

УДК 004.932: 621.383.7: 523.44

В.Е. Саваневич¹, А.М. Кожухов², А.Б. Брюховецкий²¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков²Национальный Центр управления и испытаний космических средств, Евпатория

МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ОТ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Предложен метод предварительного обнаружения сигналов от небесных объектов, основанный на сравнении с порогом значений пространственной свертки между принятым излучением, в окрестности пика цифрового изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала. Предложена новая модель распределения значений пространственной свертки, представляющая собой смесь нормального закона распределения и «хвоста» в области больших значений пространственной свертки. Для определения порога отбраковки пиков цифрового изображения, в окрестности которых отсутствуют сигналы от небесных объектов, производится приближенное выделение нормальной («фоновой») составляющей смеси распределений значений пространственной свертки по разработанному вычислительному методу. Метод использован авторами в разработанной системе автоматизированного обнаружения новых и известных астероидов.

Ключевые слова: сигналы – методы обнаружения, цифровое изображение, ПЗС-кадр.

Введение

Для оптимального обнаружения сигнала используются корреляционные обнаружители [1], в которых вычисляется корреляционный интеграл – интеграл произведения принятого сигнала на форму ожидаемого сигнала, и сравнивается с пороговым значением.

Для случая приема оптического излучения на цифровой фотоприемник типа ПЗС-матрицы, для корреляционного обнаружителя используется пространственная свертка [2] принятого излучения с пространственной формой ожидаемого сигнала.

Так как при смещении местоположения сигнала внутри пикселя его форма будет меняться, то для проведения оптимального обнаружения сигнала на ПЗС-кадре необходимо провести вычисление значения пространственной свертки для каждого возможного положения сигнала на ПЗС-кадре с шагом, пропорциональным потенциальной точности оценки параметров обнаруживаемого сигнала. С учетом того, что потенциальная точность оценки параметров сигнала может составлять до 0,01 пикселя [3] количество положений сигнала может составлять значительное количество для каждого пикселя ПЗС-матрицы. Современные ПЗС-кадры насчитывают миллионы пикселей, поэтому проведение оптимального обнаружения может повлечь за собой неприемлемые вычислительные затраты.

Анализ литературы. Общая теория обнаружения сигналов, в том числе и оптических, достаточно разработана и изложена во многих источниках, например, [1, 4, 5]. В телескопе, оснащенный ПЗС-матрицей, еще до начала обнаружения изображения астероида на цифровом изображении проводятся все операции процесса обнаружения. В свою очередь

процедура обнаружения изображения астероида на цифровом изображении сводится к пространственной последетекторной обработке [2, 5, 6,]. Связано это с тем, что, проходя через турбулентную среду атмосферы, функция пространственной когерентности сигнального поля искажается таким образом, что поле уже нельзя считать когерентным на поверхности приемного оптического прибора. Кроме того, источник излучения уже необходимо считать протяженным, пусть хотя бы размытым, а приемник уже не является точечным детектором.

Предварительное обнаружение сигналов на ПЗС-кадре в основном производится путем установления глобального порогового значения вида [5, 7]:

$$I = B + k\sigma, \quad (1)$$

где B – средний уровень фона на ПЗС-кадре; σ – СКО шума; k – коэффициент пропорциональности, обычно принимаемый равным 2,5 – 4.

На постдетекторную обработку поступают только те пиксели ПЗС-кадра, амплитуда (яркость) которых превышает пороговое значение (1). При этом возникает необходимость проведения дополнительной фильтрации изображения для выявления групп пикселей, амплитуда которых превысила порог [7].

Существенным недостатком данного подхода, отмеченным в [5], является более низкая вероятность обнаружения «размытого» сигнала по сравнению с «точечным» при равенстве их суммарных энергий (рис. 1).

Другой метод предварительного обнаружения основан на предположении, что потенциально устойчиво обнаруживаемые сигналы практически всегда находятся в окрестностях локальных максимумов (пиков) изображения на ПЗС-кадре [8].

