

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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)»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Информационных
систем ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Палюх Б.В.

Тверь, 2018

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Современное состояние проблемы обнаружения антропогенных частиц и объектов. Постановка задачи исследования.....	16
1.1 Описание оптико-электронной системы и его модернизация с помощью нового программного обеспечения	16
1.2 Классификация околоземных орбит. Методы обнаружения антропогенных частиц и объектов.....	23
1.2.1 Средства наблюдения наземного базирования	26
1.2.2 Орбитальные средства наблюдения.....	30
1.3 Методы определения параметров орбиты антропогенных частиц и объектов	32
1.4 Постановка задачи исследования	34
1.5 Выводы по главе.....	35
Глава 2. Обоснование методов обнаружения антропогенных частиц и объектов оптико-электронной системой	37
2.1 Первичное обнаружение объектов космического мусора. Определение базовой вейвлет-функции.....	39
2.2 Идентификация структурных особенностей изображений	45
2.3 Построение минимальных прямоугольных окон	50
2.4 Подтверждение первичного обнаружения фрактально-корреляционными статистиками.....	51
2.5 Описание метода вычисления координат антропогенных частиц и объектов	60
2.6 Методика обнаружения и вычисления координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц и объектов.....	62
2.7 Выводы по главе.....	64
Глава 3. Разработка алгоритмов решения задачи	67
3.1 Алгоритм вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с оптико-электронного прибора.....	70

3.2 Алгоритм формирования минимальных прямоугольных окон.....	72
3.3 Алгоритм вычисления координат окон	74
3.4 Алгоритм оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах	76
3.5 Алгоритм оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах	79
3.6 Алгоритм принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов	80
3.7 Алгоритм вычисления координат антропогенных частиц и объектов.....	82
3.8 Выводы по главе.....	84
Глава 4. Практическая реализация и результаты исследования	85
4.1 Программная реализация алгоритмов.....	85
4.2 Калибровка программной реализации для различных фоновых условий	96
4.3 Испытание программной реализации	97
4.4 Оценка вероятности обнаружения антропогенных частиц и объектов.....	99
4.5 Выводы по главе.....	102
Заключение	103
Обозначения и сокращения	106
Список литературы	107
Приложение А	113

Введение

Техногенное загрязнение околоземного космического пространства является существенным негативным последствием его практического освоения. Дальнейшее освоение околоземного пространства невозможно без объективного анализа текущего состояния загрязнения. Особенно остро этот вопрос стоит по отношению к орбитам до 2000 км., которые называют низкими, а также в геостационарных орбитах, где находится большая масса антропогенных частиц и объектов и где большая вероятность опасных взаимных катастрофических столкновений космических объектов. По мере роста количества спутников на орбите и устаревания существующих, риск лавинообразного развития синдрома Кесслера всё возрастает. Главная особенность синдрома Кесслера заключается в «эффекте домино» [1]. Столкновение двух достаточно крупных антропогенных объектов приведет к появлению большого количества новых антропогенных частиц. Каждая из этих частиц способна столкнуться с другими антропогенными объектами или действующими космическими аппаратами, что вызовет новую волну образования антропогенных частиц.

Получение информации об антропогенных частицах и объектах необходима для определения существующей и прогнозируемой опасности для космических операций. К сожалению, засоренность околоземного пространства сложно охарактеризовать точно. Только самые крупные антропогенные частицы постоянно отслеживаются наземными датчиками, а производить новые датчики для обнаружения многочисленных малых антропогенных частиц намного труднее [2].

Научно-техническим подкомитетом комитета Организации Объединенных Наций (ООН) по использованию космического пространства в мирных целях было утверждено следующее понятие космического мусора: «Космический мусор – все находящиеся на околоземной орбите или возвращающиеся в атмосферу

антропогенные объекты, включая их фрагменты и элементы, которые являются нефункциональными» [3].

Массогеометрические и орбитальные характеристики космического мусора в настоящее время, по данным каталога Космического командования США насчитывается более 16200 наблюдаемых космических объектов (КО) техногенного происхождения, образовавшихся за всю историю космической деятельности (4765 пусков ракетоносителей (РН)), в том числе в результате 251 события разрушения КО на орбите, произошедших случайным образом или инициированных преднамеренно [4].

В настоящее время вокруг Земли скопилось свыше 110 тыс. объектов космического мусора размером свыше 1 см. в диаметре и 40 млн. объектов размер которых превышает 1 мм.

Число объектов размером 1-10 см можно оценить лишь статистически — это примерно 70 - 150 тыс. объектов, поскольку они не наблюдаются ни телескопами, ни радарами, и не могут быть занесены ни в какие-либо каталоги. Столкновение любого объекта космического мусора (КМ) размером более 1 см. с действующим спутником опасно для последнего из-за большой кинетической энергии объекта космического мусора и может стать причиной прекращения его функциональной деятельности, и это еще не самое худшее последствие, если учесть, что на спутнике может находиться ядерный реактор.

Количество антропогенных частиц и объектов в области низких околоземных орбит составляет приблизительно 77 % от общего числа каталогизированных объектов, в области геостационарной орбиты сосредоточено около 6 % каталогизированных объектов, 10% — в области высокоэллиптических орбит и примерно 7 % — на других орбитах, в том числе в области навигационных спутниковых систем. По своему составу каталогизированные объекты включают 20% космических аппаратов. Среди отслеживаемых космических объектов лишь 7% (около 900 объектов) являются активно функционирующими космическими аппаратами. Порядка 11% составляют ступени ракетоносителей и разгонные блоки, 5 % — операционные элементы,

образовавшиеся в процессе выведения космических аппаратов на рабочие орбиты [5] [6] [7]. Как видно, основная часть каталогизированных космических объектов (64%) является продуктами разрушения средств выведения в космос и собственно полезной нагрузки, а именно:

- отработанные последние ступени баллистических ракет (БР) и верхние ступени ракетополносителей, разгонные блоки (ступени разведения);
- элементы конструкций БР и РН, а также отработанные, при выведении и разворачивании в космосе полезной нагрузки, операционные элементы (переходники, обтекатели, соединительные элементы и т.п.);
- полезная нагрузка – космические аппараты различного назначения, отличающиеся конструкцией, массогеометрическими и траекторными характеристиками.

По размерам (величине условного диаметра) все эти антропогенные частицы и объекты можно разделить на следующие категории:

- Мелкие - менее 5 мм,
- Средние - от 5 мм до 10 см,
- Крупные - более 10 см.

Каталоги этих систем содержат известные оценки курса антропогенных частиц и объектов, которые позволяют прогнозировать их движение. Очевидно, что при том факте, что не известна информация об элементах орбит мелких антропогенных частиц и объектов, то их изучение связано с необходимостью применения статистического подхода. Характеристики мелких объектов определяются на основе применения статистических моделей КМ [8].

Важно отметить, что традиционный подход к изучению движения спутников является детерминированным. Он основан на интегрировании уравнений движения. Поэтому создание моделей КМ потребовало необходимость разработки новых методик. В большинстве работ по моделированию КМ в той или иной степени используются идеи детерминированного подхода. Среди имеющегося разнообразия объектов КМ следует выделить два класса [9]. 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. Количество этих объектов мало среди общего числа элементов КМ, 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 космическом пространстве (ОКП) значительно больше, что подтверждается результатами отдельных локальных экспериментов и анализа повреждений поверхностей, долгое время экспонировавшихся на орбите [8].

В отличие от метеорных потоков, пребывание которых в ОКП ограничено временем пролета, антропогенные частицы и объекты представляют значительно большую опасность, так как время его пребывания на орбите существенно дольше, а количество КМ растет. Существует единственный естественный механизм, препятствующий росту засоренности околоземных орбит — это тормозящее воздействие верхних слоев атмосферы, приводящее к сходу объектов КМ с орбиты и их сгоранию в более плотных слоях. Информационные средства космического базирования позволяют определить кумулятивные потоки частиц КМ и метеороидов с поперечными размерами в диапазоне $10^{-1} - 10^4$ см. При этом неопределенность оценки кумулятивных потоков мелких частиц очень велика: $3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$ м²/год [7].

В целом следует отметить, что за последние 40 лет наблюдается устойчивый линейный рост количества каталогизированных объектов, составивший в среднем 210 объектов в год. Состав КМ, то есть доля в нем различных фракций, отличающихся механизмом образования. Около половины каталогизированных КО образовались в результате взрывов на орбите. Меньшие по размерам фрагменты взрывного происхождения не заносятся в каталог ввиду

ограниченности разрешающей способности наземных средств радиолокационного и оптического контроля.

Наиболее перспективными являются оптико-электронные системы орбитального базирования. Но в связи с тем система электроснабжения космического аппарата вносит помехи в работу фотоприёмников, снижая качество получаемых данных, требуется разработка соответствующего программного обеспечения.

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.

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

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. 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 с системы – 2017. - № 4. - С. 726-732.
2. Обнаружение минимальных прямоугольных областей / Зыков И.И. // Сборник трудов VI-й Международной научно-технической конференции «Энергетика, Информатика, Инновации» – 2016. -Т. 1. - С. 279-283.
3. 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.
4. 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.

5. Программные средства вейвлет-фрактально-корреляционного метода обнаружения объектов космического мусора / Палюх Б.В., Зыков И.И. // Программные продукты с системы – 2018. - № 2. - С. 414-417.

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 «Научные технологии».

Структура диссертации

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

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. Кроме того, приведён краткий обзор содержания диссертации.

В Главе 1 " 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 параграфе 1.1 "Описание оптико-электронной системы и его модернизация с помощью нового программного обеспечения" 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.

В параграфе 1.2 "Классификация околоземных орбит. Методы 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.

В параграфе 1.3 "Методы определения параметров орбиты антропогенных частиц и объектов" основные достижения и их недостатки в области определения орбиты антропогенных частиц и объектов в околоземном космическом пространстве.

В параграфе 1.4 "Постановка задачи исследования" изложены основные задачи, требуемые для достижения цели диссертации.

В параграфе 1.5 "Выводы по главе" представлены основные выводы по Главе 1.

В Главе 2 "Обоснование методов обнаружения антропогенных частиц и объектов оптико-электронной системой" описание всех методов и принципов на которых строится теоретическая часть диссертационной работы.

В параграфе 2.1 "Первичное обнаружение объектов космического мусора. Определение базовой вейвлет-функции" приведены основные положения причины выбора вейвлет-преобразований для первичного обнаружения антропогенных частиц и объектов. Так же приведено обоснование выбора базисной функции для вейвлет-преобразований.

В параграфе 2.2 "Идентификация структурных особенностей изображений" описан принцип локализации структурных особенностей изображения на основе вейвлет-преобразований.

В параграфе 2.3 "Построение минимальных прямоугольных окон" приведена причина доведения локализованных структурных особенностей изображения до минимальных прямоугольных областей. Так же указан механизм, по которому происходит это доведение.

В параграфе 2.4 "Подтверждение первичного обнаружения фрактально-корреляционными статистиками" описаны способы вычисления фрактальных размерностей и максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы. Так же приведен пример определения пороговых значений по этим статистикам и принцип принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов.

В параграфе 2.5 "Описание метода вычисления координат антропогенных частиц и объектов" приведен способ определения координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц и объектов.

В параграфе 2.6 "Методика обнаружения и вычисления координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц и объектов" приведена методика обнаружения и вычисления координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц.

В параграфе 2.7 "Выводы по главе" представлены основные выводы по Главе 2.

В Главе 3 "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.

В параграфе 3.1 "Алгоритм вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП" описан алгоритм для вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП.

В параграфе 3.2 "Алгоритм формирования минимальных прямоугольных окон" описан алгоритм для формирования минимального прямоугольного окна, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами.

В параграфе 3.3 "Алгоритм вычисления координат окон" описан алгоритм для вычисления координат окон с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами.

В параграфе 3.4 "Алгоритм оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах" описан алгоритм для оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами.

В параграфе 3.5 "Алгоритм оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах" описан алгоритм для оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами.

В параграфе 3.6 "Алгоритм принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов" описан алгоритм для принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов в минимальных прямоугольных окнах, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами.

В параграфе 3.7 "Алгоритм вычисления координат антропогенных частиц и объектов" описан алгоритм для вычисления координат антропогенных частиц и объектов.

В параграфе 3.8 "Выводы по главе" представлены основные выводы по Главе 3.

В Главе 4 "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.

В параграфе 4.1 "Программная реализация алгоритмов" приводятся программы реализации в системе MatLab алгоритмов обработки изображений, формируемых ОЭП, с целью обнаружения антропогенных частиц и объектов и нахождения их координат в пространстве.

В параграфе 4.2 "Калибровка программной реализации для различных фоновых условий" приводятся причина калибровки программной реализации. Вследствие чего 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.

В параграфе 4.3 "Испытание программной реализации" приводится пример испытания программной реализации несколькими изображениями, полученных канадским космическим телескопом NEOSsat, предназначенный для отслеживания потенциально опасных астероидов и космического мусора.

В параграфе 4.4 "Оценка вероятности обнаружения антропогенных частиц и объектов" производится обоснование нахождения вероятности обнаружения антропогенных частиц и объектов.

В параграфе 4.5 "Выводы по главе" представлены основные выводы по Главе 4.

В Заключение суммированы основные результаты работы. Отмечены направления дальнейшей работы по теме диссертации.

Глава 1. Современное состояние проблемы обнаружения антропогенных частиц и объектов. Постановка задачи исследования

1.1 Описание оптико-электронной системы и его модернизация с помощью нового программного обеспечения

Среди приборов, использующих оптическое излучение, особое место занимают оптико-электронные системы, которым свойственны высокая точность, быстродействие, возможность обработки многомерных сигналов и другие, ценные для теории и практики, свойства. Оптико-электронными называются системы, в которых информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением или содержится в оптическом сигнале, а ее первичная обработка сопровождается преобразованием энергии излучения в электрическую энергию [10] [11].

Структура ОЭС может быть различной в зависимости от способа работы всей системы и от стоящих перед ней задач. Общая схема устройства оптико-электронной системы представлена на рисунке 1.1. Оптико-электронная система для обнаружения антропогенных частиц и объектов состоит из оптико-электронного прибора и программы фильтрации шумов и обнаружения.

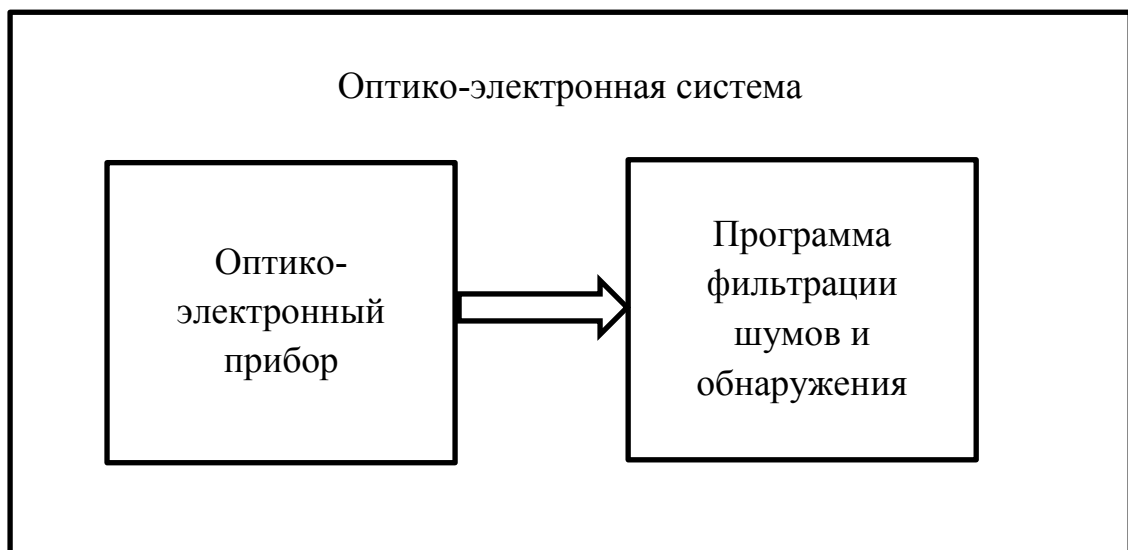


Рисунок 1.1 Схема устройства оптико-электронной системы для обнаружения антропогенных частиц и объектов.

Основным показателем при обнаружении ОЭС антропогенных частиц и объектов является их блеск, единицей измерения которого является звездная величина. Восприятие освещенности подчиняется психофизиологическому закону Вебера–Фехнера: при изменении освещенности в геометрической прогрессии наше ощущение меняется в арифметической прогрессии. Это открытие было сделано в XIX в., но уже древние астрономы бессознательно следовали этой закономерности: они так поделили звезды на величины, что в среднем отношение освещенностей, создаваемых звездами первой и второй величин, почти в точности равно отношению освещенностей от звезд второй и третьей величин, и т. д.

Звездная величина — числовая безразмерная величина, характеризующая яркость звезды или другого космического тела по отношению к видимой площади. Другими словами, эта величина отображает количество электромагнитных волн, излучаемых телом, которые регистрируются наблюдателем. Поэтому данная величина зависит от характеристик наблюдаемого объекта и расстояния от наблюдателя до него [12].

Например, для оптико-электронной системы НЕССИ Канадского космического агентства, выведенного на орбиту 25 февраля 2013 года, блеск обнаруживаемых КО равен до 13,5 звездной величины [13].

Информация об излучающем объекте содержится в параметрах оптического сигнала: амплитуде, частоте, фазе, состоянии поляризации, длительности импульса и т. д., которые и регистрируются в приборе. В зависимости от решаемой задачи источник излучения может являться объектом наблюдения (целью) или фоном. ОЭС можно классифицировать по следующим признакам:

- область спектра;
- способ использования информации;
- решаемая задача;
- ширина полосы длин волн, в которых прибор чувствителен;
- режим работы.

Исходя из используемой области спектра, ОЭС подразделяются на системы, работающие в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра.

Способ использования информации определяет, является ли ОЭС автоматическим, т. е. принимающим решение без участия человека, или индикационным, обеспечивающим выдачу информации в виде, пригодном для принятия решения человеком [14].

Исходя из решаемой задачи, ОЭС можно подразделить на пеленгаторы, определяющие положение цели, дальномеры, определяющие дальность до цели, приборы ночного видения и телевизоры, определяющие форму предмета, пирометры – приборы для измерения температуры объектов. Кроме того, существует класс систем, предназначенных для определения фотометрических характеристик излучения, оптических свойств тел и сред, поляризации излучения и т. д.

Ширина полосы длин волн, где прибор чувствителен, позволяет подразделить ОЭС на спектральные (спектрометры, спектрофотометры), интегральные (радиометры) и спектрзональные – спектрорадиометры.

Согласно режиму работы, ОЭС делятся на два больших класса – активные и пассивные ОЭС. Активные ОЭС – это системы, в которых для облучения цели используется оптический квантовый генератор (ОКГ). Часть излучения ОКГ отражается от цели, и только часть этого отражения поступает на вход ОЭС. Пассивные ОЭС – это системы, воспринимающие собственное (тепловое) излучение объектов (и фонов) и отраженное ими излучение естественных источников (Солнца, Луны, рассеянное излучение атмосферы и подстилающей поверхности) [15].

К задачам расчета ОЭС можно отнести следующее:

- выбор и расчет оптической схемы ОЭС;
- энергетический расчет прохождения произвольно поляризованного излучения через оптическую систему, позволяющий определить поляризационные параметры оптической системы;

- анализ явлений, имеющих место при взаимодействии оптического излучения с элементами оптической схемы;
- выбор источников и приемников излучения конкретных схем ОЭС и расчет их параметров;
- спектральный, пространственный и поляризационный анализ оптических сигналов и помех в ОЭС;
- расчет отношения сигнал/шум на выходе приемника излучения и на выходе всей ОЭС;
- расчет вероятности обнаружения сигнала на фоне помех;
- расчет уровней излучения точечных и протяженных объектов применительно к активным и пассивным ОЭС;
- оценка прохождения оптического излучения и преобразование его параметров и характеристик при распространении в однородной и неоднородной атмосфере Земли;
- расчет дальности действия ОЭС;
- расчет потенциальной точности ОЭС;
- расчет динамических, случайных и инструментальных погрешностей ОЭС.

Основными задачами, решаемыми оптическими системами ОЭС, являются:

- обзор части пространства, в которой находится объект поиска,
- ориентир или объект наблюдения;
- анализ оптического изображения объекта в определенном масштабе с целью последующей его регистрации;
- обеспечение требуемой освещенности на поверхности приемника излучения;
- концентрация потока излучения искусственных источников;
- определение угловых координат объектов и дальности до них.

Оценку свойств, качества и эффективности действия оптических систем ОЭС проводят с помощью ряда характеристик, которые можно разделить на следующие группы от способа работы всего прибора и от стоящих перед ним задач:

- технико-экономические и эксплуатационные;
- габаритные;
- энергетические;
- абберационные;
- пространственно-частотные.

Габаритные характеристики ОС. Основными характеристиками этой группы являются: фокусное расстояние, поле зрения, относительное отверстие, или диаметр входного зрачка, и разрешающая способность. Следует отметить, что относительное отверстие определяет освещенность в изображении объекта, т. е. оказывает влияние на энергетические характеристики ОС.

Основными энергетическими характеристиками являются: освещенность в изображении объекта, светосила, коэффициент пропускания и матрица пропускания.

Пространственно-частотные характеристики ОС характеризует реакцию ОС на входное воздействие. В случае, когда в поле зрения системы имеется светящийся объект, освещенность изображения точки, имеющей координаты (x, y) , в идеальной оптической системе, т. е. системе без аббераций и дифракционного рассеяния, равна определенному значению. Тогда в других точках плоскости изображения она равна нулю. В реальной оптической системе дифракционное рассеяние и абберации вызывают размытие светящейся точки по пятну рассеяния, в результате чего освещенность в некоторой точки (x', y') плоскости изображения оказывается отличной от нуля. Степень размытия изображения характеризуется функцией рассеивания, которая представляет собой закон изменения освещенности в точке (x', y') , когда из точки (x, y) направляем поток, равный единице.

