

УДК 004.93, 681.5
DOI: 10.15827/0236-235X.122.414-417

Дата подачи статьи: 13.04.18
2018. Т. 31. № 2. С. 414–417

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ВЕЙВЛЕТ-ФРАКТАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Б.В. Палюх¹, д.т.н., профессор, pboris@tstu.tver.ru
И.И. Зыков¹, ст. преподаватель, kemer0802@mail.ru

¹ Тверской государственный технический университет,
наб. Аф. Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Россия

Освоение космического пространства в значительной мере зависит от обеспечения безопасности орбитальных космических аппаратов от воздействия космического мусора, потенциальным источником которого может быть каждый спутник, космический зонд или пилотируемая миссия.

В данной статье представлен метод обнаружения различных объектов космического мусора. На первом этапе изображения космического пространства, полученные от оптико-электронного прибора, размещенного на космическом аппарате, преобразуются в полутоновые изображения, которые в дальнейшем обрабатываются при помощи вейвлет-преобразований. Затем для полученных результатов проводятся операции бинаризации и заполнения отверстий, формируются минимальные прямоугольные области, накрывающие предполагаемые объекты космического мусора.

В итоге для этих областей формируются статистики в виде максимальных собственных значений автокорреляционных матриц и фрактальных размерностей для принятия решения об обнаружении объектов космического мусора по критерию Неймана–Пирсона.

Полученные результаты показывают, что объекты космического мусора могут быть успешно обнаружены.

Ключевые слова: космический мусор, вейвлет-преобразования, фрактальная размерность, автокорреляционная матрица, критерий Неймана–Пирсона, MATLAB.

По мере увеличения количества спутников, появляющихся на орбите, и устаревания существующих на ней возрастает риск лавинообразного развития синдрома Кesslera, коварство которого заключается в эффекте домино [1]: столкновение двух достаточно крупных объектов приведет к появлению большого количества осколков; каждый из них, в свою очередь, может столкнуться с другим, что вызовет появление еще большего количества обломков.

Среди разнообразия объектов космического мусора (КМ) следует выделить два класса [2]. К первому классу причисляются относительно большие объекты, которые могут регулярно наблюдаться наземными радиолокационными или оптическими средствами. Их характерный размер – не менее 10–20 см для области низких и не менее 75 см для области геосинхронных орбит. Большинство таких объектов каталогизировано и отслеживается национальными средствами контроля космического пространства. Среди общего числа элементов КМ количество этих объектов мало, однако их концентрация на два порядка больше концентрации тел соответствующих размеров в естественных метеорных потоках. Ко второму классу относятся объекты гораздо меньших размеров, наблюдение которых с помощью наземных средств невозможно. Таких фрагментов в околоземном пространстве значительно больше, что подтверждается результатами отдельных локальных экспериментов и анализа повреждений поверхностей, долгое время экспонировавшихся на орбите. Поэтому наиболее перспективными являются орбитальные средства наблюдения, так как в отличие от

наземных средств наблюдения они не зависят от искажений сигналов, вызванных неоднородностью среды передачи. Орбитальные средства наблюдения способны обнаруживать антропогенные частицы и объекты в тех случаях, когда это сложно сделать с помощью наземных средств наблюдения.

Размещение камер на геостационарной орбите может обеспечить значительную производительность обнаружения и эффективный способ обновления информации о параметрах орбиты мусора и объектов [3].

Описание метода

Предлагаемый в работе метод базируется на идее первичного обнаружения областей с дефектами при помощи вейвлет-преобразований. В дальнейшем для обнаруженных областей необходимо вычислить фрактальную размерность и максимальные собственные значения автокорреляционной матрицы для подтверждения гипотезы, что в данной области находится объект КМ.

На первом этапе в поступающем с оптико-электронного прибора (ОЭП) полноцветном изображении RGB-составляющие пикселей преобразуются в соответствующие им значения яркости полутонового изображения для уменьшения объема оперативной памяти (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018_2/2018-2-dop/19.jpg). Далее все значения яркостей пикселей полученного изображения преобразуются в массив действительных чисел двойной точности.

