

УДК 621.37:621.391

Е.И. Жилин

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*На основе результатов анализа существующих методов корреляционной обработки оптических сигналов и изображений проведено имитационное моделирование и экспериментальные исследования их эффективности и реализуемости при решении задач обнаружения сигналов. Приведены результаты корреляционной обработки (обнаружения) астрофизических объектов на снимках колец Сатурна. Сделаны выводы об эффективности применения рассмотренных методов в системах распределенной обработки результатов астрофизических исследований.*

**Ключевые слова:** корреляционная обработка, оптический сигнал, астрофизические исследования.

### Введение

На сегодняшний день оптико-электронные средства остаются важнейшим источником информации об исследуемых астрофизических объектах и явлениях, получаемой с борта межпланетных станций. Применение современных высокоэффективных технологий обработки, сжатия и передачи видеoinформации позволяют существенно увеличить объемы видеоданных передаваемых с бортов космических аппаратов. Возрастающие объемы данных ставят перед центрами приема и обработки информации ведущих космических агентств мира и руководством научных проектов новые задачи о своевременности и качестве обработки потока изображений передаваемых с межпланетных станций [1, 2].

На практике, когда существует априорная неопределенность о параметрах наблюдаемого астрофизического явления или объекта, задачи поиска, обнаружения и идентификации трудно поддаются формализации и не могут быть полностью автоматизированы при обработке снимков. При этом временные затраты на ручную обработку изображений квалифицированным персоналом порой несоизмеримы с длительностью самих проектов, и тем более с продолжительностью моментов, благоприятных для наблюдения изучаемых объектов. Как альтернатива, в рамках обработки результатов ряда научно-исследовательских проектов открыты программы по распределенной обработке результатов наблюдений и экспериментов. Примером тому могут служить проекты по обработке сканов кювет с аэрогелем по программе Stardust с целью поиска кометного вещества (Wild 2), содержащегося в них, а также проект по обработке изображений колец Сатурна с целью обнаружения изображений эффекта «пропеллера» [2, 3]. Согласно этим проектам, пользователю (он или offline) предоставляется архив изображений для дальнейшей обработки. Чаще всего такая обработка сводится к визу-

альному поиску и обнаружению исследователем искомого объекта. Однако трудно поддающиеся прогнозу временные затраты и влияние человеческого фактора являются причиной низкого качества результатов обработки изображений и обесценивания результатов исследования [2, 3].

В то же время, известны и описаны в работах по теоретическим и прикладным исследованиям множество методов обработки изображений, основными направлениями применения которых являются: повышение качества изображений для улучшения визуального восприятия и автоматическая обработка изображений в системах технического зрения [4 – 9]. Анализ возможности применения некоторых методов обработки изображений для решения задач автоматизации обнаружения изображений исследуемых астрофизических объектов (явлений) и является целью данной статьи.

### Анализ вопроса

Вопросам обнаружения сигналов посвящено значительное количество работ. Их рассмотрение в литературе по радиоэлектронике, цифровой обработке сигналов, оптической локации и статистической радиотехнике связано с рассмотрением задачи синтеза оптимального решающего правила по заданному критерию качества. Задача обнаружения изображения объекта в кадре, в общем случае, может быть сведена к задаче статистического синтеза алгоритма обработки принимаемой реализации аддитивной смеси сигнала и помехи для получения соответствующих статистических выводов о наличии или отсутствии сигнала в поле зрения оптико-электронной системы (ОЭС) [10, 11]. В работе [12] подробно рассмотрена задача синтеза такого алгоритма. Здесь решена задача обнаружения оптического сигнала, описываемого в фокальной плоскости произвольной детерминированной функцией  $w(x, y)$  на фоне аддитивной поме-