В случае, когда, имеется совокупность светящихся точек, составляющих объект наблюдения. В этом случае из элементарной площадки вокруг точки (x, y) падает поток излучения. Полная освещенность в точке (x', y') равна сумме возникающих из-за рассеяния потоков, исходящих из всех элементов элементарной площадки. Преобразование Фурье позволяет получить пространственно-частотный спектр распределения освещенности изображения.

Носителями информации в оптико-электронных приборах служит оптическое излучение, идущее от исследуемого объекта. Основными параметрами этого полезного оптического излучения являются длина волны, поляризационные характеристики, интенсивность (амплитуда) и их пространственное распределение, которое характеризует форму и размеры исследуемого объекта. Каждый из перечисленных параметров может нести полезную информацию об исследуемом объекте. Аналогичными параметрами можно характеризовать и излучение от других предметов, на фоне которых производится наблюдение исследуемого объекта. Излучение от этих предметов создает помеху, искажающую полезную информацию об исследуемом объекте.

При проектировании оптико-электронных систем проводится предварительное изучение параметров излучений исследуемого объекта и фона, а также выбор в качестве основного параметра сигнала такого параметра излучения, который в большей степени характеризует исследуемый объект и в меньшей степени – вредный фон. Использование фильтров позволяет выделить сигнал из смеси «сигнал-помеха», поступающей на вход оптико-электронной системы, и, тем самым, улучшить ее информационно-измерительные характеристики. По виду основного информационного параметра оптического сигнала фильтрации подразделяют на спектральную, поляризационную и пространственную [16].

Спектральная фильтрация заключается в использовании спектральных фильтров, пропускающих на фотоприемник оптическое излучение в заданном интервале длин волн. Пространственная фильтрация характеризуется использованием в качестве информационного параметра пространственного

распределения интенсивности излучения, которое выделяется из смеси «сигнал-помеха» с помощью пространственно-частотных фильтров, выполненных в виде щелей, масок, растров, Фурье-голограмм. Пространственная фильтрация широко используется в задачах поиска, обнаружения, распределения и контроля объектов заданной формы. Поляризационная фильтрация заключается в применении фильтров, пропускающих на фотоприемник излучение определенной поляризации для объектов и не пропускающих поляризованное излучение помех.

Требования к характеристикам измерительно-фотометрического приемника хотя и являются весьма жесткими, однако среди существующих и разрабатываемых имеются такие, которые этим требованиям в той или иной мере соответствуют. В части поисково-измерительного приемника все выглядит значительно сложнее. Такой приемник одновременно должен удовлетворять трудновыполнимым и вместе с тем противоречивым требованиям: большой формат, предельно высокая интегральная квантовая эффективность, минимально возможное время считывания накопленного сигнала, минимальные шумы считывания [17].

Модернизация ОЭС с помощью нового программного обеспечения вытекает из понимания того, что обнаружения антропогенных частиц и объектов происходит в сложных фоновых условиях и априори не известны их форма и сигнал на изображении, полученного ОЭС. Пространственная фильтрация использует фильтры для обнаружения объектов заданной формы, поляризационная фильтрация использует излучение определенной поляризации для объектов. При спектральной фильтрации в большинстве случаев используются преобразования Фурье, но Фурье функции (синус или косинус) не локализованы в пространстве.

1.2 Классификация околоземных орбит. Методы обнаружения антропогенных частиц и объектов

Среди орбит, на которые выводятся искусственные спутники Земли, стоит выделить следующие типичные конфигурации:

Низкая околоземная орбита. Обычно околокруговая орбита с высотой 300-600 километров. На таких орбитах летает большинство спутников Земли, в том числе осуществляющие дистанционное зондирование планеты. Орбиты КО низкой околоземной орбиты подвержены максимальным возмущениям со стороны гравитационного поля Земли и её верхней атмосферы.

Солнечно-синхронная орбита. Приполярная околокруговая орбита. В зависимости от наклона (которое в любом случае близко к 90 градусам) и высоты орбиты можно добиться различной скорости вращения орбиты в пространстве, вызванной сплюснутостью Земли. Благодаря этому на такой орбите спутник проходит одну географическую широту каждый раз в одно и то же среднее солнечное время. Для достижения этого эффекта орбита должна прецессировать в сторону, обратную вращения Земли (т.е. на восток) на 360° в год, чтобы компенсировать вращение Земли вокруг Солнца. Такие условия соблюдаются только для определённого диапазона высот орбит и наклонов - как правило, это высоты 600-800 км. При увеличении высоты полёта КО наклонение должно увеличиваться, из-за чего он не будет пролетать над полярными районами. Как правило, солнечно-синхронные орбиты близки к круговым, но могут быть и заметно эллиптическими [17].

Геостационарная орбита. Круговая орбита, находящаяся в плоскости экватора. Высота орбиты – 35786 км. над средним уровнем моря. Угловая скорость спутника на такой орбите равна угловой скорости вращения Земли относительно звезд (сидерические сутки). Из-за небольшой сплюснутости Земли на экваторе (третья гармоника геопотенциала) на геостационарной орбите есть только две устойчивые точки, в других точках аппарат необходимо постоянно поддерживать. Из-за высокой важности орбиты и её уникальности, место на ней

дорого, и каждый аппарат сводится после окончания работы. В реальности многие геостационарные спутники имеют небольшое наклонение и подвержены возмущениям со стороны Луны и Солнца, в связи с чем они описывают на небе фигуры в виде "восьмёрок", вытянутых в направлении север-юг.

Сильноэллиптическая орбита. Орбита с большим эксцентриситетом, выглядящая как эллипс. Обычно у таких орбит низкие перицентр и высокий апоцентр. Это можно использовать для запуска телекоммуникационных спутников, минуя заполненную геостационарную орбиту. Группировка аппаратов на сильно вытянутых орбитах может обеспечивать постоянное покрытие поверхности страны. Такая орбита используется космическим телескопом Спектр-Р для обеспечения большой интерферометрической базы. К таким орбитам относятся геопереходные, у которых перицентр находится на низкой околоземной орбите, а апоцентр – на геостационарной. Ракета-носитель выводит аппарат на такую орбиту, а по достижении апоцентра он должен собственными двигателями перейти на круговую орбиту.

Обычно спутники, как искусственные, так и естественные, обращаются в ту же сторону, в которую вращается притягивающее тело. Изредка встречаются ретроградные орбиты, по которым тело вращается в обратную сторону.

В настоящее время основными источниками информации для получения данных о КМ являются [18] [19] [20]: - радиолокационные измерения, где основную роль играют наземные радиолокационные станции (РЛС) с электронным управлением направленностью луча и фазированными антенными решетками. Такие РЛС могут одновременно обнаруживать и измерять множество объектов по различным направлениям. Предельные дальности измерения КО размеру более 10-30 см — несколько тысяч километров; - оптические измерения с использованием телескопов, которые применяются, в основном, для измерения медленно движущихся КО (на высотах более 10000 км). В области геосинхронных орбит с высотой в окрестности 35 790 км телескопы могут измерять КО размеру более 0,5 м. Измерение и каталогизация КО осуществляются национальными средствами системы контроля космического пространства (СККП) в Российской

Федерации и в США. Классификация объектов производится в основном по орбитальным элементам.

Основные способы обнаружения на текущем этапе развития данной области: радиотехнические, радиолокационные, оптические и детектирующие удары системы и комплексы.

Радиотехнические средства системы контроля космического пространства работают по принципу регистрации излучаемых космическими объектами радиосигналов. Радиолокационные средства работают по отраженному сигналу в различных диапазонах электромагнитного спектра от миллиметрового до метрового и обладают разной чувствительностью и обнаружительной способностью [21].

Оптические средства наблюдают космические объекты в отраженных лучах солнечного света, поэтому ограничением для их применения являются погодные условия [22].

Системы и комплексы детекторов ударов могут применяться только при условии орбитального базирования. Это приводит к тому, что в разных областях околоземного космического пространства предельный размер обнаруживаемых и сопровождаемых объектов различный.

Современные используемые и предлагаемые методы и модели обнаружения и распознавания типов антропогенных частиц и объектов можно разделить на две группы по месту базирования:

- средства наблюдения наземного базирования;
- орбитальные средства наблюдения.

Наиболее перспективными являются орбитальные средства наблюдения в виду того, что в отличие от других групп они не зависят от искажений сигналов, вызванных неоднородностью среды передачи. Орбитальные средства наблюдения способны осуществлять обнаружение антропогенных частиц и объектов в тех случаях, когда их затруднительно обнаруживать с помощью наземных средств наблюдения.

Размещение камер на геостационарной орбите может обеспечить

значительную производительность обнаружения. Их использование должно обеспечить рентабельный способ обновления информации о параметрах орбиты мусора и объектов [23]

1.2.1 Средства наблюдения наземного базирования

К основным методам и моделям средств наблюдения наземного базирования относятся радиолокационные и оптические средства систем контроля космического пространства, которые весьма сложные и уникальные в техническом исполнении устройства. К примеру, американская РЛС с фазированной антенной-решеткой «Кобра Джейн», позволяет определять траектории объектов размером от 5 см. и является одним из самых совершенных сенсоров для средств контроля космического пространства США. Дальность обнаружения радиолокационной станции в соответствии с формулой радиолокации в значительной мере зависит от дальности до цели и ее размеров - эффективной поверхности рассеивания. Только единичные РЛС системы SPADATS способны наблюдать объекты на высоких орбитах. Но основной проблемой при использовании РЛС в штатном режиме является их работа с повышенным порогом чувствительности и невозможность обнаружить большинство из фрагментов.

В 2015 году разработан и введен в эксплуатацию Германский экспериментальный радар для космических наблюдений и сопровождения (GESTRA). Этот радар, доработкой которого занимается Фраунгоферовский институт физики высоких частот и радиолокационных методов, является экспериментальной системой для определения орбитальных параметров в области низких околоземных орбит [22].

Оптические посты американской системы GEODSS расположены в районах Земного шара, отличающихся повышенной прозрачностью атмосферы. Пост оптического наблюдения на острове Ла-Пальма - один из самых больших в мире телескопов с диаметром зеркала 10,4 метров. Особенностью его конструкции является очень низкий уровень вибрации оптической системы, что обеспечивает

исключительную четкость получаемых изображений [24].

Российские оптические средства объединены в составе научной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН) техногенных объектов, включающей по состоянию на 2009 год 19 пунктов наблюдения в 9 государствах и использующих 26 телескопов различного класса с диаметром зеркала от 22 см до 2,6 м. Общее руководство проектом НСОИ АФН, постановку задач, накопление и анализ результатов осуществляет ИПМ им. М.В.Келдыша РАН во взаимодействии с ОАО МАК «Вымпел». НСОИ АФН является единственным в мире источником информации по опасным малоразмерным (0,2-1м) и слабым (менее 16,5 звездной величины) объектам в области геостационарной орбиты и высокоэллиптических орбит.

В Бернском университете, Швейцария, ведется работа над созданием сети оптических станций, предназначенных для мониторинга секторов геостационарной орбиты и других связанных с ней орбит в целях поддержки исследований в области предупреждения столкновений и других научных областях. Управление телескопами осуществляется дистанционно, а сбор данных ведется по объектам размером более 50 см на геостационарной орбите. В ходе ряда успешных испытаний удавалось обнаруживать объекты менее 18-й звездной величины и определять их местоположение. Орбиты определялись с точностью до 200 м во всех трех измерениях, и удавалось безошибочно выявлять спутники, объединенные в группировки.

С 1982 года Институт космических исследований Австрийской академии наук использует станцию спутниковой лазерной дальнометрии на базе Лустбюэльской обсерватории в Граце. Эта станция круглосуточно и ежедневно измеряет расстояния для более чем 60 спутников, оборудованных ретрорефлекторами, включая геодезические спутники, спутники глобальных навигационных спутниковых систем, спутники наблюдения Земли и различные научно-исследовательские спутники. В 2012 году лазерная станция в Граце начала опробовать использование лазерной дальнометрии применительно к объектам космического мусора. Были разработаны новые специальные однофотонные

детекторы, а программное обеспечение лазерной дальнометрии было адаптировано применительно к слежению за космическим мусором. Впервые были произведены измерения фотонов, которые были диффузно отражены от объектов космического мусора, в целях определения расстояния до этих объектов. Хотя точность этих измерений выходит за миллиметровый диапазон, такой подход позволяет значительно точнее определять орбиту.

Метод [25] обнаружения элементов космического мусора, использующий широкоугольной оптико-электронной системы с мгновенными полями зрения более 30 кв. градусов. На первом этапе осуществляется анализ параметров фоновой-сигнальной составляющей. Далее определяются значения коэффициентов корреляции полигональных оценок гистограмм. На втором шаге осуществляется определение глобальных или локальных пороговых значений по интенсивности с учетом полученных оценок параметров фоновой составляющей. На следующем шаге выделяются изображения в цифровом кадре. На четвертом шаге выявляются особо яркие изображения. Для локального сегмента определяется значение порога по интенсивности и производится уточнение параметров формуляра особо яркого изображения. Также данный локальный сегмент исключается из сегмента цифрового кадра, и производится уточнение порогового значения по интенсивности и дополнительное выделение изображений.

Существуют несколько методов обнаружения при помощи бистатистических радаров. В [26] предлагается использовать SRDI, который расширяет понятие RDI с использованием Доплеровского распространение для получения двумерной (2D) форма космического мусора. Однако, из-за его некогерентного метода обработки разрешения SRDI низкая. Система преодолевает основной недостаток RDI, в том, что он применим только если длина волны радара волны больше, чем размер объекта. В [27] рассматриваются аспекты целесообразности отслеживания космического мусора на низкой околоземной орбите, используя излучение от спутников GNSS, как бистатистических радаров-осветителей. Длины волн сигналов GNSS порядка 20 см и главной задачей является отслеживание мусора меньше этого размера, тем самым сохраняя стабильной фазу рассеянных сигналов, что

позволяет долго обрабатывать последовательные интервалы. Тем не менее, сигналы рассеянных объектов космического мусора будут очень слабыми на земных приемниках, требующими интегрированных вычислительных ресурсов большого количества сигналов в течение длительного срока и с большой фазированной решеткой. Выявление таких слабых сигналов в присутствии относительно сильного прямого принимаемого сигнала требует чрезвычайно высокую взаимную корреляцию защиты.

Использование больших антенн земной станции, сообщающихся с геостационарными спутниками-ретрансляторами и повторное использование спектра с внесенными помехами, могут обнаружить линии визирования космического мусора. Более высокочастотные сигналы могут определить и размер мусора, как малых, так и 5 см в диаметре [28].

Также производятся исследования возможности, которые предоставляет техника, использующая новый низкочастотный радиотелескоп, который был построен в Западной Австралии, массив Мерчисон Уидфилде (МДж). Кратко, МДж работает в частотном диапазоне 80 - 300 МГц с мгновенную ширину полосы 30.72 МГц, имеет очень широкое поле зрения, и разумные угловым разрешением. Массив Мерчисон Уидфилде (МДж) является совместным проектом международного консорциума университетов, чтобы построить низкочастотный спектр радиостанций, работающих в частотном диапазоне 80-300 МГц [29].

Радиолокационные средства наблюдения (наземного базирования), ввиду присущих им особенностей, предпочтительнее использовать для контроля низких орбит.

Недостатки радиолокационных средств:

- практически невозможны передислоцируемые варианты;
- высокая стоимость создания и обслуживания РЛС;
- чрезмерно большое потребление электроэнергии во время работы;
- экологическая небезопасность;
- возможная неоднозначность измерений, в частности, при определении размеров наблюдаемого КО;

- зависимость чувствительности от четвертой степени расстояния до наблюдаемой цели [4].

Основное назначение оптических средств наблюдения (наземного базирования) — обнаружение и наблюдение за высокоорбитальными КО. Однако не лишены они и недостатков. Прежде всего:

- возможность наблюдения зависит от времени суток, погодных условий, фазы Луны, степени освещенности цели, фазы ее освещенности;
- обнаружительные способности и точность измерений во многом определяются скоростью пересечения целью поля зрения средства;
- одно средство может одновременно контролировать крайне ограниченное число целей;
- операция перенацеливания телескопа на другой КО требует заметно большего времени, чем радара с фазированной решеткой;
- программно-алгоритмическое обслуживание процесса наблюдения,
- обнаружения полезного сигнала и его измерения значительно сложнее, чем в радиолокационной системе;
- производительность оптических средств значительно ниже, чем радиолокационных.

1.2.2 Орбитальные средства наблюдения

Одним из направлений исследований для орбитальных средств наблюдения являются методы обнаружения антропогенных частиц и объектов детектором ударов.

В работе [30] предлагается создание сети из каптоновых пленок для столкновений с космическим мусором, предназначенной для обнаружения малоразмерного космического мусора и микрометеоритов. Измерение разницы во времени воздействия между первыми двумя каптоновыми пленками, с известным расстоянием могут быть использованы для расчета скорости микрометеоритов и космического мусора. Местоположения воздействия на каждую пленку могут быть определены методом триангуляции по времени прихода акустических

сигналов, полученных на различных датчиках поливинилиденфторида (ПВДФ) в известных местах. Сравнение локальных влияний на первые две пленки позволяет определить направление удара. ПВДФ-датчики также используются для измерения размера отверстия воздействия с помощью пик-пик амплитуды акустического сигнала.

Еще один схожий метод на основе детектора ударов, использует солнечные панели для обнаружения воздействия. Так как солнечные панели обеспечивают большие зоны обнаружения, этот метод позволяет получать большой объем данных. Концепция метода заключается в модификации изоляционного слоя солнечных элементов для распространенных солнечных батарей. Модифицированная панель объединяет два слоя медных линий между слоями изоляции. Два слоя меди выравниваются в перпендикулярных направлениях, образуя сетку обнаружения. В случае столкновения наносится урон частицами, проникающая способность которых может варьироваться от слоя покровного стекла до слоя обнаружения и как следствие, уничтожает несколько медных линий в сетке. Количество и расположение поврежденных линий можно определить путем электроники обнаружения и программного обеспечения [31].

У методов, использующих детекторы ударов есть существенный недостаток, заключающийся в том, что после столкновения с антропогенными частицами и объектами появляются неустраняемые повреждения поверхностей детекторов. Также возникает вероятность создания новых антропогенных частиц.

В настоящее время Японское космическое агентство ДЖАКСА разрабатывает бортовой детектор для непосредственного измерения микрофрагментов космического мусора (диаметром менее 1 мм), которые невозможно обнаружить с Земли. Принцип работы датчика в этом детекторе, который называется индикатором частиц космического мусора, впервые основан на использовании проводящих (резистивных) полосок. Если такие датчики установить на многих космических аппаратах, то полученные данные могли бы способствовать уточнению модели среды космического мусора. Для проведения первого эксперимента по измерению микрофрагментов мусора с использованием

проводящих (резистивных) полосок для детектирования [32].

В работе [33] предлагается использовать для решения задач обнаружения и идентификации радиоактивного космического мусора гамма- спектрометры на основе сцинтилляционных детекторов и ксеноновых гамма-детекторов. Сцинтилляционный детектор служит, в основном, для обнаружения радиоактивных объектов космического мусора, а ксеноновый гамма- детектор обеспечивает возможность идентификации этих объектов благодаря его высокому энергетическому расширению.

Модель лазерной локации космического мусора, построенной на основе классического уравнения локации [34] используется мониторинг отдельных объектов космического мусора на значительных дальностях представляющий собой решение классической задачи лазерной локации диффузного отражателя произвольной формы, угловые размеры которого меньше угловой расходимости излучения лазерного локатора. При размерах облака ФКМ меньше угловой расходимости излучения лазерного локатора проблема сводится к описанной выше задаче лазерной локации диффузного отражателя произвольной формы.

1.3 Методы определения параметров орбиты антропогенных частиц и объектов

После проблемы обнаружения, второй наиважнейшей проблемой является проблема вычисления координат антропогенных частиц и объектов в ОКП. В настоящее время предложено несколько способов решения данной задачи.

Группа исследователей из Института прикладной оптики и точной механики Фраунгофера разработали новый лазер, способный точно позиционировать КМ и определять направление их движения. Принцип работы этого лазера состоит в испускании им многочисленных коротких импульсов в разные стороны с последующей регистрацией отраженных от космических объектов лучей. Эта лазерная система способна излучать по несколько тысяч импульсов в секунду. Если объект действительно находится в одном из

проверяемых расположений, лазерный луч отразится от него и попадет на специальный сканер, непосредственно интегрированный в систему.

Предлагается способ в области траекторных измерений параметров орбит подвижных КО на фоне звездного неба. Достижимым техническим результатом изобретения является повышение точности определения координат движущегося КО на фоне звездного неба. Результат достигается за счет того, что в заявленном способе определяют угловые координаты КО и пересчитывают полученные величины во вторую экваториальную систему координат путем привязки КО к каталожным звездам, координаты которых с высокой точностью известны во второй экваториальной системе координат [35].

Также используются методы моделирования ускорений от светового давления с использованием позиционных наблюдений объектов космического мусора. В первом способе совместно с координатами и скоростями определяется коэффициент парусности. В последующих двух подходах задаются отличные друг от друга спутникоцентрические системы координат и определяются три компоненты вектора ускорения вдоль осей этих систем координат [36].

В другой работе предлагается альтернативный способ регистрации космического мусора, основанный на использовании звёздных датчиков систем ориентации, которыми оснащаются практически все современные космические аппараты. на конкретных примерах показано, что с помощью звёздных датчиков можно регистрировать частицы космического мусора с размером от 1 мм, находящиеся на расстоянии до нескольких километров от космического аппарата [37].

