

## СИСТЕМА ОБРАБОТКИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ СНИМКОВ НА БАЗЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО УСКОРИТЕЛЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА РУПК-50

*Коваленко В.Б., младший научный сотрудник НИИ МВС им. академика А.В. Каляева ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», г. Таганрог, vereten@hotmail.ru*  
*Кочерга М.С., инженер-исследователь Южного научного центра РАН, г. Таганрог, regul105@list.ru*  
*Семерников Е.А., к.т.н., заведующий лабораторией Южного научного центра РАН, г. Таганрог, semernikov@mvs.tsure.ru*

**Ключевые слова:** астрофизические снимки, реконфигурируемый ускоритель, серии изображений, алгоритм обработки, вычислительная структура.

### Введение

В настоящее время реконфигурируемые вычислительные системы являются мощным вычислительным средством, с помощью которого можно решать многие задачи, в том числе и в реальном масштабе времени [1]. Одной из таких задач является выделение полезной информации из астрофизических снимков, искаженных турбулентностями атмосферы. Движения атмосферы вызывают постоянные колебания коэффициента преломления на пути распространения световой волны и являются одной из основных причин потери качества изображения при съемке космических объектов. Для решения этой проблемы в 1970 г. французским ученым А. Лабейри был предложен метод пространственной спекл-интерферометрии, основанный на анализе зернистой структуры изображений, получаемых при съемке звездных объектов [2]. Метод Лабейри предполагает накопление квадратов модулей спектров изображений, получаемых при фотографировании звездных объектов с короткими выдержками. При этом в накоплении могут участвовать несколько десятков тысяч изображений. Такой статистический анализ позволяет существенно повысить достоверность получаемой информации. Каждое обрабатываемое изображение представляет собой спекл-структуру, которая формируется при интерференции лучей света, попадающих в фокальную плоскость телескопа от разных участков объектива. Метод спекл-интерферометрии Лабейри успешно применяется при изучении кратных звездных систем в Специальной астрофизической обсерватории РАН с использованием шестиметрового телескопа БТА-6 [3]. Однако отсутствие вычислительных средств необходимой производительности приводило к тому, что обработка получаемых изображений производилась не в реальном масштабе времени, а по истечении нескольких недель, месяцев и даже лет после наблюдения. Эта проблема связана с отсутствием возможности обрабатывать поток изображений в темпе их поступления, так как количество операций для обработки одного изображения значительно превышает вычислительные

*Рассмотрены вопросы применения реконфигурируемого ускорителя на основе ПЛИС для получения информации в реальном масштабе времени из астрофизических снимков кратных звездных систем. Приводятся алгоритмы обработки серий изображений с короткими выдержками (спекл-интерферограмм), получаемых телескопом БТА-6, и описание вычислительных структур, созданных в поле ячеек ПЛИС реконфигурируемого ускорителя для реализации алгоритмов обработки.*

возможности персонального компьютера. Задержка в обработке изображений приводит не только к нерациональному использованию дорогостоящего оборудования телескопа, но и к утрате возможности продолжить исследования из-за изменения взаимного положения звезд по прошествии времени.

### Алгоритм обработки изображений

Опишем алгоритм обработки спекл-изображений в соответствии с методом Лабейри. Входными данными для алгоритма является поток спекл-интерферограмм. Каждая спекл-интерферограмма представляет собой изображение, элементы которого составляют двумерный массив из 512 строк и 512 столбцов. В ходе работы алгоритма размерность массива увеличивается до 1024 строк и 1024 столбцов. Это позволяет получить на выходе алгоритма более подробное спектральное изображение. Увеличение производится путем дополнения входного массива нулевыми отсчетами. При этом все строки и столбцы с номерами, следующими после 511, являются нулевыми. В итоге входной массив, над которым будут производиться последующие действия алгоритма, имеет вид, показанный на рис. 1.

Для получения спектра исходного изображения  $x(n_1, n_2)$  применяется алгоритм двумерного дискретного преобразования Фурье, которое определяется следующей формулой:

$$X_p(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} x(n_1, n_2) e^{-j(2\pi/N_1)n_1k_1} e^{-j(2\pi/N_2)n_2k_2},$$

$$k_1 = 0, \dots, N_1 - 1, k_2 = 0, \dots, N_2 - 1,$$

где  $x(n_1, n_2)$  - исходное изображение;  $X_p(k_1, k_2)$  - двумерный спектр исходного изображения.

