

УДК 520.8.054:519.85

## Опыт применения ПЗС-фотоприемников в Астрономической обсерватории Харьковского национального университета

В. В. Корохин, С. А. Белецкий, Ю. И. Великодский, В. В. Коничек, И. Е. Синельников

Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина  
61022, Харьков, ул. Сумская, 35

*Рассматриваются некоторые особенности применения ПЗС-приемников для астрофизических наблюдений Луны, Солнца и планет. Описан новый фотополяриметр на основе ПЗС-камеры, созданный в Астрономической обсерватории Харьковского национального университета, а также программный комплекс IRIS, предназначенный для автоматизации наблюдений и первичной обработки цифровых изображений. Пробные наблюдения показали точность измерения поляризации точечных источников 0.15 %.*

*ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ПЗЗ-ФОТОПРИЙМАЧІВ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ, Корохін В. В., Белецький С. О., Великодський Ю. І., Конічек В. В., Синельников І. Є. — Розглядаються деякі особливості застосування ПЗЗ-приймачів для астрофізичних спостережень Місяця, Сонця та планет. Описано новий фотополяриметр на основі ПЗС-камери, створений в Астрономічній обсерваторії Харківського національного університету, а також програмний комплекс IRIS, призначений для автоматизації спостережень і первинної обробки цифрових зображень. Пробні спостереження показали точність вимірювання поляризації точкових джерел 0.15 %*

*THE EXPERIENCE OF CCD-PHOTODETECTORS USING ON KHARKIV OBSERVATORY, by Korokhin V. V., Beletsky S. A., Velikodsky Yu. I., Konichek V. V., Sineľ'nikov I. E. — Some peculiarities of the use of CCD detectors in astrophysical observations of the Moon, the Sun, and planets are considered. A new photopolarimeter constructed around a CCD camera at the Kharkiv Observatory and the program complex IRIS developed for automation of observations and initial processing of digital images are described. Test observations revealed that the polarization of point sources is measured with an accuracy of 0.15 percent.*

### ВВЕДЕНИЕ

В 1989 г. в Астрономической обсерватории Харьковского национального университета был разработан и изготовлен фотополяриметрический комплекс на основе охлаждаемой ПЗС-линейки K1200ЦЛ2 и персонального компьютера [10]. Для обработки получаемых данных были созданы программы Wk\_DIP [6] и PIDGI [2]. С использованием этих средств за 10 лет проведен ряд астрофизических работ (фотометрия поверхности Луны в широком диапазоне фазовых углов [1, 7—9], поляриметрические наблюде-

ния Юпитера [12, 13, 15], наблюдения фотосферы и хромосферы Солнца [2, 11]).

В последнее время круг наблюдательных задач существенно расширился, возросли требования к обработке больших потоков информации, что нельзя решить простой модернизацией прибора. Необходимо было применение нового высокопроизводительного приемника излучения — ПЗС-матрицы, что требует конструктивных изменений прибора и разработки новых программных средств сбора и обработки информации.

Поэтому в 1998 г. нами был разработан новый прибор — фотополариметр на базе ПЗС-матрицы и создано новое программное обеспечение IRIS. Эта работа посвящена их описанию, а также анализу некоторых особенностей применения ПЗС-приемников для астрофизических наблюдений Луны, Солнца и планет.

#### ФОТОПОЛЯРИМЕТР НА БАЗЕ ПЗС-МАТРИЦЫ

**Электронная часть.** Светочувствительным элементом фотополариметра является ПЗС-матрица, установленная в серийной камере OS-65D фирмы «Минтрон». Эта камера использует ПЗС-матрицу формата 752×582 элементов (размер светочувствительной секции 4.9 мм × 3.7 мм) производства фирмы «Сони» и имеет хорошие фототехнические характеристики (высокая чувствительность, отсутствие «слепых» и «горячих» пикселей, низкий уровень темновых шумов даже без охлаждения, неравномерность чувствительности по полю не больше 1 %).