хи  $g(x, y)$  со средним  $m_g$  и дисперсией  $\sigma_g^2$ , которая может быть охарактеризована, в общем случае, гауссовским распределением. Таким образом, в [12] получено аналитическое описание достаточной статистики логарифма отношения правдоподобия

$$L = \frac{Y(x_0, y_0)}{N_0}, \quad (1)$$

где

$$Y(x_0, y_0) = \iint_{x, y} n(x, y) s(x - x_0, y - y_0) dx dy \quad (2)$$

корреляционный интеграл;  $n(x, y) = g(x, y) + w(x, y)$  – изображение, формируемое в фокальной плоскости ОЭС, реализация аддитивной смеси сигнальной и помеховой составляющей;  $s(x - x_0, y - y_0)$  – строб, формируемый в соответствии с параметрами ожидаемого сигнала;  $N_0$  – спектральная плотность шума, которая, при условии согласования полос принимаемой аддитивной смеси и приемника равна  $N_0 = \sigma_g^2$ .

Там же получены выражения для условной вероятности ложной тревоги  $F$ , условной вероятности правильного обнаружения  $D$  и отношения с/ш  $\phi$ :

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \int_{Y_0}^{\infty} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma_Y^2}} dY, \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \int_{Y_0}^{\infty} e^{-\frac{(Y - m_{Y_w})^2}{2\sigma_Y^2}} dY, \quad (4)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{2E}{N_0}} \quad (5)$$

или

$$\phi = \sqrt{\frac{n_{str} I_0^2}{\sigma^2}}, \quad (6)$$

где  $E$  – полная энергия принимаемого сигнала при оптимальном соответствии параметров принимаемого и ожидаемого сигналов;  $I_0$  – амплитуда сигнальной составляющей в элементе изображения;  $x_0, y_0$  – координаты центра пространственного распределения сигнальной составляющей в плоскости изображения;  $\Delta x, \Delta y$  – линейные размеры пространственного распределения сигнальной составляющей в плоскости изображения;  $n_{str} = \Delta x_{str} \times \Delta y_{str}$  – площадь стоба с соответствующими линейными размерами.

Из (1) и (2) очевидно, что в рассматриваемой постановке задачи оптимальный обнаружитель является корреляционным. Действительно, в [13 – 16] приводятся доказательства статистической оптимальности корреляционных алгоритмов обнаружения сигналов, однако в большинстве случаев, в отличие от [12], рассматривается задача обнаружения радиолокационных (радиотехнических) сигналов, что на-

кладывает ряд ограничений на применение получаемых алгоритмов в задачах обработки оптических изображений. С другой стороны, представляет интерес анализ практической реализуемости, работоспособности и оценки эффективности разработанного в [12] метода по результатам обработки имитационных изображений и реальных изображений объектов астрономических и астрофизических исследований.

### Имитационное моделирование

В соответствии с приведенными выражениями (1) и (2) оптимальный обнаружитель реализует формирование стоба, форма и пространственное положение которого соответствует параметрам ожидаемого сигнала, его перемножение с принятой реализацией, интегрирование полученного произведения по площади изображения и сравнение вычисленного корреляционного интеграла с заданной величиной порога. При этом условием оптимальности описанного алгоритма обнаружения является наличие точных априорных данных о форме и пространственном положении сигнала в плоскости изображения используемых в последствии для формирования стоба. Случай, когда пространственное положение сигнала точно априори не известно, анализу в работе [12] не подвергался. Ответ о наличии сигнала с неизвестным положением в плоскости изображения может быть дан при установлении факта наличия сигнала для различных значений его пространственного положения с точностью, не превышающей разрешающую способность ОЭС в целом. Таким образом, отсутствие априорных данных о пространственном положении сигнала в плоскости изображения может быть компенсировано применением многоканальных схем корреляционной обработки с параллельным или последовательным формированием стобов. В отличие от одноканальной схемы построения корреляционного обнаружителя для многоканальной схемы свойственно формирование на ее выходе корреляционной матрицы, элементы которой содержат вычисленные значения корреляционного интеграла для каждого положения стоба в плоскости изображения, а размерность определяется количеством элементов разрешения, содержащихся в исходном дискретном изображении. При этом процедура сравнения с порогом должна проводится для каждого элемента «корреляционного» изображения, что, в общем случае, приводит к увеличению вычислительных затрат относительно одноканальной обработки, пропорционально размеру обрабатываемого изображения. Однако здесь необходимо отметить, что, несмотря на возникающие трудности вычислительного характера при реализации многоканальной обработки изображений, совместное применение специальных методов вычислительной математики и современной технической базы позволяет проводить указанную обработку в режиме реального времени.