При работе ОЭП могут возникать ситуации, когда появляются искажения, связанные с возникно-

вением шумов от приборов, которые приводят к появлению сложных фоновых условий. Именно этим и обуславливается использование вейвлет-преобразований, так как вейвлеты являются подходящим средством для анализа различных нестационарных сигналов. К таким сигналам можно отнести и сцены изображений объектов. Это обусловлено прежде всего характером фонов изображения. Обработка изображения на основе вейвлет-преобразования позволяет решать ряд задач, связанных с уменьшением уровня шума, выделением локальных пространственных неоднородностей, сжатием изображения, а также с анализом текстур [4].

На втором этапе вычисляются вейвлет-коэффициенты столбцов $WTv(x, y)$, строк $WTg(x, y)$ и одной из диагоналей $WTD(x, y)$. Это требуется для большей детализации, так как при различных углах наклона ОЭП может возникать смещение обнаруженной области от действительного положения объекта КМ на изображении [5]. Для получения результирующего массива вейвлет-коэффициентов $WT(x, y)$ без потери структурных особенностей строк, столбцов и диагоналей используется следующая формула: $WT(x, y) = WTg(x, y) \vee WTV(x, y) \vee WTD(x, y)$ [6]. Представим программную реализацию этапа:

```
v_mass_vertical = ones(size(mass)); v_mass_gorizantal =
ones(size(mass)); v_mass_diagonal1 = ones(size(mass));
v_mass = ones(size(mass));
[M, N] = size(mass);
for i = 1:M
    v_mass_gorizantal(i,:) = cwt(mass(i,:), 8, wname);
end
for j = 1:N
    v_mass_vertical(:,j) = cwt(mass(:,j), 8, wname);
end
for k = 1: M + N - 1
    g = 0;
    for i = 1: M
        for j = 1: N
            if (i + j - 1 == k)
                g = g + 1;
                if (g == 1)
                    h = mass(i, j);
                else
                    h = [h, mass(i, j)];
                end
            end
        end
    end
end
v = cwt(h, 8, wname);
u = 0;
for i = 1: M
    for j = 1: N
        if (i + j - 1 == k)
            u = u + 1;
            v_mass_diagonal1(i, j) = v(u);
        end
    end
end
end
for i = 1: M
```

```
for j = 1: N
    v_mass(i, j) = min(abs(v_mass_vertical(i, j)),
        abs(v_mass_gorizantal(i, j)));
    v_mass(i, j) = min(abs(v_mass(i, j)),
        abs(v_mass_diagonal1(i, j)));
    if (abs(v_mass_vertical(i, j)) == v_mass(i, j))
        v_mass(i, j) = v_mass_vertical(i, j);
    end
    if (abs(v_mass_gorizantal(i, j)) == v_mass(i, j))
        v_mass(i, j) = v_mass_gorizantal(i, j);
    end
    if (abs(v_mass_diagonal1(i, j)) == v_mass(i, j))
        v_mass(i, j) = v_mass_diagonal1(i, j);
    end
end
end
end
```

На третьем этапе выполняется сегментация изображения по пороговому значению: все значения, меньшие указанного порога, принимаются равными 0, а превышающие порог – 1, результаты итерации сохраняются в массив сегментации. После операции сегментации последовательно выполняются бинаризация массива и заполнение отверстий. Бинаризация массива осуществляется для переформатирования массива сегментации формата данных double в формат uint8. Операция заполнения отверстий использует алгоритм на основе морфологической реконструкции, в процессе выполнения которого происходит заполнение отверстий, имеющих значения 0 и окруженных значениями 1 для 8-связных фоновых окрестностей. Программная реализация этапа выглядит следующим образом:

```
BW = im2bw(mass);
BW = imfill(BW, 8, 'holes');
for k = 1: 50
    for i = 1: M - 1
        for j = 1: N - 1
            if ((BW(i + 1, j + 1) == 1) & (BW(i, j) == 1))
                BW(i, j + 1) = 1; BW(i + 1, j) = 1;
            end
            if ((BW(i, j + 1) == 1) & (BW(i + 1, j) == 1))
                BW(i + 1, j + 1) = 1; BW(i, j) = 1;
            end
        end
    end
end
```

Получившиеся области локализованных объектов КМ имеют произвольную форму, но для построения их автокорреляционной матрицы требуется, чтобы они были прямоугольными. Для приведения областей к нужной форме применяется следующее правило: если у четырех пикселей, образующих квадрат, одна из диагоналей имеет два значения, равных 1, то все четыре значения квадрата принимают значения 1, иначе – 0. В итоге на всем изображении образуются требующиеся для дальнейших вычислений прямоугольные области (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018_2/2018-2-dop/20.jpg).