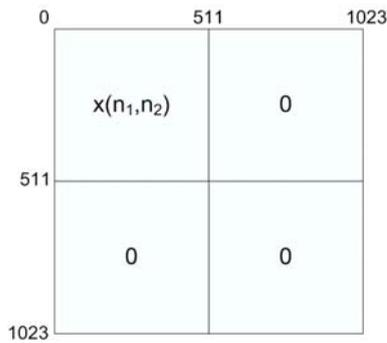


Рис. 1. Дополнение исходного изображения  $x(n_1, n_2)$  нулевыми столбцами и строками

Как известно, двумерный спектр может быть вычислен посредством алгоритма вычисления одномерного спектра. Для этого необходимо выполнить преобразование Фурье сначала над всеми строками, а затем произвести такое же преобразование над столбцами результата.

Алгоритм обработки потока снимков может быть разделен на 6 основных этапов:

1. Получение спектра  $X_p(m_1, m_2)$  всех строк изображения. Преобразование Фурье в пределах одной строки может быть вычислено, используя следующую формулу:

$$X_p(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} x(n_1) e^{-j(2\pi/N_1)n_1 k_1}; k_1=0, \dots, N_1-1, k_2=0, \dots, N_2-1.$$

2. Получение двумерного спектра изображения  $X_p(k_1, k_2)$ :

$$X_p(k_1, k_2) = \sum_{n_2=0}^{N_2-1} X_p(n_2) e^{-j(2\pi/N_2)n_2 k_2}; k_1=0, \dots, N_1-1, k_2=0, \dots, N_2-1.$$

3. Вычисление квадрата модуля двумерного спектра:

$$M_p(k_1, k_2) = \text{Re}[X_p(k_1, k_2)]^2 + \text{Im}[X_p(k_1, k_2)]^2.$$

4. Накопление текущего спектра со спектрами, полученными на предыдущих шагах:

$$S_p^*(k_1, k_2) = S_{p-1}(k_1, k_2) + M_p(k_1, k_2).$$

5. Нормировка суммы спектров мощности серии из  $NF$ -спекл-интерферограмм  $S_p^*(k_1, k_2)$ :

$$S_p(k_1, k_2) = \frac{\sum_{k=1}^{NF} S_p^*(k_1, k_2)}{NF}.$$

6. Центрирование двумерного спектра мощности.

При реализации алгоритма было учтено несколько особенностей структуры поступающих данных, что

позволило существенно сократить количество выполняемых вычислений. Во-первых, учитывался тот факт, что все строки с номерами больше 511 – нулевые. По этой причине расчет БПФ можно осуществлять лишь над половиной строк, представляющих собой ненулевые элементы входного массива. Во-вторых, при расчете БПФ над столбцами учитывалось свойство симметрии спектров действительных массивов, полученных на предыдущем шаге алгоритма. Это означает, что спектры значащих (ненулевых) строк являются симметрично-сопряженными  $X_p^*(e^{j\omega}) = X_p^*(e^{-j\omega})$ , и одноименные элементы столбцов с номерами  $k_2$  и  $N - k_2$ , где  $N$  – количество столбцов, будут комплексно сопряжены. Таким образом, достаточно вычислить спектры только половины столбцов, а спектры оставшейся половины могут быть получены по формуле  $F\{x^*[n]\} = X_p^*(e^{-j\omega})$  [4]. При использовании вышеперечисленных особенностей количество производимых операций для нахождения двумерного БПФ было уменьшено почти вдвое по сравнению с простым расчетом двумерного БПФ размера 1024x1024.

### Аппаратная поддержка вычислений

Однако даже с учетом сокращения операций вычислительная мощность системы, обрабатывающей изображения в темпе их поступления с камеры телескопа, должна составлять не менее 5,5 Гфлопс, что значительно превышает производительность современных персональных компьютеров. По этой причине для решения поставленной задачи необходимо использование специального ускорителя, способного поддерживать высокий темп обработки изображений.

В качестве такого ускорителя был использован РУПК-50 «Фекда», созданный в НИИ МВС ЮФУ в рамках Государственного контракта № 02.524.12.4002 «Создание семейства высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой архитектурой на основе реконфигурируемой элементной базы и их математического обеспечения для решения вычислительно трудоемких задач» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 гг.». Ускоритель РУПК-50 разработан на базе развиваемой в НИИ МВС ЮФУ концепции реконфигурируемых вычислительных систем.