С целью подтверждения полученных результатов теоретических исследований было проведено имитационное моделирование, включавшее в себя формирование тестового (исходного) изображения с заданным отношением  $c/\text{ш}$ , его корреляционную обработку и бинарное квантование с порогом, обеспечивающим значение вероятностных характеристик обнаружения не ниже заданных. Формирование тестового изображения выполнялось путем имитационного моделирования детерминированного сигнала прямоугольной формы, постоянной амплитуды  $I_0 - \text{const}$  (рис. 1, а) и шума с нормальным распределением, средним  $\bar{p}_{\text{ш}} \neq 0$ , и дисперсией  $\sigma_{\text{ш}}^2 = \bar{p}_{\text{ш}}$  (рис. 1, б). Вычитание постоянной составляющей шума из аддитивной смеси сигнала и помехи (рис. 1, в) позволило осуществить переход к квазибелой шумовой помехе. Таким образом, было получено тестовое изображение (рис. 1, г) соответствующее условиям и допущениям, принятым в ходе теоретических исследований, и значением отношения  $c/\text{ш}$  близким к  $\varphi \approx 1,2$  в одном элементе разрешения.

Корреляционная обработка тестового изображения была реализована программно, согласно алгоритма построенного на основе выражений (1, 2), приведенных к дискретному виду. При этом стробирование изображения осуществлялось последовательным сдвигом по строкам и столбцам дискретного изображения строба, форма и амплитуда которого соответствовала ожидаемому сигналу. Как видно из рис. 2, а, при площади строба  $n_{\text{стр}} = 1$  ( $1 \times 1$  элемент разрешения), «корреляционное» изображение соответствует тестовому, а процедура корреляционного обнаружения идентична процедуре энергетического обнаружения сигнала с предварительным усилением по мощности.

В силу инвариантности критерия Неймана-Пирсона к выбору рода стабилизируемой ошибки обнаружения, для большей наглядности качества результатов обнаружения, в качестве стабилизируемой, была выбрана ошибка обнаружения первого рода. В этом случае обнаружение сигнала производилось по порогу, обеспечивающему значение условной вероятности правильного обнаружения на уровне  $D \approx 0,9$ . Представленное на рис. 3, а пространственное распределение значений корреляционного интеграла по поверхности изображения позволяет проиллюстрировать «низкое» качество обнаружения сигнала при малых значениях отношения  $c/\text{ш}$ , где проявляется преобладание шумовой составляющей изображения над сигнальной.

В случае единичного строба, как и в случае тестового изображения, при значении отношения  $c/\text{ш}$   $\varphi \approx 1,2$  и фиксированной условной вероятности правильного обнаружения  $D \approx 0,9$ , условная вероятность ложной тревоги составила  $F \approx 0,5$  (рис. 4, а), что объясняется наличием большого количества «ложных» шумовых выбросов, соизмеримых по амплитуде с сигнальными (рис. 3, а).