Существует приближенный аналитический метод, позволяющий вычислить значения орбитальных элементов по конечным формулам. В основу разработки метода положено преобразование конечных вычислительных зависимостей, полученных при аналитическом интегрировании дифференциальных уравнений, описывающих орбитальное движение космического аппарата в скоростной системе координат, представляющей частный случай общей системы уравнений. После преобразования исходной системы дифференциальных уравнений

составляются аналитические зависимости, связывающие данные, полученные после обработки информации, с кеплеровским интегралом площадей орбиты исследуемого объекта [38].

Также возможно формулирование минимаксной задачи определения параметров ориентации плоскости орбиты космического аппарата (КА) таким образом, чтобы максимальный угол некомпланарности между плоскостями орбит КА и космического мусора был минимально возможным. Решение задачи осуществляется с помощью новой методики, которая заключается в представлении положения плоскостей орбит в пространстве (наклонение, прямое восхождение восходящего узла) точками на единичной сфере и упорядочивании их [39].

Возможно решение проблемы вычисления координат КО при помощи предварительного определения орбиты космического объекта КМ, необходимые начальные данные могут быть получены с приборов, входящих в систему навигации и ориентации большинства современных космических аппаратов [40].

Для определения параметров орбиты КМ на орбиту выводят КА, в составе бортовой аппаратуры которого размещают навигационную аппаратуру потребителя глобальной навигационной спутниковой системы и аппаратуру измерения частоты сигнала, передаваемого наблюдаемым КА. В орбитальном полете выведенного КА определяют параметры его орбиты с помощью навигационной аппаратуры потребителя. Определяют орбиту наблюдаемого КМ по измеренным значениям частоты сигнала и параметрам орбиты выведенного космического аппарата [41].

1.4 Постановка задачи исследования

Для достижения цели диссертации, состоящего в повышении показателей надежности и точности обнаружения антропогенных частиц и объектов оптико-электронной системой, необходимо:

- 1) разработать методику обнаружения антропогенных частиц и объектов при априори неизвестных данных о состоянии наблюдаемой области околоземного космического пространства
- 2) разработать алгоритм обнаружения на изображениях антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронной системы;
- 3) разработать алгоритм вычисления координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов в околоземном пространстве;
- 4) выполнить экспериментальные исследования возможности использования разработанной методологии;
- 5) провести оценку вероятности обнаружения предложенными алгоритмами антропогенных частиц и объектов.

1.5 Выводы по главе

Несмотря на то, что освоение околоземного космического пространства наращивается и все больше и больше стран, компаний и агентств участвует в этом процессе. Проблема обнаружения малоразмерного космического мусора в виде антропогенных частиц и объектов стоит очень остро и в любой момент из-за скопившейся массы объектов на орбите и их столкновений между собой может привести к синдрому Кesslera, который может остановить развитие освоения ОКП.

Описана причина того, что наиболее перспективными являются орбитальные средства наблюдения в виду того, что в отличие от других групп они не зависят от искажений сигналов, вызванных неоднородностью среды передачи. Но в тоже время работа энергоустановок орбитальных средств, использующие оптико-электронные приборы, может привести к зашумлению изображений наблюдаемой области ОКП. И для устранения этой проблемы требуется разработать метод и алгоритмы обработки изображений, способных при отсутствии априорной информации функционировать.

Глава 2. Обоснование методов обнаружения антропогенных частиц и объектов оптико-электронной системой

Предлагаемый в данной работе метод 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.

При работе оптико-электронной системы могут возникать ситуации, когда появляются искажения, связанные с возникновением шумов от ОЭС, 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 антропогенных частиц и объектов. В первую очередь этот вывод обусловлен характером фонов изображения [42]. Обработка изображения на основе вейвлет-преобразования позволяет решить ряд задач, связанных с уменьшением уровня шума, выделение локальных пространственных неоднородностей, сжатия изображения, а также анализом текстур [43].

Одним из главных преимуществ, которое предоставляет вейвлет, является возможность представлять локальный анализ, т.е. анализировать локализованную область в большом сигнале. Вейвлет анализ способен выявить следующие особенности данных, которые упускают другие методы анализа сигналов: точки разрыва, резкие нелинейности в высших гармониках и самоподобие.

Вейвлеты позволяют выделять одновременно как низкочастотные характеристики сигнала, так и высокочастотные составляющие. Это свойство является существенным преимуществом в задачах обработки сигналов по сравнению с оконным преобразованием Фурье, где, варьируя ширину окна, приходится выбирать масштаб, на котором требуется выделять особенности в

сигнале. Результатом вейвлет-преобразования одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования. Распределение этих значений в пространстве «временной масштаб» – «временная локализация» дает информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования или вейвлет-спектром [44].

Одним из способов узнать частотно–временные различия между преобразованием Фурье и вейвлет–преобразованием, является посмотреть на базисную функцию. В оконном преобразовании Фурье окном является простая квадратная волна. Окно квадратной волны обрезает синус или косинус, чтобы соответствовать окну определенной ширины. Так как одно окно используется для всех частот в ДВП, точность анализа остается постоянной на всех участках в частотно–временной плоскости [45] [46].

Преимуществом вейвлет преобразования является то, что окна изменяются. Для того чтобы выделить разрывы сигнала, требуется иметь некоторые очень короткие базисные функции. В то же время для того, чтобы получить подробный анализ частоты, требуется иметь некоторые очень длинные базисные функции. Одним из способов достижения этого является наличие коротких высокочастотных базисных функций и длинных низкочастотных. Эта золотая середина именно то, что вы получаете при использовании вейвлет–преобразования [47].

Единственное, что следует помнить это то, что вейвлет–преобразования не имеют единого набора базисных функций, таких как преобразование Фурье, которое использует только функции синус и косинус. Вместо этого, вейвлет–преобразования имеют бесконечное множество возможных базисных функций. Таким образом, вейвлет–анализ обеспечивает немедленный доступ к информации, которая может быть скрыта от других частотно–временных методов таких, как анализ Фурье.

С целью получения достоверных результатов антропогенных частиц и объектов следует учитывать несколько показателей - фрактальные размерности и

максимальные собственные значения автокорреляционных матриц исходных изображений [48]. Информативность не нарушается при изменении фоновых условий, подтверждаются свойства фрактальной размерности, как минимальной достаточной статистики и максимального инварианта [49]. По определению максимальные собственные значения являются максимальными инвариантами и минимально достаточными статистиками [50].

2.1 Первичное обнаружение объектов космического мусора. Определение базовой вейвлет-функции

Определяющую роль в шумоподавлении и обнаружении характерных для антропогенных частиц и объектов структурах играет выбор семейства вейвлетов.

Обычно под вейвлетами понимаются функции, сдвиги и растяжения которых образуют базис многих важных пространств, в том числе и ортогональный базис $L^2(R)$. Эти функции являются компактными как во временной, так и в частотной области. Вейвлеты непосредственно связаны с кратномасштабным анализом сигналов. Вейвлеты могут быть ортогональными, полуортогональными, биортогональными. Эти функции могут быть симметричными, асимметричными и несимметричными. Различают вейвлеты: с компактной областью определения и не имеющие таковой. Некоторые функции имеют аналитическое выражение, другие — быстрый алгоритм вычисления связанного с ними вейвлет-преобразования. Вейвлеты различаются также степенью гладкости. Для практического использования желательно было бы иметь ортогональные симметричные или асимметричные вейвлеты, к сожалению, доказана теорема о том, что такими вейвлетами являются лишь вейвлеты Хаара [51]. Так же существует еще деления по основным возможностям для анализа данных.

Прямое вейвлет-преобразование содержит комбинированную информацию об анализируемом сигнале и анализирующем вейвлете. Несмотря на это, вейвлет-преобразование позволяет получить объективную информацию о сигнале, потому

что некоторые свойства вейвлет-преобразования не зависят от выбора анализирующего вейвлета. Независимость от вейвлета делает эти простые свойства очень важными.

К вейвлетам относятся локализованные функции, которые конструируются из одного материнского вейвлета $\psi(t)$ (или по любой другой независимой переменной) путем операций сдвига по аргументу (b) и масштабного изменения (a):

$$\psi_{ab}(t) = (1/\sqrt{|a|}) \psi((t-b)/a), \quad (a, b) \in \mathbb{R}, \quad \psi(t) \in L^2(\mathbb{R}) \quad (1.1)$$

где множитель $(1/\sqrt{|a|})$ обеспечивает независимость нормы функций от масштабного числа ' a '.

Вейвлетный масштабно-временной спектр $S(a,b)$ в отличие от фурье-спектра является функцией двух аргументов: масштаба вейвлета ' a ' (в единицах, обратных частоте), и временного смещения вейвлета по сигналу ' b ' (в единицах времени), при этом параметры ' a ' и ' b ' могут принимать любые значения в пределах областей их определения [52].

К «грубым» вейвлетам относятся вейвлеты Гауссова типа, Морле и «мексиканской шляпы». Они обладают минимумом свойств, которыми должны обладать вейвлеты, обеспечивающие полноценные возможности: анализ не является ортогональным; возможна непрерывная декомпозиция.

К бесконечным регулярным вейвлетам принадлежат вейвлеты Мейера. Они имеют следующие свойства: их анализ ортогональный; вейвлеты симметричны и регулярны в бесконечности; быстрый алгоритм преобразований не поддерживается. Еще один вейвлет этого типа — дискретный вейвлет Мейера. Его свойства: аппроксимация фильтром класса FIR; поддержка непрерывного и дискретного преобразований.

Ортогональные вейвлеты с компактным носителем. К этим вейвлетам относятся вейвлеты Добеши, Симлета и Койфлета. Их основные свойства: возможны непрерывные преобразования и дискретные преобразования с

применением быстрого вейвлет-преобразования; обеспечивается принципиальная возможность реконструкции сигналов и функций.

Биортогональные парные вейвлеты с компактным носителем. К ним относятся В-сплайновые биортогональные вейвлеты. Наиболее существенные достоинства: симметрия с фильтрами, желаемые свойства для разложения и восстановления разделены, возможно их хорошее распределение. Наиболее существенные трудности: отсутствие ортогональности.

К комплексным относится довольно большая группа вейвлетов: Гаусса, Морле, Шеннона и частотные В-сплайновые вейвлеты. Они обладают минимальными свойствами: анализ не ортогональный; возможен анализ типа комплексной декомпозиции. Трудности применения: быстрый алгоритм и реконструкция невозможны.

Перед началом шумоподавления важно правильно выбрать сам алгоритм обработки сигнала. В результате анализа научных работ по данной тематике сделаны следующие выводы:

- вейвлеты вида Хаара, Добеши 4 и Добеши 6 при четвертом уровне декомпозиции дают лучшие результаты;
- лучшие результаты получаются при использовании вейвлетов семейства Добеши на восьмом уровне декомпозиции;
- лучшим в шумоподавлении является вейвлет Койфлет 5;
- семейство Симлет 4 на пятом уровне декомпозиции является наиболее подходящим для проведения шумоподавления [53] [54].

На основании проведенных исследований на реальных изображениях антропогенных частиц и объектов были сделаны следующие выводы (изначально было выбрано одно пороговое значения идентификации для всех семейств вейвлетов):

- бесконечные регулярные вейвлеты (вейвлеты Мейера и дискретный вейвлет Мейера) при заданном пороговом значении идентификации разделяют исходную область на изображении с антропогенными

частицами и объектами на несколько частей, что введет к уменьшению информативности об объекте КМ;

- в виду того, что «грубые» вейвлеты обладают минимумом свойств, которыми должны обладать вейвлеты, вейвлеты данного семейства (вейвлеты Гауссова типа, Морле и «мексиканской шляпы») также, как и предыдущее семейство, не подходит для решения задачи обнаружения антропогенных частиц и объектов;
- семейство ортогональных вейвлетов с компактным носителем (вейвлеты Добеши и Хаара) могут применяться для первичного обнаружения антропогенных частиц и объектов, в частности вейвлеты Хаара, так как они являются ортогональными симметричными вейвлетами. С вейвлетами Добеши намного труднее выполнять операции обнаружения, так как они являются асимметричными и с возрастанием порядка уменьшается область обнаружения и информативность об КО (Рис 2.1).

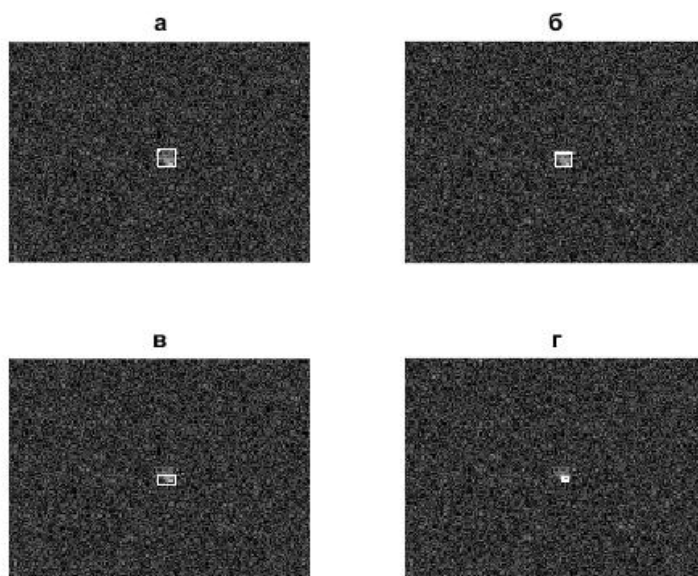


Рис. 2.1. Пример обнаруженных окон, покрывающими область с антропогенной частицей. а – реальная занимаемая область с антропогенной частицей; б – область с антропогенной частицей, найденная вейвлетом Хаара; в – область с антропогенной частицей, найденная вейвлетом Добеши 2; г – область с антропогенной частицей, найденная вейвлетом Добеши 4.

- семейство ортогональных вейвлетов с компактным носителем (вейвлеты Симлета и Койфлета) являются частными случаями вейвлетов Добеши (первые совпадают с вейвлетами Добеши низких порядков, вторые - вейвлеты Добеши с нулевыми моментами скейлинг-функции). Вследствие чего, они являются асимметричными и с возрастанием их порядка уменьшается область обнаружения и информативность об КО (Рис 2.2).

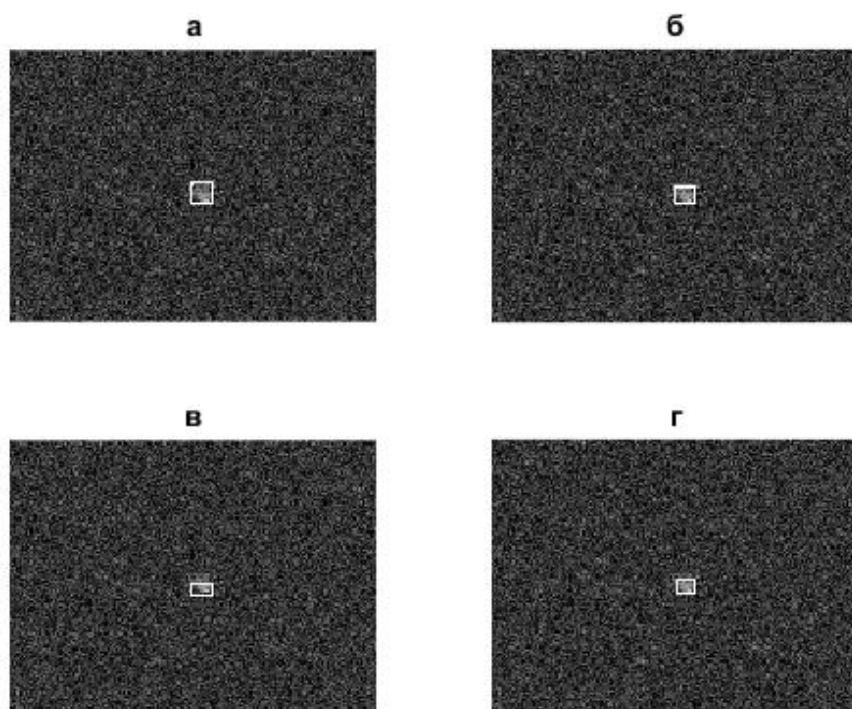


Рис. 2.2. Пример обнаруженных окон, покрывающими область с антропогенной частицей. а – реальная занимаемая область с антропогенной частицей; б – область с антропогенной частицей, найденная вейвлетом Симлета 1; в – область с антропогенной частицей, найденная вейвлетом Симлета 2; г – область с антропогенной частицей, найденная вейвлетом Койфлета 1.

- семейство биортогональных парных вейвлетов с компактным носителем в ходе исследовательской работы с реальными изображениями объектов показали наилучшие результаты, так как в отличие от вейвлетов Хаара, обнаруженная область более точно накрывает область с антропогенной

частицей или объектом и находит меньшее число ложных областей с фоновыми шумами (Рис 2.3).

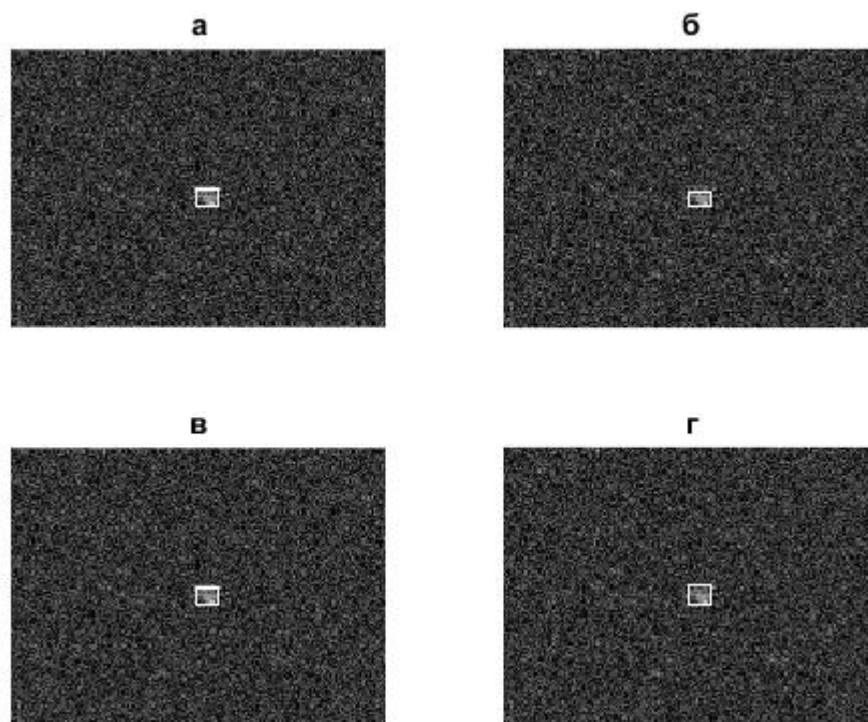


Рис. 2.3. Пример обнаруженных окон, покрывающими область с антропогенной частицей. а – область с антропогенной частицей, найденная биортогональным вейвлетом 1.1; б – область с антропогенной частицей, найденная биортогональным вейвлетом 1.3; в – область с антропогенной частицей, найденная обратным биортогональным вейвлетом 1.1; г – область с антропогенной частицей, найденная обратным биортогональным вейвлетом 1.3.

Главным выводом исследования базовых функций вейвлетов для обнаружения областей с антропогенными частицами или объектами является заключение 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.

2.2 Идентификация структурных особенностей изображений

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.

Структурные особенности локализуются в системе координат изображений, полученных с ОЭС, и имеют собственные фрактальные размерности и максимальные собственные значения автокорреляционных матриц. Сегментация сводится к выполнению двух свойств: высокая пространственная и частотная разрешающие способности и максимальное соотношение значений яркостей пикселей к яркость фоновых помех.

Первое свойство реализуется при сегментации изображения при помощи вейвлет-преобразований строк, столбцов и одной из диагоналей. Известно, что в отличие от Фурье-преобразований, вейвлет-преобразования в меньшей степени подвержены принципу неопределенности Гейзенберга. Этот принцип, в данном

вопросе, гласит, что невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала, то есть нельзя определить для какого момента времени, какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале. Единственное, что можно определить – это временные интервалы, в течение которых в сигнале существует полосы частот [55]. Из этого следует, что вейвлет-преобразования дают возможность уменьшить влияние принципа неопределенности Гейзенберга на полученном частотно-временном представлении сигнала. С его помощью низкие частоты имеют более детальное представление относительно времени, а высокие — относительно частоты [56].

При этом вейвлет-преобразования могут выделить ложные изображения, обусловленные оптическим излучением фона. Это происходит потому, что вейвлет-преобразование реализуется без введения априорной информации о текущем состоянии фоновых помех в зоне контроля ОЭС.

Вейвлет-преобразование, пусть двумерное, по определению, представляется операцией скалярного произведения $\zeta_{mk} = (f(x, y), \psi_{mk}(x, y))$ изображения, как двумерной случайной функции $f(x, y)$, $(x, y) \in R^2$, в пространстве R^2 , на двумерную вейвлет – функцию

$$\psi_{mk}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{m_x m_y}} \psi \left(\frac{x - k_x}{m_x}, \frac{y - k_y}{m_y} \right), \quad (1.2)$$

где $m = (m_x, m_y)$ – переменные масштаба, $k = (k_x, k_y)$ – переменные сдвига по строке, столбцу и одной из диагоналей пикселей изображения, ζ_{mk} – вейвлет-коэффициенты.

Вейвлет-коэффициенты при каждом значении $k_x \in X, k_y \in Y, m_x, m_y > 0$ есть реализации нормально распределенной случайной величины (X, Y – количество пикселей в строке и столбце соответственно). Нормализация непосредственно обуславливается структурой скалярного произведения в виде интегрального преобразования изображения как реализации двумерного случайного процесса [57].