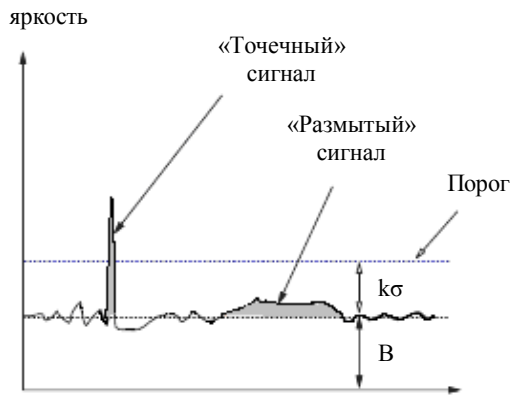


Рис. 1. Детектирование «точечного» и «размытого» сигналов при использовании глобального порога

Количество пиков изображения на кадре может достигать 10 – 11 % от общего количества пикселей, что при размерах современных ПЗС-матриц в миллионы пикселей, также составляет значительную величину. Вычислительные затраты, необходимые для определения значения пространственной свертки принятого излучения с ожидаемой формой сигнала в окрестности такого количества пиков, также являются чрезмерными. Задача уменьшения данных вычислительных затрат может быть решена путем проведения предварительной селекции пиков изображения.

Постановка задачи. Изображения небесных объектов (звезд, астероидов) на ПЗС-кадре представляют собой «размытые точки». Координаты падения фотонов от небесных объектов имеют круговое нормальное распределение с математическими ожиданиями, соответствующими координатам пика изображения, в окрестности которого сформировано изображение сигнала от небесного объекта.

Группы сигнальных пикселей расположены вблизи одного из пиков изображения. При этом на этапе предварительного обнаружения считается, что пространственная форма сигнала не зависит от его положения в пикселе. Вычисление пространственной свертки принятого излучения с ожидаемой формой сигнала производится для области, соответствующей окрестности пика изображения. Данная исследуемая область, называемая в работе строб внутрикадровой обработки (СВКО), существенно больше изображения искомого небесного объекта и ее размер составляет десятки пикселей.

Целью статьи является разработка метода предварительного обнаружения пиков изображения, используемых как начальные приближения положения ожидаемых сигналов. При этом предварительное обнаружение не должно приводить к значительному количеству пропусков сигналов от небесных объектов, которые могут быть устойчиво обнаружены без ее применения.

Основная часть

Обнаружение сигнала от небесного объекта, на ПЗС-кадре. В последдетекторной обработке, в случае известной формы сигнала для его обнаружения обычно применяют корреляционное решающее правило (РП) вида:

$$U = \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} s_{ikt} A_{ikt} > \Pi_1, \quad (2)$$

где $S_{\text{СВКОс}} = \{s_{11t}, \dots, s_{ikt}, \dots, s_{N_{\text{СВКОс}}t}\}$ – вектор пространственной формы сигнала на цифровом изображении в пределах зоны строба внутрикадровой обработки, в которой предполагается наличие сигнала от небесного объекта; $N_{\text{СВКОс}}$ – количество пикселей в стробе внутрикадровой обработки, в которых предполагается наличие сигнала; A_{ikt} – амплитуда ik -го пикселя t -го ПЗС-кадра.

Вместо элементов s_{ikt} вектора пространственной формы сигнала на цифровом изображении можно использовать вероятности v_{ikt} попадания фотонов в пиксели ПЗС-матрицы, рассчитанные на основе оценок местоположения небесного объекта на ПЗС-кадре. Оценки местоположения небесного объекта определяются методом, описанным в работе [9]. Тем самым, при обнаружении небесного объекта на цифровом изображении целесообразно использовать решающее правило в форме:

$$A_{it} = \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt} A_{ikt} > \Pi_1, \quad (3)$$

где A_{it} – амплитуда сигнала, подлежащего обнаружению.

Особенности определения пространственной свертки для сигнала в окрестности пика изображения. Левая часть неравенства (3) представляет собой выражение для расчета пространственной свертки принятого излучения с ожидаемой формой сигнала [1]. Для уменьшения вычислительных затрат на предварительную селекцию размер области СВКО в пикселях $N_{\text{СВКОс}}$, в которой предполагается наличие сигнала, ограничивается 9 пикселями: пикселем, соответствующего пику, и соседними с ним пикселями. Для каждой окрестности пика изображения вычисление пространственной свертки сигнала производится один раз для ожидаемого положения небесного объекта, соответствующего центру пикселя с максимальной амплитудой (пика).

Закономерности распределения значений пространственной свертки для ПЗС-кадра. Если в окрестности пика изображения находится сигнал, то распределение амплитуд пикселей в данной окрестности будет близко к ожидаемой форме сигнала.