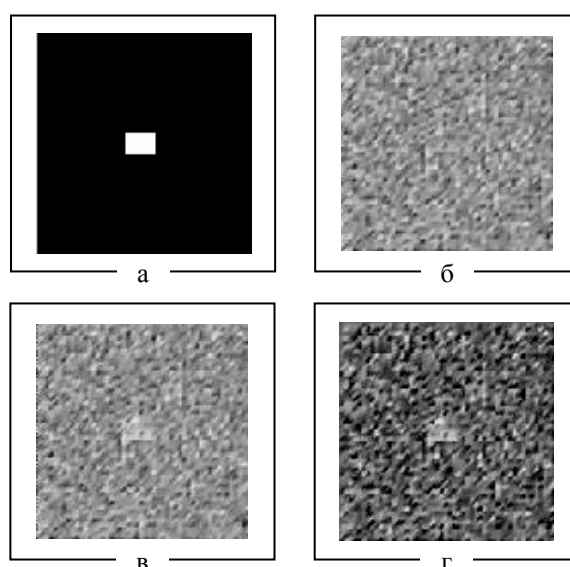


Рис. 1. Результаты формирования тестового изображения (имитационное моделирование)

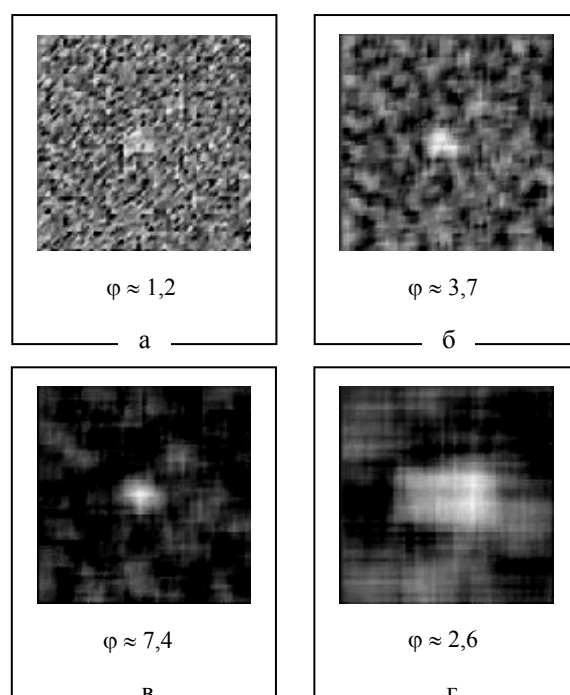


Рис. 2. Результаты корреляционной обработки тестового изображения

В случае оптимального согласования параметров строба с размерами, формой и интенсивностью принимаемого сигнала  $n_{\text{стр}} = n_{\text{опт}}$  алгоритм корреляционного обнаружения сигнала обеспечивает на выходе максимальное значение отношения  $c/\text{ш}$  (рис. 2, в) и наилучшее (в смысле выбранного критерия) соотношение условных вероятностных характеристик обнаружения (рис. 4, в).

При оптимальном выборе строба «пиковое» значение корреляционного интеграла обеспечивается в точке соответствующей совпадению энергетического центра строба и принимаемого сигнала (рис. 3, в), а отношение  $c/\text{ш}$  увеличивается по сравнению с исходным изображением пропорционально  $\sqrt{n_{\text{стр}}}$  раз.

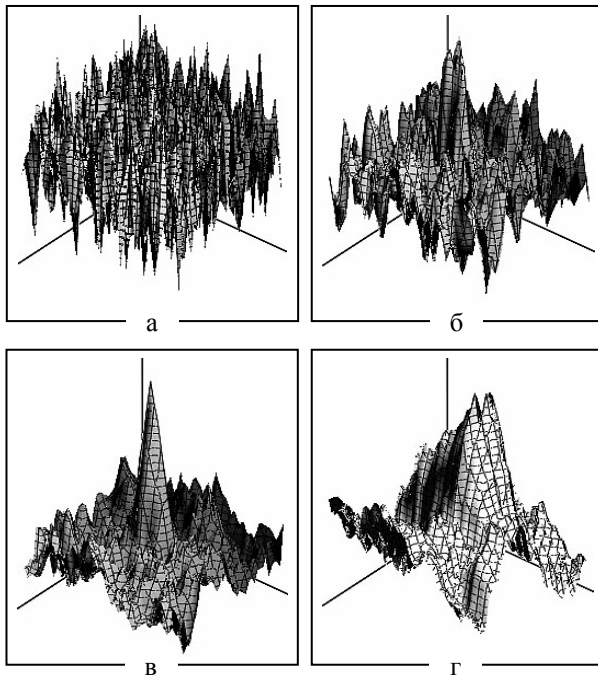


Рис. 3. Пространственное распределение значений корреляционного интеграла тестового изображения

