 –150 пикселей). Сигнал в интервалах между объектами создается фоном звездного неба и неразрешенными источниками. Его величина составляет единицы квантов на пиксель за время экспозиции. Суммирование без считывания используется для того, чтобы шум считывания вносился в измеряемый сигнал только один раз.

- в) По изображениям в наиболее чувствительных полосах фотометрической системы (V , B и R) можно провести определение мгновенных положений фотоцентров объекта и найти для него сдвиг и смаз за время прохождения по фокальной плоскости. Эта процедура, в частности, позволяет в реальном времени выделять объекты Солнечной системы, перемещающиеся по небесной сфере с достаточно высокой скоростью.

Наблюдение ярчайших звезд

Емкость пикселя матричного фотоприемника ограничена и зависит в первую очередь от его линейного размера [18]. Например, матричные ПЗС производства e2v с пикселем размером 12×12 мкм имеют емкость около 200 000 электронов. При более высоком сигнале накопленные электроны начинают перетекать в потенциальные ямы соседних пикселей вперед и назад по столбцу. Поскольку наиболее яркая часть изображения звезды занимает 2×2 пикселя, то максимальный накопленный от нее заряд составляет около 800 000 электронов. С учетом шумов приемника значимый сигнал начинается примерно с 200 электронов. Следовательно, одновременно могут из-

меряться объекты, число накопленных электронов от которых составляет от 200 до 800 000. Блеск таких объектов различается не более чем на 8^m .

Корректная фотометрия более ярких звезд, одновременно с наиболее слабыми, становится невозможной.

Фотометрия ярчайших звезд осуществляется в специальном режиме, в котором необходимо распределить накапливаемый сигнал по большому числу пикселей. Наиболее простой способ это сделать – расфокусировать изображение. Расфокусировка смещает динамический диапазон фотоприемных устройств в сторону больших потоков. В этом режиме слабые звезды, близкие к пределу обзора, не будут видны, зато будут наблюдаться яркие и ярчайшие.

При использовании КМОП ВЗН для каждой полосы возможна реализация двух светочувствительных полос – «высокой», размером 2250×300 пикселей, и «низкой», размером 2250×3 пикселя. Экспозиции на этих матрицах различаются в 100 раз, т. е. на 5^m .

Причины проведения эксперимента на МКС и вызываемые этим проблемы

Выбор МКС в качестве места проведения эксперимента «Лири-Б» имеет свои достоинства и недостатки. Альтернативой этому является создание автономного спутника.

К достоинствам проведения эксперимента на МКС можно отнести следующее:

- наличие технологической и технической инфраструктуры – источников энергии, информационных каналов, возможности получения информации об ориентации станции и пр;
- отработанная технология доставки на борт приборов малого и среднего веса;
- возможность возвращения на Землю грузов (с сильными ограничениями по весу);
- монтаж аппаратуры силами экипажа станции;
- возможность (при крайней необходимости) проведения ремонта аппаратуры силами экипажа.

Однако основной причиной выбора в качестве места проведения эксперимента «Лири-Б» МКС является большой объем научных данных, который требуется передать на Землю. В ходе сеансов наблюдений поток данных составляет около 300 Мбит/с. Полный объем дан-

ных, который будет получен за время проведения эксперимента и который должен быть передан на Землю, составляет около 200 Тбайт.

Стандартные средства космической радиосвязи имеют недостаточную скорость передачи информации — порядка нескольких десятков мегабит в секунду. Помимо этого для непрерывной передачи информации хотя бы во время сеансов наблюдений космический аппарат должен все время передачи находиться в прямой видимости наземного пункта приема информации. При ограниченном числе приемных антенн такое возможно только на геостационарных (геосинхронных) или высокоэллиптических орбитах.

МКС также не обладает каналом связи, позволяющим передать получаемый поток информации. Поэтому для передачи данных на Землю был выбран другой путь: данные с телескопа передаются в блок управления научным экспериментом, установленный внутри гермоотсека МКС. Там они записываются на сменные внешние носители, которые затем доставляются на Землю в составе спускаемого груза (2 раза в год). В качестве носителей информации предполагается использовать сборки флэш-памяти. Эти устройства обладают высокой надежностью и одним из наилучших на сегодня отношением объема записываемой информации к массе порядка 10 Тбайт/кг.