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 особенностей строк, столбцов и одной из диагоналей изображения при обнаружении, необходимого и достаточного условия, как отношения предпочтения в виде отношения стохастической эквивалентности формируемых строк, столбцов и одной из диагоналей вейвлет – коэффициентов.

Второе свойство – 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.

В этом смысле двумерная корреляционная связь представляет адаптивный инвариантный согласованный фильтр [58], на выходе которого имеет место максимальное отношение значения связи к мощности шума. Двумерный согласованный фильтр реализуется с использованием одномерных вейвлет-преобразований.

Для изображения, искаженного аддитивными аппликативной помехой и шумом ОЭП, запишем в виде

$$f(x, y) = \phi(x, y)S(x, y) + B_{\phi}(x, y) + n(x, y), \quad (1.3)$$

где $\phi(x, y)$ – функция изменения характеристик среды распространения излучения, $S(x, y)$ – функция изменения яркости антропогенных частиц и объектов, $B_{\phi}(x, y)$ – функция изменения яркости фона, $n(x, y)$ – функция результирующего шума изображения на выходе ОЭС, $(x, y) \in S$, $S = X \times Y$, (x, y) – целочисленные координаты в картинной плоскости ОЭС.

Затем, воспользовавшись неравенством Коши-Буняковского, введем и оценим метрику отличия функции $f(x, y)$ от функции $\psi_{mk}(x, y)$ при варьировании переменными $k=(k_x, k_y)$ и $m=(m_x, m_y)$ на множествах их значений с использованием взаимной корреляционной связи (как корреляционного интеграла) между изображением $f(x, y)$ и вейвлет-функцией $\psi_{mk}(x, y)$.

При этом считаем, что функции $f(x, y)$ и $\psi_{mk}(x, y)$ неотрицательны, не нулевые и интегрируемы, то есть принадлежат пространству L_2 [59]. Выражение взаимной корреляционной связи записываем в виде

$$K_{f\psi}[k, m] = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y) \psi_{mk}(x, y), \quad (1.4)$$

а выражение метрики – в виде

$$\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0} K_{f\psi}[k_x, k_y, m_x, m_y]. \quad (1.5)$$

Действительно, минимальное отличие изображения антропогенных частиц и объектов от вейвлет-функции, будет иметь место только при достижении максимальной корреляции между ними, что и достигается операцией $\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0}$. Естественно, при высокой чувствительности вейвлетов к неоднородности структуры исходного изображения будет установлено, в общем несколько локальных максимумов, каждый из которых будет находиться в каком-то одном из выделяемых кластеров вейвлет-коэффициентов.

Теперь, применив к корреляционной связи неравенство Коши-Буняковского [59] с учетом представления функции изображения, получим

$$\begin{aligned} \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y) \psi_{mk}(x, y) &= \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \phi(x, y) S(x, y) \psi_{mk}(x, y) + \\ &+ \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} B_\phi(x, y) \psi_{mk}(x, y) + \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n(x, y) \psi_{mk}(x, y) \leq \\ &\leq [\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \phi^2(x, y) S^2(x, y)]^{\frac{1}{2}} [\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y)]^{\frac{1}{2}} + \\ &+ [\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} B_\phi^2(x, y)]^{\frac{1}{2}} [\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y)]^{\frac{1}{2}} + \\ &+ [\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n^2(x, y)]^{\frac{1}{2}} [\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \psi_{km}^2(x, y)]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Здесь отметим, что шум $n(x, y)$ ОЭС – нормальный, представляется составляющими – гармониками с малыми амплитудами, имеющими одинаковые (близкие) среднеквадратические значения амплитуд для всех частот. Такие гармоники должны сильно ослабляться вейвлет-функциями, при которых достигается максимум корреляции между ними и изображением антропогенных частиц и объектов. Это естественное требование [58], иначе, будет обнаруживаться недопустимо большое количество ложных шумовых изображений, то есть корреляционная связь вида

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} n(x, y) \psi_{mk}(x, y) \quad (1.7)$$

должна быть незначительной при

$$\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0} K_{f\psi}[k_x, k_y, m_x, m_y]. \quad (1.8)$$

Поэтому в левой и правой частях неравенства Коши-Буняковского достаточно учитывать только первые два слагаемые выражения для изображения. Но эти слагаемые, в свою очередь, могут проявляться одновременно в разных частях изображения, полученного с ОЭС.

В связи с этим при одном и том же значении переменной масштаба, но при разных значениях переменной сдвига вейвлет-функций, на разных непересекающихся частях изображения одновременно могут проявляться области с антропогенными частицами и объектами и ложные области с аппликативными шумами.

При этом, как было отмечено, операция

$$\max_{k_x \in X, k_y \in Y, m_x > 0, m_y > 0} K_{f\psi}[k_x, k_y, m_x, m_y] \quad (1.9)$$

реализуется автоматически в каждой из этих возможных ситуаций функционирования ОЭС и тем самым обеспечивает адаптацию вейвлет-функций к структуре изображения.

Теперь имеются основания утверждать, что найдутся такие совокупности значений $k_x^*, k_y^*, m_x^*, m_y^*$, переменных $k_x \in X, k_y \in Y$ и $m_x, m_y > 0$, при которых будет выполнено условие локальной тождественности, с точностью до некоторой

мультипликативной константы, вычисленной корреляционной связи $K_{f\psi}[k_x^*, k_y^*, m_x^*, m_y^*]$ выходу «своего» согласованного фильтра. В рассматриваемом случае это условие, для каждой четверок $(k^*, m^*) = (k_x^*, k_y^*, m_x^*, m_y^*)$, записывается в виде одного из равенств

$$\phi(x, y)S(x, y) = C_1\psi_{k^*m^*}(x, y), \quad B_\phi = C_1\psi_{k^*m^*}(x, y); \quad (1.10)$$

равенство $\phi(x, y)S(x, y) \wedge B_\phi = C_2\psi_{k^*m^*}(x, y)$, где $\wedge$ – обозначение «и», не реализуемо.

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.

2.3 Построение минимальных прямоугольных окон

После идентификации структурных особенностей изображений вейвлет-преобразованиями, обнаруженные области имеют произвольную форму, с пустотами внутри. Но для дальнейших операций, требующихся для обнаружения антропогенных частиц и объектов области должны быть прямоугольными. При этом их площадь должна быть минимальной, так как при увеличении площади может увеличиваться процент аппликативного шума в прямоугольной области, далее окне [60].

Для уменьшения количества информации производится бинаризация изображения. По результатам сравнения, пикселю присваивается значение 0 или 1. Это требуется для алгоритма на основе морфологической реконструкции, который используется для заполнения отверстий в обнаруженных областях.

Морфологическая реконструкция [61] является нелинейным фильтром, основанным на математической морфологии. Она использует функции расширения и эрозии, которые являются простейшими операциями математической морфологии [62]. По сравнению с другими типами фильтров, морфологическая реконструкция может сохранить информацию о контурах

объекта при выполнении фильтрации. Обработка реконструкцией может восстановить те границы объектов, которые не были полностью удалены с помощью операций раскрытия/закрытия, а затем реконструкцией раскрытия/закрытия возможно удалить пики, которые полностью содержатся в структурированном элементе. С помощью процедур реконструкции будут восстановлены основные контуры объектов. Исходное изображение упрощено, но в то же время, сохранена информация об базовых контурах.

С выполнением операция заполнения отверстий, использующей алгоритм на основе морфологической реконструкции, происходит заполнение отверстий, имеющих значения 0 и окруженных значениями 1 для 8-связных фоновых окрестностей.

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. В итоге на всем изображении образуются требующиеся для дальнейших вычислений прямоугольные области.

Получившиеся окна с минимальными площадями, они не перекрываются и полностью накрывают только свои локализованные изображения со структурными особенностями, но наряду с антропогенными частицами и объектами могут содержать до 50% аппликативного фона. Из построенных прямоугольников непосредственно видно, что каждый из них представляет реализацию выпуклой оболочки и поэтому имеет минимальную площадь для соответствующей области [63].

2.4 Подтверждение первичного обнаружения фрактально-корреляционными статистиками

К настоящему времени фрактальная размерность оценивается либо методом покрытий, либо точечным методом, либо с использованием корреляционного интеграла или локального спектра мощности, либо экспериментальным

оптическим методом, либо $R(\tau)/S$ методом [64]. Для решения задачи обнаружения антропогенных частиц и объектов был выбран метод покрытий, ввиду простоты программной реализации.

Метод покрытий основан на реализации фундаментального определения фрактальной размерности [49] [64]

$$d = \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[-\frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \right], \quad (1.11)$$

где $\varepsilon > 0$ – диаметр (размер) шара (куба) покрытия пикселей яркостей изображения; $N(\varepsilon)$ – минимальное количество шаров (кубов) диаметра (размера) ε , требующееся для покрытия изображения или это мощность замкнутого множества шаров (кубов) диаметра (размера) ε , полностью покрывающего изображение или его выделенный кластер.

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 [65]. Входным изображением является одиночное текстурное изображение, например, изображения дерева, листвы, воды, облаков и проч. На этапе инициализации ε присваиваются минимальное и максимальное значения. Также устанавливается размер шага уменьшения значения ε . На этапе обработки осуществляется вычисление фрактальной размерности и вывод результатов. Приведем описание алгоритма расчета фрактальной размерности методом покрытия эталонами:

В начале работы алгоритма экспериментально устанавливаются значения ε_i , $i = \overline{1, m}$, а $N(\varepsilon_i)$ – определяются для соответствующего ε_i лишь приближенно.

Это обстоятельство обусловлено вычислением оценки фрактальной размерности d при априори неизвестном законе распределения ошибок измерения значений $N(\varepsilon_i)$, $i = \overline{1, m}$. Далее происходит вычисление по формуле ().

Точность вычисления фрактальной размерности методом покрытий ограничивается первыми двумя десятичными разрядами, однако при этом обеспечивается возможность соотнесения значения к одной из ситуаций на изображении, полученного ОЭС.

Вычисление автоковариационной матрицы осуществляется сначала по строкам, столбцам, а затем совместный учет результатов расчета ковариационных матриц по строкам и столбцам приводит к оценке искомой матрицы. Отсюда непосредственно вытекает следующая последовательность вычислительных операций:

1) Вычисление математического ожидания j -го столбца изображения окна фоноцелевого кадра

$$m_y(j) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N x_{lj}, j = 1, \dots, N. \quad (1.12)$$

2) Вычисление ковариационной матрицы столбцов изображения окна

$$K_y(i, j) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (x_{li} - m_{yi})(x_{lj} - m_{yj}), i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N, \quad (1.13)$$

введем обозначение $K_y(i, j) = (K_y(i, j))_{i,j=1}^{i=M, j=N} \square K_y$.

3) Вычисление математического ожидания i -ой строки изображения окна

$$m_x(i) = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M x_{il}, i = 1, \dots, M \quad (1.14)$$

4) Вычисление ковариационной матрицы строк изображения окна

$$K_x(i, j) = \frac{1}{M-1} \sum_{l=1}^M (x_{il} - m_{xi})(x_{jl} - m_{xj}), i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N, \quad (1.15)$$

введем обозначение $K_x(j, i) = (K_x(j, i))_{j,i=1}^{j=N, i=M} \square K_x$

5) Вычисление математического ожидания яркостей пикселей изображения окна в целом

$$m = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} \quad (1.16)$$

6) Вычисление дисперсии яркостей пикселей изображения окна в целом

$$\sigma^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - m)^2 \quad (1.17)$$

7) Вычисление ковариационной матрицы яркостей пикселей изображения окна в целом

$$K_{xy} = K_y \otimes K_x = \frac{1}{\sigma^2} \begin{pmatrix} K_x(1,1)K_y & K_x(1,2)K_y \dots K_x(1,N)K_y \\ K_x(2,1)K_y & K_x(2,2)K_y \dots K_x(2,N)K_y \\ \dots & \dots \\ K_x(N,1)K_y & K_x(N,2)K_y \dots K_x(N,N)K_y \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

$K_y \otimes K_x$ - кронекеровское произведение (прямое, тензорное) произведение матриц K_y и K_x или это левое кронекеровское произведение.

Выражения для ковариационных матриц очевидным образом преобразуются в выражения смещенных авто- и взаимной корреляционных матриц. Действительно, при выводе для них выражений следует, согласно определению корреляционных матриц, не учитывать математические ожидания в выражениях ковариационных матриц

$$K_x(i, j) = \frac{1}{M-1} \sum_{l=1}^M (x_{il} - m_{xi})(x_{jl} - m_{xj}), \quad i=1, \dots, M, j=1, \dots, N, \quad (1.19)$$

$$K_y(i, j) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (x_{li} - m_{yi})(x_{lj} - m_{yj}), \quad i=1, \dots, M, j=1, \dots, N, \quad (1.20)$$

$$K_R(i, j) = \frac{1}{M-1} \sum_{l=1}^M (a_{il} - m_{AR}(i))(b_{jl} - m_{BR}(j)), \quad i=1, \dots, M, j=1, \dots, N, \quad (1.21)$$

$$K_C(i, j) = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (a_{il} - m_{AC}(i))(b_{jl} - m_{BC}(j)), \quad i=1, \dots, M, j=1, \dots, N \quad (1.22)$$

и множители $\frac{1}{M-1}$, $\frac{1}{N-1}$ заменить множителем $\frac{1}{M}$, $\frac{1}{N}$ соответственно.

Получаемые при этом выражения для

$$K_{xy} = K_y \otimes K_x \text{ и } K_{AB} = \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} K_R \otimes K_C \quad (1.23)$$

являются искомыми смещенными автокорреляционными матрицами. Такие матрицы, естественно, квадратные и обладают свойствами симметричности, положительной определенности, а их собственные значения – различны и положительны.

Пусть $\lambda_{1R}, \lambda_{2R}, \dots, \lambda_{NR}$ и $\lambda_{1C}, \lambda_{2C}, \dots, \lambda_{NC}$ – собственные значения матриц K_R и K_C , тогда собственные значения $\mu_{(N(i-1)+j)}$ матрицы K_{AB} определяются по выражениям

$\mu_{(N(i-1)+j)} = \lambda_{iR} \lambda_{jC}$, $i, j = 1, \dots, N$. Так же вычисляются и собственные значения матрицы K_{xy} .

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 [66] [67].

Введем обозначение K_ν , $\nu = 1, 2$, $K_1 \equiv K_{xy}$ и $K_2 \equiv K_{AB}$.

Структура QR -алгоритма представляется следующими операциями:

1) Вычисление QR -разложения матрицы $K_\nu^{(0)} = K_\nu$, сводящее матрицу $K_\nu^{(0)}$ к виду $K_\nu^{(0)} = Q_1 R_1$.

2) Построение матрицы $K_\nu^{(1)} = R_1 Q_1 = Q_1^{-1} K_\nu^{(0)} Q_1$, подобной матрице $K_\nu^{(0)}$. Такие матрицы имеют одинаковые собственные значения.

3) Вычисление QR -разложения матрицы $K_\nu^{(1)}$. Последняя будет иметь вид $K_\nu^{(1)} = Q_2 R_2$.

4) Вычисление матрицы $K_\nu^{(2)} = R_2 Q_2$, подобной матрице $K_\nu^{(1)}$. Далее выполняются аналогичные действия до k -й итерации.

5) На $k+1$ итерации выполняется QR -разложение матрицы $K_\nu^{(k)}$.

6) Вычисление матрицы $K_\nu^{(k+1)} = R_{k+1} Q_{k+1}$, подобной матрице $K_\nu^{(k)}$.

Видно, что неограниченное выполнение таких итераций приведет к последовательности матриц $K_\nu^{(1)}, K_\nu^{(2)}, \dots, K_\nu^{(n-1)}, K_\nu^{(n)}$ подобных матрице $K_\nu^{(0)} = K_\nu$. Доказано [68], что эта последовательность сходится к верхней треугольной матрице, то есть к виду

$$L = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \ell_{12} & \ell_{13} & \dots & \ell_{1N} \\ 0 & \lambda_2 & \ell_{23} & \dots & \ell_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_N \end{pmatrix}. \quad (1.24)$$

На диагонали этой матрицы располагаются все собственные значения для матриц K_v , $v=1,2$, то есть для автокорреляционных матриц яркостей пикселей на изображении, полученного с ОЭС. Искомое максимальное из них определяется посредством их сравнения.

При практическом применении QR-алгоритма предварительно с помощью подобных для матриц преобразований исходную матрицу K_v , $v=1,2$, преобразуют к форме Хессенберга, то есть к виду матрицы, в которой все элементы, расположенные ниже диагонали и непосредственно примыкающие к главной диагонали, равны нулю.

При нахождении антропогенных частиц и объектов в зоне контроля ОЭС конфигурация его изображения будет обусловлена расстоянием ОЭС – КМ и состоянием фона, на котором осуществляется поиск и обнаружение антропогенных частиц и объектов, а также особенностями их индикатрис интегральной яркости.

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. Известно, что для реализации правила требуется знание закона распределения вероятностей энергетической яркости для различных ситуаций (антропогенная частица или объект, ложная цель, звезда или планета) – условий функционирования ОЭС.

По результатам моделирования на основе реальных экспериментальных данных представлены гистограммы фрактальной размерности (d_{vi}) и максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы ($\lambda_{\max vi}$) для ситуаций антропогенная частица или объект, ложная цель, звезда или планета.

Гистограмма фрактальной размерности изображений для ситуации антропогенная частица или объект ($\beta_d = 5.2$, $\alpha_d = 3.4$) левосторонняя относительно ситуации звезда или планета ($\beta_d = 7.7$, $\alpha_d = 2.6$) и правосторонняя относительно ситуации ложная цель ($\beta_d = 2$, $\alpha_d = 3.6$) (Рисунок 2.4). По рисунку 2.5 видно, что

бета-вероятности значительно перекрываются, но в тоже время ситуации разрешимы между собой.

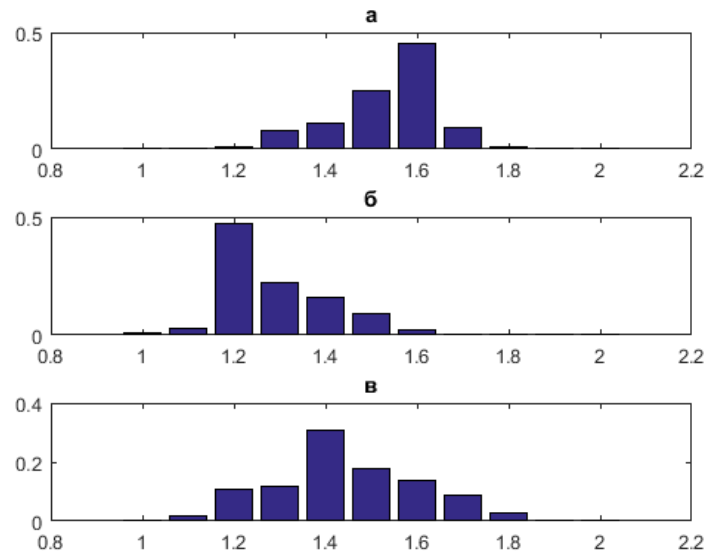


Рис. 2.4 Гистограммы фрактальной размерности изображений. а – для ситуации ложная цель, б – для ситуации звезда или планета, в – для ситуации антропогенная частица или объект

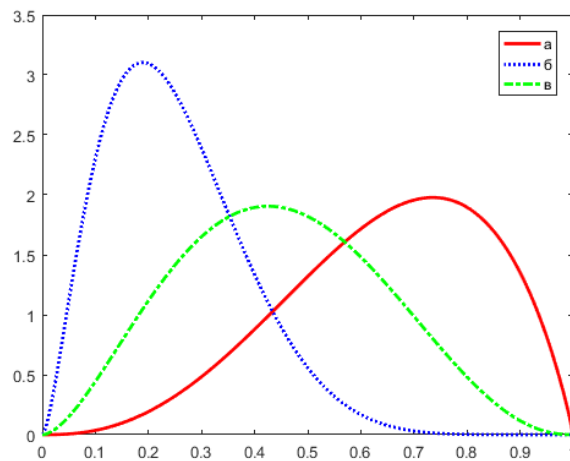


Рис. 2.5 Бета-распределения фрактальной размерности изображений. а – для ситуации ложная цель, б – для ситуации звезда или планета, в – для ситуации антропогенная частица или объект

Гистограмма максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы изображений для ситуации антропогенная частица или объект ($\beta_\lambda = 0.7$, $\alpha_\lambda = 1.5$) правосторонняя относительно ситуаций ложная цель ($\beta_\lambda = 3.3$, $\alpha_\lambda = 0.7$) и звезда или планета ($\beta_\lambda = 9.4$, $\alpha_\lambda = 3.1$) (Рисунок 2.6). По рисунку 2.7 видно, что

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

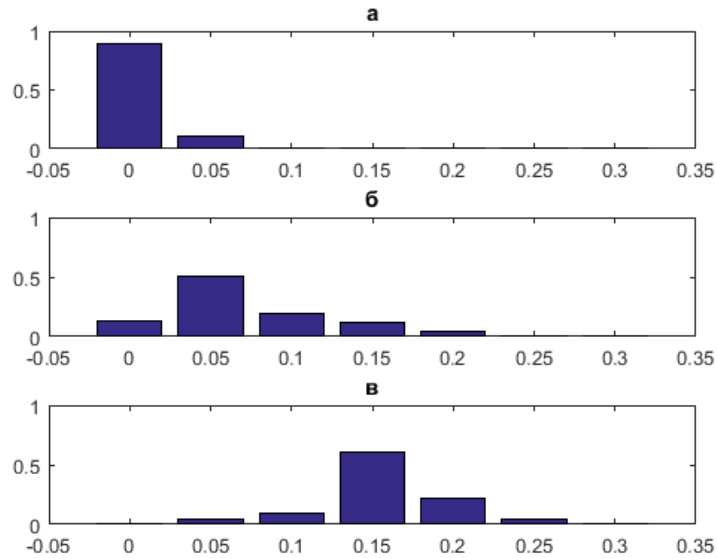


Рис. 2.6 Гистограммы максимальных собственных значений изображений. а – для ситуации ложная цель, б – для ситуации звезда или планета, в – для ситуации антропогенная частица или объект

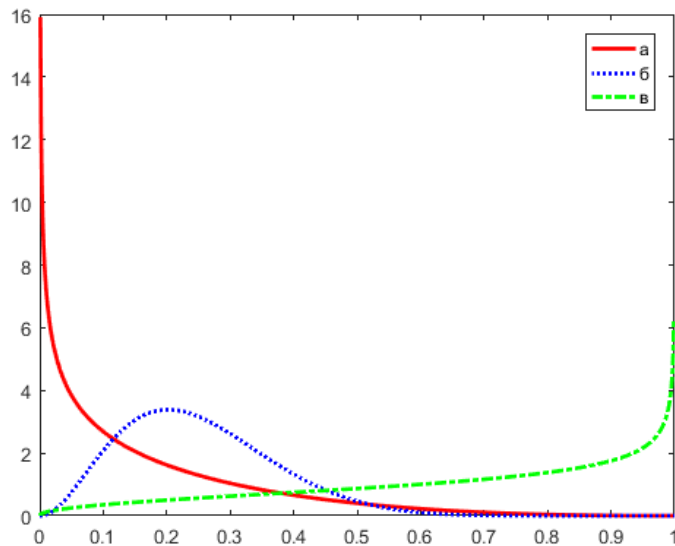


Рис. 2.7 Бета-распределения максимальных собственных значений изображений. а – для ситуации ложная цель, б – для ситуации звезда или планета, в – для ситуации антропогенная частица или объект

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 (или не превышение, в случае верхней границы по критерию фрактальной размерности) порога, иначе будет приниматься решение «ложь». Возможны, что такие решения могут быть и ошибочными. Обнаружение антропогенных частиц и объектов должно осуществляться в реальном масштабе времени работы ОЭС без использования априорной информации относительно текущего состояния обстановки при допустимом уровне вероятности ложного принятия решения об обнаружении.

