

На правах рукописи



ЗЫКОВ ИЛЬЯ ИГОРЕВИЧ

**Методы и алгоритмы обнаружения антропогенных
частиц в сложных фоновых условиях
функционирования оптико-электронных систем**

Специальность 05.13.01 –

«Системный анализ, управление и обработка информации (в
промышленности)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тверь - 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»).

Научный руководитель: Палюх Борис Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы» ФГБОУ ВО ТвГТУ

Официальные
оппоненты: Малевинский Михаил Федорович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Математического моделирования и вычислительной математики» ФГБОУ ВО Тверской государственный университет

Нефедов Сергей Игоревич, доктор технических наук, доцент, временный генеральный директор АО «НПО «Импульс»

Ведущая организация: Межведомственный суперкомпьютерный центр Российской академии наук – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (МСЦ РАН – филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

Защита состоится 14.12.2018 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.262.06 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Создание эффективных оптико-электронных систем на базе нового программного обеспечения, позволяющего обнаруживать антропогенные частицы и объекты в сложных фоновых условиях, является актуальной проблемой, что подтверждается следующим:

- в ОКП происходит постоянный рост популяции малоразмерных объектов космического мусора в областях движения действующих космических аппаратов, вследствие чего повышается вероятность их высокоскоростного столкновения;
- неполнота имеющихся каталогов космических объектов
- большой объем антропогенных частиц и объектов, которые трудно обнаруживать в виду их неизвестных размеров
- фильтрация изображений оптико-электронной системой в сложных фоновых условиях при априорной неопределенности;
- точность измерения координат положения малоразмерных антропогенных частиц и объектов в околоземном пространстве.

Цель работы

При работе над диссертацией были поставлены следующие цели:

- повышение быстродействия обнаружения антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем
- повышение показателей точности и надежности обнаружения малоразмерных антропогенных частиц и объектов оптико-электронными системами;
- определение параметров орбиты обнаруженных антропогенных частиц и объектов.

Основные задачи работы

- На основе анализа проблемы обнаружения антропогенных частиц и объектов выработать требования к алгоритмам;
- Разработать эффективный алгоритм обнаружения антропогенных частиц и объектов;
- Разработать алгоритм измерения координат положения антропогенных частиц и объектов в околоземном пространстве;
- Разработать программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы;
- Провести экспериментальные исследования предложенных алгоритмов.

Научная новизна работы

- Новая методика обнаружения антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронной системы с вычислением координат обнаруженных объектов в околоземном космическом пространстве;
- Вейвлет-фрактально-корреляционный алгоритм обнаружения антропогенных частиц и объектов в контролируемом ОЭС пространстве, который с заданной вероятностью может обнаружить антропогенные частицы и объекты;
- Алгоритм измерения координат положения антропогенных частиц и объектов в инерциальной системе координат с началом в центре Земли.

Соответствие паспорту специальности

Проблематика, исследованная в диссертации, соответствует специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации». Согласно формуле специальности 05.13.01 — это специальность, занимающаяся проблемами разработки и применения методов системного анализа сложных прикладных объектов исследования, обработки информации, целенаправленного воздействия человека на объекты исследования, включая вопросы анализа, моделирования, оптимизации,

совершенствования управления и принятия решений, с целью повышения эффективности функционирования объектов исследования. Проблематика диссертации соответствует областям исследований: пункт 4 формулы специальности - разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; пункт 5 формулы специальности - разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций диссертации основана на достаточном объеме экспериментальных данных и подтверждена их верификацией при различной интенсивности шумов.

Практическая ценность работы, по мнению автора, заключается в разработке метода и алгоритмов обнаружения антропогенных частиц и нахождения их координат в пространстве. Что позволяет повысить вероятность нахождения антропогенных частиц оптико-электронной системой.

Основные положения, выносимые на защиту

- Вейвлет-фрактально-корреляционный алгоритм обнаружения антропогенных частиц и объектов в контролируемом ОЭС пространстве;
- Алгоритм измерения координат положения антропогенных частиц и объектов в инерциальной системе координат с началом в центре Земли.