Указанный способ позволяет передать весь объем научной информации, получаемой в эксперименте «Ли́ра-Б», но совершенно не обладает оперативностью. К счастью, обзорный характер эксперимента делает оперативное получение информации несущественным для большинства научных задач эксперимента.

Помимо перечисленных выше достоинств размещение научной аппаратуры на МКС имеет и ряд недостатков. Подробнее этот вопрос рассмотрен в [19]. Одним из наиболее серьезных недостатков для наблюдений в видимом диапазоне с использованием телескопов с разрешением лучше угловой секунды являются вибрации пилотируемой станции, которые вызываются деятельностью экипажа и работой систем поддержания жизнедеятельности. Отметим, что именно по этой причине на пилотируемых станциях не велись астрономические наблюдения, требующие секундных точностей угловой стабилизации инструментов.

Такая проблема существует и для эксперимента «Ли́ра-Б»^{*}; для ее преодоления разработана специальная система стабилиза-

^{*}Хотя МКС проектировалась для проведения в том числе и экспериментов при микрогравитации, ее вибрации ниже, чем на всех предыдущих пилотируемых станциях, например, на «Мире».

ции изображения, встроенная в телескоп. Компенсация сдвига будет проводиться путем перемещения фокальной плоскости с помощью высокоточного пьезомеханического гексапода (платформы Гью—Стюарта) [20] — некоторый современный автоматизированный аналог «кассеты Ричи» [21]. Описание этой системы, а также других технических особенностей научной аппаратуры космического эксперимента «Ли́ра-Б» приведено в работе [19].

Более подробную техническую информацию о комплексе научной аппаратуры КЭ «Ли́ра-Б» можно найти в [19].

Структура данных обзора «Ли́ра-Б»

Общие характеристики обзора «Ли́ра-Б»

Длительность эксперимента	3—5 лет
Число зарегистрированных объектов	$150\text{—}300 \cdot 10^6$
Точность фотометрии звезд (в полосе V):	
от 3 до 12^m	не хуже 0.001^m
от 12 до 16^m	не хуже 0.01^m
Точность фотометрии астероидов и переменных звезд (в полосе V):	
ярче 12^m	не хуже 0.01^m
ярче 16^m	не хуже 0.1^m
Астрометрия (для звезд):	
от 3 до 12^m	не хуже 0.1 mas
от 12 до 16^m	не хуже 1 mas

Обзор проводится в сканирующем режиме с использованием ВЗН (TDI) режима накопления и считывания сигнала с ПЗС/КМОП ВЗН-матриц.

Помимо фотометрии звезд, возможно, будут получены данные о фоне неба в тех же фотометрических полосах.

Данные наблюдений записываются на борту МКС на носитель (SSD-диск) и доставляются на землю при возвращении космонавтов. Соответственно никаких алертов от «Ли́ра-Б» не будет. Время, необходимое на изменение программы наблюдений (для наведения на конкретный объект), — не менее 3 суток. Место размещения комплекса научной аппаратуры — Российский сегмент МКС.

Телескоп

Телескоп «Ли́ра-Б» изготавливается по системе Ричи—Кре́тьена с линзовым афокальным компенсатором. Диаметр главного зеркала — 0.5 м. Эффективное фокусное расстояние — 3 м. Поле зрения — 2° , исправленное поле зрения — 1.5° , ширина полосы сканирования — 1° .

Временная структура наблюдений

При наблюдениях звезд в рамках эксперимента «Ли́ра-Б» присутствуют три различные временные шкалы (рис. 3). Самая короткая шкала связана с последовательным прохождением изображения звезды по светочувствительным матрицам в фокальной плоскости. Интервал между прохождениями по соседним матрицам — около 1 с. Полное время прохождения звезды через фокальную плоскость — около 15 с.