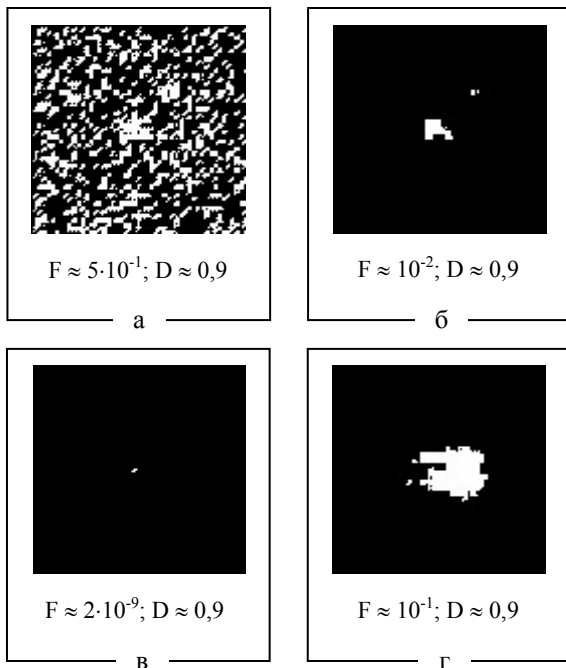


Рис. 4. Результаты бинарного квантования корреляционных «изображений»

На практике, когда параметры ожидаемого сигнала априорно не известны, возможен переход к использованию квазиоптимальных алгоритмов обнаружения. В этом случае потери в качестве корреляционной обработки изображения могут быть вызваны не соответствием параметров строба реально принимаемому сигналу. На рис. 2, б, г представлены результаты обработки исходного изображения для случая когда размеры строба меньше  $n_{str} = 0,25 \cdot n_{opt}$  и, соответственно, больше  $n_{str} = 8 \cdot n_{opt}$  пространственных размеров сигнала. Как видно, такое несоответствие ожидаемого сиг-

нала принимаемому приводит к ухудшению отношения с/ш и вероятностных характеристик обнаружения по сравнению с оптимальным приемом. Однако, несмотря на это применение квазиоптимальных алгоритмов позволяет получить выигрыш относительно исходного изображения так же пропорциональный  $\sqrt{n_{str}}$  раз. Неоднозначность в обнаружении сигнала при использовании квазиоптимальных стробов (рис. 4, б, г) хорошо иллюстрируется рельефом «корреляционного» изображения (рис. 3, б, г), где видно «размытие» и «дробление» его пика, что обусловлено в свою очередь, отсутствием приращения значения корреляционного интеграла в области изображения, содержащего сигнал, при перемещении строба вдоль него.

### Экспериментальные исследования

Эффективность методов корреляционной обработки и адекватность математической и имитационной моделей подтверждаются результатами экспериментов по обнаружению пропеллерообразных образований в кольцах Сатурна (рис. 5, а), изображения которых получены в ходе миссии Cassini и описаны на официальном сайте NASA [2], а также в журнале Nature от 30 марта 2006 г.