Для вычисления пороговых значений между парами ситуаций по фрактальной размерности требуется воспользоваться следующим выражениями [69]

$$\frac{\Gamma(\beta_1 + \alpha_1)}{\Gamma(\beta_1)\Gamma(\alpha_1)} \int_{\Pi(\alpha_{дон}, d)}^{\infty} \exp\{-y\beta_1\}(1 - \exp\{-y\})^{\alpha_1-1} dy \leq \alpha_{дон, d}. \quad (1.25)$$

$$\Pi(\alpha_{дон}; d_{vi}) = \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\beta_1 + \alpha_1) - \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \ln \Gamma(\alpha_1) + \ln(\mu_{11} - \mu_{10}) + \frac{\rho_d}{d\alpha_1/d\beta_1} \quad (1.26)$$

При $\alpha_{дон, d} = 0.2$, $\beta_d = 5.2$, $\alpha_d = 3.4$ получаем $\Pi(\alpha_{дон}; d_{vi}) = 0.55$ для верхней границы и $\Pi(\alpha_{дон}; d_{vi}) = 0.36$ нижней границы. По найденным $\Pi(\alpha_{дон}; d_{vi})$ 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 $\Pi(\alpha_{дон}; \lambda_{maxvi}) = 0.48$ и $p_\lambda = 0.144$, при $\alpha_{дон, \lambda} = 0.2$, $\beta_\lambda = 0.7$, $\alpha_\lambda = 1.5$.

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), а искомый критерий принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов сформировать на логике бинарного накопителя, то есть на логике бинарной серийной процедуры.

2.5 Описание метода вычисления координат антропогенных частиц и объектов

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:

$$D_{\text{макс}} = \left[\int_{\Delta\lambda} (I(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_0(\lambda) / F_{\text{экв}}) d\lambda (d_{\text{об}} / f_{\text{об}})(rT / \Omega\tau_{\text{пр}}) \right]^{1/2}, \quad (1.27)$$

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.

Отметим, что ОЭС представляет собой линейный фильтр безынерционный, $F_{\text{эКВ}}$ вычисляется в текущих условиях функционирования ОЭС при закрытом объективе и, естественно, является реализацией случайной величины, значения характеристик $(\tau_0, d_{\text{об}} / f_{\text{об}}, T, \Omega, \tau_{\text{пр}}, r)$ устанавливаются априори для конкретного ОЭС и по текущему изображению.

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

$$\varphi = \arctg (X_{\text{ср}} / D_{\text{макс}}) \quad (1.28)$$

$$\theta = \arctg \left(D_{\text{макс}} \sqrt{(M - Y_{\text{ср}})^2 + (X_{\text{ср}})^2} \right) \quad (1.29)$$

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 объекта используются две системы координат:

- сферическая система, связанная и вращающаяся с КА. В этой системе ОЭС аппарата обнаруживает антропогенные частицы и объекты, измеряет угловые координаты объекта, мощность и спектральную плотность принимаемого от него оптического излучения;

- «топоцентрическая» прямоугольная система, непосредственно связанная со сферической системой и вращающаяся вместе с ней.

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

Соответствующие преобразования выполняются с использованием известных соотношений аффинных преобразований [70]:

- из сферической в прямоугольную ОЭС $D, \varphi, \theta \rightarrow x, y, z$, где D – дальность, φ – азимут и θ – угол места, обнаруженного ОЭС антропогенной частицы или объекта, x, y, z – координаты объекта в прямоугольной системе.

Формулы перехода записываются в виде

$$x(t) = -D(t)\cos\theta(t)\cos\varphi(t), \quad y(t) = D(t)\cos\theta(t)\sin\varphi(t), \quad z(t) = D(t)\sin\theta(t). \quad (1.30)$$

Координаты D, φ, θ являются случайными функциями времени. Скорости изменения координат антропогенной частицы или объекта вычисляются как производные по времени от этих соотношений [71].

2.6 Методика обнаружения и вычисления координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц и объектов

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.

На первом этапе метода, для поступающего с оптико-электронного прибора изображения преобразуются в полутонное изображение для уменьшения объемов оперативной памяти. Далее все значения яркостей пикселей полученного изображения преобразуются в массив действительных чисел двойной точности.

Вторым этапом является вычисление вейвлетов-коэффициентов столбцов $WT_v(x,y)$, строк $WT_g(x,y)$ и одной из диагоналей $WT_d(x,y)$, это требуется для большей детализации, так как при различных углах наклона ОЭП может возникать смещение обнаруженной области от действительного положения антропогенной частицы или объекта на изображении. Для получения результирующего массива вейвлет - коэффициентов $WT(x,y)$ без потери структурных особенностей строк, столбцов и диагоналей используется следующая формула

$$WT(x,y) = WT_g(x,y) \vee WT_v(x,y) \vee WT_d(x,y) \quad (1.31)$$

На следующем этапе выполняется сегментация изображения по пороговому значению, все значения, которые меньше указанного порога принимают значения равные 0, а превышающие порог - 1, результаты итерации сохраняются в массив сегментации. После проведения операции сегментации последовательно выполняются бинаризация массива и заполнение отверстий. Операция заполнения отверстий использует алгоритм на основе морфологической реконструкции, с выполнением которого происходит заполнение отверстий, имеющих значения 0 и окруженных значениями 1 для 8-связных фоновых окрестностей.

Получившиеся области локализованных объектов КМ имеют произвольную форму, но для построения их автокорреляционной матрицы требуется, чтобы эти области имели прямоугольную форму. 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.

Четвертый этап заключается в нахождение координат вершин образованных областей, в результате его работы формируется соответствующий двумерный массив координат.

Далее происходит оценка фрактальной размерности посредством реализации метода наименьших квадратов [72] и вычисляется максимальное собственное значения 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 [73]. А максимальные собственные значения существенно доминируют над всеми другими показателями и содержат практически полную информацию о действительной ситуации в соответствующей анализируемой области изображения.

На шестом этапе методики используется для подтверждения обнаружения объекта КМ критерий Неймана-Пирсона. Согласно этому критерию 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 [74]. Для каждого критерия (фрактальная размерность и максимальные собственные значения автокорреляционной матрицы) установлен оптимальный пороговый уровень принятия решения, полученные в ходе проведения экспериментальных работ.

Далее для каждого подтвержденного антропогенного объекта вычисляется максимальная дальность по формуле (1.27), после чего производится вычисления азимута и угла места по формулам (1.28 и 1.29 соответственно). Эти координаты находятся в сферической системе координат, которые следует преобразовать по формулам (1.30) в «топоцентрическую» прямоугольную систему координат.

В итоге, для приведенной методики, имеются координаты в прямоугольной системе координат, которые можно использовать для занесения данных в реестр космических объектов и прогнозирования траектории движения антропогенных частиц и объектов, с целью избежание возможных катастрофических столкновений с действующими космическими аппаратами.

2.7 Выводы по главе

Таким образом выявлено, что при работе оптико-электронной системы могут возникать ситуации, когда появляются искажения, связанные с возникновением шумов от энергоустановки орбитального аппарата, которые приводят к появлению сложных фоновых условий.

Именно поэтому обусловлено использование вейвлет-преобразований, так как вейвлеты являются подходящим средством для анализа различных нестационарных сигналов. К таким сигналам можно отнести и сцены изображений антропогенных частиц и объектов. Обработка изображения на основе вейвлет-преобразования позволяет решить ряд задач, связанных с уменьшением уровня шума, выделение локальных пространственных

неоднородностей, сжатия изображения, а также анализом текстур. Одним из главных преимуществ, которое предоставляет вейвлет, является возможность представлять локальный анализ, т.е. анализировать локализованную область в большом сигнале. Вейвлет анализ способен выявить следующие особенности данных, которые упускают другие методы анализа сигналов: точки разрыва, резкие нелинейности в высших гармониках и самоподобие.

Локализованные области изображений вейвлет-преобразованиями имеют произвольную форму, с пустотами внутри. Для дальнейших операций локализованные области должны быть приведены к минимальный прямоугольным окнам. Получившиеся окна с минимальными площадями полностью накрывают только свои локализованные изображения со структурными особенностями.

С целью подтверждения гипотезы о нахождении в минимальном прямоугольном окне антропогенной частицы или объекта следует учитывать несколько показателей - фрактальные размерности и максимальные собственные значения автокорреляционных матриц исходных изображений. Информативность не нарушается при изменении фоновых условий, подтверждаются свойства фрактальной размерности, как минимальной достаточной статистики и максимального инварианта. По определению максимальные собственные значения являются максимальными инвариантами и минимально достаточными статистиками. Окончательное решение об обнаружении принимается по критерию Неймана-Пирсона с использованием пороговых значений, полученных при вычислении, бета-распределения вероятностей по фрактальным размерностям и максимальным собственным значениям автокорреляционных матриц.

Для внесения информации об антропогенных частицах или объектам в каталоги, или выработки информации о маневре орбитального аппарата, при возможности столкновения с антропогенными частицами или объектами, требуется вычислить координаты их координаты в пространстве.

Разработана соответствующая методика обнаружения и вычисления координат в околоземном космическом пространстве антропогенных частиц, использующая вышеприведенные методы и технологии.

Глава 3. Разработка алгоритмов решения задачи

В главе приведены вейвлет-фрактально-корреляционные алгоритмы обнаружения и алгоритмы вычисления координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов. Общая блок-схема и последовательность алгоритмов приведена ниже (Рисунок 3.1).

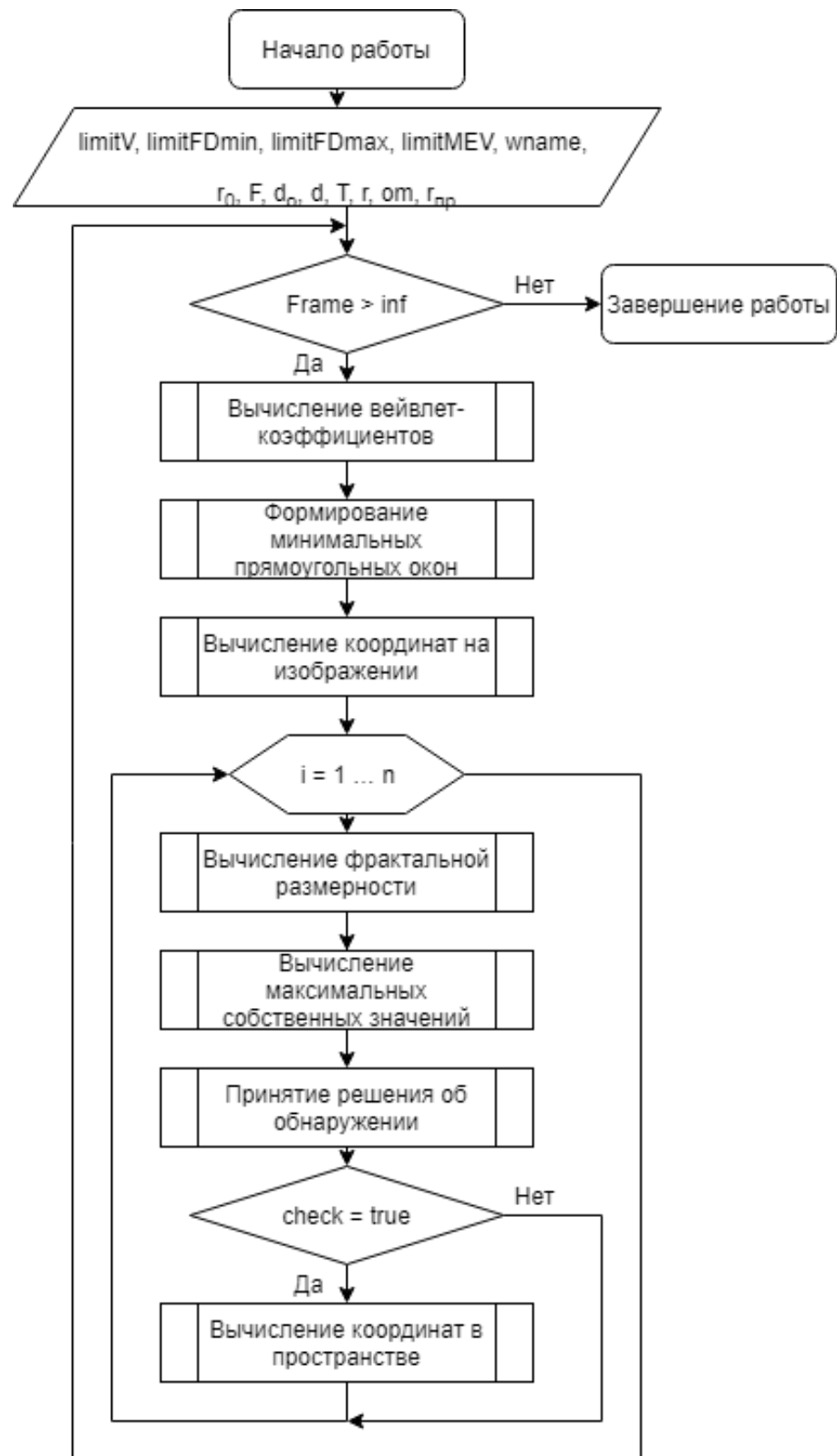


Рисунок 3.1 Блок-схема вейвлет-фрактально-корреляционных алгоритмов обнаружения и вычисления координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов.

В начале работы алгоритма задаются 4 пороговых значения: минимальное пороговое значение вейвлет-коэффициентов limitV для функции «Вычисление вейвлет-коэффициентов»; минимальное (limitFDmin) и максимальное (limitFDmax) пороговые значения фрактальной размерности, и минимальное пороговое значение максимального собственного значения автокорреляционной матрицы limitMEV для функции «Принятие решения об обнаружении». Также задается базисная функция для вейвлет-преобразования w_{pame} и еще несколько характеристик: r_0 – коэффициент пропускания ОЭП; F – эквивалентная мощность шумов ОЭП; d – относительное отверстие объектива ОЭП; T – время просмотра угла обзора; r – число элементов поля зрения; om – угол обзора космической обстановки; $r_{\text{пр}}$ – постоянная времени ОЭП

В цикле с условием, пока номер, поступившего с ОЭП, кадра меньше бесконечности выполняются все основные функции метода. Завершение работы алгоритма производится при достижении номером кадра машинной бесконечности.

Функции «Вычисление вейвлет-коэффициентов», «Формирование минимальных прямоугольных окон» и «Вычисление координат на изображении» выполняются последовательно, результатом работы последней функции является массив координат вершин минимальных прямоугольных окон, накрывающий области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами, на изображении.

Далее в цикле для каждой обнаруженного минимального прямоугольного окна последовательно выполняются следующие функции: «Вычисление фрактальной размерности», «Вычисление максимальных собственных значений» и «Принятие решения об обнаружении». В результате работы последней принимается решение об обнаружении антропогенной частицы или объекта, если гипотеза о нахождении в данном минимальном прямоугольном окне подтверждается, то выполняется функция «Вычисление координат в пространстве».

В итоге работы вейвлет-фрактально-корреляционных алгоритмов обнаружения и вычисления координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов предоставляется информации о координатах в пространстве относительно центра Земли для каждого обнаруженного объекта на текущем кадре, поступившего с ОЭП.

3.1 Алгоритм вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с оптико-электронного прибора

Для вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП используется следующий алгоритм (Рисунок 3.2).

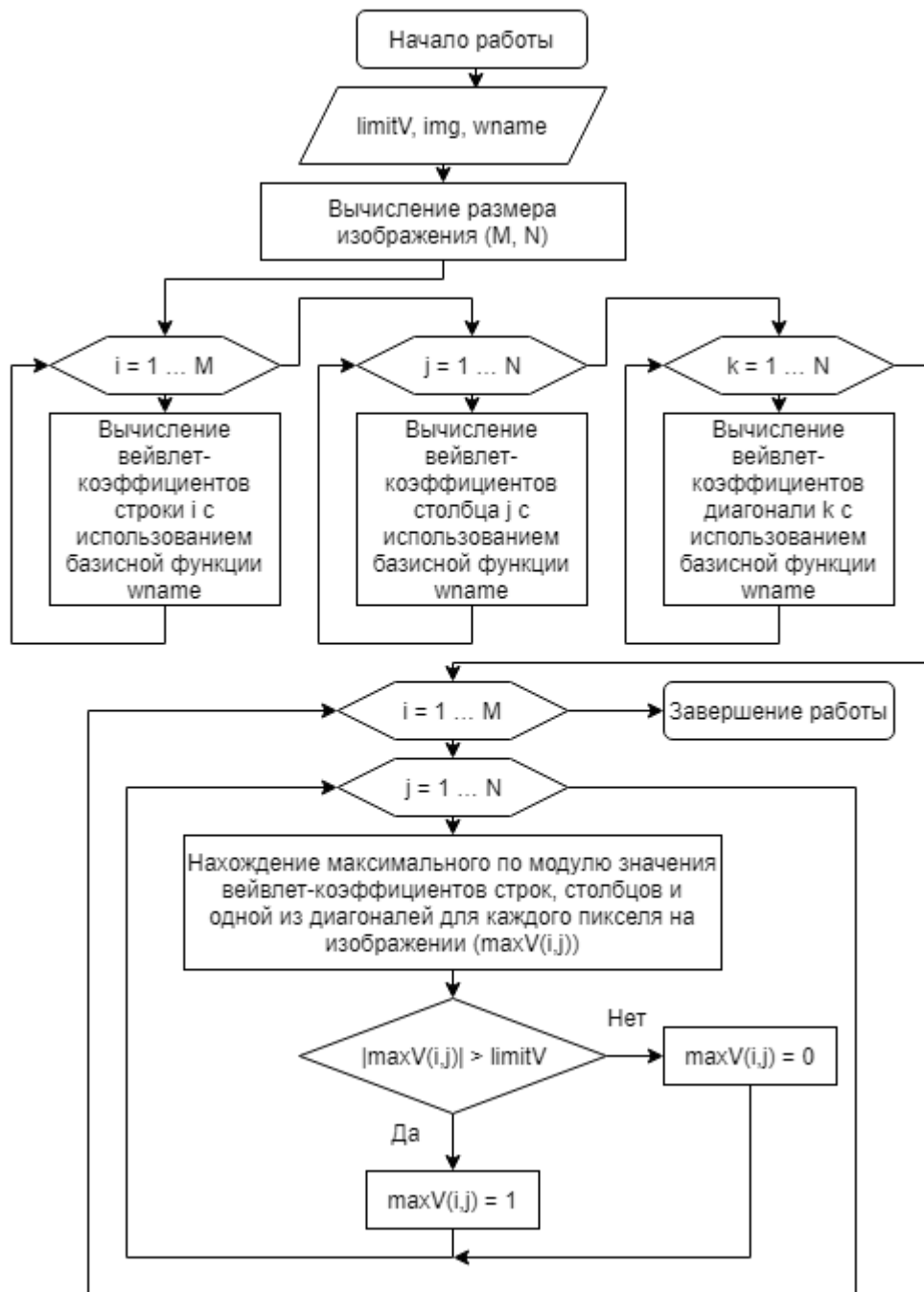


Рисунок 3.2 Блок-схема алгоритма вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре.

В начале работы алгоритма задаются 2 значения: минимальное пороговое значение вейвлет-коэффициентов $limitV$ и базисная функция для вейвлет-преобразования $wname$. И массив пикселей изображения кадра (img), поступившего с ОЭП.

Далее происходит вычисление размера, поступившего в функцию массива пикселей изображения кадра. Затем последовательно в циклах вычисляются

вейвлет-коэффициенты строк, столбцов и одной из диагоналей массива пикселей изображения кадра.