Средняя шкала связана с наблюдениями объекта на последовательных витках орбиты. Интервал между наблюдениями — около полутора часов. Объекты наблюдаются три или более раз.

Самая длинная шкала связана с повторным попаданием объекта в полосу сканирования. Она не является строго периодической, так как зависит от графика перекладок телескопа. Характерный временной масштаб — порядка месяца.

Характеристики эксперимента, которые можно и нельзя изменить

Характеристики, которые не будут меняться

Сканирующий режим наблюдений:

- надежность конструкции — большую часть времени телескоп неподвижен относительно станции;
- усреднение характеристик ПЗС;
- стабильные режимы функционирования ПЗС и электроники.

Диаметр телескопа (0.5 м):

- доставка конструкций на МКС (через гермоотсек МКС).

Ширина поля зрения (полосы сканирования):

- меньше — ухудшается покрытие небесной сферы;
- больше — снижается качество оптической системы.

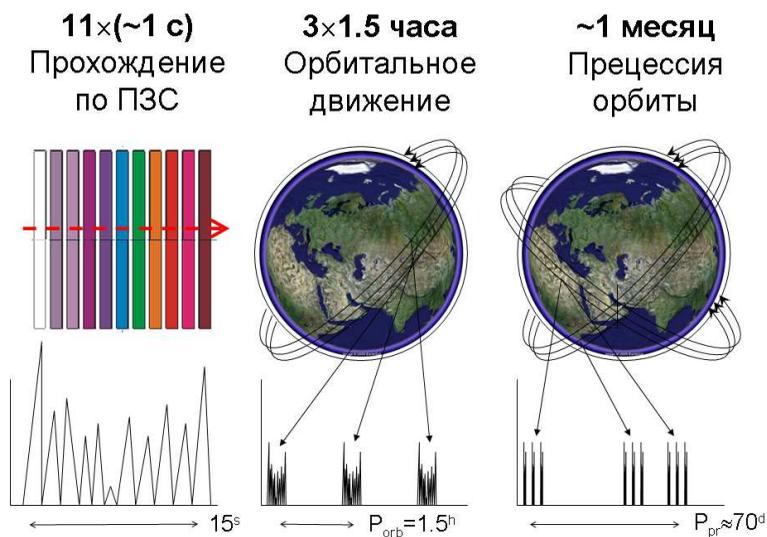


Рис. 3. Временная структура наблюдений объектов в эксперименте «Лира-Б»

Характеристики, которые трудно, но можно изменить

Размер пикселя (12 мкм):

— емкость пикселя. Технологические ограничения.

Количество фотометрических полос (9–11):

— больше — не позволяют конструкция фокальной плоскости и технологические ограничения;

— меньше — нет выигрыша.

Характеристики, которые могут быть изменены

Алгоритм сканирования небесной сферы.

Центры, ширины и профили фотометрических полос.

Порог регистрации звезд.

Обработка измерений фона.

Заключение

Основной задачей КЭ «Лира-Б», которую поставила перед собой группа разработчиков эксперимента, является создание фотометрического каталога звезд всего неба:

- высокоточный каталог звезд — фотометрических стандартов всего неба до 12^m ;
- фотометрический каталог (атлас) звезд всего неба от 12^m до 16^m .

Оба каталога являются многоцветными (9—11 фотометрических полос), однородными (выполненными на одной аппаратуре). Фотометрические измерения для их построения проводятся квазиодновременно. Будут предприняты меры, чтобы измерения в каталоге и атласе были максимально точно привязаны друг к другу (минимальные систематические ошибки, зависящие от звездной величины).

В указанные два каталога будут входить только звезды, не являющиеся переменными.

Помимо фотометрии непременных звезд полные данные КЭ «Лира-Б» содержат много другой информации. На их основе можно исследовать переменные звезд и астероиды, межзвездное поглощение и протяженные объекты, обнаруживать неразрешенные двойные системы, проводить статистические исследования звезд и многое другое. Некоторые из этих направлений исследования подробнее рассмотрены в [19]. Но у научного коллектива разработчиков КЭ «Лира-Б» на это просто не хватит сил.

