

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ НА БТА САО РАН

© 2021 А. С. Бескаотов^{1*}, А. Ф. Максимов¹, В. В. Дьяченко¹,
А. А. Митрофанова¹, Ю. Ю. Балега¹, Д. А. Растегаев¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 3 августа 2021 года; после доработки 10 октября 2021 года; принята к публикации 10 октября 2021 года

Спекл-интерферометрические наблюдения двойных звезд проводились в инфракрасном диапазоне 900–1600 нм БТА САО РАН с использованием коммерчески доступной ПЗС-камеры SWIR Snake-640 с InGaAs-детектором с чувствительной областью 640×512 пикселей. Пельтье-охлаждение датчика позволяет достичь температуры ПЗС-матрицы -30°C . При такой температуре тепловой шум ПЗС-матрицы остается существенным. Это ограничивает применение камеры в спекл-интерферометрических исследованиях объектов примерно до 8-й звездной величины при удовлетворительных погодных условиях. Чтобы оценить другие характеристики камеры для интерферометрического применения в ближнем ИК-диапазоне, мы использовали ее для измерения разделения, позиционных углов и разности блеска некоторых хорошо изученных двойных звезд. Для каждого из восстановленных изображений было достигнуто ограниченное дифракцией угловое разрешение.

Ключевые слова: *инструменты: высокое угловое разрешение — методы: наблюдательные — двойные: визуальные — инфракрасные: звезды*

1. ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасная спекл-интерферометрия в диапазоне длин волн от 1.2 до 2.2 μm широко применяется на 6-м телескопе САО РАН с 2000 г. в результате сотрудничества с Институтом радиоастрономии Макса Планка, Бонн, Германия. Детектор НАWAII-II, охлажденный до азотных температур, использовался для наблюдения объектов до 12 звездной величины в полосе *I* с дифракционно-ограниченным разрешением телескопа. В разных областях наблюдательной астрономии был получен ряд уникальных результатов. Среди них: изучение кратности в Трапедии Ориона (Schertl et al. 2003, Kraus et al. 2009), наблюдения с высоким угловым разрешением газовых оболочек, окружающих очень молодые звезды (Hofmann et al. 2002), и моделирование газопылевых структур оболочек звезд на последних стадиях эволюции (Osterbart et al. 2000). Результаты этих работ показывают, что 6-м телескоп обеспечивает возможность исследования кратных звездных систем и звездных оболочек с угловым разрешением и динамическим диапазоном высокой точности.

Torres et al. (2010) опубликовали наиболее точную на сегодняшний день информацию об отношении массы к светимости (MLR) для звезд Главной последовательности. Однако они собрали данные всего для нескольких звезд с массами ниже $0.3 M_\odot$. Несмотря на десятилетия исследований, изучение множества маломассивных звезд и коричневых карликов по-прежнему остается сложной задачей для наблюдательной астрономии. В первую очередь это связано с методологическими трудностями наблюдения таких звезд в инфракрасном диапазоне. Только широкие пары с угловыми расстояниями в несколько угловых секунд и орбитальными периодами в сотни и тысячи лет доступны для прямых наблюдений. Такие системы не могут быть источниками данных о точных массах и светимостях компонентов. Систематические спектральные измерения лучевых скоростей карликов поздних типов могут выполняться только с помощью крупнейших телескопов, оснащенных уникальными спектрографами; выделение значительного наблюдательного времени для таких задач возможно лишь в немногих исключительных случаях. Из-за малых угловых диаметров и больших орбитальных периодов карлики с малой массой редко могут быть найдены в затменных системах, которые могут являться источниками данных о свойствах компо-

*E-mail: beskakotov@sao.ru

нентов. Наконец, маломассивные спутники в кратных системах с массивной главной звездой трудно обнаружить и наблюдать из-за большой разницы в яркости. Все эти обстоятельства приводят к тому, что физические характеристики маломассивных звезд известны со значительно меньшей точностью, чем параметры массивных звезд. В то же время звезды малой массы вместе с коричневыми карликами составляют основную часть населения Галактики.

Кроме того, интерферометрические исследования кратных маломассивных звезд в инфракрасном диапазоне тесно связаны с обнаружением и наблюдениями экзопланет. Зона обитаемости подобных объектов с низкой массой расположена ближе к родительской звезде (Corrao et al. 2013), и для них характерны землеподобные спутники (Dressing and Charbonneau 2013). В настоящее время поиск таких объектов находится в центре внимания в связи с разработкой соответствующих методов наблюдения (например, Varoch et al. (2021), Валявин Г. Г. и др. (готовится к печати)).

Этими причинами обусловлена необходимость разработки методов интерферометрических наблюдений кратных звезд поздних спектральных классов в ближнем ИК-диапазоне.

Начиная примерно с 2010 г. новые ИК-детекторы с водяным охлаждением на основе InGaAs ПЗС стали коммерчески доступными. Они уступают по своим возможностям лучшим образцам астрономических детекторов, таких как HAWAII-I или HAWAII-II, однако могут быть использованы для решения определенного круга астрономических задач, включая спекл-интерферометрию кратных звезд. Ниже мы представляем результаты спекл-интерферометрических наблюдений нескольких двойных систем, выполненных в ближнем ИК-диапазоне, с целью определения их позиционных и фотометрических параметров. В результате мы делаем вывод о том, в какой степени подобные детекторы применимы для звездной интерферометрии.