Значения пространственной свертки для областей кадра, соответствующих окрестностям пиков изображения с сигналами от астероидов или других объектов, будут чаще превышать значения пространственной свертки для областей кадра, в которых имеются только шумы фона. При проведении предварительных исследований, авторами экспериментально установлено, что в случае наличия на кадре большого количества сигналов от астероидов и звезд, модель статистического распределения значений пространственной свертки для окрестностей пиков изображения на одном кадре, можно представить в виде смеси нормального закона распределения и «хвоста» в области больших значений пространственной свертки (рис. 2). При этом «хвост» формируется значениями пространственной свертки, соответствующими пикам, в окрестности которых находятся сигналы, сформированные звездами и яркими астероидами, находящимися на кадре.

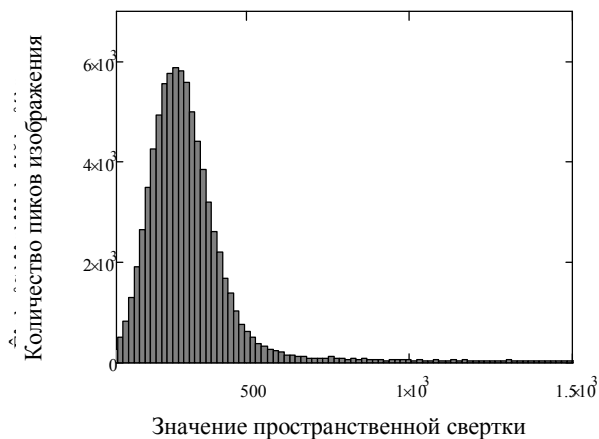


Рис. 2 Гистограмма распределения значений пространственной свертки на ПЗС-кадре. Область малых значений

Значения пространственной свертки для окрестностей пиков изображения с сигналами от астероидов со слабым блеском, будут находиться в области, соответствующей правой части «фоновой» составляющей смеси распределений значений пространственной свертки. Данная область пересекается с левой частью «сигнального хвоста» рассматриваемой смеси распределений.

Определение значения порога предварительного обнаружения для астероидов со слабым блеском. Для оценки значения порога предварительной селекции предлагается провести приближенное выделение «фоновой» (нормальной) составляющей из смеси распределений значений пространственной свертки принятого излучения с ожидаемой формой сигнала. Для этого в работе использовано свойство равенства значений медианы и среднего для случайных величин, распределенных по нормальному закону. При этом никаких гипотез о

возможной модели распределения «хвоста» смеси распределений, соответствующего «сигнальной» составляющей, не выдвигается. Таким образом, выделение нормальной составляющей смеси распределений значений пространственной свертки можно провести по следующей итерационной вычислительной схеме. Для выборки значений пространственной свертки определяются среднее, медиана и СКО, после чего проводится сравнение значений медианы и среднего.

Для определения значимости различий между ними используется порог соответствия – величина, зависящая от оценки значения СКО нормальной составляющей смеси распределений значений пространственной свертки и определяющаяся экспериментально.

Если медиана и среднее выборки значений пространственной свертки отличаются друг от друга больше, чем на порог соответствия, то из выборки исключаются значения пространственной свертки, превышающие значение оценки среднего более чем на порог исключения значений из оценки СКО «фоновой» составляющей распределения.

Порог исключения выбирается так, чтобы вероятность исключения значений пространственной свертки, принадлежащих «фоновой» составляющей не была значимой (не превышала $0,05$). Это делается для того, чтобы избежать серьезных погрешностей в оценке СКО «фоновой» составляющей смеси распределений значений пространственной свертки.

В работе значение порога исключения устанавливается равным значению СКО «фоновой» составляющей смеси умноженному на коэффициент пропорциональности, который был принят равным 3 .

После исключения части выборки оцениваются медиана и среднее на основе оставшихся в выборке значений пространственной свертки.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока медиана и среднее выборки значений пространственной свертки не станут отличаться менее чем на величину порога соответствия. Полученное на последней итерации значение СКО принимается за оценку значения СКО нормальной составляющей смеси распределений значений пространственной свертки.

Вычислительный метод определения значения порога предварительного обнаружения пиков изображения. Исходя из вышеизложенного, определение значения порога предварительной селекции пиков изображения Π_1 для каждого кадра производится следующим образом.

1. Для используемой выборки (на первой итерации – всей выборки) значений пространственной свертки на ℓ -й итерации, соответствующих текущему (t -му) кадру, находится среднее значение

пространственной свертки (\bar{A}_t):

$$\bar{A}_{\ell t} = \left(\sum_{j=1}^{N_{\max \ell t}^{\text{лок}}} A_{jt} \right) / N_{\max \ell t}^{\text{лок}}, \quad (4)$$

где $N_{\max \ell t}^{\text{лок}}$ – количество локальных максимумов на ℓ -й итерации метода на t -м кадре.