Камера модернизирована так, что рабочая частота кадров 25 Гц снижается в 2, 4 или 8 раз (12.5, 6.25, 3.125 Гц). Это обратно пропорционально увеличило максимальное время накопления сигнала и пороговую чувствительность прибора. Кроме того, уменьшился информационный поток, что дало возможность вводить изображения в ПК в режиме реального времени при помощи сравнительно несложного устройства сопряжения. В устройстве применен быстродействующий высокоточный аналого-цифровой преобразователь AD775 фирмы «Аналог Дивайсиз», что гарантирует высокие фотоэлектрические характеристики прибора, также применена схема двойной буферизации оцифрованной информации и взаимодействие с ПК по прерываниям, что обеспечивает эффективную работу прибора в многозадачных операционных системах. Для связи устройства сопряжения с ПК используется параллельный порт, работающий в режиме EPP (Enhanced Parallel Port). Разрядность оцифровки отдельного кадра — 8 бит.

**Оптико-механическая часть.** При разработке оптико-механической части прибора были учтены особенности проведения поляриметрических наблюдений планет: необходимость сопоставления изображений, полученных в разных положениях поляроида через разные светофильтры с минимальными временными интервалами. Для реализации такого режима турель с шестью сменными светофильтрами и поляроид вращаются шаговыми двигателями при полном контроле со стороны управляющего ПК. Диаметр фильтров 25 мм.

Поляроид диаметром 30 мм установлен в шарикоподшипниках и через промежуточные шестерни поворачивается шаговым двигателем (минимальный угол 1.8°, максимальная частота 500 гц). В штатном режиме регистрируется поток от объекта при данном положении поляроида, после чего производится поворот на 45° за 0.1 с и очередная регистрация потока. За одно измерение производится несколько десятков оборотов поляроида. Такая схема позволяет в значительной мере учесть нестабильность атмосферы за время изменения положения поляроида. Таким образом, весь цикл наблюдений состоит из набора коротких (20—50 кадров) серий при всех

положениях поляроида, и при последующей обработке изображения совмещаются и усредняются.

Нулевое положение поляроида и инструментальная поляризация определяются по наблюдениям поляризационных стандартов. Для измерения темнового тока непосредственно перед матрицей установлена световая заслонка.

**Отличительные черты прибора.** Распространенные в астрономии «звездные» матрицы характеризуются низкой скоростью ввода изображений в ПК — один кадр за десятки секунд. Наша система обеспечивает скорость до 12.5 кадра/с, в связи с чем эффективно наблюдать могут только сравнительно яркие объекты, от Солнца до ярких спутников планет и ярких комет. Однако она дает возможность применять современные прогрессивные методы наблюдений и обработки. В частности, если яркость объекта позволяет проводить наблюдения при времени накопления сигнала меньше 10—20 мс, то можно использовать явление замороженности атмосферы [4] и частично устранять влияние атмосферной турбулентности. Разработанное нами для этого программное обеспечение позволяет накапливать сотни кадров и затем, после совмещения, суммировать их. Если для такой процедуры выбирать области наблюдаемых объектов в пределах изопланетичности земной атмосферы, то можно получать изображения этих областей с разрешением близким к дифракционному разрешению телескопа.

**Применение прибора.** С использованием описанного прибора в сентябре 1998 г. совместно со Стародубцевой О. М. были проведены наблюдения поляризации Юпитера. За 20 ночей наблюдений получено несколько гигабайт информации. Обработка еще продолжается, но первые результаты позволяют надеяться на более высокую точность фотометрии, чем для используемой ранее ПЗС-линейки [12, 13, 15].

Проведены также наблюдения галилеевых спутников Юпитера с целью изучения тонких эффектов в отрицательной ветви фазовой зависимости поляризации (совместно с Н. Н. Киселевым и В. К. Розенбуш). Точность измерения поляризации составила 0.15 %.

Совместно с Астрономической обсерваторией Киевского национального университета проводятся работы по применению описанной ПЗС-камеры для наблюдений хромосферы и фотосферы Солнца в рамках международной Службы Солнца. Разработаны специальные оптико-механические узлы для согласования камеры с хромосферным телескопом АФР-2 и фотообъективом «Таир-3». Пробные наблюдения показали перспективность камеры для работ такого рода.

В дальнейшем авторы планируют применять описанный фотополяриметр также для поляризационных наблюдений поверхности Луны.