2. СТРУКТУРА ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Схема спекл-интерферометра ближнего инфракрасного диапазона (near-infrared band speckle interferometer, NIRSI) представлена на рис. 1. Он состоит из трех основных блоков: оптико-механического блока в главном фокусе БТА, детектора и компьютера управления и сбора данных.

Основными элементами оптико-механического блока NIRSI являются: светодетель для отвода части света на гидрирующую камеру, 10-кратный

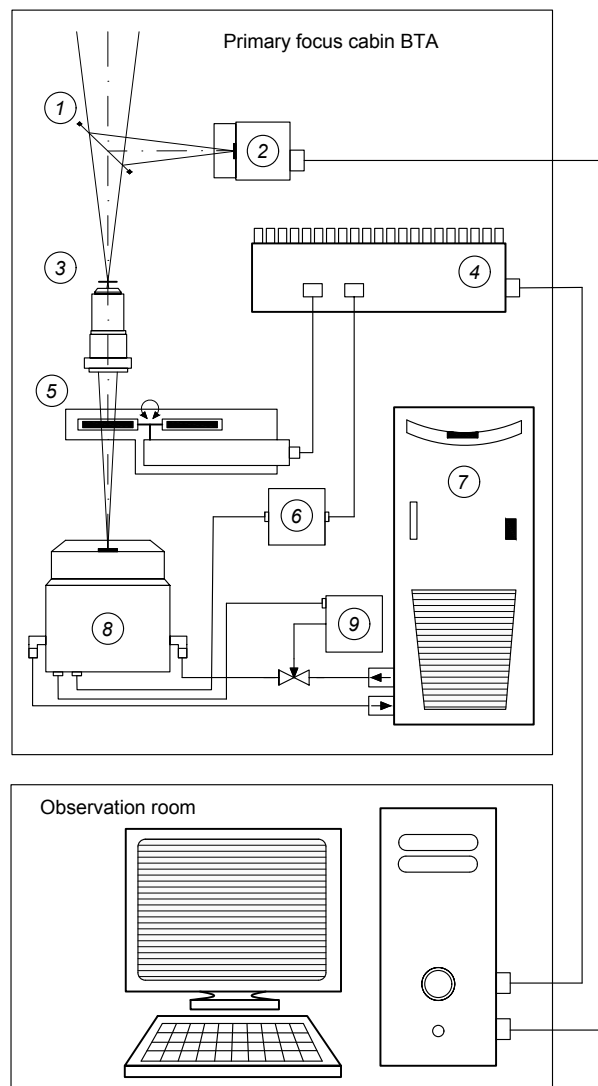


Рис. 1. Схема ИК-спекл-интерферометра: 1 — мембранный светодетель, 2 — камера наведения и гидрирования, 3 — микрообъектив, 4 — промышленный компьютер, 5 — моторизованная турель фильтров, 6 — плата видеозахвата, 7 — система водяного охлаждения, 8 — InGaAs-детектор, 9 — датчик контроля потока жидкости в системе охлаждения.

микрообъектив для согласования размера спекла с размером регистрирующего элемента приемника, набор интерференционных фильтров для выделения узкой спектральной полосы. Необходимо отметить, что в системе не применяется коррекция атмосферной дисперсии. Ниже мы приводим краткое описание элементов.

2.1. Микрообъектив

Размер отдельного спекла в фокальной плоскости телескопа соответствует диаметру первого

Таблица 1. Основные параметры камеры SWIR Snake-640

Parameter	Value
Sensor type	InGaAs
Pixel resolution	640 × 512
Input pixel size	15 μm
Spectral response	Up to 1700 nm
Peak QE	~80% (1000 nm)
Typical QE	>70% (950–1700 nm)
Grey scale resolution	14 bit
Readout noise	~35 e ⁻
Dynamic range	~800 : 1 (High Gain)

темного кольца на дифракционной картине. При длине волны 1025 нм это $d = 5 \mu\text{m}$. Для размера пикселя детектора $15 \mu\text{m}$ и в соответствии с теоремой Котельникова ($f_{\text{discr}} \geq 2f_{\text{max}}$, где f_{max} — верхняя частота в спектре сигнала), изображение должно быть увеличено не менее чем в шесть раз. Для согласования масштабов используется высококачественный 10-кратный ахроматический микрообъектив фирмы «Carl Zeiss» с исправленной кривизной поля. Объектив обладает высокой пропускающей способностью в ближнем ИК-диапазоне. Он имеет заднее рабочее расстояние 160 мм. При таком увеличении один спекл занимает на ПЗС-матрице около 3×3 пикселей. Для детектора 640×512 пикселей с общей светочувствительной областью 9.6×7.68 мм угловое поле зрения NIRSI составляет $8''25$ на $6''6$ (масштаб $0''0129$ на пиксел).