Результаты экспериментальных исследований метода корреляционной обработки на примере обнаружения неоднородностей в изображениях колец Сатурна представлены на рис. 6 и 7. Для обработки изображения использовались стробы различной формы. Оптимальный строб был получен из исходного изображения (рис. 5, а). Результат корреляционной обработки показан на рис. 6, а, а сечение данного изображения – на рис. 6, в. Как видно из данного рисунка, корреляционный интеграл достигает максимума при совмещении исходного изображения и строба. В результате пороговой обработки (рис. 6, б), получаем единственную точку, соответствующую данному условию. Однако, применение оптимального строба в подавляющем большинстве случаев с практической точки зрения невозможно, иначе это соответствовало бы ситуации, когда объект уже обнаружен и пространственные параметры его изображения известны. Поэтому на практике имеет место ситуация, когда ожидаемый сигнал (изображение объекта) описываются в площади изображения квазиоптимальным стробом, параметры которого могут быть выбраны исходя из знаний о природе возникновения наблюдаемого астрофизического явления (процесса). Так, в ходе исследований для обнаружения пропеллерообразного образования в кольцах Сатурна использовался бинарный строб, состоящий из двух прямоугольных полустробов, взаимное положение и размеры которых соответствовали наблюдаемому явлению. Результаты, полученные для случая применения бинарного строба в корреляционной обработке исходного изображения, представленные на рис. 7. После корреляционной обработки исходного изображения квазиоптимальным стробом в области совпадения изображения пропеллера и строба наблюдается максимум (рис. 7, а, в).

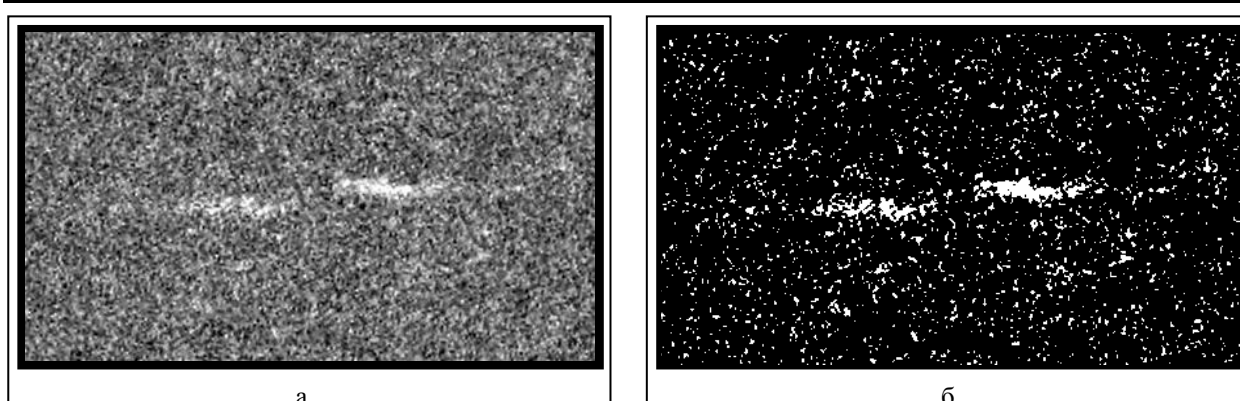


Рис. 5. Бинарное квантование изображения эффекта «пропеллера» порожденного микроспутником внутри колец Сатурна:  
а – исходное изображение (442 x 254); б – бинарное квантование исходного изображения