#### **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ С ПЗС-ПРИЕМНИКАМИ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ**

Для эффективной работы с новой ПЗС-камерой необходимо было новое программное обеспечение, так как наши старые пакеты Wk\_DIP и PIDGI не обладали достаточной мощностью и гибкостью. Готовые пакеты MIDAS (разработка Европейской Южной обсерватории) и IDL (разработка «Рисерч Системс», США) оказались слишком сложными, громоздкими и дорогими. Наибольшим же их недостатком для нас была относительная закрытость их архитектуры.

Поэтому в 1997—1998 гг. В. В. Корохин, С. А. Белецкий и Ю. И. Великодский разработали новую унифицированную систему обработки изображений IRIS. Система задумывалась как универсальное ядро для решения комплекса задач, начиная от подключения к ПК наблюдательной аппаратуры до обработки данных алгоритмами любой сложности. В IRIS удалось

сочетать следующие принципы.

- Удобство, естественность, привычность и единство пользовательского интерфейса (визуализация, интерактивность, множественность способов управления, максимальное использование манипулятора «мышь», легкость обучения).
- Мультиконфигурируемость (гибкость настройки не только под пользователя, но и под конкретную задачу).
- Функционирование в среде современных многозадачных операционных систем Windows 95/98 и Windows NT.
- Максимальная ориентация на стандарты (FITS [17], WINDOWS 95/98/NT/2000, OLE, TCP/IP [5]).
- Открытость архитектуры (возможность интеграции с другими программными пакетами).
- Структурный подход как на уровне архитектуры системы, так и на уровне исходного кода: объектно-ориентированный подход (ООП).
- Максимальное повторное использование кода (как авторами системы, так и прочими разработчиками, OLE, ООП, визуальное программирование).
- Использование современных технологий и систем программирования (среда «Delphi» фирмы «Инпрайз»).
- Возможность развития в систему распределенного вычисления.

В настоящее время система IRIS включает в себя следующие основные приложения-компоненты.

1. IRIS-интегратор (IrIn) — оболочка системы, командный центр, упорядочивание потоков данных, работа с наборами данных, процессор встроенного макроязыка «Bastis», набор стандартных процедур обработки изображений.

2. WisA — визуализация изображений и оперативный анализ.

3. HeadEdit — просмотр и редактирование сопроводительной информации (в частности FITS-заголовков), ведение журнала работы.

Перечисленные компоненты могут использоваться как автономно, так и в составе системы. В последнем случае эффективность работы значительно выше, так как целостностная среда IRIS оптимизирована на решение типичных астрофизических задач и обеспечивает для этого широкий набор средств.

Систему IRIS можно использовать несколькими способами.

1. Использование как готового приложения (от пользователя не требуются знания в области программирования).

2. Создание алгоритмов обработки на языке «Bastis» (он базируется на простом и интуитивном языке программирования и использует технологию визуального построения алгоритмов; доступно практически всем, кто имеет общие представления о программировании).

3. Включение компонентов системы в свои приложения с использованием технологии «OLE-automation» [5] (необходимы специальные знания; доступно для опытных программистов).

4. Расширение системы путем подключения дополнительных модулей (plug-ins) с использованием технологии «OLE-automation» (необходимы специальные знания; доступно для опытных программистов).

Система IRIS начала активно использоваться с января 1998 г. На базе IRIS была разработана программа x\_CCD, которая служит для управления описанным выше ПЗС-фотополяриметром и первичной обработки информации. IRIS используется также для обработки данных фотометрии затмений Солнца [14], гелиограмм Солнца (разработан специальный модуль расширения «Helios»), ПЗС-изображений Луны, получаемых в Астрономической

обсерватории Харьковского национального университета [1], серий изображений участков поверхности Луны, полученных КА «Клементина» [16], для обработки поляризационных ПЗС-наблюдений Юпитера и его галилеевых спутников.

С конца 1998 г. авторами предпринимаются шаги для распространения системы IRIS через компьютерную сеть «Интернет». Для этого организован Web-сайт <http://members.xoom.com/cyteg>, разработана соответствующая документация, продумана система технической поддержки продукта. По данным авторов, уже имеются пользователи системы IRIS в США и России.

В мае 1999 г. система IRIS заняла первое место в открытом конкурсе на лучшую украинскую программную разработку «SoftRegatta 99» (Киев) в номинации «Прикладные системы. Системы поддержки фундаментальных наук и инженерных расчетов». Двухлетний опыт использования показал, что система IRIS позволяет быстро и комплексно решать практически любую современную задачу, от автоматизации наблюдений до обработки огромных массивов информации, получаемой космическими аппаратами.

#### СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКОВ, И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

ПЗС-приемники обладают явными преимуществами перед традиционными астрономическими приемниками излучения. Это высокая информационная емкость, возможность получения изображений в режиме реального времени в цифровом виде, высокие фототехнические характеристики и многое другое. В то же время работа с ними обнаружила ряд специфических проблем.

*Интерференция.* Во время наблюдений с ПЗС-линейкой на спектрогелиографе фокусное расстояние камерного зеркала выбиралось таким, чтобы диаметр Солнца на выходной щели спектрографа совпадал с размером линейки [2]. Дифракционная решетка (1200 штр/мм) обеспечивает дисперсию 0.2 нм/мм. При таких условиях ПЗС-линейка шириной 12 мкм вырезает в спектре полосу 0.0024 нм. Высокая когерентность регистрируемого излучения приводит к возникновению интерференционной картины (амплитуда модуляции до 20—30 %) на покровном стекле линейки и в самом кристалле ПЗС. Для устранения этого эффекта был разработан и применяется специальный программный алгоритм [2].

Пробные наблюдения с ПЗС-камерой на хромосферном телескопе АФР-2 (ширина полосы 0.05 нм) интерференции не показали.

*Размывание зарядов в ПЗС.* Из-за низкого коэффициента поглощения света в светочувствительных структурах ПЗС-линейки в ближнем ИК-диапазоне наблюдается сильная боковая диффузия носителей заряда. Это приводит к заметному размыванию изображения вдоль линейки. Для коррекции изображений мы применяли алгоритм повышения пространственного разрешения методом моментов [2].

*Необходимость использования короткофокусной оптики.* Реально доступные ПЗС-матрицы обладают, как правило, небольшими геометрическими размерами. Так, используемая нами матрица OS-65D имеет размер 4.9×3.7 мм при размере пиксела 6×6 мкм. Для того чтобы наблюдать, например, полный диск Солнца или Луны, необходимо применять объектив с фокусным расстоянием порядка 40 см. Для традиционных телескопов необходимо использовать оптическую схему изменения масштаба.

*Избыток светового потока при наблюдениях Солнца.* При проведении пробных наблюдений Солнца с ПЗС-матрицей на хромосферном телескопе АФР-2 мы столкнулись с проблемой избыточного светового потока. Поэтому при наблюдении хромосферы через интерференционно-поляризационный фильтр, для уменьшения потока нам приходилось применять еще и стек-

лянные светофильтры. При наблюдениях фотосферы необходимо ослаблять световой поток еще на несколько порядков. Для этой цели была разработана специальная оптическая схема на основе призм.

*Большие объемы и потоки информации.* Оснащенный ПЗС-приемником телескоп способен выдавать в сутки до нескольких гигабайт информации. Для уменьшения объемов хранимой информации можно рекомендовать следующие меры:

1) сжатие файлов изображений без потерь в несколько раз (программы типа arj, pkzip);

2) сжатие до 100 раз с потерями (алгоритм JPEG, EZW-компрессия на основе вейвлет-преобразования, другие алгоритмы удаления избыточной или второстепенной информации с учетом специфики изображений);

3) параметризацию данных (например, вычисление индексов солнечной активности).

Для долговременного хранения данных в настоящее время лучше всего подходят носители информации CD-R.

*Специфические требования к ПК, используемым для наблюдений.* При наблюдениях с ПЗС-приемниками (особенно с матрицами) в ПК поступают большие потоки информации (несколько Мбайт в секунду). В то же время для нормальной работы ПК требуются комнатные условия.

Если управляющий компьютер установлен в удаленном помещении, то возникает необходимость в дорогостоящих высокоскоростных магистралях передачи информации. Если же управляющий ПК установлен непосредственно возле телескопа, то он должен быть в промышленном исполнении, чтобы нормально функционировать на открытом воздухе (особенно в холодное время года). Еще одна возможность — возле телескопа используется облегченный ПК (в специальном термостатированном корпусе, без монитора, клавиатуры и пр.), связанный с главным компьютером Ethernet-сетью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Десятилетний опыт применения ПЗС-фотоприемников для наблюдений Солнца, Луны и планет показал перспективность и высокую эффективность такого способа регистрации изображений для решения различных задач астрофизики. Программный комплекс IRIS показал свою пригодность в качестве унифицированной системы обработки изображений.