2.2. Фильтры

Пять интерференционных фильтров диаметром 25 мм производства Andover (США) и Edmund Optics (США) были установлены в моторизованной турели Thorlabs FW102C (США). Шестое гнездо турели остается пустым для регулировки или отображения белого света. Его можно закрыть заглушкой для коррекции темного поля. Интерференционные фильтры $\lambda/\Delta\lambda$ были выбраны на основе стандартных фотометрических систем, атмосферных окон пропускания и диапазона чувствительности детектора: 900/80 нм (Andover); 1025/50 нм, 1050/25 нм, 1075/50 нм, 1225/50 нм и 1600/50 нм (Edmund Optics). Моторизованная турель фильтров управляется с помощью программного обеспечения, предоставленного производителем.

2.2.1. Светоделитель

Мембранный светоделитель BP108 от Thorlabs предназначен для разделения светового луча в соотношении 92:8. Отраженный свет (8%) падает на камеру для наведения и гидирования в широком поле, в то время как остальная часть света используется для регистрации ИК-спекл-интерферограмм.

2.2.2. Камера наведения

ПЗС-камера Basler acA645-100gm, оснащенная сенсором Sony ICX414, используется в NIRSI в качестве камеры наведения и гидирования. При формате 659×494 и размере регистрирующего элемента $9.9 \mu\text{m}$ поле зрения составляет $56''$ на $42''$. Благодаря большому полю камера упрощает поиск и наведение на звезду. После выведения объекта в центр поля выполняется регистрация света основным ИК-детектором. Камера наведения управляется с помощью программного пакета Basler pylon Camera Software Suite. Связь между камерой в основном фокусе и компьютером в комнате для наблюдений осуществляется по локальной сети через разъем Gigabit Ethernet на камере. Программный пакет предоставляет широкий спектр возможностей, но для решения наших задач мы воспользовались лишь возможностями выбора времени экспозиции и усиления света.

3. ИНФРАКРАСНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Камера SWIR Snake-640, разработанная компанией Photonic Science (Великобритания) используется для регистрации спекл-изображений с короткими экспозициями. Согласно данным производителя, матрица на основе InGaAs-структуры имеет квантовую эффективность (QE) 80% на длине волны 1000 нм и 70% в диапазоне от 950 нм до 1700 нм. Светочувствительная область ПЗС-матрицы 640×512 с размером регистрирующего элемента $15 \mu\text{m}$ составляет 9.6×7.68 мм. Все основные характеристики детектора указаны в таблице 1.

Сенсор Snake SW от компании Sofradig (Франция) имеет внутренний термоэлектрический одноступенчатый охладитель на основе элемента Пельтье TEC-1, которая позволяет охлаждать датчик до -30°C с эффективным отводом тепла от горячего спая с использованием дополнительного водяного охлаждения. Для отвода тепла от матрицы применялся рециркуляционный охладитель F250 JULABO GmbH. Он способен обеспечить минимальную температуру водно-этиленгликолевого хладагента -10°C с точностью поддержания температуры $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Однако, по словам производителя ИК-детектора, существует риск образования

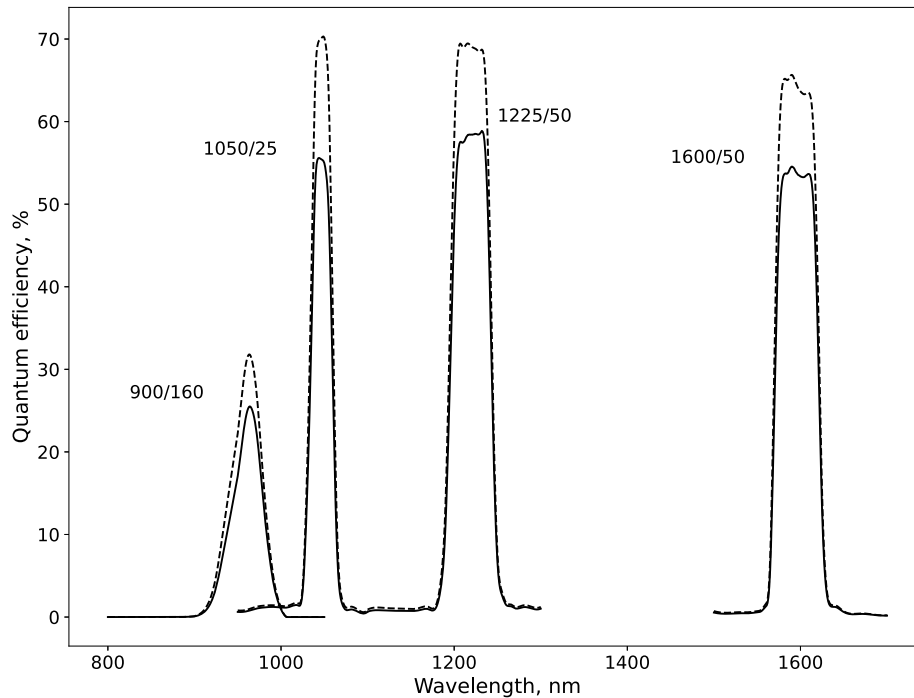


Рис. 2. Квантовая эффективность системы в разных диапазонах. На графике приведены параметры фильтров. Сплошная линия показывает измеренную квантовую эффективность системы, которая объединяет прозрачность оптических элементов и заявленные характеристики детектора и светоделиителя. Штриховая линия демонстрирует повышение эффективности в том случае, если с оптического тракта удалить светоделиитель и использовать микрообъектив с просветляющим покрытием в ближнем ИК-диапазоне (приблизительно 95%).