Отличительной особенностью ускорителя РУПК-50 являются малые габариты и потребляемая мощность изделия при сохранении высокой производительности системы. Общий вид РУПК-50 представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид РУПК-50

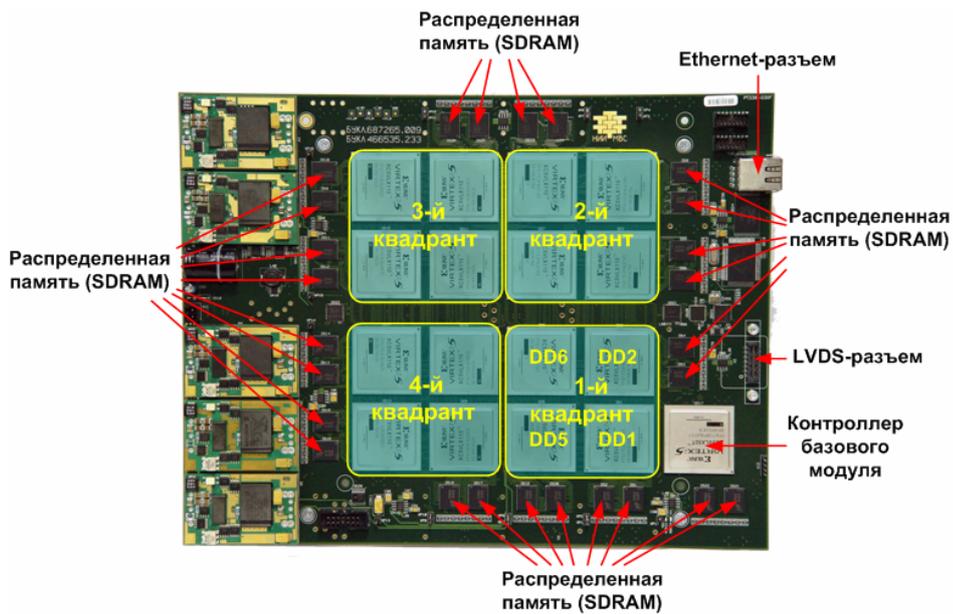


Рис. 3. Базовый модуль 16V5-50 ускорителя РУПК-50

Ускоритель РУПК-50 имеет в своем составе базовый модуль 16V5-50, который содержит 16 микросхем ПЛИС XC5VLX110-1FFG1153 фирмы Xilinx, соединенных между собой ортогональной системой связей по близкодействию. Большая часть микросхем сопряжена с распределенной памятью общим объемом 1,5 Гб. Для обмена данными с Host-контроллером базовый модуль оснащен LVDS- и Ethernet-разъемами. Обмен информацией между базовым модулем и Host-компьютером осуществляется под управлением контроллера базового модуля, размещенного в отдельной микросхеме ПЛИС. Общий вид базового модуля 16V5-50 представлен на рис. 3.

Обработка изображения в соответствии с описанным выше алгоритмом производится при помощи специаль-

ной вычислительной структуры, сформированной в поле ячеек ПЛИС – макрообъекта ЦОС-7.3. В общем случае макрообъект ЦОС-7.3 способен решать целый ряд задач цифровой обработки сигналов и изображений [1]. Настройка макрообъекта на решение той или иной задачи предметной области производится на программном уровне. В данном случае макрообъект настраивается на решение задачи вычисления и накопления квадратов модулей двумерных спектров изображений.

На рис. 3 представлена обобщенная структура макрообъекта ЦОС-7.3, сконфигурированного для обработки изображений в реальном масштабе времени. Макрообъект размещается в трех микросхемах DD1, DD2 и DD5 базового модуля 16V5-50, входящего в состав ускорителя персонального компьютера РУПК-50 «Фекда».