Апробация результатов

Результаты, представленные в диссертации, докладывались: на III-ей Международной летней школе-семинаре по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальные системы и технологии: современное состояние и перспективы» (ISyT'2015); на IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием «Информатика, управление и системный анализ» (ИУСА 2016); на VI-й Международной научно-технической конференции «Энергетика,

Информатика, Инновации»; на шестой Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития информационно-управляющих систем, РЛС ВЗГ дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения воздушно-космической обороны и комплексов управления, и обработки информации» («РТИ Системы ВКО – 2018»).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ (в том числе 2 работы в журналах, входящих в перечень ВАК для кандидатских и докторских диссертаций).

Реализация результатов работы.

Тема диссертационной работы поддержана:

- Госзаданием МОиН РФ «Теория и адаптивные алгоритмы обнаружения антропогенных частиц и объектов, и оценка их динамического взаимодействия с космическими аппаратами на основе интеллектуального анализа данных» (№ 2.1777.2017/ПЧ).

Разработанные методика, алгоритмы и программные модули внедрены (использованы):

- в научно-производственном процессе 4 НИО ЗАО "РТИС ВКО;
- для применения в разработках оптико-электронных систем ООО «Наукоемкие технологии».

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Число страниц в диссертации – 114, рисунков – 24. Список литературы состоит из 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описывается актуальность темы, описываются цели, поставленные перед автором работы, предмет и методы проведённых исследований, обсуждается новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость диссертационной работы. Приведены положения,

выносимые на защиту, апробация результатов, список опубликованных по теме диссертации работ.

В **первой главе** "Современное состояние проблемы обнаружения антропогенных частиц и объектов. Постановка задачи исследования" дано текущее состояние и предлагаемые методы обнаружения и определения орбит антропогенных частиц и объектов.

В частности, описано понятие оптико-электронной системы, даны характеристики и задачи, стоящие перед ней. Так же изложены основные методы фильтрации и причина модернизации оптико-электронной системы для обнаружения антропогенных частиц и объектов.

Приведена классификация околоземных орбит по их параметрам и назначению. Приведено краткое описание современных наземных и орбитальных средств наблюдения антропогенных частиц и объектов.

Дано описание основных достижений и их недостатков в области определения орбиты антропогенных частиц и объектов в околоземном космическом пространстве.

Во **второй главе** "Обоснование методов обнаружения антропогенных частиц и объектов оптико-электронной системой" описание всех методов и принципов на которых строится теоретическая часть диссертационной работы.

Определяющую роль в шумоподавлении и обнаружении характерных для антропогенных частиц и объектов структурах играет выбор семейства вейвлетов. На основании проведенных исследований был сделан следующий вывод о том, что для решения задачи лучше всего подходят вейвлеты Хаара, биортогональные и обратные биортогональные. Но при условии обнаружения минимума ложных областей целесообразно использовать обратный биортогональный вейвлет 1.3.

Идентификация структурных особенностей осуществляется с целью локализации однородных областей на текущих нестационарных

изображениях, полученных ОЭС с последующим формированием прямоугольных окон с минимальными площадями локализованных областей.

За основу принимаются следующие объективно существующие закономерности: априорная неопределенность для текущего состояния ОКП в зоне контроля ОЭС; антропогенные частицы и объекты контрастирует с фоновыми помехами; изображение антропогенных частиц и объектов на изображении, полученного с ОЭС, формируется на фоне аппликативных помех и шумов, вызванных работой ОЭС; аппликативные помехи и шумы, вызванных работой ОЭС, могут обуславливать обнаружение ложных объектов; если два объекта на изображении, полученного с ОЭС, перекрывают друг друга, то считается, что это один объект; на различных изображениях один и тот же объект может иметь различные размеры и характеристики.

Идентификация структурных особенностей изображений по областям вейвлет – коэффициентов строк, столбцов и одной из диагоналей изображения реализуется практически безошибочно: подтверждается справедливость принятия, в основу решения задачи непараметрической идентификации структурных, необходимого и достаточного условия, как отношения предпочтения в виде отношения стохастической эквивалентности формируемых строк, столбцов и одной из диагоналей вейвлет – коэффициентов.