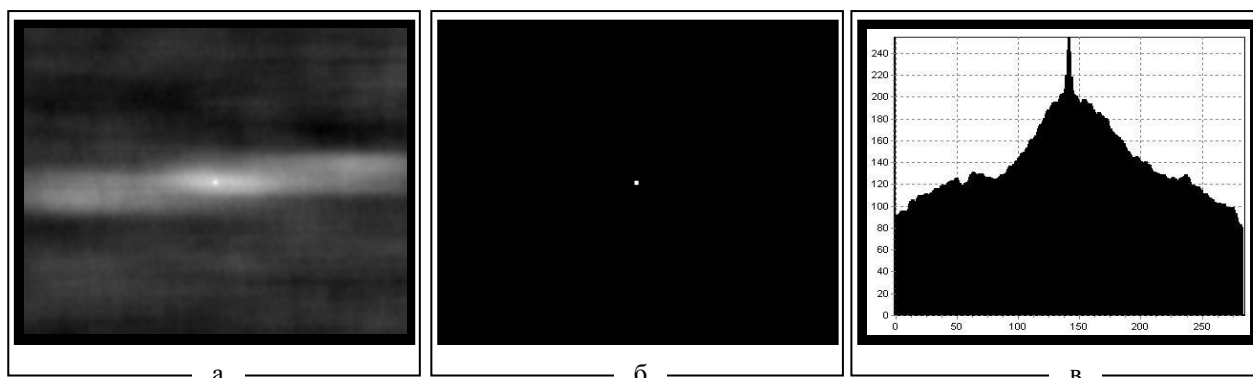


Рис. 6. Оптимальная корреляционная обработка:  
а – «корреляционное» изображение; б – бинарное квантование «корреляционного» изображения;  
в – сечение «корреляционного» изображения по строке

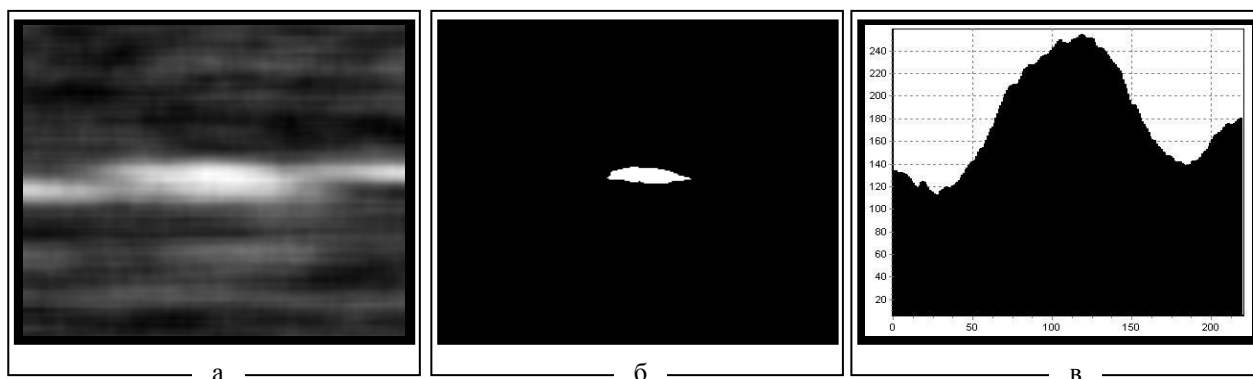


Рис. 7. Квазиоптимальная корреляционная обработка бинарным стробом:  
а – «корреляционное» изображение; б – бинарное квантование «корреляционного» изображения;  
в – сечение «корреляционного» изображения по строке

В отличие от оптимальной обработки данный максимум более размыт. После применения процедуры порогового обнаружения (рис. 7, б, в) образуются ложные отметки, однако их положение в плоскости изображения близко к истинному.

### Выводы

Совпадение теоретических результатов, полученных в [12], и результатов проведенных экспериментальных исследований (имитационного моделирова-

ния) подтверждают эффективность корреляционного метода обнаружения оптических сигналов. При этом эффективность данного метода проявляется при обнаружении изображений протяженных объектов пропорционально их площади и имеет смысл при размере изображения объекта  $n > 1$ . В противном случае ( $n = 1$ ), процедура корреляционного обнаружения сводится к известному методу энергетического обнаружения сигналов.

Квазиоптимальная реализация корреляционно-

го алгоритма обнаружения может быть обусловлена отсутствием точных априорных данных о форме и структуре сигнала и ведет к потере качества обнаружения относительно оптимального аналога. В этом случае, потери в качестве обнаружения будут вызваны потерей энергии сигнала либо увеличением дисперсии помехи, в зависимости от соотношения площадей (формы) строга и сигнала.