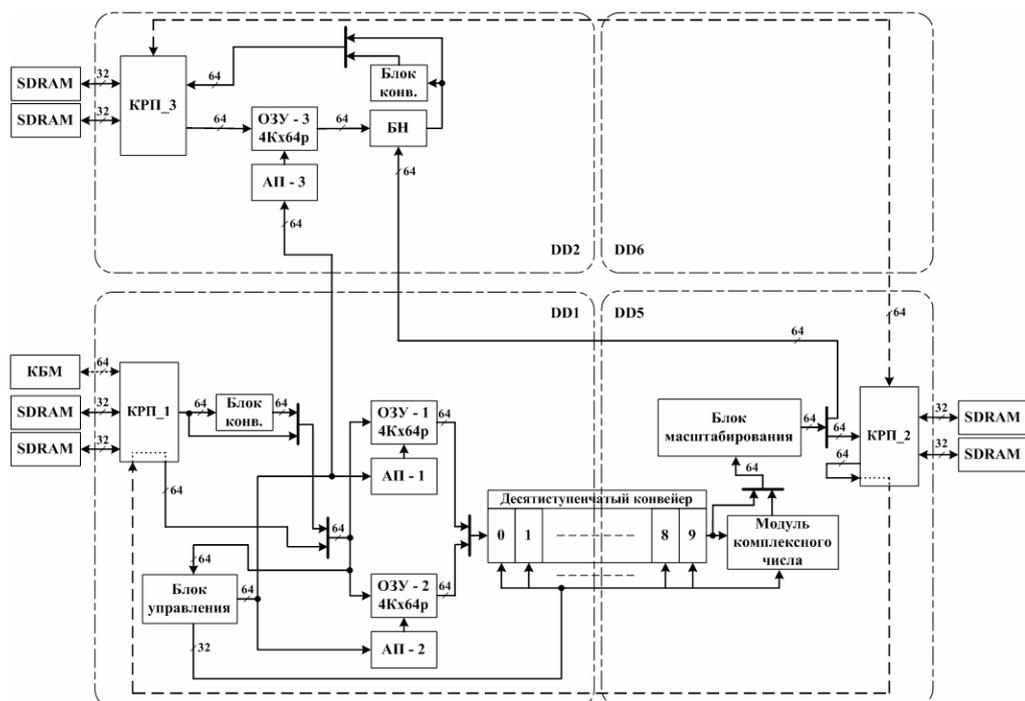


Рис. 4. Структура макрообъекта ЦОС 7.3

В состав макрообъекта ЦОС 7.3 входят следующие узлы:

- 1) контроллеры распределенной памяти – КРП\_1, КРП\_2, КРП\_3 с подключенными внешними блоками памяти SDRAM;
- 2) адресные процессоры для адресации двухпортовых ОЗУ – АП-1, АП-2, АП-3;
- 3) двухпортовые ОЗУ – ОЗУ-1, ОЗУ-2, ОЗУ-3;
- 4) десятиступенчатый конвейер, содержащий десять вычислительных блоков, в котором выполняется преобразование Фурье размером  $N = 1024$ ;
- 5) блок управления;
- 6) блок вычисления амплитуды (модуля) комплексного числа по формуле;
- 7) блок масштабирования;
- 8) блок накопления амплитудных спектров - БН;
- 9) блок конвертирования данных.

Исходное изображение поступает через контроллер базового модуля (КБМ) и записывается в SDRAM КРП\_1. Обработка начинается с поочередного считывания строк изображения через блок конвертирования микросхемы DD1 в ОЗУ-1 или ОЗУ-2, которые работают в дуплексном режиме. Каждый элемент поступающего изображения кодируется целым беззнаковым 16-разрядным числом. Для вычисления спектра 16-разрядные числа преобразуются в 32-разрядные с плавающей точкой в соответствии со стандартом IEEE-754. Преобразование форматов производится в блоке конвертирования данных. Преобразованные в формат с плавающей запятой элементы строки из ОЗУ-1 или ОЗУ-2 подаются в вычислительный конвейер, где над каждой строкой выполняется алгоритм БПФ. Промежуточные данные записываются в SDRAM КРП\_2. Таким образом, обрабатываются все строки. На втором этапе промежу-

точные данные считываются по столбцам из SDRAM КРП\_2 в ОЗУ-1 или ОЗУ-2, также работающие в дуплексном режиме, и из них подаются в вычислительный конвейер, где над столбцами выполняется алгоритм БПФ размером  $N=1024$ . Элементы двумерного спектра подаются через блок вычисления модуля и масштабирования в блок накопления в виде элементов амплитудного спектра текущего изображения. В блоке накопления происходит суммирование элементов текущего спектра с ранее накопленными значениями, поступающими из SDRAM КРП\_3. Новое значение результатов накопления записывается в SDRAM КРП\_3. Вывод результатов вычисления на визуализацию в персональный компьютер происходит через блок конвертирования и КБМ [5]. Все вычисления в ЦОС-7.3 выполняются в соответствии со стандартом IEEE-754 одинарной точности.