Максимальное соотношение значений яркостей пикселей к яркость фоновых помех, происходит из выражения вейвлет-преобразования как двумерного корреляционного интеграла связи функции изображения с вейвлет-функцией при каждом значении переменных масштаба и сдвига. При этом корреляция определяется автоматически с установлением всех ее значений, в том числе, и максимального на множестве переменных сдвига и масштаба независимо от формы обрабатываемого изображения.

Применив к корреляционной связи неравенство Коши-Буняковского с учетом представления функции изображения, получим

$$\begin{aligned}
\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y) \psi_{mk}(x, y) &= \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \phi(x, y) S(x, y) \psi_{mk}(x, y) + \\
&+ \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} B_{\phi}(x, y) \psi_{mk}(x, y) + \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n(x, y) \psi_{mk}(x, y) \leq \\
&\leq \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \phi^2(x, y) S^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} + \\
&+ \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} B_{\phi}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} + \\
&+ \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y) \right]^{\frac{1}{2}}.
\end{aligned} \tag{1}$$

При выполнении какого-либо из равенств в процессе обработки изображения ОЭС на выходе рассмотренного вейвлет-коррелятора как согласованного фильтра будет иметь место максимальное отношение антропогенных частиц и объектов к фоновым помехам. Это означает справедливость второго свойства.

После идентификации структурных особенностей изображений вейвлет-преобразованиями, обнаруженные области имеют произвольную форму, с пустотами внутри. Алгоритм на основе морфологической реконструкции используется для заполнения отверстий в обнаруженных областях. Для приведения областей к прямоугольной 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.

Для решения задачи обнаружения антропогенных частиц и объектов был выбран метод покрытий, ввиду простоты программной реализации. Сущность метода покрытий заключается в покрытии фрактального изображения квадратной сеткой с шагом $\varepsilon \rightarrow 0$, но при этом значение ε не должно быть слишком малым.

Вычисленная автокорреляционная матрица по содержащейся в ней информации аналогична корреляционному интегралу, являющемуся

достаточной статистикой и реализующемуся как согласованный фильтр в задачах обнаружения полезных сигналов в аддитивном гауссовом шуме.

К настоящему времени предпочтительным методом вычисления собственных значений является QR -алгоритм, где Q – ортогональная, а R – верхняя треугольная матрицы

Для обнаружения антропогенных частиц и объектов информации, содержащейся в них, достаточно для обнаружения на каждом изображении, полученного ОЭС, по статистическому правилу Неймана-Пирсона с пороговым уровнем как значением порога бинарного квантования.

По результатам моделирования на основе реальных экспериментальных данных построены бета-вероятности распределения (для ситуаций антропогенная частица или объект ($\beta_d = 5.2$, $\alpha_d = 3.4$), звезда или планета ($\beta_d = 7.7$, $\alpha_d = 2.6$) и ложная цель ($\beta_d = 2$, $\alpha_d = 3.6$). По рисунку 1 видно, что бета-вероятности значительно перекрываются, но в тоже время ситуации разрешимы между собой.

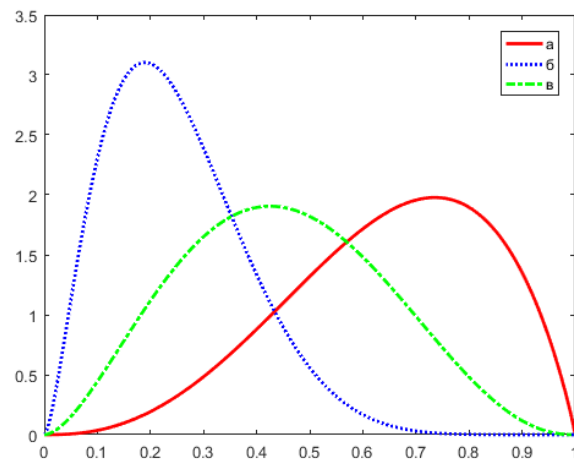


Рис. 1 Бета-распределения фактальной размерности изображений. а – для ситуации ложная цель, б – для ситуации звезда или планета, в – для ситуации антропогенная частица или объект

Для ситуаций антропогенная частица или объект ($\beta_\lambda = 0.7$, $\alpha_\lambda = 1.5$), ложная цель ($\beta_\lambda = 3.3$, $\alpha_\lambda = 0.7$) и звезда или планета ($\beta_\lambda = 9.4$, $\alpha_\lambda = 3.1$). По

рисунку 2 видно, что бета-вероятности максимальных собственных значений имеют те же свойства, что и у бета-вероятностей фрактальной размерности.