Применение корреляционных методов обнаружения оптических сигналов в системе распределенной обработки астрофизической информации возможно в качестве операции предварительной обработки, для выявления наиболее вероятных областей изображения содержащих искомые объекты. Учитывая наличие последующей обработки данных изображений и важность содержащейся в них информации, выбор порога обнаружения целесообразно осуществлять по критерию максимума условной вероятности правильного обнаружения. Такой подход позволит минимизировать пропуск в изображении искомого объектов.

В заключение необходимо отметить, что применение квазиоптимальных алгоритмов корреляционного обнаружения сигнала приводит к существенному искажению формы принимаемого сигнала и, как следствие, к потере информации о его структуре. Однако предложенный алгоритм обработки изображения обеспечивает на выходе максимум отношения с/ш и условной вероятности правильного обнаружения при фиксированном значении условной вероятности ложной тревоги, что является оптимальным с точки зрения выбранного критерия обнаружения и полностью удовлетворяет поставленной задаче.

### Список літератури

1. Глобальна стратегія досліджень – основи координаційного процесу. – К.: НКАУ, 2007. – 36 с.
2. Информационный ресурс НАСА [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov).

3. Информационный ресурс *stardustahome* [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [www.stardustahome.ssl.berkeley.edu](http://www.stardustahome.ssl.berkeley.edu).

4. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, А.А. Рожнецов, Р.Г. Хафизов, И.Л. Егошина, А.Н. Леухин; Под ред. Я.А. Фурмана; 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.

5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р.Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

7. Быков Р.Е. Цифровое преобразование изображений / Р.Е. Быков, Р. Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцетов. – М.: Телеком, 2003. – 228 с.

8. Москвитин С.В. Теоретические основы оптической локации / С.В. Москвитин, А.И. Стрелков. – Х.: ВИРТА ПВО, 1992. – 369 с.

9. Писаревский А.Н. Системы технического зрения / А.Н. Писаревский, А.Ф. Чернявский и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 432 с.

10. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов / К. Хелстром. – М.: Иностр. лит., 1963. – 432 с.

11. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

12. Стрелков А.И. Обнаружение сигналов в системах технического зрения / А.И. Стрелков, Е.И. Жилин, А.П. Лытюга, А.С. Калмыков, С.А. Лисовенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2006. – Вып. 145. – С. 178-184.

13. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

14. Ширман Я.Д. Основы теории радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Д. Голиков. – Х.: АРТА СА, 1962. – 204 с.

15. Алмазов В.Б. Основы теории радиолокации / В.Б. Алмазов. – Х.: ВИРТА ПВО, 1992. – 204 с.

16. Гришин Ю.П. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.

Поступила в редколлегию 9.12.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Стрелков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ВИЯВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛЕНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ АСТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

С.І. Жилін

На основі результатів аналізу існуючих методів кореляційної обробки оптичних сигналів і зображень проведено імітаційне моделювання та експериментальні дослідження їх ефективності та можливості реалізації при рішенні задач виявлення сигналів. Приведено результати кореляційної обробки (виявлення) астрофізичних об'єктів на знімках кілець Сатурна. Зроблені висновки щодо ефективності використання розглянутих методів в системах розподіленої обробки результатів астрофізичних досліджень.

**Ключові слова:** кореляційна обробка, оптичний сигнал, астрофізичні дослідження.

### DISCOVERY OF IMAGES OF COSMIC OBJECTS IN THE SYSTEMS OF THE DISTRIBUTED PROCESSING OF RESULTS OF ASTROPHYSICAL RESEARCHES

E.I. Zhilin

On the basis of results of analysis of existent methods of correlation treatment of visual signals and images an imitation design and experimental researches of their efficiency and realized in case of decision of tasks of discovery of signals is conducted. Results of correlation treatment (discoveries) of astrophysical objects on pictures of the Saturn rings are led. Inferences are done about efficiency of application of considered methods in the systems of the distributed processing of results of astrophysical researches.

**Keywords:** correlation treatment, visual signal, astrophysical researches.