конденсата на входном окне матрицы, если температура хладагента упадет ниже $+10^{\circ}\text{C}$. Темновой ток ПЗС-матрицы Snake SW от Sofradig составляет менее 1 fA/пикс/с при охлаждении до -30°C . Как будет показано далее, высокий тепловой шум матрицы не позволяет наблюдать слабые источники.

Управление и запись кадров детектором происходит с применением платы видеозахвата (frame grabber).

Графический интерфейс программного обеспечения позволяет:

- контролировать температуру датчика;
- устанавливать время экспозиции, режим усиления («High Gain» или «Low Gain») и другие параметры камеры;
- применять коррекцию выходного кадра (темновой сигнал, плоское поле, «плохие» пиксели);
- отображать и сохранять спекл-интерферограммы в двоичном 16-битном формате или в качестве PNG (8-бит) или TIFF (16-бит) изображений.

В ходе лабораторных испытаний была изучена зависимость темнового сигнала от температуры воды в системе охлаждения. Для каждого значения температуры воды в системе охлаждения

было записано 500 кадров темнового сигнала с экспозицией 20 мс в режиме с высоким коэффициентом усиления при отключении всех типов посткоррекции. Было обнаружено, что темновой сигнал уменьшается примерно на 10% каждые 5°C в диапазоне температур от 20°C до 10°C (рис. 3). При минимально допустимой температуре воды в системе охлаждения матрица охлаждалась до -30°C .

Существенным недостатком детектора является волнообразный вид темнового сигнала по полю с большим количеством «горячих» и «холодных» пикселей при коротких экспозициях (рис. 4). Для изображений, записанных с длинной экспозицией (более 100 мс), программное обеспечение производителя может лишь частично устранить эти артефакты.

4. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Выборка из семи звезд для тестовых наблюдений с помощью камеры SWIR Snake-640 была сформирована из двойных звезд с хорошо изученными позиционными параметрами. Это было сделано для сравнения наших ИК-измерений с существующими данными наблюдений в видимом диапазоне.

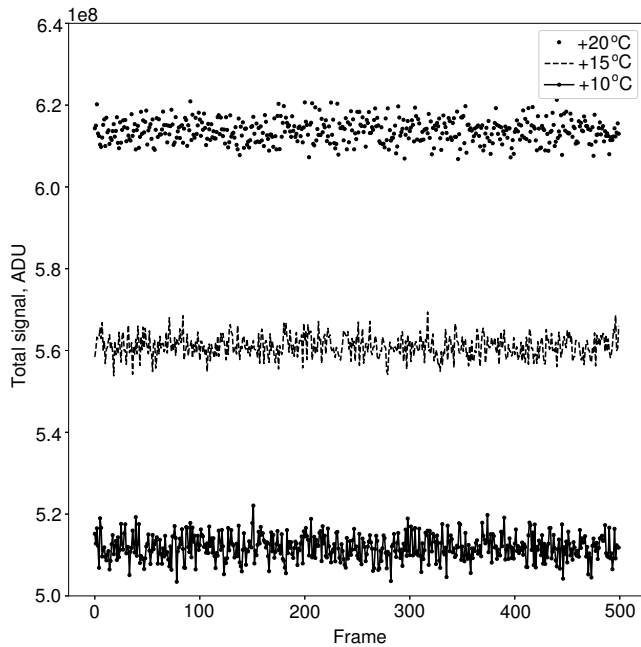


Рис. 3. Темновой сигнал ПЗС-матрицы в зависимости от температуры воды в системе охлаждения. Температура окружающей среды составляет $+20^{\circ}\text{C}$.

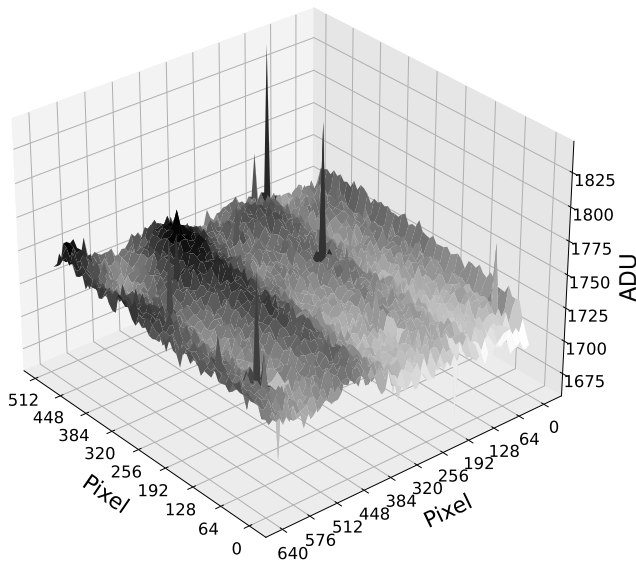


Рис. 4. Темновой сигнал камеры SWIR Snake-640 с 20 мс экспозицией. Коррекция «плохих» пикселей и темнового сигнала была выполнена с помощью программного обеспечения производителя. Для удобства на графике показано усреднение 8×8 пикселей.