Описанный в статье фотополяриметрический комплекс на базе ПЗС-матрицы был разработан благодаря финансовой помощи Астрономической обсерватории Киевского университета.

1. Акимов Л. А., Великодский Ю. И., Корохин В. В. Зависимость яркости лунных материков от фотометрической широты // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 4.— С. 304—309.
2. Белкина И. Л., Белецкий С. А., Грецкий А. М., Марченко Г. П. ПЗС-наблюдения Солнца в линиях He I 1083 нм, H $\alpha$ , K Ca II // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 2.—С. 65—76.
3. Вакулик В. Г., Железняк А. П., Корохин В. В. и др. Быстрый микрофотометр Астрономической обсерватории Харьковского университета // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 2.—С. 107—112.
4. Дудинов В. Н., Вакулик В. Г., Железняк А. П. и др. Основные результаты обработки изображений в Астрономической обсерватории Харьковского университета // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 2.—С. 86—97.
5. Кинг А. Windows-95 изнутри. — СПб: Питер, 1995.—512 с.
6. Корохин В. В. WК\_DIP — интегрированная система для обработки астрономических изображений // Физика Луны и планет: Тез. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н. П. Барабашова; 6—10 июня 1994 г. — Харьков, 1994.—С. 69—70.

7. *Корохин В. В.* Районирование лунной поверхности с использованием параметров фазовой зависимости яркости // *Астрон. вестник.*—1997.—**31**, № 6.—С. 484—490.
8. *Корохин В. В., Акимов Л. А.* Картирование фазовой зависимости яркости лунной поверхности: приведение наблюдений к стандартным условиям, построение карт эквигонального альbedo // *Кинематика и физика небес. тел.*—1994.—**10**, № 2.—С. 3—10.
9. *Корохин В. В., Акимов Л. А.* Картирование параметров фазовой зависимости яркости лунной поверхности // *Астрон. вестник.*—1997.—**31**, № 2.—С. 143—152.
10. *Корохин В. В., Акимов Л. А., Марченко Г. П., Стародубцева О. М.* Наблюдения Юпитера, Луны и Солнца с помощью линейного ПЗС-приемника // *Астрон. вестник.*—1993.—**27**, № 3.—С. 56—64.
11. *Курочка Л. Н., Белкина И. Л., Белецкий С. А. и др.* Наблюдения и анализ излучения активных областей на Солнце у границы бальмеровского континуума // *Астрон. журн.*—1997.—**74**, № 3.—С. 460—465.
12. *Стародубцева О. М., Акимов Л. А., Корохин В. В.* Временные вариации северо—южной асимметрии поляризованного излучения Юпитера // *Астрон. вестн.*—1997.—**31**, № 3.—С. 214—221.
13. *Стародубцева О. М., Акимов Л. А., Корохин В. В., Тейфель В. Г.* Пространственные и временные вариации степени линейной поляризации Юпитера в видимом спектральном диапазоне // *Кинематика и физика небес. тел.*—1994.—**10**, № 2.—С. 50—57.
14. *Akimov L. A., Beletsky S. A., Dyatel N. P.* The chromospheric D3 helium emission observed at the total solar eclipse of July 31, 1981 // *Astron. and astrophys. transections.*—1999.—**18**(1).—P. 253—260.
15. *Starodubtseva O. M., Akimov L. A., Korokhin V. V.* Temporal changes in the north-south asymmetry of polarized light of Jupiter may be associated with the comet SL-9 visit to the Jovian system // *Planet. Space Sci.*—1997.—**45**, N 10.—P. 1183—1188.
16. *Velikodsky Yu. I., Kreslavsky M. A., Shkuratov Yu. G., et al.* An empirical photometric function in analysis of Clementine data // 30th Lunar and Planetary Science Conf., March 15—19, 1999, Houston, Texas. — Houston: LPI, 1999.—Abstract N 1039.
17. *Wells D. C., Greisen E. W., Harten R. H.* FITS: a Flexible Image Transport System // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1981.—**44**.—P. 363—370.

Поступила в редакцию 15.02.00