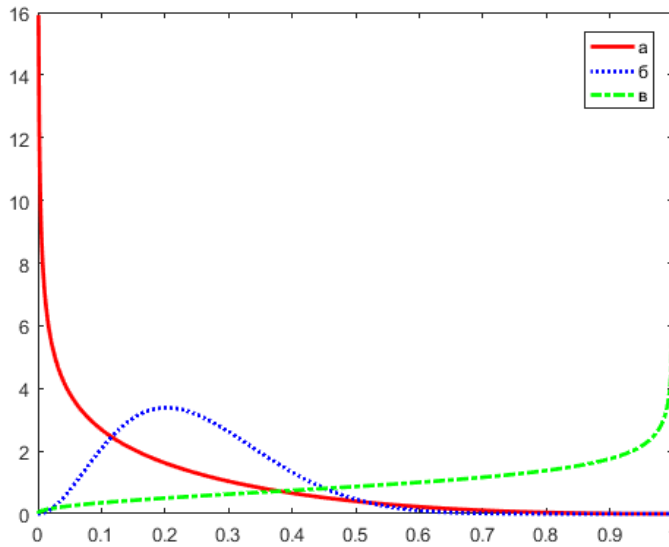


Рис. 2 Бета-распределения максимальных собственных значений изображений. а – для ситуации ложная цель, б – для ситуации звезда или планета, в – для ситуации антропогенная частица или объект

Для обнаружения антропогенной частицы или объекта ОЭС в условиях априорной неопределенности принимается в соответствии с принципом Неймана-Пирсона, то есть в результате операции сравнения критерия с пороговым уровнем, при заданной вероятности ложной тревоги. Для принятия решения «истина» требуется чтобы было превышение порога, иначе будет приниматься решение «ложь». Возможны, что такие решения могут быть и ошибочными.

Пороговые значения при $\alpha_{\text{доп},d} = 0.2$, $\beta_d = 5.2$, $\alpha_d = 3.4$ получаем $P(\alpha_{\text{доп}}; d_{vi}) = 0.55$ для верхней границы и $P(\alpha_{\text{доп}}; d_{vi}) = 0.36$ нижней границы. По найденным $P(\alpha_{\text{доп}}; d_{vi})$ и выражению для них можно вычислить и значение пороговой константы $\rho_d = 1.55$ для верхней границы и $\rho_d = 1.36$ для нижней границы.

Аналогичным образом, только с отличием в том, что граница только одна, формируется критерий принятия решения о признаке нахождения по

статистике максимального собственного значения $\Pi(\alpha_{\text{доп}}; \lambda_{\text{maxvi}}) = 0.48$ и $p_{\lambda}=0.144$, при $\alpha_{\text{доп},\lambda} = 0.2$, $\beta_{\lambda} = 0.7$, $\alpha_{\lambda} = 1.5$.

На основе результатов требуется сформировать структуру критерия обнаружения антропогенных частиц и объектов. По критериям максимальных собственных значений и фрактальной размерности возможны следующие сочетания: (истина, ложь), (ложь, истина), (ложь, ложь) и (истина, истина). В связи с априорной неопределенностью о ситуации сочетания (истина, ложь) и (ложь, истина) следует преобразовать в сочетание (ложь, ложь). Поэтому критерий обнаружения антропогенных частиц и объектов целесообразно основывать на сочетании (истина, истина).

Для вычисления координат антропогенных частиц и объектов требуется знать три параметра в сферической системе координат ОЭС θ – угол места, φ – азимут и максимальную дальность до объекта. Изначально ОЭС может предоставить только мощность и спектральную плотность силы излучения антропогенных частиц и объектов, так же после обнаружения, известны координаты локализованных областей с антропогенными частицами или объектами на изображении, с помощью которого можно вычислить центр области.