### Включение РУПК-50 в контур наблюдения телескопа БТА-6

РУПК - 50 включается в систему спекл-интерферометрии в соответствии со следующей схемой:

Как показано на рис. 5, система наблюдения за кратными звездными системами включает два персональных компьютера IBM PC1 и IBM PC2, фотокамеру телескопа БТА, РУПК-50. Камера телескопа фиксирует изображение и передает его по оптическим каналам на IBM PC1. Компьютер IBM PC1 осуществляет хранение получаемых изображений и их передачу по Gigabit Ethernet на ускоритель РУПК-50, где происходит обработка изображений в соответствии с алгоритмом. По окончании обработки очередного изображения РУПК-50 по каналам LVDS передает результат на персональный компьютер IBM PC2 для его визуализации.

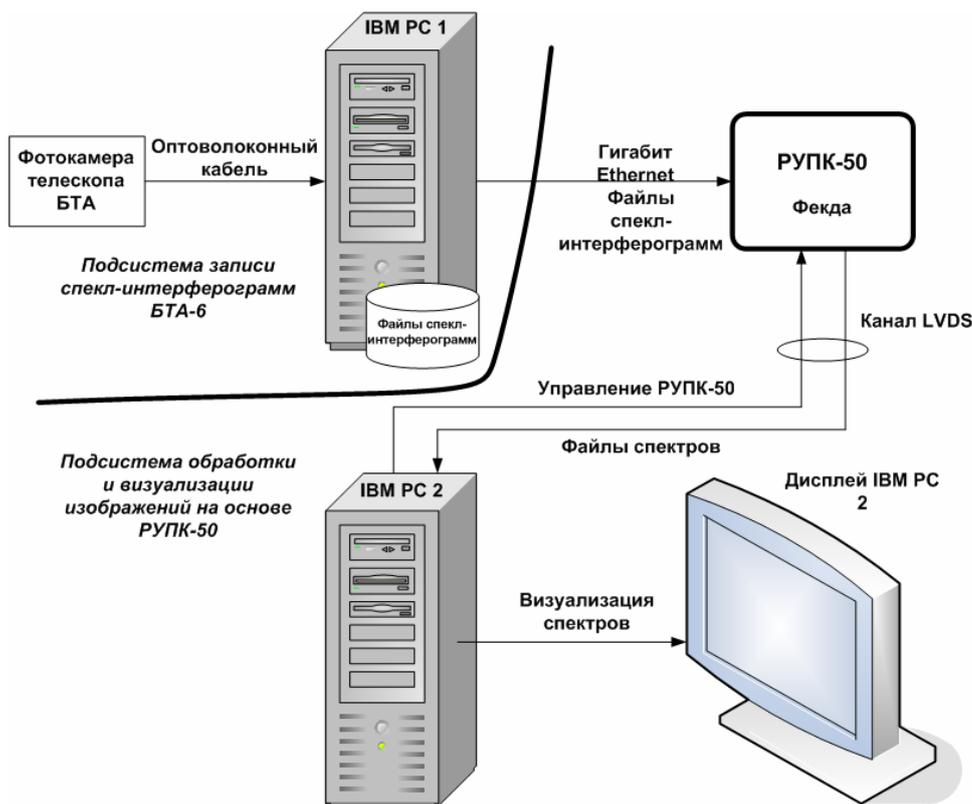


Рис. 5. Схема подключения РУПК-50 в систему наблюдения БТА-6

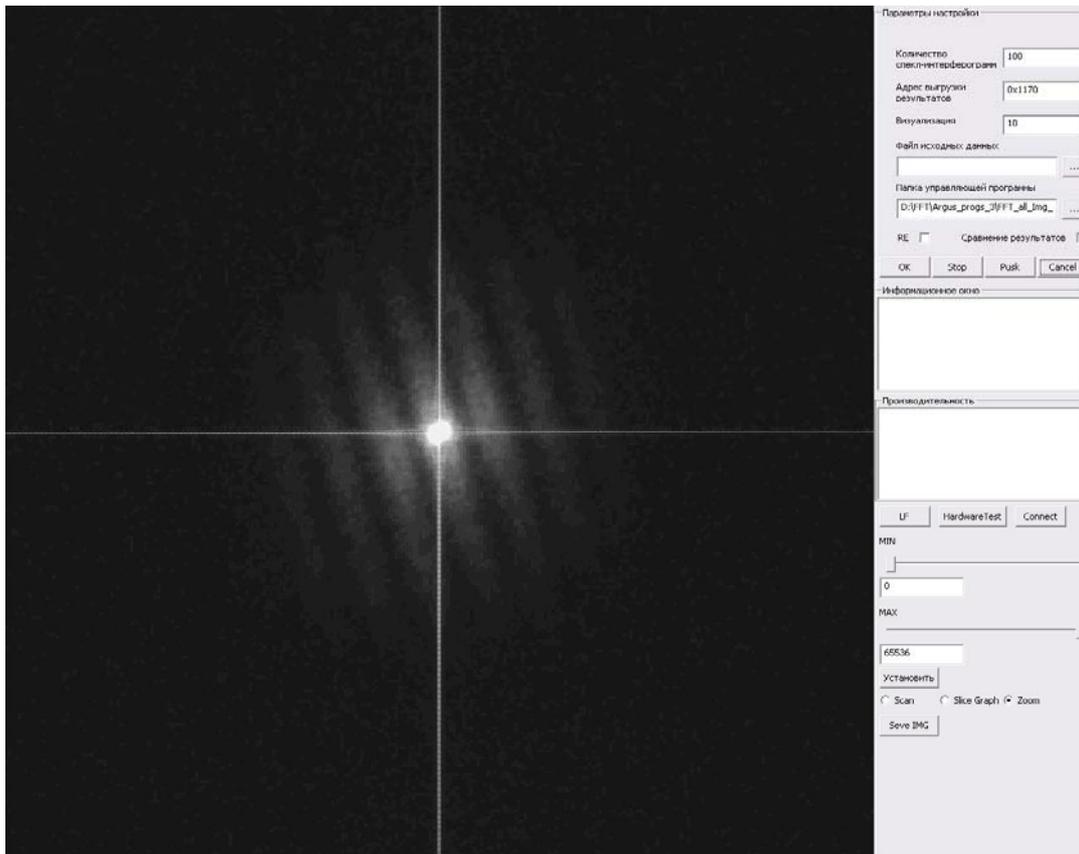


Рис. 6. Оконная форма управляющей программы

### Управление процессом наблюдения

Для визуализации накопленных спектров мощности и управления процессом наблюдения разработана программная оболочка, представленная на рис. 6.

В программу визуализации включены следующие графические инструменты: приближение выводимого изображения, срез яркости по проведенной пользователем линии, показатели яркости в выбранной точке спектра, изменения верхней и нижней границ яркости визуализации, сохранение накопленного спектра в формате jpg. Помимо этого в информационной части экранной формы выводится установочная и оценочная информация о процессе обработки спекл-интерферограмм. Все перечисленные инструменты помогают пользователю более детально рассмотреть накопленный спектр и позволяют получать из него как можно более полную информацию.