2. Для выборки значений пространственной свертки на ℓ -й итерации, соответствующих текущему (t -му) кадру, находится медиана ($A_{1/2 \ell t}$) значений пространственной свертки принятого излучения с ожидаемой формой сигнала. Для этого производится упорядочивание совокупности значений пространственной свертки по возрастанию и в качестве медианы используется значение среднего элемента упорядоченной совокупности. В случае, если данная совокупность состоит из четного количества элементов, то в качестве оценки медианы используется среднее арифметическое двух средних элементов совокупности.

3. Определяется оценка СКО распределения значений пространственной свертки текущего кадра $\hat{\sigma}_{A \ell t}$ для оставшихся элементов выборки значений пространственной свертки текущего кадра:

$$\hat{\sigma}_{A \ell t} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\max \ell t}^{\text{лок}}} (A_{jt} - \bar{A}_{\ell t})^2 / (N_{\max \ell t}^{\text{лок}} - 1)}, \quad (5)$$

4. Если невязка значений медианы и среднего выборки значений пространственной свертки превышает заданную наперед величину порога соответствия ε , то переход на пункт 5. Иначе – на пункт 6.

5. Для оценки СКО «фоновой» составляющей распределения значений пространственной свертки на следующей итерации в выборке значений пространственной свертки данного кадра, исключаются значения, предположительно относящиеся к «целевому хвосту распределения» и удовлетворяющие условию отбраковки:

$$A_{jt} \geq \bar{A}_{\ell t} + 3\hat{\sigma}_{A \ell t}. \quad (6)$$

Переход на пункт 1.

6. Формируется порог отбраковки пиков изображения по соответствующим им значениям пространственной свертки:

$$\Pi_1 = \bar{A}_{\ell t} + k_{\text{отбр}} \hat{\sigma}_{A \ell t}, \quad (7)$$

где $k_{\text{отбр}}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый для каждого телескопа с ПЗС-камерой экспериментально и находящийся обычно в пределах между 2 и 3.

Результаты применения метода. Разработанный метод предварительного обнаружения сигналов от небесных объектов был применен в автоматизи-

рованной системы обнаружения астероидов CoLiTec, в разработке которой принимали участие авторы. Система проходила испытания в Андрушевской астрономической обсерватории на телескопе Zeiss-600 с диаметром зеркала 60 см., оснащенный ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер кадра при съемке с одинарным бинированием 1528x1528 пикселей). С мая 2010 года с использованием данной программы наблюдателями Андрушевской астрономической обсерватории было открыто 66 астероида [10].

С конца ноября 2010 года программа испытывается также в российской дистанционно управляемой обсерватории ISON-NM [11], расположенной в штате Нью-Мексико (США), на астрографе Astroworks Centurion-18 с диаметром зеркала 45 см., оснащенный ПЗС-камерой FLI ML09000-65 (размер кадра 3056x3056 пикселей).

Применение программы значительно увеличило количество обнаруживаемых астероидов [12]. При этом с 1 декабря 2010 года по 12 сентября 2011 года было открыто и получило временные обозначения 471 астероид [10].

10 декабря 2010 года с использованием программы CoLiTec была открыта комета C/2010 X1 (Elenin) [13, 14], которая стала первой кометой, открытой российским астрономом после распада СССР [15].

7 июля 2011 года с использованием программы CoLiTec была открыта комета P/2011 NO1 [16]. Открытие было сделано в обсерватории ISON-NM.

Таким образом, с использованием программы CoLiTec к 12 сентября 2011 года было открыто 539 небесных объектов (две кометы и 537 астероидов).

Выводы

В статье предложен метод предварительного обнаружения сигналов от небесных объектов, основанный на сравнении с порогом значений пространственной свертки между принятым излучением, в окрестности пика изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала. При этом считается, что сигналы от небесных объектов формируются в окрестностях пиков изображения, а значения пространственной свертки для «фоновых» пиков изображения на кадре распределены по нормальному закону. Также принимается, что на этапе предварительного обнаружения пространственная форма сигнала не зависит от его положения в пикселе, и для каждой окрестности пика изображения вычисление пространственной свертки сигнала производится один раз для ожидаемого положения объекта, соответствующего центру данного пика изображения. Предложена новая модель распределения значений пространственной свертки для текущего кадра, представляющая собой смесь нормального