Для вычисления максимальной дальности от ОЭС до антропогенной частицы или объекта возможно воспользоваться следующей формулой:

$$D_{\text{макс}} = \left[\int_{\Delta\lambda} (I(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda) / F_{\text{экв}}) d\lambda (d_{\text{об}} / f_{\text{об}})(rT / \Omega\tau_{\text{пр}}) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $I(\lambda)\tau_a(\lambda)$ – спектральная плотность силы излучения на входе ОЭС от обнаруженного объекта при коэффициенте пропускания космического пространства – $\tau_a(\lambda)=1$; $\tau_0(\lambda)$ – коэффициент пропускания ОЭС; $F_{\text{экв}}$ – эквивалентная мощность шумов ОЭС; $d_{\text{об}} / f_{\text{об}}$ – относительное отверстие объектива ОЭС; $d_{\text{об}}$ – диаметр входного отверстия ОЭС; T – время просмотра угла обзора; r – число элементов поля зрения; Ω – угол обзора космической обстановки; $\tau_{\text{пр}}$ – постоянная времени ОЭС.

Для вычисления θ – угла места, φ – азимута требуется воспользоваться следующими формулами:

$$\varphi = \arctg (X_{\text{ср}} / D_{\text{макс}}) \quad (3)$$

$$\theta = \arctg \left(D_{\text{макс}} \sqrt{(M - Y_{\text{ср}})^2 + (X_{\text{ср}})^2} \right) \quad (4)$$

где $D_{\text{макс}}$ - максимальная дальность от ОЭС до антропогенной частицы или объекта; $X_{\text{ср}}$, $Y_{\text{ср}}$ – координаты центра области с антропогенной частицей или объектом; M – высота изначального изображения, полученного с ОЭП.

Для вычисления координат необходимо вычисленные угловые координаты обнаруживаемых антропогенных частиц и объектов передать из «своей» сферической системы в «свою» топоцентрическую прямоугольную.

Формулы перехода записываются в виде

$$x(t) = -D(t)\cos\theta(t)\cos\varphi(t), \quad y(t) = D(t)\cos\theta(t)\sin\varphi(t), \quad z(t) = D(t)\sin\theta(t). \quad (5)$$

Координаты D, φ, θ являются случайными функциями времени. Скорости изменения координат антропогенной частицы или объекта вычисляются как производные по времени от этих соотношений.

Методика обнаружения и вычисления координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц и объектов базируется на идее первичного обнаружения областей с антропогенными частицами и объектами при помощи вейвлет-преобразований. С дальнейшим вычислением для обнаруженных областей фрактальной размерности и максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы, с целью подтверждения гипотезы, что в данной области находится антропогенная частица или объект. В итоге, для приведенной методики, имеются координаты в прямоугольной системе координат.

В третьей главе "Разработка алгоритмов решения задачи" описаны вейвлет-фрактально-корреляционные алгоритмы обнаружения и алгоритмы вычисления координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов. Так же представлена общая блок-схема и последовательность алгоритмов.

Общая блок-схема и последовательность алгоритмов приведена ниже (Рисунок 3).