Для калибровки масштаба регистрирующего элемента мы использовали широкую пару ADS 7286 (расстояние между компонентами $\rho = 1''8$). Для нее существует большое количество позиционных измерений на разных телескопах. Поскольку орбитальное движение данной двойной

незначительно, ее можно использовать в качестве стандарта астрометрической калибровки (см., например, Mason et al. (2001; 2018)).

Первые наблюдения в ИК-диапазоне были сделаны 26–27 июня 2016 г. и 10 февраля 2017 г. В среднем было накоплено от 250 до 1000 спекл-изображений для каждого объекта с экспозицией от 20 мс до 100 мс. Наблюдения проводились при удовлетворительных и хороших погодных условиях (среднее качество изображения $1''-2''$).

Алгоритм обработки наблюдательного материала идентичен обработке видимых наблюдений (Balega et al. 2002, Pluzhnik 2005). Сначала мы выполняем подбор модели методом наименьших квадратов среднего спектра мощности ансамбля полурешечных спекл-изображений. Затем спектр мощности был поделен на спектр мощности неразрешенной одиночной звезды. Система полос, полученная в результате деконволюции, позволяет определить разделение, позиционный угол и разность блеска двойной системы. Квадрант вторичного компонента был определен по восстановленному биспектральному изображению. Рисунок 5 иллюстрирует процесс получения ИК-изображения двойной звезды HIP 74386 с расстоянием между компонентами около $0''5$ и разницей блеска более 4^m в полосе J .

В общей сложности 23 измерения шести звезд представлены в таблице 2, где в столбцах (1) и (2) даны номер звезды в каталоге Hipparcos и звездная величина объектов в полосе J , в столбцах (3) и (4) указаны параметры используемого фильтра и эпоха наблюдений (в долях бесселевого года), в столбцах (5)–(7) приведены полученное разделение ρ (в миллисекундах дуги), позиционный угол θ (в градусах) и разность блеска в звездных величинах. Для сравнения мы приводим измерения, выполненные в видимой области спектра с помощью спекл-интерферометра БТА видимого диапазона на базе камеры EMCCD Andor IXon Ultra 897 (Maksimov et al. 2009), эти данные отмечены звездочкой. Обращаем внимание на то, что ошибки для измерений ρ , θ и Δm являются формальными, полученными моделями спектров мощности. Реальные ошибки, связанные с ошибкой положения NIRS1 при установке и калибровке масштаба, могут быть на порядок больше.

Во время наблюдений HIP 40818 мы применили встроенную в программное обеспечение функцию удаления фоновой подложки. Эта процедура привела к значительному различию разностей блеска компонентов в фильтре 1225/50 нм. В дальнейшем мы отказались от применения всех видов посткоррекции и использовали только алгоритмы обработки, включенные в наш стандартный пакет.