закона распределения значений пространственной свертки, соответствующих фону, и «хвоста» из значений пространственной свертки, соответствующих сигналам от небесных объектов, в области больших значений пространственной свертки. Для определения порога отбраковки пиков изображения, в окрестностях которых отсутствуют сигналы от небесных объектов, производится приближенное выделение нормальной («фоновой») составляющей смеси распределений значений пространственной свертки. Выделение нормальной составляющей смеси распределений выборки значений пространственной свертки проводится разработанным итерационным вычислительным методом, основанным на свойстве равенства значений медианы и среднего нормально распределенных случайных величин.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теории: справочн. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Саваневич В.Е. Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении / В.Е. Саваневич // Радиотехника и информатика. – 1999. – № 1. – С. 4-8.
4. Фотозлектрический метод определения координат сверхслабых космических астероидов / В.С. Губанов, И.И. Куликова, Е.И. Малахов, О.Е. Шорнков // Наблюдения искусственных небесных тел. – 1990. – № 26. – С. 176-190.
5. Starck J.-L. *Astronomical Image and Data Analysis*. / Starck J.-L., Murtagh F. // *Second Edition*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006.
6. Гудмен Дж. *Статистическая оптика*. / Гудмен Дж. // пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 528 с.
7. Kouprianov, V. "Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects," *Advances in Space Research*. Vol. 41, Issue 7, 2008, p. 1029-1038.
8. Mighell K.J. *Algorithms for CCD Stellar Photometry. Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII. ASP Conference Series, Vol. 172, 1999, p. 317-328.*
9. Оценки координат астероида на дискретном изображении / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2010. – Вып. 162. – С. 78-86.
10. MPC 70135 – 76268. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html.
11. SpaceObs. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://spaceobs.org/ru>.
12. 100 астероид обсерватории ISON-NM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://spaceobs.org/ru/2010./12/06/100-asteroid-observatorii-ison-nm/>.
13. C 2010/X1 (ELENIN) = WJ08B04. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://spaceobs.org/ru/2010/12/13/c2010-x1-elenin-wj08b04/>.
14. MPC 2010-X101: COMET C/2010 X1 (ELENIN). [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpc/K10/K10XA1.html>.
15. «Впервые после распада СССР астроном из России открыл комету». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.gazeta.ru/news/science/2010/12/13/n_1614225.shtml.
16. MPC 2011-O09: COMET P/2011 NO1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net/mpc/K11/K11O09.html>.

Поступила в редколлегию 3.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Н. Жолткевич, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков.

МЕТОД ПОПЕРЕДНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ВІД НЕБЕСНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЦИФРОВОМУ ЗОБРАЖЕННІ

В.С. Саваневич, О.М. Кожухов, О.Б. Брюховецкий

Запропонований метод попереднього виявлення сигналів від небесних об'єктів, заснований на порівнянні з порогом значень просторової згортки між прийнятим випромінюванням, в околиці піку цифрового зображення, і маскою, що відповідає формі очікуваного сигналу. Запропонована нова модель розподілу значень просторової згортки, що є сумішшю нормального закону розподілу і «хвоста» в області великих значень просторової згортки. Для визначення порогу відбракування піків цифрового зображення, в околиці яких відсутні сигнали від небесних об'єктів, виробляється наближене виділення нормальній («фоновій») складовій суміші розподілів значень просторової згортки по розробленому обчислювальному методу. Метод використаний авторами в розробленій системі автоматизованого виявлення нових і відомих астероїдів.

Ключові слова: сигнали – методи виявлення, цифрове зображення, ПЗС-кадр.

METHOD OF PRELIMINARY DETECTION OF CELESTIAL OBJECTS' SIGNALS ON DIGITAL IMAGE

V.E. Savanevich, A.M. Kozhukhov, A.B. Bryukhovetskiy

The method of preliminary detection of celestial objects' signals is offered, which is based on comparing of values of spatial convolution of the accepted radiation, in the neighbour of digital image's peak, and by a mask, corresponding to the form of the expected signal, to the threshold. The new model of distribution of values of spatial convolution is offered, which is represented a mixture of normal distribution law and "tail", which is situated in area of large values of spatial convolution. An approximate selection of normal ("base-line") component of distribution of values of spatial convolution is followed the developed computational method for determination of rejection threshold of digital image's peaks, in the neighborhood of which celestial objects' signals are absent. The method has used by authors in developed system of automatic new asteroids detection and known asteroids tracking.

Keywords: signals are methods of exposure, digital representation, PZS-shot.