Четвертый этап – нахождение координат вершин образованных областей, в результате чего

формируется соответствующий двумерный массив координат.

Далее происходит оценка фрактальной размерности путем реализации метода наименьших квадратов [7] и вычисляется максимальное собственное значение автокорреляционной матрицы для каждой обнаруженной прямоугольной области, накрывающей объект КМ на изображении. В общем случае использование фрактальных характеристик направлено на увеличение информативности пространства признаков и более четкое выделение классов естественных и искусственных объектов [8]. Максимальные собственные значения существенно (на порядки) доминируют над всеми другими показателями и содержат практически полную информацию о действительной ситуации в соответствующей анализируемой области изображения.

На последнем этапе работы метода для подтверждения обнаружения объекта КМ используется критерий Неймана–Пирсона. Согласно ему выбирается такое правило обнаружения, которое обеспечивает минимальную величину вероятности пропуска сигнала (максимальную вероятность правильного обнаружения) при условии, что вероятность ложной тревоги не превышает заданную величину [9]. Для каждого критерия (фрактальная размерность и максимальные собственные значения автокорреляционной матрицы) установлен оптимальный пороговый уровень принятия решения.

Заключение

Целью предлагаемого метода является нахождение объектов КМ при помощи вычисления вейвлет-преобразований, фрактальной размерности и максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы. Метод, описанный на языке MATLAB, был протестирован на изображениях КМ в околоземном пространстве и показал ожидаемые результаты. Предлагаемая система является простой и дешевой. Учитывая скорость об-

наружения, она может быть включена в состав разрабатываемых космических аппаратов. Гибкость предложенного метода обработки изображения позволяет применять его не только для объектов КМ, но и для производства, например, листового стекла. Дальнейшие исследования будут проводиться с целью повышения точности обнаружения объектов КМ. Будут изучаться методы, которые можно использовать для увеличения устойчивости системы к ошибкам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект № 2.1777.2017/4.6.

Литература

1. Адушкин В.В., Вениаминов С.С., Козлов С.И., Сильников М.В. О техногенном засорении космоса и некоторых его последствиях // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 7-8. С. 16–21.
2. Райкунова Г.Г. Космический мусор. Кн. 1: Методы наблюдения и модели космического мусора. М.: Физматлит, 2014. 248 с.
3. Shell J.R. Optimizing Orbital Debris Monitoring with Optical Telescopes. Proc. Conf. Advanced Maui and Optical Space Surveillance Technologies, 2010, pp. 427–443.
4. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Реализация дискретного вейвлет-преобразования в реальном времени // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 6. С. 68–72.
5. Табырца Д.В., Попов С.А., Малисов Н.П. Синтез алгоритма распознавания изображения на основе вейвлет-преобразования // Вестн. ВГТУ. 2010. Т. 6. № 10. С. 81–86.
6. Зыков И.И. Метод обнаружения и распознавания дефектов листового стекла // Информатика, управление и системный анализ: тр. IV науч. конф. молодых ученых с международным участием. Т. II. Тверь: Изд-во ТвГТУ, 2016. 205 с.
7. Чересов Ю.И. Вычисление фрактальных размерностей радиолокационных изображений и примеры использования их для обнаружения и распознавания целей и фона // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2009. № 147. С. 104–108.
8. Авраменко Д.В. Обнаружение и выделение космических объектов искусственного и естественного происхождения на основе вейвлет-преобразований // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XXXV Междунар. науч.-практич. конф. Н.: Изд-во СибАК, 2016. № 6. С. 77–83.
9. Катулев А.Н., Колонсков А.А., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Адаптивный метод и алгоритм обнаружения мало-контрастных объектов оптико-электронным средством // Оптический журнал. 2014. № 2. С. 29–39.