После чего в «цикле в цикле» производится нахождение максимального по модулю значения вейвлет-коэффициентов ($\max V(i,j)$) среди вейвлет-коэффициентов строк, столбцов и одной из диагоналей для каждого пикселя из массива пикселей изображения кадра. В дальнейшем происходит сравнение максимального по модулю значения вейвлет-коэффициентов $\max V(i,j)$ с минимальным пороговым значением вейвлет-коэффициентов $\text{limit}V$. Если максимальное по модулю значения вейвлет-коэффициентов $\max V(i,j)$ превышает минимальное пороговое значение вейвлет-коэффициентов $\text{limit}V$, то $\max V(i,j)$ равно 1, иначе равно 0.

В результате работы функции получается бинарный массив $\max V$.

3.2 Алгоритм формирования минимальных прямоугольных окон

Для формирования минимального прямоугольного окна, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами используется следующий алгоритм (Рисунок 3.3).

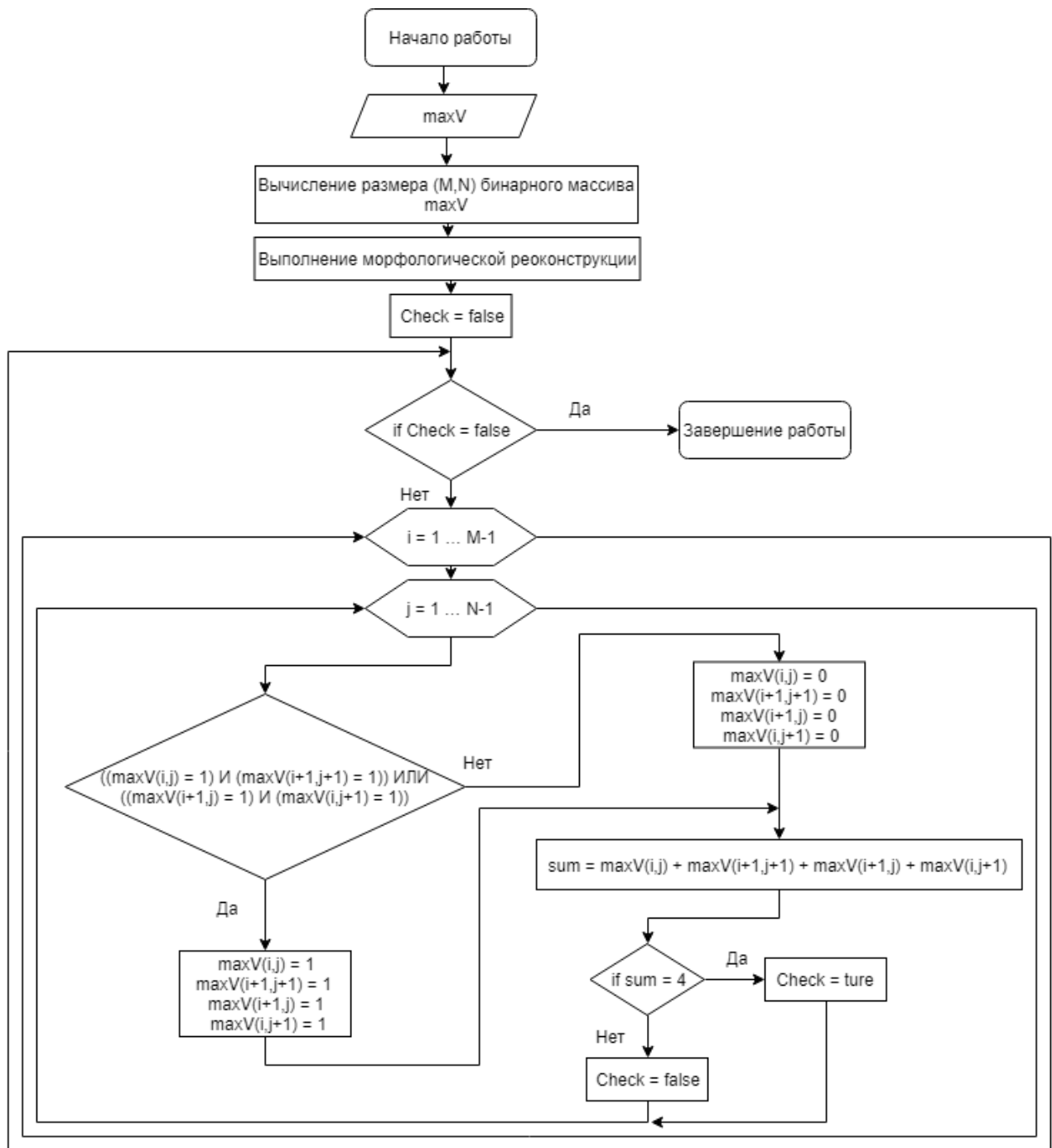


Рисунок 3.3 Блок-схема алгоритма формирования минимальных прямоугольных окон.

В начале работы алгоритма задается бинарный массив $\max V$, который был сформирован функцией «Вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей».

На первом этапе вычисляется размер массива. Затем происходит выполнение морфологической реконструкции. После чего задается флаг Check со

значением «ложь», который в дальнейшем будет указывать циклу с условием о завершении работы. Два последующих цикла предоставляют возможность обращения к каждому элементу бинарного массива $\max V$. Для каждого элемента и рядом стоящих с ним элементов проверяется выполняется условие $((\max V(i,j) = 1) \text{ И } (\max V(i+1,j+1) = 1)) \text{ ИЛИ } ((\max V(i+1,j) = 1) \text{ И } (\max V(i,j+1) = 1))$ или нет. Если выполняется, то элемент и рядом стоящие с ним элементы массива равны 1, иначе равны 0. Далее происходит сложение значений этих элементов, если сумма равна 4, то флаг Check принимает значение «правда», иначе принимает значение «ложь».

Результирующий массив работы функции $\max V$, содержит доведенные до минимальной прямоугольной формы изначальный бинарный массив $\max V$, который был сформирован функцией «Вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей».

3.3 Алгоритм вычисления координат окон

Для вычисления координат окон с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами используется следующий алгоритм (Рисунок 3.4).

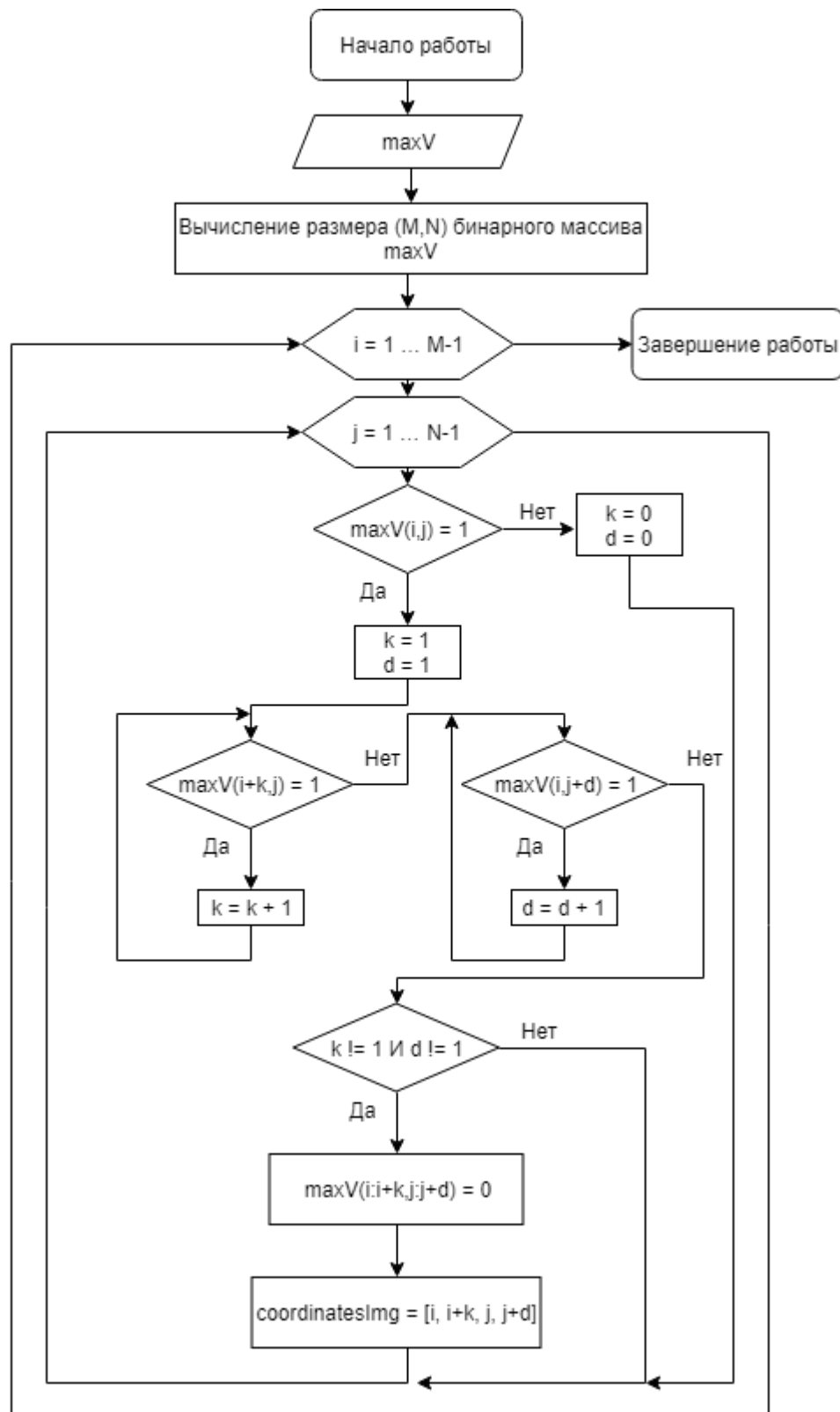


Рисунок 3.4 Блок-схема алгоритма вычисления координат окон.

В начале работы алгоритма задается бинарный массив $\max V$, с доведенными до минимальных прямоугольных форм областями, который был сформирован функцией «Формирования минимальных прямоугольных окон».

Следующим оператором является – вычисление размера бинарного массива $\max V$. Далее в циклах для каждого пикселя изображения выполняется проверка на его равенство единице, если значение равно единице, счетчики d и k становятся равны единицам, иначе нулю. Затем для вычисления координат используется условие равен следующий пиксель по строкам 1, если да, то тоже самое условие выполняется для следующего пикселя, иначе выполняется вычисление координаты по столбцам с тем же самым условием. После того, как все условия выполнены, выполняется операция зануления всех пикселей найденной области и координаты сохраняются в соответствующий массив `coordinatesimg`. После того как проверка была выполнена по всем пикселем бинарного массива, функция завершается.

Результирующий массив работы функции `coordinatesimg`, содержит координаты вершин минимальных прямоугольных окон бинарного массива $\max V$, который был сформирован функцией «Формирования минимальных прямоугольных окон».

3.4 Алгоритм оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах

Для оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами, используется следующий алгоритм (Рисунок 3.5).

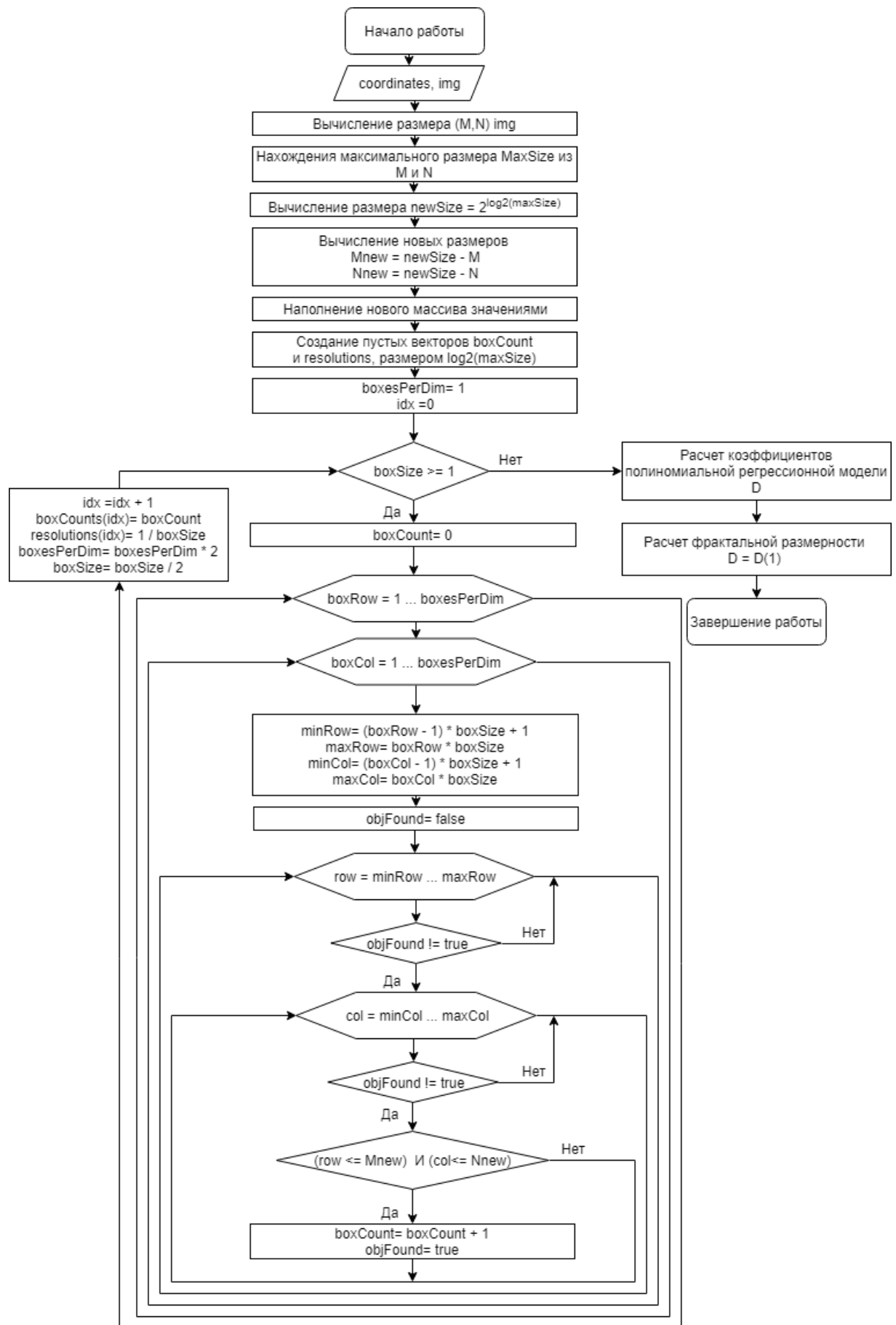


Рисунок 3.5 Блок-схема алгоритма оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах.

В начале работы алгоритма задается массив координат вершин минимальных прямоугольных окон `coordinatesimg`, сформированный функцией «Вычисления координат окон», и массив пикселей изображения `img` окна с координатами `coordinatesimg`.

Далее происходит вычисление размера, поступившего в функцию массива пикселей изображения окна и находится максимальный размер (`maxSize`) из вычисленных. После чего вычисляется новый размер по соответствующей формуле и производится вычисление новых размеров, с помощью которых на следующем этапе происходит заполнения нового массива.

Затем создаются два пустых вектора `boxCount` и `resolutions`, размером $\log_2(\text{maxSize})$. Также задаются два счетчика `boxesPerDim`, с изначальным значением 1, и `idx`, с изначальным значением 0.

В дальнейшем при выполнении условия «размер окна больше или равен 1», счетчик `boxCount` принимает значение 0. В циклах вычисляются минимальные и максимальные значения размеров квадратов, требующихся для нахождения методом покрытий фрактальной размерности. Флаг `objFound` принимает значение ложь. Затем в циклах от минимальных до максимальных значений размеров квадратов с шагом 1, с условием что флаг `objFound` не принял значение правда, выполняется проверка на не превышение размеров нового массива. Если размер превышен, то к счетчику `boxCount` прибавляется единица и флаг `objFound` принимает значение правда, иначе продолжается выполнение операций в циклах. При завершении циклов к счетчику `idx` прибавляется единица, в векторы `boxCount` и `resolutions` записываются новые значения и размер окна уменьшается вдвое.

При невыполнении «условия размер окна больше или равен 1» производится расчет коэффициентов полиномиальной регрессионной модели D и находится фрактальная размерность, как первый коэффициент полиномиальной регрессионной модели.

Результатом работы функции является фрактальная размерность исследуемого минимального прямоугольного окна (FD).

3.5 Алгоритм оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах

Для оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами, используется следующий алгоритм (Рисунок 3.6).

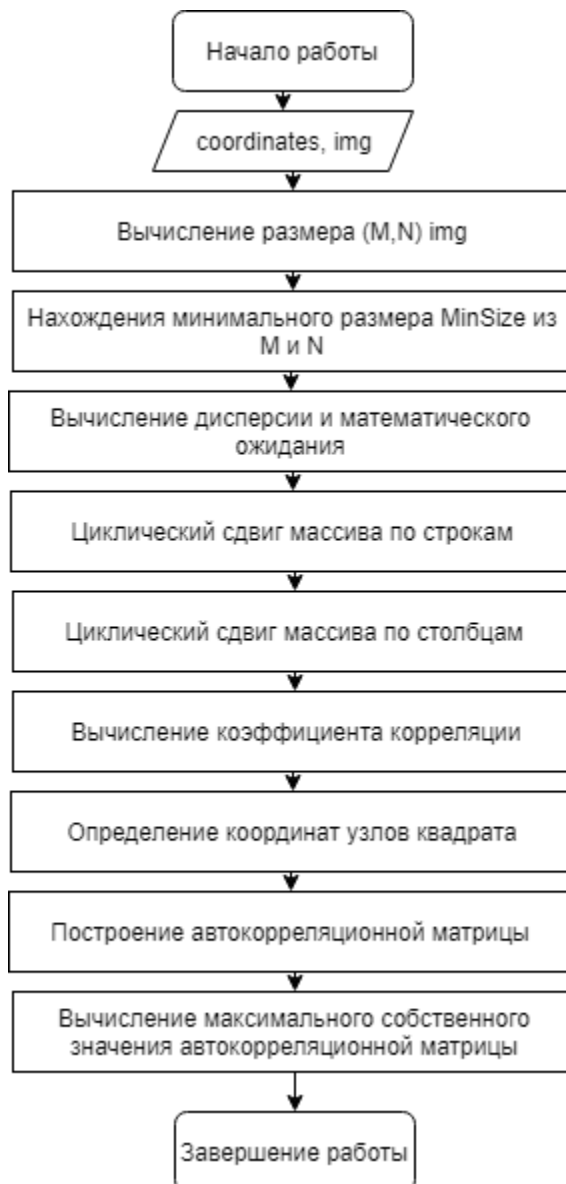


Рисунок 3.6 Блок-схема алгоритма оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах.

В начале работы алгоритма задается массив координат вершин минимальных прямоугольных окон `coordinatesimg`, сформированный функцией

«Вычисления координат окон», и массив пикселей изображения `img` окна с координатами `coordinatesimg`.

Далее происходит вычисление размера, поступившего в функцию массива пикселей изображения окна и находится минимальный размер (`minSize`) из вычисленных. На следующем этапе вычисляются дисперсия и математическое ожидание.

Затем производится циклических сдвиг массива по строкам и результат сохраняется в соответствующий массив, такая же операция выполняется для циклического сдвига по столбцам.

При помощи вычисленных массивов вычисляется коэффициент корреляции. Строится пустой массив размером $2 * minSize$ на $2 * minSize$. Далее происходит построение автокорреляционной матрицы из пустого массива с использованием дисперсии и коэффициента корреляции.

На конечном этапе вычисляется максимальное собственное значения автокорреляционной матрицы QR алгоритмом.

Результатом работы функции является максимальное собственное значение автокорреляционной матрицы исследуемого минимального прямоугольного окна (MEV).

3.6 Алгоритм принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов

Для принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов в минимальных прямоугольных окнах, накрывающих области с предполагаемыми антропогенными частицами и объектами, используется следующий алгоритм (Рисунок 3.7).

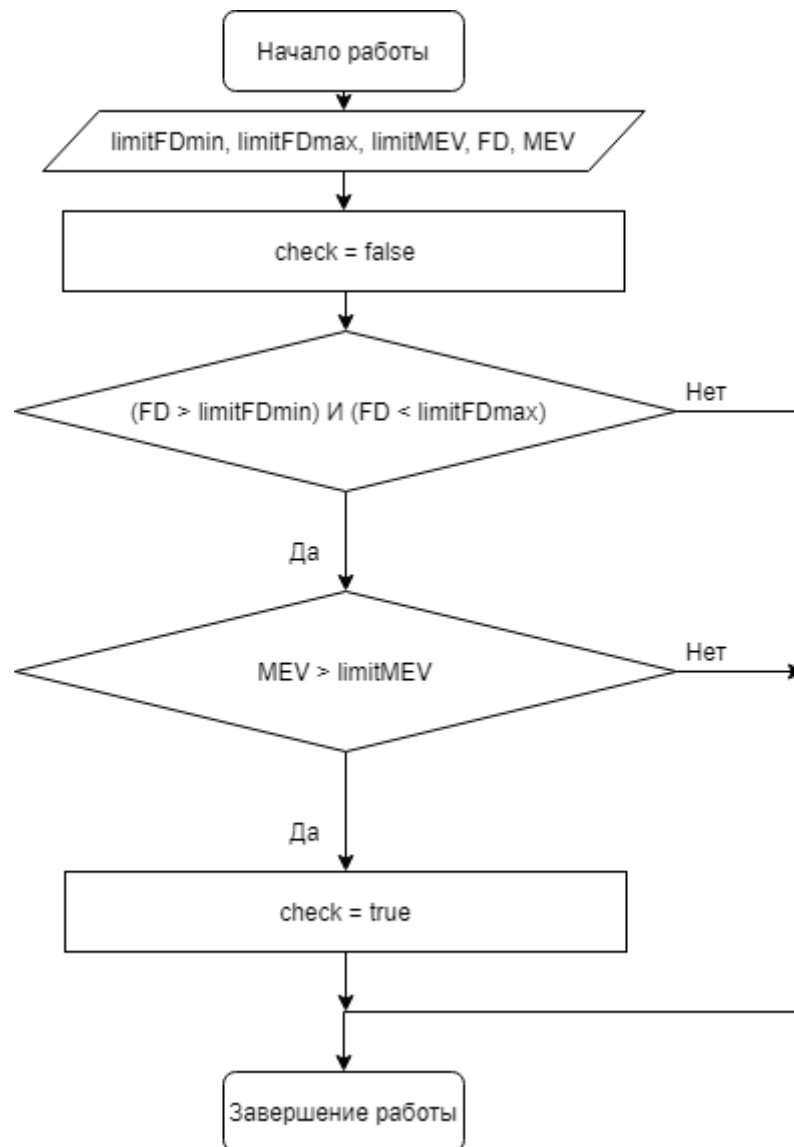


Рисунок 3.7 Блок-схема алгоритма принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов.