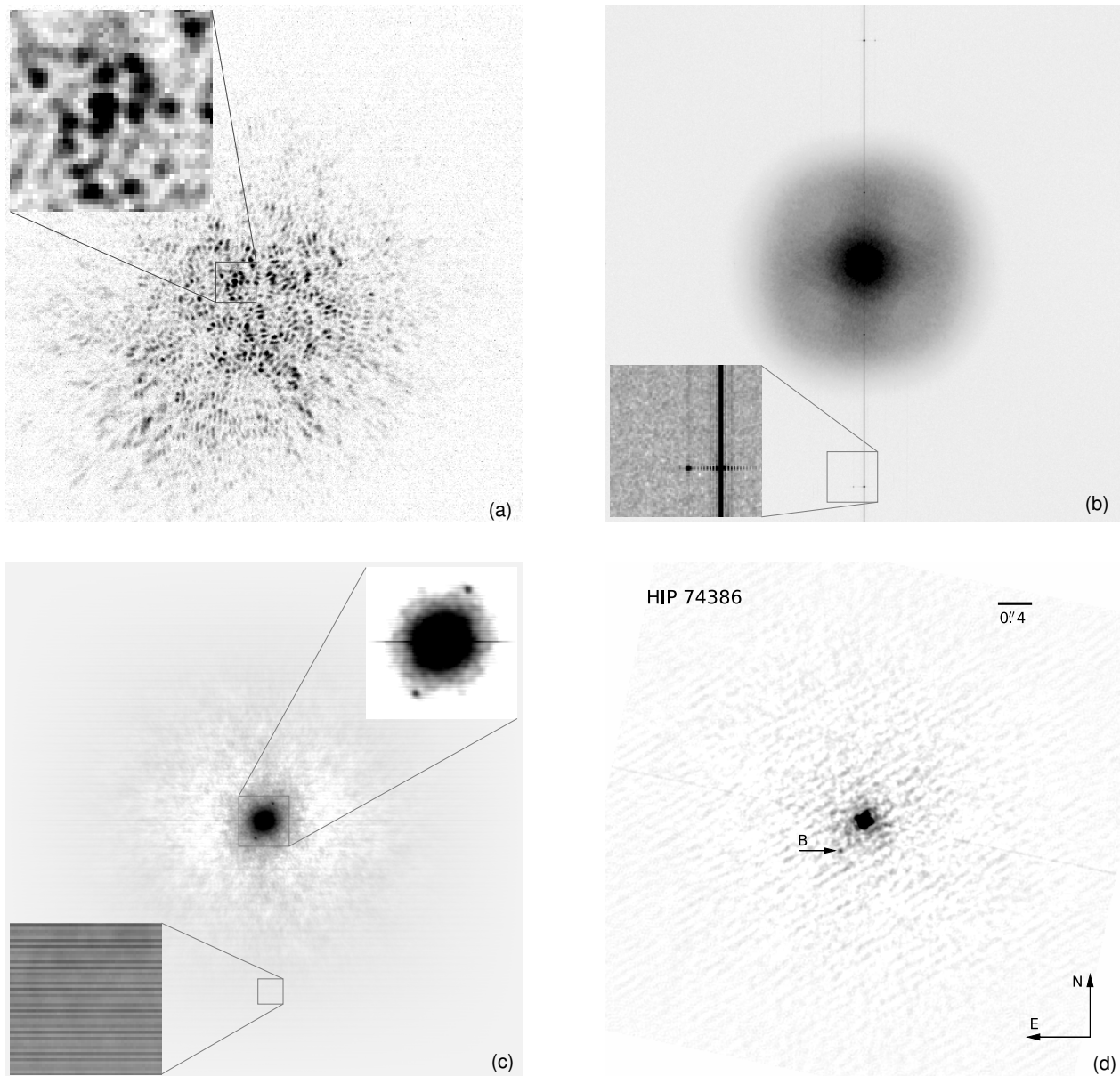


Рис. 5. Процесс восстановления двойной звезды HIP 74386: (a) — однократное спекл-изображение, полученное в феврале 2017 г с применением фильтра 1050/25 нм, (b) — усредненный спектр мощности из совокупности 1000 кадров, (c) — автокорреляционная функция, (d) — биспектральное восстановление изображения.

Ниже мы приводим краткие комментарии для двух отдельных систем из выборки.

HIP 74386 (COU 189) — пара, состоящая из M-гиганта и звезды неопределенного спектрального класса. Из-за медленного орбитального движения пара систематически используется для калибровки положений и относительных расстояний в звездной астрометрии двойных систем. Значения позиционного угла θ и расстояния ρ между компонентами для разных эпох наблюдений варьировались от 139° до 146° и от 441 mas до 510 mas соответственно (Vonneau et al. 1986, Al-Shukri

et al. 1996, Fu et al. 1997, McAlister and Hendry 1982, McAlister et al. 1984; 1987b; a; 1989; 1990, Hartkopf et al. 1994; 1997; 2000, Balega and Balega 1987, Balega et al. 1990; 1994; 1999, Mason et al. 2004, Scardia et al. 2007). Однако, несмотря на обилие наблюдательных данных, природа вторичного компонента в паре недостаточно ясна. Оцененная разность блеска в видимом диапазоне Mason et al. (2001), составила приблизительно 2^m8 . Наши спекл-наблюдения показали различия в диапазоне от 2^m2 до 2^m5 в видимой области спектра, воз-

Таблица 2. Позиционные параметры и разности блеска двойных. Измерения, полученные с помощью спекл-интерферометра БТА видимого диапазона, отмечены *. Резко отличающиеся значения помечены **

HIP	m_J , mag	$\lambda/\Delta\lambda$, nm	Epoch, year	ρ , mas	θ , deg	Δm , mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
40818	4.28	550/20*	2017.1085	221±1	52.2±0.1	0.43±0.01
		800/100*		221±1	52.3±0.1	0.40±0.01
		900/80	2017.1143	221±1	52.1±0.3	1.09±0.03
		1025/50		221±1	52.2±0.4	1.36±0.04
		1050/25		222±2	52.0±0.4	1.33±0.04
		1225/50		221±1	52.2±0.3	1.21±0.02
		1225/50		221±1	52.0±0.3	0.75±0.02
1600/50	221±1	52.0±0.3	0.93±0.02			
74386	1.69	550/20*	2016.4106	480±1	140.8±0.1	2.24±0.01
		1050/25	2016.4871	506±1**	139.6±0.3	4.05±0.02
		550/20*	2017.1064	481±1	140.8±0.1	2.45±0.01
		800/100*		481±1	140.9±0.1	3.84±0.02
		900/80	2017.1149	484±2	140.3±0.4	3.74±0.04
		1025/50		480±1	140.5±0.4	4.08±0.03
		1050/25		481±1	140.5±0.4	4.12±0.03
1225/50	482±1	140.4±0.4		3.76±0.06		
1600/50	481±2	141.5±0.4		4.12±0.04		
89455	7.02	900/80	2016.4873	185±1	327.8±0.4	1.24±0.05
		1225/50		184±1	328.0±0.4	1.58±0.05
		1600/50		221±3**	327.8±0.4	1.73±0.05
105438	5.66	900/80	2016.4904	719±1	238.9±0.3	0.59±0.02
		1025/50		720±1	238.9±0.3	1.10±0.03
		1050/25		720±1	238.9±0.3	1.36±0.03
		1225/50		719±1	238.9±0.3	0.93±0.02
		1600/50		719±1	238.9±0.3	1.17±0.03
107354	3.36	550/20*	2016.4711	136±1	261.0±0.1	0.27±0.01
		1225/50	2016.4905	142±1	260.4±0.3	0.33±0.01
		1600/50		141±1	260.5±0.3	0.35±0.01
110893	5.58	1225/50	2016.4876	1527±1	270.4±0.3	1.34±0.01
<i>ads</i> 7286	5.50	550/20*	2017.1063	1897±1	49.8±0.1	1.15±0.01
		800/100*		1898±1	49.8±0.1	0.92±0.01
		900/80	2017.1148			0.97±0.02
		1025/50				0.95±0.02
		1050/25				1.08±0.05
		1225/50				0.88±0.03
1600/50			0.80±0.05			