Мы предполагаем, что на основе данных эксперимента будет создан научный архивный центр, в котором можно будет работать со всеми данными эксперимента. Вполне возможно, что он будет построен на основе существующего в ГАИШ сервиса доступа к каталогам SAI CAS [22].

Нам бы хотелось, чтобы сформировалась группа энтузиастов, в которую вошли бы те астрономы, которым интересны будущие данные эксперимента «Лира-Б» и которые готовы предложить свои программы обработки ожидаемых данных. Также мы приветствуем любые предложения по улучшению программы наблюдений КЭ «Лира-Б» или ее научной аппаратуры.

Библиографические ссылки

1. Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. и др. Каталог WBVR-величин ярких звезд Северного неба. — М. : МГУ, 1991.
2. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616, iss. A1.
3. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163—1183.
4. *Larter N., Gonfalone A.* International space station. A guide for European users. — ESA SP, Paris : European Space Agency (ESA), 1996.
5. *Martinez P., Klotz A.* A practical guide to CCD astronomy. — Cambridge : Cambridge University Press, 1998.
6. *Gunn J. E., Carr M., Rockosi C. et al.* The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera // *Astron. J.* — 1998. — Vol. 116. — P. 3040—3081.
7. Попов Г. М. Современная астрономическая оптика. — М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1988.
8. *Максумов Д. Д.* Астрономическая оптика. — М. : Наука, 1979.
9. *Горбатенко Ю. В., Цуканова Г. И.* Расчет исходных систем для ортоскопических зеркально-линзовых объективов // *Опт. журн.* — 2012. — Т. 79, № 4. — С. 13—17.
10. *Цуканова Г. И., Горбатенко Ю. В.* Исследование исходных систем ортоскопических астрономических объективов в спектральном диапазоне 0.2—1 мкм // *Опт. журн.* — 2012. — Т. 79, № 5. — С. 15—18.
11. *Alekseev V. A., Bokov V. V., Egorov V. N. et al.* Analysis of constructions of silicon carbide mirrors // *Sov. J. Opt. Technol.* — 1991. — Vol. 58, № 7. — P. 390—391.
12. *Johnson H. L.* The absolute calibration of the Arizona photometry // *Comm. Lunar Plan. Lab.* — 1965. — Vol. 3. — P. 73—77.
13. *Khaliullin Kh., Mironov A. V., Moshkalyov V. G.* A new photometric WBVR system // *Astrophys. Space Sci.* — 1985. — Vol. 111. — P. 291—323.
14. *Mironov A., Zakharov A., Prokhorov M.* “Lyra” Space Stellar Survey and Establishing a Large Grid of Photometric Standards // *ASP Conference Series.* — 2016. — Vol. 503. — P. 123—134.
15. *Mironov A. V., Zakharov A. I., Prokhorov M. E. et al.* The Multicolor Lyra Photometric System for Variable Stars and Halo Studies // *Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy Formation.* — Moscow : Sternberg Astron. Inst., 2010. — P. 185—191.

16. *Миронов А. В., Захаров А. И., Прохоров М. Е.* Проблемы современной астрофотометрии // Физика космоса : тр. 37-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 28 янв.— 1 февр. 2008 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 105—117.
17. ТЕСИС: О проекте. — http://www.thesis.lebedev.ru/about_thesis.html.
18. *Howell S. B.* Handbook of CCD Astronomy. — Cambridge : Cambridge University Press, 2006.
19. *Захаров А. И., Миронов А. В., Прохоров М. Е. и др.* Космический эксперимент «Лира-Б»: цели и принципы реализации // Астрон. журн. — 2013. — Т. 90. — С. 223—241.
20. *Stewart D.* A Platform with Six Degrees of Freedom // UK Inst. of Mech. Eng. Proc. — 1965—1966. — Vol. 180, № 15.
21. *Мартынов Д. Я.* Курс практической астрофизики. — М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1997. — С. 6.
22. SAI CAS Project. — <http://www.sai.msu.su/~megera/wiki/CAS>.