В начале работы алгоритма задаются минимальное ($limitFDmin$) и максимальное ($limitFDmax$) пороговые значения фрактальной размерности, и минимальное пороговое значение максимального собственного значения автокорреляционной матрицы $limitMEV$, так же используются значения FD , полученное функцией оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах, и MEV , полученное функцией оценки максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах.

Далее флаг $check$ принимает значение ложь. Затем последовательно выполняются два условия: «Если FD больше $limitFDmin$ и FD меньше

limitFDmax» и «Если MEV больше limitMEV». При выполнении этих условий флаг check принимает значение правда, иначе никаких изменений с флагом не происходит и происходит завершение работы алгоритма.

Результатом работы функции является флаг check, который при значении правда подтверждает гипотезу о нахождении в минимальном прямоугольном окне антропогенной частицы или объекта, иначе, при значении ложь, опровергает гипотезу.

3.7 Алгоритм вычисления координат антропогенных частиц и объектов

Для вычисления координат антропогенных частиц и объектов, используется следующий алгоритм (Рисунок 3.8).

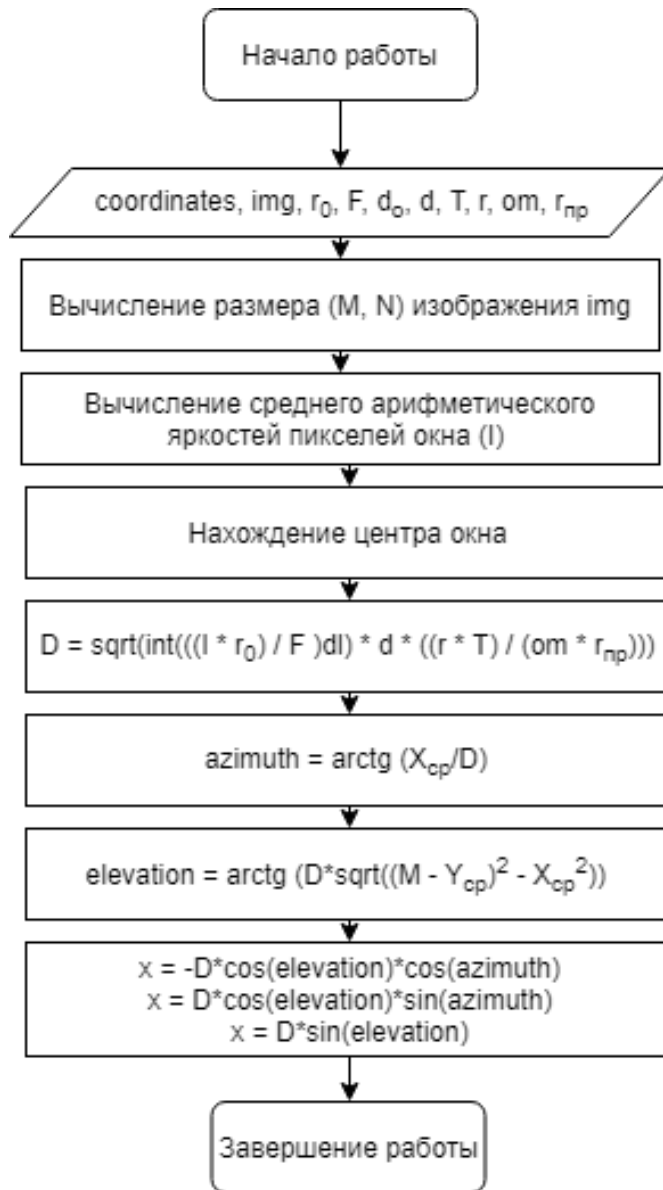


Рисунок 3.8 Блок-схема алгоритма вычисления координат антропогенных частиц и объектов.

В начале работы алгоритма задается массив координат вершин минимальных прямоугольных окон `coordinatesimg`; массив пикселей изображения кадра (`img`), поступившего с ОЭП; r_0 – коэффициент пропускания ОЭП; F – эквивалентная мощность шумов ОЭП; d – относительное отверстие объектива ОЭП; T – время просмотра угла обзора; r – число элементов поля зрения; om – угол обзора космической обстановки; r_{np} – постоянная времени ОЭП.

Далее происходит вычисление размера, поступившего в функцию массива изображения `img`. После чего вычисляется средняя яркость пикселей окна размерами из массива `coordinatesimg`. Затем производится вычисление центра окна с антропогенной частицей или объектом.

В дальнейшем происходит вычисление максимальной дальности от ОЭС, азимута и угла места антропогенной частицы или объекта. На следующем этапе осуществляется перевод координат из сферической в прямоугольную ОЭС систему координат. И завершающей операции, после которой происходит завершения работы, является переход из прямоугольной в инерциальную с учетом вращения прямоугольной системы относительно начала координат инерциальной системы.

3.8 Выводы по главе

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.

Все алгоритмы легко программно реализуемы и могут быть использованы ОЭС для обработки изображений, полученных ОЭП.

Глава 4. Практическая реализация и результаты исследования

4.1 Программная реализация алгоритмов

Ниже приводятся программы реализации в системе MatLab алгоритмов обработки изображений, формируемых ОЭП, с целью обнаружения антропогенных частиц и объектов и нахождения их координат в пространстве [75].

Все программы построены по материалам предыдущих глав, они составляют базис, в котором могут синтезироваться комплексные программы как частных алгоритмов обнаружения антропогенных частиц, так и комплексного алгоритма оценки текущего состояния контролируемого ОЭП околоземного космического пространства.

Программная реализация алгоритмов начинается с приема текущего кадра. Прием и порядок подключения осуществляется по последовательности команд:

```
obj = videoinput('winvideo', 1, 'YUY2_640x480');
Frames = 0;
% limitV, limitFDmin, limitFDmax, limitMEV - предопределённые граничные
значения
% r0, F, do, d, T, r, om, rpr - предопределённые характеристики ОЭП
% wname – наименование базисной функции для вейвлет-преобразований
while (Frames<inf)
    Frames = Frames + 1;
    img = getsnapshot(obj);
    % Функция вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации
    структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП
    maxV = velvet (img, limitV, wname);
```

```

% Функция формирования минимальных прямоугольных окон
maxV = minWindows(maxV);
% Функция вычисления координат окон
coordinatesimg = coordinatesimg (maxV);
[A,Y]= size (coordinatesimg);
for i=1:A
    % Функция оценки фрактальной размерности в минимальных
    прямоугольных окнах
    FD = FD(coordinatesimg, img, i);
    % Функция оценки максимальных собственных значений
    автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах
    MEV = MEV(coordinatesimg, img, i);
    % Функция принятия решения об обнаружении антропогенных частиц
    и объектов
    check = takingDecision(FD, MEV, limitFDmin, limitFDmax, limitMEV);
    if check == true
        % Функция вычисления координат антропогенных частиц и
        объектов
        coordinates = coordinates (r0, F, do, d, T, r, om, rpr, img,
        coordinatesimg, i);
    end
end
end
end

```

Функция вычисления вейвлет-коэффициентов и идентификации структурных особенностей на текущем кадре, поступившего с ОЭП:

```

function v_mass = velvet (mass, wname, porog)
    v_mass_vertical = ones(size(mass));
    v_mass_gorizontal = ones(size(mass));

```

```

v_mass_diagonal1 = ones(size(mass));
v_mass = ones(size(mass));
[M,N] = size(mass);
for i=1:M
    v_mass_gorizortal(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
    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

```

```

        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_gorizontal(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_gorizontal(i,j)) == v_mass(i,j))
            v_mass(i,j) = v_mass_gorizontal(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
for i=1:M
    for j=1:N
        if (abs(v_mass(i,j)) < porog)
            v_mass(i,j) = 0;
        else
            v_mass(i,j) = 1;
        end
    end
end
end

```

Как пример работы, вычисленный массив вейвлет-коэффициентов (рисунок 4.1) и результат идентификации структурных особенностей (рисунок 4.2).

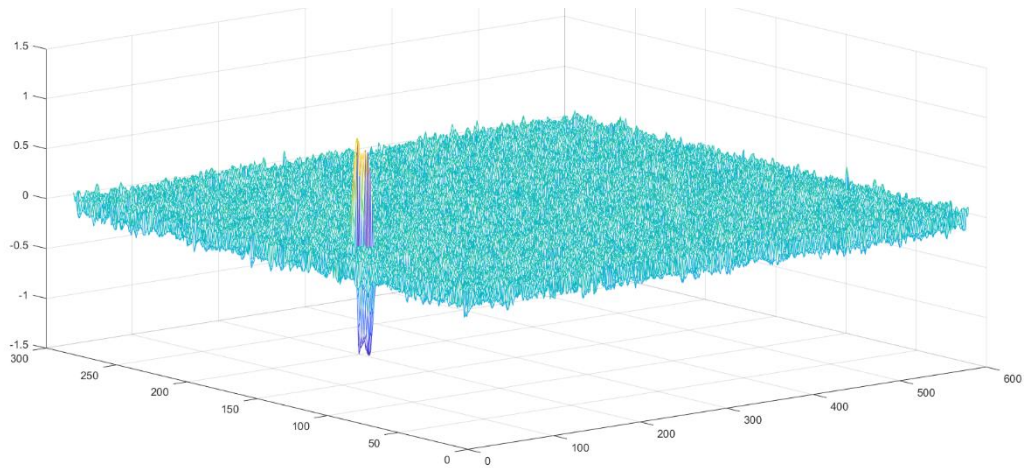


Рисунок 4.1 Массив вейлет-коэффициентов



Рисунок 4.2 Результат идентификации структурных особенностей

Функция формирования минимальных прямоугольных окон:

```
function windows = minWindows (mass)
    [M,N] = size(mass);
    windows = mass;
    windows = im2bw(windows);
    windows = imfill(windows,8,'holes');
    for k=1:10
        for i=2:M-1
            for j=2:N-1
                if ((windows(i+1,j+1)==1)&&(windows(i,j)==1))
```

```

    windows(i,j+1)=1;
    windows(i+1,j)=1;
end
if ((windows(i,j+1)==1)&&(windows(i+1,j)==1))
    windows(i+1,j+1)=1;
    windows(i,j)=1;
end
if ((windows(M-i+1,N-j+1)==1)&&(windows(M-i,N-j)==1))
    windows(M-i,N-j+1)=1;
    windows(M-i+1,N-j)=1;
end
if ((windows(M-i,N-j+1)==1)&&(windows(M-i+1,N-j)==1))
    windows(M-i+1,N-j+1)=1;
    windows(M-i,N-j)=1;
end
if ((windows(M-i+1,j+1)==1)&&(windows(M-i,j)==1))
    windows(M-i,j+1)=1;
    windows(M-i+1,j)=1;
end
if ((windows(M-i,j+1)==1)&&(windows(M-i+1,j)==1))
    windows(M-i+1,j+1)=1;
    windows(M-i,j)=1;
end
if ((windows(i+1,N-j+1)==1)&&(windows(i,N-j)==1))
    windows(i,N-j+1)=1;
    windows(i+1,N-j)=1;
end
if ((windows(i,N-j+1)==1)&&( windows(i+1,N-j)==1))
    windows(i+1,N-j+1)=1;
    windows(i,N-j)=1;

```

```

        end
    end
end
end

```

Для примера работы функции приведен рисунок 4.3.



Рисунок 4.3 Результат работы функции. 1- область с антропогенным объектом, 2 – область с ложным объектом.

Функция вычисления координат окон:

```

function v = coordinatesimg (mass)
    [M,N] = size(mass);
    v = [0, 0, 0, 0, 0];
    for i=1:M
        for j=1:N
            if (mass(i,j)==1)
                k = 1;
                while (mass(i+k,j)== 1)
                    k = k + 1;
                end
                d = 1;
            end
        end
    end
end

```

```

while (mass(i,j+d)== 1)
    d = d + 1;
end
if ((d~=1)&&(k~=1))
    mass(i:i+k,j:j+d)=0;
    v = [v; i, i+k, j, j+d;];
end
end
end
v(1,:) = []
end

```

Функция оценки фрактальной размерности в минимальных прямоугольных окнах:

```

function [ D ] = FD( I, coordinatesimg, i )
    I = I(coordinatesimg(i, 1): coordinatesimg(i, 2), coordinatesimg(i, 3):
coordinatesimg(i, 4));
    maxDim = max(size(I));
    newDimSize = 2^ceil(log2(maxDim));
    rowPad = newDimSize - size(I, 1);
    colPad = newDimSize - size(I, 2);
    I = padarray(I, [rowPad, colPad], 'post');

    boxCounts = zeros(1, ceil(log2(maxDim)));
    resolutions = zeros(1, ceil(log2(maxDim)));

    boxSize = size(I, 1);
    boxesPerDim = 1;
    idx = 0;

```

```

while boxSize >= 1
    boxCount = 0;

    for boxRow = 1:boxesPerDim
        for boxCol = 1:boxesPerDim
            minRow = (boxRow - 1) * boxSize + 1;
            maxRow = boxRow * boxSize;
            minCol = (boxCol - 1) * boxSize + 1;
            maxCol = boxCol * boxSize;

            objFound = false;
            for row = minRow:maxRow
                for col = minCol:maxCol
                    if I(row, col)
                        boxCount = boxCount + 1;
                        objFound = true;
                    end;

                    if objFound
                        break;
                    end;
                end;
            end;

            if objFound
                break;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

idx = idx + 1;
boxCounts(idx) = boxCount;
resolutions(idx) = 1 / boxSize;

boxesPerDim = boxesPerDim * 2;
boxSize = boxSize / 2;
end;

D = polyfit(log(resolutions), log(boxCounts), 1);
D = D(1);
end

```

**Функция оценки максимальных собственных значений
автокорреляционной матрицы в минимальных прямоугольных окнах:**

```

function MEV = MEV(img, coordinatesimg, i)
    cam = img (coordinatesimg(i, 1): coordinatesimg(i, 2), coordinatesimg(i,
3): coordinatesimg(i, 4));
    [M, N] = size(cam);
    if (M>N) N=M; end
    if (M<N) M=N; end
    sigma2_x = var(cam(:));
    mean_x = mean(cam(:));
    cam_r = circshift(cam,[1 0]);
    cam_c = circshift(cam,[0 1]);
    rho_mat = corrcoef([cam(:); cam(:)],[cam_c(:); cam_r(:)]);
    rho = rho_mat(1,2);
    [rr,cc] = meshgrid([-M:M-1],[-N:N-1]);
    r_x = (sigma2_x*rho.^sqrt(rr.^2+cc.^2));
    MEV = max(eig(real(r_x)));

```

End

Функция принятия решения об обнаружении антропогенных частиц и объектов:

```
function check = takingDecision(FD, MEV, limitFDmin, limitFDmax, limitMEV)
    check = false;
    if ((FD > limitFDmin) && (FD < limitFDmax))
        if MEV > limitMEV
            check = true;
        end
    end
end
```

Функция вычисления координат антропогенных частиц и объектов:

```
function coordinates = coordinates (r0, F, do, d, T, r, om, rpr, img,
coordinatesimg, i)
    [M,N] = size(img);
    I = mean(mean(img(coordinatesimg(i, 1): coordinatesimg(i, 2),
coordinatesimg(i, 3): coordinatesimg(i, 4))));
    Y = mean(coordinatesimg(i, 1), coordinatesimg(i, 2));
    X = mean(coordinatesimg(i, 3), coordinatesimg(i, 4));
    syms l;
    dl = diff(l);
    D = sqrt(int( (((I* r0)/F) * dl * (do) * (r*T / (om * rpr) ))));
    azimuth = rad2deg(atan(Y / D));
    elevation = rad2deg(atan((sqrt((M - Y)^2+X^2) / D));
    [x, y, z] = SPH2CART[azimuth, elevation, D];
    coordinates = [x, y, z];
```

end

4.2 Калибровка программной реализация для различных фоновых условий

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 примера можно рассмотреть три изображения одной и той же ситуации, но к последним двум ситуациям добавлен дополнительный белый шум (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 Ситуация с антропогенным объектом.

Как видно из изображений на рисунке 4.5, более сильные помехи при одном и том же пороговом значении вейвлет-коэффициентов дают больше ложных объектов.

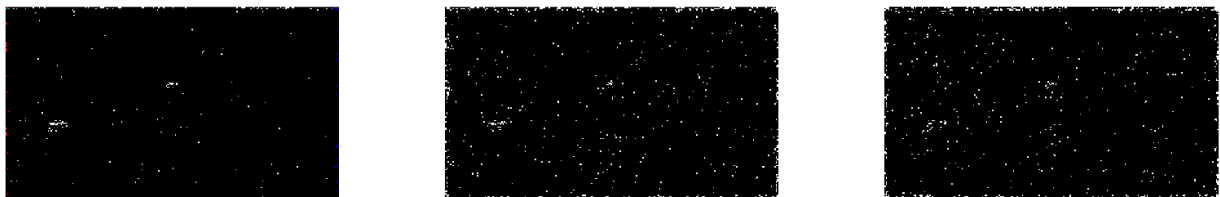


Рисунок 4.5 Идентифицируемые структурные особенности изображения с антропогенным объектом.

Как видно из изображений на рисунке 4.2, более сильные помехи при одном и том же пороговом значении вейвлет-коэффициентов дают больше ложных объектов.

Калибровка порогового значения вейвлет-коэффициентов должна выполняться эмпирически по как минимум 100 ситуациям с антропогенными частицами или объектами. В процессе калибровки накапливается статистика о фрактальных размерностях и максимальных собственных значениях автокорреляционной матрицы по антропогенным частицам и объектам, звездам и планетам, и так же по ложным объектам, вызванных шумами.

На основе этих статистик, можно узнать закон распределения закона распределения вероятностей энергетической яркости для различных ситуаций (антропогенная частица или объект, ложная цель, звезда или планета). И соответственно вычислить бета-вероятности распределения и найти пороговые значения.

4.3 Испытание программной реализации

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



Рисунок 4.6 Изображение, полученное канадским космическим телескопом NEOSsat.

На изображении (Рисунок 4.6) 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. Самые яркие звезды на данном изображении, которые не были отброшены при использовании порогового значения вейвлет-коэффициентов, имеют значение фрактальной размерности выше 1.58, и максимальное собственное значение автокорреляционной матрицы менее 0.11. Координаты обнаруженного антропогенного объекта: максимальная дальность до объекта 160109 м., азимут - 1.3201, угол места - 1.5708.



Рисунок 4.7 Изображение, полученное канадским космическим телескопом NEOSsat.

На изображении (Рисунок 4.7) присутствует один антропогенный объект, так же около 7 звезд. После обработки программой был выделен один объект с фрактальной размерностью 1.45 и максимальным собственным значением автокорреляционной матрицы 0.17. Координаты обнаруженного антропогенного объекта: максимальная дальность до объекта 142620 м., азимут - 1.0385, угол места - 1.142.

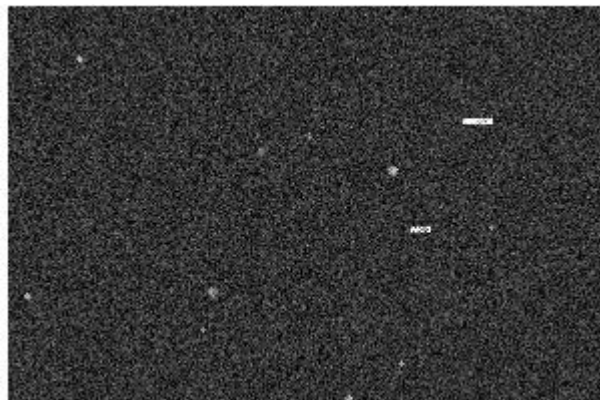


Рисунок 4.8 Изображение, полученное канадским космическим телескопом NEOSsat.

На изображении (Рисунок 4.8) присутствует два антропогенных объекта, так же около 10 звезд. После обработки программой был выделено три области с двумя антропогенными частицами и одной звездой. Этот факт указывает на то, что требуется дополнительная калибровка и уточнение пороговых значений. Так для антропогенных объектов фрактальные размерности равны 1.38 и 1.47, а максимальные собственные значения автокорреляционной матрицы – 0.19 и 0.21. В то же время для звезды, которую программа посчитала как антропогенный объект, фрактальная размерность равна 1.54, а максимальные собственные значения автокорреляционной матрицы 0.16. Из этого можно сделать вывод что калибровка должна производиться по фрактальной размерности и порог должен быть снижен до 1.54. Но более точно определить пороговое значение можно при калибровке программы, в том числе при уточнении бета-вероятности распределения.

4.4 Оценка вероятности обнаружения антропогенных частиц и объектов

Обнаружением с помощью оптико-электронного прибора называется процесс принятия решения о наличии или отсутствии антропогенных частиц и объектов в данной области околоземного космического пространства в результате приема и обработки изображений.