растая до 3^m8 на длине волны 800 нм. Новые инфракрасные данные могут позволить оценить температуру и яркость вторичного источника. В результате проведенных нами измерений в диапазоне от 900 до 1600 нм разности яркости варьируются от

3^m7 до 4^m1. На расстоянии 200 пк главной звездой в системе является гигант M4 с абсолютной звездной величиной около -1. Это указывает на то, что слабым компонентом системы должна быть

проэволюционировавшая звезда, принадлежащая к спектральному типу К5–К6.

HIP 89455 — самая слабая разрешенная звезда в выборке. Интегральные значения ее звездной величины в полосах J и H следующие: $m_J = 7^m.02$ и $m_H = 6^m.73$ (Cutri et al. 2003). Для полученных разностей величин $\Delta m_J = 1^m.58$ и $\Delta m_H = 1^m.73$ мы определили следующие значения для обоих компонентов: $m_1 = 7^m.25$ и $m_2 = 8^m.83$ в полосе J , $m_1 = 6^m.93$ и $m_2 = 8^m.66$ в полосе H . Девятая звездная величина в этих спектральных полосах близка к предельной для описываемого прибора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны первые спекл-интерферометрические наблюдения нескольких двойных звезд с помощью коммерчески доступной инфракрасной камеры SWIR Snake-640, установленной в первичном фокусе БТА САО РАН. В наблюдениях использовался оптический блок, специально разработанный для применения в ближнем ИК-диапазоне. Целью работы было проверить возможности камеры для проведения интерферометрических наблюдений и оценить полученную точность и предельные характеристики.

В ходе лабораторных испытаний NIRSI было выявлено, что темновой сигнал детектора имеет волнистую структуру. Кроме того, детектор имеет «плохие» пиксели, которые не полностью компенсируются стандартным программным обеспечением. Эти проблемы объясняются тем, что датчик камеры работает при недостаточно низкой температуре из-за ограничений производителя.

Звезды наблюдались в течение четырех технических ночей с 2016.47 до 2017.11. Спекл-интерферометрические данные были обработаны с помощью стандартного программного пакета, предназначенного для обработки и восстановления изображений в видимом свете. Мы установили, что предельная звездная величина системы в данной конфигурации близка к $m_J \approx 9^m$ в полосе J . Максимальная зарегистрированная разность блеска компонентов двойных систем составила $4^m.5$ в полосах J и H . Наличие «плохих» пикселей на изображениях с короткой экспозицией привело к значительному ухудшению качества окончательного восстановления изображения. В результате оно сопровождалось снижением точности измерений параметров двойных систем, в первую очередь фотометрических.

Увеличение предельных значений чувствительности прибора можно достигнуть путем уменьшения потерь света в приборе. Наиболее очевидным представляется применение интерференционных фильтров с более широкой (не менее 100 нм)

полосой пропускания. Кроме того, желательно использовать микрообъектив с увеличением не менее 4 в полосе H , что повысит плотность потока на пиксель детектора. Такие шаги позволят нам получить увеличение чувствительности на $1^m.5$, что позволит регистрировать изображения звезд 9-й и даже 10-й величины при хороших погодных условиях.

Используя интерферометр ближнего ИК-диапазона NIRSI на БТА САО РАН, мы получили новые данные об относительном положении и фотометрических свойствах компонентов шести двойных звезд. Для всех объектов был достигнут дифракционный предел 6-м зеркала, а именно: 40 mas при 1 μm и 65 mas при 1.6 μm . Эти результаты дополняют информацию о двойных, ранее накопленную в видимой части спектра.