SOFTWARE TOOLS OF A WAVELET/FRACTAL CORRELATION METHOD FOR DETECTING SPACE DEBRIS OBJECTS

*B.V. Palyukh*¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, pboris@tstu.tver.ru
*I.I. Zikov*¹, Senior Lecturer, kemer0802@mail.ru

¹ Tver State Technical University, Nikitin Quay 22, Tver, 170026, Russian Federation

Abstract. The problem of space exploration efforts depends on orbiters, which in turn require their safety precautions from the effects of space debris. Each satellite, space probe or manned mission might be a potential source of space debris.

The paper presents a method of detecting various objects of space debris. Images of cosmic space from an optoelectronic device placed on a spacecraft are transformed into halftone images. They are further processed by wavelet transforms. The next stage includes binarization and filling operations for the obtained results. At the end of this stage, there is a formation of the minimum rectangular areas covering the supposed objects of space debris.

As a result, these areas have formed statistics in the form of the maximum eigenvalues of autocorrelation matrices and fractal dimensions for making a decision on detection space debris according to the Neyman-Pearson criterion.

The obtained results show that space debris objects can be successfully detected.

Keywords: space debris, wavelet transforms, fractal dimension, autocorrelation matrix, Neumann-Pearson criterion, MATLAB.

Acknowledgements. The study was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the research project no. 2.1777.2017/4.6.

References

1. Adushkin V.V., Veniaminov S.S., Kozlov S.I., Silnikov M.V. On technogenic contamination of space and some special consequences. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Counter-Terrorism Technical Devices. I. 16]. 2015, no. 85–86, pp. 16–21 (in Russ.).
2. Raykunova G.G. *Kosmichesky musor. Kn. 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora* [Space Debris. Book 1. Space Debris Observation Methods and Models]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 248 p.
3. Shell J.R. Optimizing Orbital Debris Monitoring with Optical Telescopes. *Advanced Maui and Optical Space Surveillance Technologies Conf.* 2010, pp. 427–443.
4. Alekseev V.V., Konovalova V.S., Kalyakin I.V. Implementation of discrete wavelet transform in real time. *Izvestiya SPbGETU LETI* [Bulletin of ETU "LETI"]. 2017, no. 6, pp. 68–72 (in Russ.).
5. Tabyrtsa D.V., Popov S.A., Malisov N.P. Synthesis of image recognition algorithm based on wavelet transform. *Vestn. VGTU* [Bulletin of VSTU]. 2010, no. 10, pp. 81–86 (in Russ.).
6. Zykov I.I. Method of detection and recognition of defects in flat glass. *Informatika, upravlenie i sistemny analiz: Tr. IV Vseros. nauch. konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiem* [Informatics, Management and System Analysis: Proc. 4th All-Russian Sci. Conf. of Young Scientists with Int. Participation]. Tver, TvGTU Publ., vol. II, 2016, 205 p.
7. Cheresov Yu.I. Calculation of fractal dimensions of radar images and examples of their use for detection and recognition of targets and backgrounds. *Nauch. vestn. MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTU CA]. 2009, no. 147, pp. 104–108 (in Russ.).
8. Avramenko D.V. Detection and isolation of space objects of artificial and natural origin based on wavelet transforms. *Nauka vchera, segodnya, zavtra: sb. st. po mater. XXXV mezhdunar. nauch.-praktich. konf.* [Science Yesterday, Today, Tomorrow: Proc. 15th Int. Sci. and Pract. Conf.]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2016, no. 6 (28), pp. 77–83 (in Russ.).
9. Katulev A.N., Kolonskov A.A., Khramichev A.A., Yagolnikov S.V. Adaptive method and algorithm for detection of low contrast objects by optoelectronic means. *Optichesky zhurnal* [Jour. of Optical Technology]. 2014, no. 2 (81), pp. 29–39 (in Russ.).

Примеры библиографического описания статьи

1. Палюх Б.В., Зыков И.И. Программные средства вейвлет-фрактально-корреляционного метода обнаружения объектов космического мусора // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 2. С. 414–417. DOI: 10.15827/0236-235X.122.414-417.
2. Palyukh B.V., Zykov I.I. Software tools of a wavelet/fractal correlation method for detecting space debris objects. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2018, vol. 31, no. 2, pp. 414–417 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.122.414-417.