Прием изображений всегда происходит на фоне помех того или иного вида (собственные шумы приемника, радишумы космического пространства, отражение от гидрометеоров, земной поверхности и др.). Наличие помех приводит к искажению изображений и к возникновению ошибок в оценке обстановки. При обнаружении возможны четыре ситуации.

Во-первых, если объект действительно имеется и сигналы поступают при наличии помех, то могут быть приняты два решения: первое — антропогенная частица или объект есть и второе — антропогенной частицы или объекта нет. В

первом случае (т.е. принятие решения о том, что объект есть при наличии антропогенной частицы или объекта в действительности) называется правильным обнаружением антропогенной частицы или объекта. Во втором случае (принятие решения об отсутствии антропогенной частицы или объекта в то время, как антропогенная частица или объект есть) — пропуском объекта. Возможность неопределенного ответа — «неизвестно, есть ли антропогенная частица или объект или его нет» — исключается.

Во-вторых, если антропогенной частицы или объекта нет, то при наличии помех также возможны два решения: антропогенная частица или объект есть и антропогенной частицы или объекта нет. В этом случае принятие решения о наличии антропогенной частицы или объекта (когда его в действительности нет) называется ложной тревогой, а решение об отсутствии антропогенной частицы или объекта — правильным необнаружением.

Пропуск антропогенной частицы или объекта и ложная тревога являются ошибками при обнаружении антропогенных частиц или объектов. Так как в общем случае изображения и помехи являются случайными функциями времени, то принятие того или иного решения носит случайный характер. Поэтому возможность возникновения перечисленных ситуаций принято характеризовать соответствующими вероятностями: вероятностью правильного обнаружения $W_{по>}$ пропуска $W_{пр}$, ложной тревоги $W_{лт}$ и правильного необнаружения $W_{пн}$.

Правильное обнаружение и пропуск антропогенной частицы или объекта (при наличии антропогенной частицы или объекта в действительности) образуют полную группу несовместимых событий, поэтому

$$W_{но} + W_{пр} = 1 \quad (4.1)$$

Точно так же ложная тревога и правильное необнаружение образуют полную группу несовместимых событий при отсутствии антропогенной частицы или объекта

$$W_{лт} + W_{пн} = 1 \quad (4.2)$$

Рассмотренные четыре вероятности являются условными, т.к. они характеризуют события, происходящие при условии наличия или отсутствия

объекта. В реальных условиях работы станции разведки мы не можем заранее знать, имеются ли антропогенной частицы или объекты в просматриваемой области пространства или их там нет.

Обозначив вероятность наличия антропогенной частицы или объекта в интересующий нас области пространства через $W(\pi)$, а вероятность отсутствия антропогенной частицы или объекта через $W(o)$.

Четыре указанных события также составляют полную группу несовместимых событий, поэтому

$$W(\pi) \cdot W_{\text{по}} + W(\pi) W_{\text{пр}} + W(o) W_{\text{лт}} + W(o) W_{\text{пн}} = 1 \quad (4.3)$$

где: $W(\pi) \cdot W_{\text{по}}$ - безусловная вероятность правильного обнаружения,

$W(\pi) W_{\text{пр}}$ - безусловная вероятность пропуска цели,

$W(o) W_{\text{лт}}$ - безусловная вероятность ложной тревоги,

$W(o) W_{\text{пн}}$ - безусловная вероятность правильного необнаружения.

Оптимальной оптико-электронной системой обнаружения, с помощью которого может быть достигнуто лучшее (по сравнению с другими) значение выбранного критерия при прочих равных условиях [76]. Наиболее употребляемыми являются три критерия: критерий идеального наблюдателя, критерий Неймана-Пирсона, критерий последовательного анализа.

В соответствии с критерием Неймана-Пирсона, оптимальная оптико-электронная система характеризуется максимумом разности

$$W_{\text{по}} * W_{\text{лт}} \text{ при } W_{\text{лт}} \leq (W_{\text{лт}})_{\text{доп}} \quad (4.5)$$

Следовательно, оптимальный характер критерия Неймана-Пирсона состоит в том, что он максимизирует вероятность правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги.

В оптико-электронном приборе, с помощью которого производится обнаружение антропогенных частиц и объектов, осуществляется определение апостериорных вероятностей различных сообщений (например, сообщение — есть объект или его нет) и указание в качестве решения на то сообщение, вероятность которого больше остальных. Основными характеристиками

устройства, используемыми для обнаружения сигналов, являются рабочие характеристики приемника.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что 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. По факту вероятность правильного обнаружения можно повысить, повысив вероятность ошибки при расчете пороговых значений фрактальных размерностей и максимальных собственных значений автокорреляционной матрицы.

4.5 Выводы по главе

Программная реализация показывает, что предложенный метод и разработанные алгоритмы для ОЭС с заданной вероятностью обнаруживают антропогенные частицы и объекты. Но в то же время может потребоваться калибровка пороговых значений для уменьшения случаев пропусков и обнаружения ложных целей.

Программная реализация обеспечивает высокие показатели эффективности в любой фоноцелевой обстановке без наличия априорных сведений в том числе и относительно закона распределения вероятностей ошибок измерения ОЭС координат пространственного положения антропогенных частиц и объектов.

Доказана статистическая устойчивость исходных достаточных статистик для вейвлет-фрактально-корреляционного алгоритма. Так же подтверждается факт, что алгоритмы легко реализуемы на различных языках программирования, в частности на языке Matlab.

Заключение

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 малоразмерного космического мусора в виде антропогенных частиц и объектов стоит очень остро и в любой момент из-за скопившейся массы объектов на орбите и их столкновений между собой может привести к синдрому Кesslera, который может остановить развитие освоения ОКП.
- Описана новая методика обнаружения антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронной системы с вычислением координат обнаруженных объектов в околоземном космическом пространстве
- Описана причина того, что наиболее перспективными являются орбитальные средства наблюдения в виду того, что в отличие от других групп они не зависят от искажений сигналов, вызванных неоднородностью среды передачи. Но в тоже время работа энергоустановок орбитальных средств, использующие оптико-электронные приборы, может привести к зашумлению изображений наблюдаемой области ОКП. И для устранения этой проблемы требуется разработать метод и алгоритмы обработки изображений, способных при отсутствии априорной информации функционировать.
- На основе анализа проблемы обнаружения антропогенных частиц и объектов выработаны основные требования к методу и алгоритмам.
- Описана причина использования вейвлет-преобразований, в виду того, что вейвлеты являются подходящим средством для анализа различных нестационарных сигналов. К таким сигналам можно отнести и сцены изображений антропогенных частиц и объектов. Обработка изображения на

основе вейвлет-преобразования позволяет решить ряд задач, связанных с уменьшением уровня шума, выделение локальных пространственных неоднородностей, сжатия изображения, а также анализом текстур. Одним из главных преимуществ, которое предоставляет вейвлет, является возможность представлять локальный анализ, т.е. анализировать локализованную область в большом сигнале. Вейвлет анализ способен выявить следующие особенности данных, которые упускают другие методы анализа сигналов: точки разрыва, резкие нелинейности в высших гармониках и самоподобие.

- Локализованные области изображений вейвлет-преобразованиями имеют произвольную форму, с пустотами внутри. Для вычисления фрактальных размерностей и максимальных собственных значений автокорреляционных матриц локализованные области должны быть провидены к минимальный прямоугольным окнам. Получившиеся окна с минимальными площадями полностью накрывают только свои локализованные изображения со структурными особенностями.
- Информативность не нарушается при изменении фоновых условий, подтверждаются свойства фрактальной размерности, как минимальной достаточной статистики и максимального инварианта для подтверждения гипотезы об обнаружении антропогенной частицы или объекта.
- По определению максимальные собственные значения являются максимальными инвариантами и минимально достаточными статистиками для подтверждения гипотезы об обнаружении антропогенной частицы или объекта.
- Окончательное решение об обнаружении принимается по критерию Неймана-Пирсона с использованием пороговых значений, полученных при вычислении, бета-распределения вероятностей по фрактальным размерностям и максимальным собственным значениям автокорреляционных матриц.
- 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. Для вычисления максимальной дальности от ОЭС до антропогенной частицы требуется только вычисление спектральная плотность антропогенной частицы или объекта. Азимут и угол места можно вычислить по известным тригонометрическим формулам.
- Разработанный программный комплекс обеспечивает высокие показатели эффективности в любой фоноцелевой обстановке без наличия априорных сведений в том числе и относительно закона распределения вероятностей ошибок измерения ОЭС координат пространственного положения антропогенных частиц и объектов.
- 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.

Обозначения и сокращения

- **БР** – баллистические ракеты;
- **КМ** – космический мусор;
- **КО** – космический объект;
- **ОКП** – околоземное космическое пространство;
- **ООН** – Организация объединенных наций;
- **ОЭП** – оптико-электронный прибор;
- **ОЭС** – оптико-электронная система;
- **РН** – ракетоноситель;

Список литературы

1. Адушкин В.В., Вениаминов С.С., Козлов С.И., Сильников М.В. О техногенном засорении космоса и некоторых его последствиях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 7-8. С. 16-21.
2. Stansbery G. Orbital Debris Research at NASA // Johnson Space Center. URL: <http://aero.tamu.edu/sites/default/files/faculty/alfriend/S2.2%20Stansbery.pdf> (дата обращения: 12.5.2017).
3. Руководящие принципы Комитета по использованию космического пространства в мирных целях по предупреждению образования космического мусора. 2007.
4. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор — угроза человечеству. Москва: Инст. космич. исследований РАН, 2012. 192 с.
5. Солодов А.В. Инженерный справочник по космической технике. М.: Воениздат, 1977.
6. Берлин А.А., Ассовский И.Г. Перспективные материалы и технологии для. ТОРУС ПРЕСС, 2007.
7. Панасюк М.И., Новиков Л.С. Модель космоса. Т.1: Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007.
8. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. Москва: ИКИ РАН, 2013. 216 с.
9. Райкунов Г.Г. Методы наблюдения и модели космического мусора. Кн. 1. М.: Физматлит, 2014.
10. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. 4-е изд. М.: Логос, 1999. 360 с.
11. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2008.
12. Хокинг С. Черные дыры и молодые вселенные. СПб: Амфора, 2001. 189 с.
13. NEOSSat's Dual Mission – HEOSS [Электронный ресурс] // NESS - Near Earth Space Surveillance: [сайт]. URL: http://neossat.ca/?page_id=99 (дата обращения: 23.5.2018).
14. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники, справочник.

- М.: Радио и связь, 1978. 400 с.
15. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
 16. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 478 с.
 17. Бельский А.Б., Здор С.Е., Колинко В.И., Яцкевич Н.Г. Новый подход к разработкам оптико-электронных средств мониторинга околоземного космического пространства // Оптический журнал, Т. 8, № 76, 2009. С. 22-28.
 18. Райкунов Г.Г. Космический мусор в 2 кн. Кн.1 Методы наблюдения и модели космического мусора. М.: Физматлит, 2014.
 19. Райкунов Г.Г. Космический мусор в 2 кн. Кн.2 Предупреждение образования космического мусора. М.: Физматлит, 2014.
 20. Макаров Ю.Н. Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором. ЦНИИмаш, 2015.
 21. Проблема техногенного засорения околоземного космического пространства и основные направления ее решения [Электронный ресурс] // Центр военно-политических исследований: [сайт]. [2015]. URL: <http://eurasian-defence.ru/?q=node/34149> (дата обращения: 14.5.2017).
 22. Организация Объединенных Наций. Комитет по использованию космического пространства в мирных. Научно-технический подкомитет. Национальные исследования, касающиеся космического мусора, безопасного использования космических объектов с ядерными источниками энергии на борту и проблем их столкновений с космическим мусором. Вена. 2016.
 23. Shell J.R. Optimizing Orbital Debris Monitoring with Optical Telescopes // Advanced Maui and Optical Space Surveillance Technologies Conference. 2010. pp. 427-443.
 24. Carlos M., Estrella P. Seminar space debris // Space debris. 2013.
 25. Кразмальский И.О. Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC // Адаптивный алгоритм выделения изображений в широкоугольных оптико-электронных системах обнаружения элементов космического мусора. 2014.
 26. Sato T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 1999. No. 37(2). pp. 1000-1005.
 27. Sohrab M., Sana U.Q. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference // Tracking Low Earth Orbit Small Debris with GPS Satellites as Bistatic Radar. 2016.

28. Jayasimha S., Jyothendar P. International Conference on Space Science and Communication // Detection of Orbital Debris Using Self-Interference Cancellation Residual Signal. 2013.
29. Tingay S.J., Kaplan D.L. On the detection and tracking of space debris using the Murchison Widefield Array. I. Simulations and test observations demonstrate feasibility // Instrumentation and Methods for Astrophysics, 2013.
30. Bauer W., Romberg O., Krag H. The 4S Symposium // Debris in-situ impact detection by utilization of cube-sat solar panels. 2016.
31. New J.S., Price M.C., Cole M. 47th Lunar and Planetary Science Conference // ODIN: a concept for an orbital debris impact detection network. 2016.
32. Организация Объединенных Наций. Комитет по использованию космического пространства в мирных целях. Научно-технический подкомитет. Национальные исследования, касающиеся космического мусора, безопасного использования космических объектов с ядерными источниками энергии на борту и проблем их столкновений с космическим мусором. Вена. 2015.
33. Аникеева М.А., Боярчук К.А., Улин С.Е. Обнаружение радиоактивного космического мусора с борта космического аппарата // Космическая электромеханика. космические аппараты. Вопросы электромеханики. 2012. Т. 126.
34. Гарнов С.В., Моисеева А.В., Носатенко П.Я., Фомин В.Н., Церевитинов А.Б. Оценка характеристик перспективного орбитального лазерного локатора для мониторинга космического мусора // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. 2014. Т. 70.
35. Половников В.И., Ильичев В.В. Способ определения координат космического объекта, 2319172.
36. Чувашов И.Н. труды 46-й Международной студенческой научной конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина // Численное моделирование орбит объектов космического мусора. Екатеринбург. 2017. С. 226.
37. Кузин С.В., Ульянов А.С., Шестов С.В., Богачёв С.А. Наблюдение космических объектов с помощью оптических датчиков в экспериментах спирит // Механика, управление и информатика, № 13, 2013. С. 58-68.
38. Соколов Н.Л., Захаров П.А. Автономная идентификация параметров орбит потенциально опасных космических объектов бортовыми средствами // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 2. С. 214-224.

39. Проценко П.А. Методика определения параметров ориентации плоскости орбиты космического аппарата в интересах контроля техногенной космической обстановки // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2012. № 636. С. 44-49.
40. Трещалин А.П. Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных объектов // Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 3.
41. Стрельников С.В., Бубнов В.И., Родионова Г.Г. Способ определения орбиты космического аппарата, 2520714.
42. Гузенко О.Б., Храмичев А.А. Анализ особенностей фоноцелевой обстановки в задаче обнаружения динамических объектов в оптическом диапазоне // Вестник Концерна ПВО "Алмаз-Антей". 2015. № 2.
43. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Реализация дискретного вейвлет-преобразования в реальном времени // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2017. № 6. С. 68-72.
44. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. М.: РХД, 2001. 461 с.
45. Грибунин В.Г. Введение в анализ данных с применением дискретного. Новосибирск. 2001. 54 с.
46. Graps A. An Introduction to Wavelets // Computational Science and Engineering, Vol. 2, No. 2, 1995. pp. 2-18.
47. Валеев С.Г., Вершилкина Е.А. Применение вейвлета при обработке. Москва. 2008. 102 с.
48. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. 3rd ed. М.: Высшая школа, 2000. 462 pp.
49. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2005. 848 pp.
50. Зыков И.И. Информатика, управление и системный анализ: Труды IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием // Метод обнаружения и распознавания. 2016. С. 205-209.
51. Иванов М.А. Новые информационные технологии в науке и образовании // Применение вейвлет-преобразований в кодировании изображений. 2011. С. 157-175.
52. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, Т. 166, № 11, 1996. С. 1145-1170.
53. Singh B.N., Tiwari A.K. Optimal selection of wavelet basis function applied to ECG signal denoising // Digital Signal Processing. 2006. No. 16(3). pp. 275-287.

54. Ercelebi E. Electrocardiogram signals de-noising using lifting-based discrete wavelet transform // *Computers in Biology and Medicine*. 2004. No. 34(6). pp. 479-493.
55. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразование. Учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2003.
56. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. ДМК-Пресс, 2005. 304 с.
57. Розанов Ю.А. Случайные процессы. М.: Наука, 1971. 286 с.
58. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
59. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М. 1968. 496 с.
60. 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» // Метод обнаружения повреждений на изображении со сложным фоном. 2015. С. 172-176.
61. Vincent L. Morphological Gray Scale Reconstruction in Image Analysis : Applications and Efficient Algorithms // *IEEE Transactions on Image Processing*. 1993. Vol. 2. No. 2. pp. 176-201.
62. Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications // Springer-Verlag, 1999. pp. 173-174.
63. Зыков И.И. Сборник трудов VI-й Международной научно-технической конференции «Энергетика, Информатика, Инновации» // Обнаружение минимальных прямоугольных областей. 2016. Т. 1. С. 279-283.
64. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 266 с.
65. Петухов Н.Ю. Тез. докл. 11-й междунар. конф. и выст. “Цифровая обработка сигналов и ее применение” // Реализация метода покрытий для расчета фрактальной размерности ландшафтных изображений. М. 2009. Т. 2. С. 393–396.
66. Воеводин В.В. Вычислительные основы линейной алгебры. М.: Наука, 1977. 304 с.
67. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир, 1980. 456 с.
68. Кублановская В.Н. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра: Перевод с англ. М.: Машиностроение, 1976. 390 с.
69. Катулев А.Н., Храмичев А.А., Ягольников С.В. 2d слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных

- фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов. Монография. М.: Радиотехника, 2018. 408 с.
70. Моденов П.С. Аналитическая геометрия. МГУ, 1955. 563 с.
 71. Ягольников С.В., Храмичев А.А., Катулев А.Н., Палюх Б.В., Зыков И.И. Показатели безопасности космического аппарата в полете и генерация информации для предупреждения о высокоскоростном взаимодействии // Программные продукты с системы, № 4, 2017. С. 726-732.
 72. Чересов Ю.И. Вычисление фрактальных размерностей радиолокационных изображений и примеры использования их для обнаружения и распознавания целей и фона // Научный вестник МГТУ ГА, № 109, 2009.
 73. Авраменко Д.В. Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XXXV междунар. науч.-практ. конф // Обнаружение и выделение космических объектов искусственного и естественного происхождения на основе вейвлет преобразований. Новосибирск. 2016. Т. 28. С. 77-83.
 74. Катулев А.Н., Колонсков А.А., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Адаптивный метод и алгоритм обнаружения малоконтрастных объектов оптико-электронным средством // Оптический журнал, № 81, 2014. С. 29-39.
 75. Палюх Б.В., Зыков И.И. Программные средства вейвлет-фрактально-корреляционного метода обнаружения объектов космического мусора // Программные продукты с системы, № 2, 2018. С. 414-417.
 76. Байкенов А.С. Технические средства защиты информации в телекоммуникационных системах. Алматы: НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2012. 29 с.
 77. Зверев П.С., Довгарь В.М. Метод и алгоритм распознавания искусственных околоземных орбитальных объектов и «Мусора» для обеспечения безопасности космических полетов // Вестник ВГТУ. 2010. № 4.

Приложение А

Внедрение результатов работы в производство



**Общество с ограниченной ответственностью
«Научемкие технологии»**

Юридический адрес: Адрес: 170023, Тверская обл, г. Тверь, ул. Маршала Конева, д. 12

ИНН/КПП 6950150397/695001001, ОГРН 1126952014551
р/сч 40702810406000000853 в Филиал "СДМ-Банк"(ПАО) в г. Твери
к/сч 30101810500000000921, БИК 042809921

Тел: 8-(4822)-78-72-93, тел: 8-920-688-24-63, E-mail: 69print@mail.ru

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Зыкова Илья Игоревича

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

Общество с ограниченной ответственностью «НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО "НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ") (г.Тверь) реализовало в своем производственном процессе материалы диссертационной работы И.И. Зыкова на тему «Методы и алгоритмы обнаружения антропогенных частиц в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем» для применения в разработках оптико-электронных систем для обнаружения антропогенных частиц и объектов.

Генеральный директор
ООО «Научемкие технологии», к.т.н.



Разумов М.С.

24.08.2018

Утверждаю
Генеральный директор



А.А. Храмичев
2018 г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
Зыкова Ильи Игоревича

на тему «Методы и алгоритмы обнаружения антропогенных частиц в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем»

Комиссия в составе начальника отдела «Исследований радиооптических информационных систем наземно-воздушно-космического базирования» Павлова В.А, заместителя начальника отдела начальника Белова А.А., начальника 1 сектора Ковальчука А.Н. составила настоящий акт в том, что материалы диссертационной работы Зыкова И.И. на тему «Методы и алгоритмы обнаружения антропогенных частиц в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем» использованы при разработке НИР «Методы и алгоритмы обнаружения антропогенных частиц и объектов в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем в околосредном пространстве» (инв. № 350) и внедрены в научно-производственный процесс 4 НИО ЗАО «РТИС ВКО», в части:

1. Вейвлет-фрактально-корреляционные алгоритмы обнаружения антропогенных частиц в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем (подразделы 3.1 - 3.3).

2. Алгоритм определения координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов в околосредном пространстве (подраздел 3.4).

3. Программная реализация вейвлет-фрактально-корреляционных алгоритмов и алгоритма определения координат обнаруженных антропогенных частиц и объектов в околосредном пространстве (подраздел 4.1).

Начальник отдела, к.в.н., доцент

В.А. Павлов

Заместитель начальника отдела, к.т.н.

А.А. Белов

Начальник сектора. к.в.н., профессор

А.Н. Ковальчук