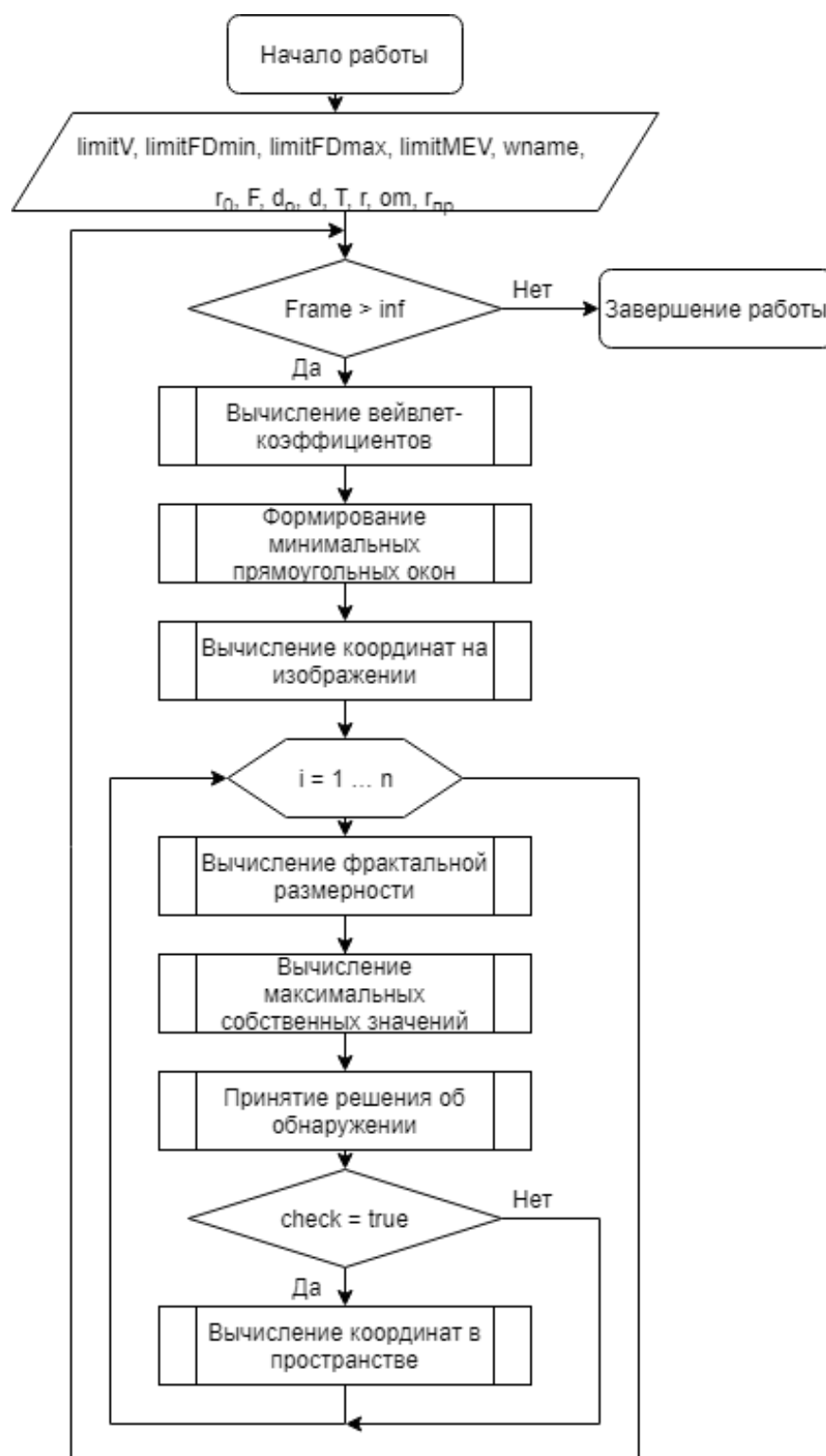


Рисунок 3 Блок-схема вейвлет-фрактально-корреляционных алгоритмов обнаружения и вычисления координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов.

Разработаны алгоритмы: Алгоритм вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП; Алгоритм формирования минимальных прямоугольных окон; Алгоритм вычисления координат окон; Алгоритм оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах; Алгоритм оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах; Алгоритм принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов; Алгоритм вычисления координат антропогенных частиц и объектов.

В четвертой главе "Практическая реализация и результаты исследования" описана программная реализация алгоритмов, представлены результаты работы программы, описана причина и принцип калибровки программной реализации и проведена оценка вероятности обнаружения антропогенных частиц и объектов.

Калибровка программной реализации вытекает из того, что помехи при работе оптико-электронного прибора, вызываемые электроустановкой орбитального аппарата. Вследствие этой проблемы требуется изменить пороговое значения вейвлет-коэффициентов для идентификации структурных особенностей. В тоже время из изменения порогового значения вейвлет-коэффициентов вытекает калибровка пороговых значений фрактальной размерности и максимального собственного значения автокорреляционной матрицы.

Для испытания были выбраны несколько ситуаций, полученных канадским космическим телескопом NEOSsat, предназначенный для отслеживания потенциально опасных астероидов и космического мусора.