### Заключение

Включение ускорителя персонального компьютера РУПК-50 в контур обработки астрофизических снимков позволило извлекать из них полезную информацию в темпе ее поступления. В результате исследователи получили возможность принимать квалифицированное решение о продолжении наблюдений или об их прекращении, что, в свою очередь, существенно повысило эффективность использования уникального оборудования телескопа БТА-6.

Реконфигурируемый ускоритель РУПК-50 обладает значительными резервами производительности, что позволяет в дальнейшем использовать его для обработ-

ки изображений размером 1024x1024 пикселей, поступающих от перспективных фотоприемных устройств, которые планируется использовать в ближайшем будущем.

Возможности реконфигурируемой структуры РУПК-50 позволяют достаточно просто изменять обработку информации вслед за изменением алгоритмов решаемых задач. Реконфигурируемые ускорители могут использоваться не только для задач обработки изображений, но и для задач обработки сигналов в радиолокации, задач диаграммоформирования в радиолокаторах с фазированными антенными решетками и для других задач, где требуется высокая реальная производительность вычислительных средств.

### Литература

1. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / Изд. 2-е перераб. и доп. / под общ. редакцией И.А. Каляева. – Ростов н/Д: Издательство ЮНЦ РАН, 2009. – 334 с.
2. Labeyrie A., Astron. Astrophys., 1970, 6, 85.
3. Maksimov A.F. et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs., 2003, 56, 102.
4. Опенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Опенгейм, Р. Шафер. – М.: 2006. – 856 с.
5. Семерников Е.А., Кочерга М.С., Малоголовец Е.В. Обработка астрофизических снимков на реконфигурируемых вычислительных системах // Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы (МВУС-2009) // Материалы Международной научно-технической конференции. Т.1. – Таганрог: изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 242 с., с.58 – 62.