Несмотря на то, что детектор, используемый в NIRSI, значительно уступает по своим характеристикам детекторам, охлаждаемым до азотных температур (HAWAII-II), для него существует довольно широкая область применения при изучении двойных и кратных звезд. Техническое усовершенствование камеры, в первую очередь достижение более низких температур матрицы, расширит спектр исследовательских задач, решаемых с помощью 6-м телескопа САО РАН в ближнем ИК-диапазоне.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны администрации обсерватории за предоставление времени наблюдений в резервные ночи на телескопе БТА.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение №05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. M. Al-Shukri, H. A. McAlister, W. I. Hartkopf, et al., *Astron. J.* **111**, 393 (1996).
2. I. I. Balega and Y. Y. Balega, *Pis'ma Astron. Zh.* **13**, 508 (1987).
3. I. I. Balega, Y. Y. Balega, I. N. Belkin, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **105**, 503 (1994).
4. I. I. Balega, Y. Y. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astron. and Astrophys.* **385**, 87 (2002).
5. I. I. Balega, Y. Y. Balega, A. F. Maksimov, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **140**, 287 (1999).
6. I. I. Balega, Y. Y. Balega, and V. A. Vasyuk, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **65**, 5 (1990).
7. D. Baroch, J. C. Morales, I. Ribas, et al., *arXiv:2105.14770* (2021).
8. D. Bonneau, Y. Balega, A. Blazit, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **65**, 27 (1986).
9. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog II/246* (2003).
10. C. D. Dressing and D. Charbonneau, *Astrophys. J.* **767** (1), 95 (2013).
11. H.-H. Fu, W. I. Hartkopf, B. D. Mason, et al., *Astron. J.* **114**, 1623 (1997).
12. W. I. Hartkopf, B. D. Mason, H. A. McAlister, et al., *Astron. J.* **119** (6), 3084 (2000).
13. W. I. Hartkopf, H. A. McAlister, B. D. Mason, et al., *Astron. J.* **108**, 2299 (1994).
14. W. I. Hartkopf, H. A. McAlister, B. D. Mason, et al., *Astron. J.* **114**, 1639 (1997).
15. K. H. Hofmann, Y. Balega, N. R. Ikhsanov, et al., *Astron. and Astrophys.* **395**, 891 (2002).
16. R. K. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting, et al., *Astrophys. J.* **765** (2), 131 (2013).
17. S. Kraus, G. Weigelt, Y. Y. Balega, et al., *Astron. and Astrophys.* **497** (1), 195 (2009).
18. A. F. Maksimov, Y. Y. Balega, V. V. Dyachenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **64**, 296 (2009).
19. B. D. Mason, W. I. Hartkopf, S. E. Urban, and J. D. Josties, *Astron. J.* **156** (5), 240 (2018).
20. B. D. Mason, W. I. Hartkopf, G. L. Wycoff, et al., *Astron. J.* **128** (6), 3012 (2004).
21. B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf, et al., *Astron. J.* **122** (6), 3466 (2001).
22. H. McAlister, W. I. Hartkopf, and O. G. Franz, *Astron. J.* **99**, 965 (1990).
23. H. A. McAlister, W. I. Hartkopf, B. J. Gaston, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **54**, 251 (1984).
24. H. A. McAlister, W. I. Hartkopf, D. J. Hutter, and O. G. Franz, *Astron. J.* **93**, 688 (1987a).
25. H. A. McAlister, W. I. Hartkopf, D. J. Hutter, et al., *Astron. J.* **93**, 183 (1987b).
26. H. A. McAlister, W. I. Hartkopf, J. R. Sowell, et al., *Astron. J.* **97**, 510 (1989).
27. H. A. McAlister and E. M. Hendry, *Astrophys. J. Suppl.* **49**, 267 (1982).
28. R. Osterbart, Y. Y. Balega, T. Blöcker, et al., *Astron. and Astrophys.* **357**, 169 (2000).
29. E. A. Pluzhnik, *Astron. and Astrophys.* **431**, 587 (2005).
30. M. Scardia, J. L. Prieur, L. Pansecchi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **374** (3), 965 (2007).
31. D. Schertl, Y. Y. Balega, T. Preibisch, and G. Weigelt, *Astron. and Astrophys.* **402**, 267 (2003).
32. G. Torres, J. Andersen, and A. Giménez, *Astron. and Astrophys.* **18** (1–2), 67 (2010).

Infrared Speckle Observations of Binary Stars at the BTA Telescope

A. S. Beskakotov¹, A. F. Maksimov¹, V. V. Dyachenko¹, A. A. Mitrofanova¹,
Yu. Yu. Balega¹, and D. A. Rastegaev¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia

Speckle observations of binary stars were performed in the 900–1600 nm infrared range with the 6-m SAO RAS telescope using the commercially available CCD camera SWIR Snake-640 with InGaAs 640 × 512 pixels sensitive area. Peltier cooling of the sensor allows reaching –30°C temperature of the CCD. The thermal noise of the CCD remains significantly high under such temperature. That limits the speckle interferometric application of the camera to approximately 9-th magnitude under moderate seeing conditions. To estimate other characteristics of the camera for interferometric application in the near-IR, we used it to measure separations, position angles and magnitude differences of some well-studied binary stars. Diffraction-limited angular resolution was achieved for each of the reconstructed images.

Keywords: *instrumentation: high angular resolution—methods: observational—binaries: visual—infrared: stars*