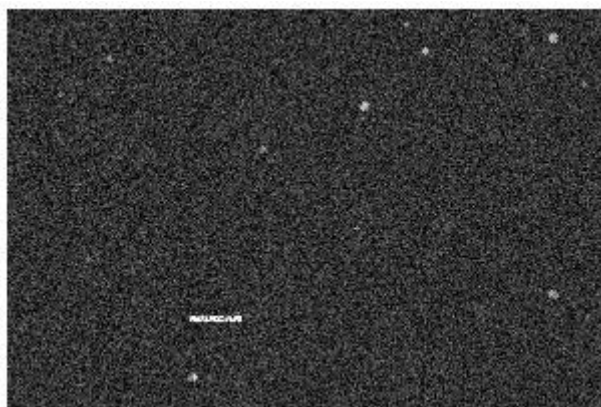


Рисунок 4 Изображение, полученное канадским космическим телескопом NEOSsat.

На изображении (Рисунок 4) присутствует один антропогенный объект, так же около 12 звезд. После обработки программой был выделен один объект с фрактальной размерностью 1.43 и максимальным собственным значением автокорреляционной матрицы 0.21. Координаты обнаруженного антропогенного объекта: максимальная дальность до объекта 160109 м., азимут - 1.3201, угол места - 1.5708.

Вероятность ошибки предопределена и по фрактальным размерностям и максимальным собственным значениям составляет 0.2. Отсюда вероятность правильного обнаружения 0.8. Т.е. существует возможность обнаружения ложных объектов и пропуска антропогенных частиц и объектов.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные научные результаты, полученные в ходе решения поставленной научно-технической задачи. Подтвержден факт, что для обнаружения антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях и при априори не известной их форме и сигнала на изображении, полученного ОЭП требуется модернизация ОЭС. Для этого был разработан новый метод и новые алгоритмы.

Основные результаты работы:

- Проблема обнаружения антропогенных частиц и объектов стоит очень остро и из-за скопившейся массы объектов на орбите и их столкновений между собой может привести к синдрому Кesslera;
- Описана новая методика обнаружения антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронной системы;
- Разработаны эффективные алгоритмы: Алгоритм вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП; Алгоритм формирования минимальных прямоугольных окон; Алгоритм вычисления координат окон; Алгоритм оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах; Алгоритм оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах; Алгоритм принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов.
- Разработан алгоритм измерения координат положения антропогенных частиц и объектов в околоземном пространстве.
- Разработанный программный комплекс обеспечивает высокие показатели эффективности в любой фоноцелевой обстановке без наличия априорных сведений.
- При проведении экспериментальных исследований предложенных алгоритмов подтвердился факт, что может потребоваться калибровка пороговых значений для уменьшения случаев пропусков и обнаружения ложных целей.

Дальнейшим развитием данного исследования может стать построение траектории движения антропогенных частиц и объектов в ОКП и прогнозирование столкновения с космическими аппаратами.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах из перечня ВАК РФ

1. Зыков И.И. Показатели безопасности космического аппарата в полете и генерация информации для предупреждения о высокоскоростном взаимодействии / Ягольников С.В., Храмичев А.А., Катулев А.Н., Палюх Б.В., Зыков И.И. // Программные продукты и системы – 2017. - № 4. - С. 726-732.
Вклад Зыкова И.И. - алгоритмы вычисления координат и построения траектории движения антропогенных частиц.

2. Зыков И.И. Программные средства вейвлет-фрактально-корреляционного метода обнаружения объектов космического мусора / Палюх Б.В., Зыков И.И. // Программные продукты и системы – 2018. - № 2. - С. 414-417. Вклад Зыкова И.И. - описание метода и программного кода обнаружения объектов космического мусора.

Статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК РФ

3. Зыков И.И. Обнаружение минимальных прямоугольных областей / Зыков И.И. // Сборник трудов VI-й Международной научно-технической конференции «Энергетика, Информатика, Инновации» – 2016. -Т. 1. - С. 279-283.

4. Зыков И.И. Метод обнаружения и распознавания / Зыков И.И. // Информатика, управление и системный анализ: Труды IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием – 2016. - С. 205-209.

5. Зыков И.И. Метод обнаружения повреждений на изображении со сложным фоном / Зыков И.И. // Сборник трудов III-ей Международной летней школы-семинара по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальные системы и технологии: современное состояние и перспективы» – 2015. - С. 172-176.