

Оптико-информационный метод обнаружения беспилотных воздушных судов роботизированной оптико-электронной системой

В.А. Смолин¹, И.В. Якименко¹, Д.С. Рассказа¹

¹ Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический проезд, дом 1, Смоленск, 214013, Россия

Аннотация

Рассматривается информативность рабочих спектральных диапазонов оптико-электронных систем обнаружения беспилотных воздушных судов. Проведенные исследования показали, что спектральный диапазон 3 – 5 мкм, в силу отсутствия у беспилотных воздушных судов мощных источников излучения, имеет существенно меньшую мощность излучения по сравнению со спектральным диапазоном 8 – 13 мкм. В качестве альтернативы диапазону 3 – 5 мкм предлагается диапазон 1,2-1,7 мкм. Предлагаемый ближний инфракрасный диапазон может дополнить использование диапазона 8 – 13 мкм в дневных условиях, что наряду с разработкой новых способов обнаружения, основанных на фоновом принципе, повысит эффективность обнаружения беспилотных воздушных судов. На основе фоновых принципов обнаружения разработан контрастный способ. Отличительной особенностью контрастного способа является разбиение кадра на сегменты. Размер сегмента соответствует размеру неоднородностей атмосферы. Рассмотрен контрастный алгоритм обнаружения беспилотных воздушных судов. Проведено вычисление вероятности обнаружения малоразмерных объектов при помощи разработанного способа. Проведено сравнение разработанного контрастного способа с существующими методами. Выявлено преимущество разработанного контрастного способа по сравнению с исследованными. Дальность обнаружения беспилотных воздушных судов увеличилась на 10%.

Ключевые слова

Спектральный диапазон, беспилотное воздушное судно, оптико-электронная система, изображение фона.

Optical-information Method of Detection of Unmanned Aircraft by a Robotic Optical-electronic System

V.A. Smolin¹, I.V. Yakimenko¹, D.S. Rasskaza¹

¹ Smolensk branch of the "NIU "MPEI", Energeticheskiy proezd, house 1, Smolensk, 214013, Russia

Abstract

The informativeness of the operating spectral ranges of optoelectronic detection systems for unmanned aircraft is considered. The conducted studies have shown that the spectral range of 3 – 5 microns, due to the absence of powerful radiation sources in unmanned aircraft, has significantly lower radiation power compared to the spectral range of 8 – 13 microns. As an alternative to the range of 3 – 5 microns, a range of 1.2 - 1.7 microns is proposed. The proposed near-infrared range can complement the use of a range of 8 - 13 microns in daytime conditions, which, along with the development of new detection methods based on the background principle, will increase the detection efficiency of unmanned aircraft. A contrast method has been developed based on the background detection principle. A distinctive feature of the contrast method is the splitting of the

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: smolin.vofka@yandex.ru (В.А. Смолин); jakigor@rambler.ru (И.В. Якименко); rasskazadaria@mail.ru (Д.С. Рассказа)

ORCID: 0000-0003-1312-4689 (В.А. Смолин); 0000-0002-1003-8403 (И.В. Якименко)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

frame into segments. The segment size corresponds to the size of the inhomogeneities of the atmosphere. A contrast algorithm for detecting unmanned aircraft is considered. The probability of detecting small-sized objects was calculated using the developed method. The developed contrast method is compared with existing methods. The advantage of the developed contrast method in comparison with the investigated ones is revealed. The detection range of unmanned aircraft has increased by 10%.

Keywords

Unmanned aerial vehicle, spectral range, optoelectronic system, background image.

1. Введение

В настоящее время беспилотные воздушные суда (БВС) используются для решения широкого спектра задач как организациями и физическими лицами, имеющими лицензии на подобную деятельность и руководствующимися правилами организации воздушного движения, так и субъектами, их не соблюдающими. Вследствие этого, в ряде случаев возникает необходимость в организации противодействия БВС, создающим угрозу безопасности полетов пилотируемой авиации в воздушном пространстве аэропортов и угрозы эксплуатации различных техногенных объектов, первым этапом которого является их обнаружение. Ввиду того, что большинство современных БВС представляют собой малоразмерные объекты, изготовленные преимущественно из композиционных материалов, радиолокационные способы их обнаружения являются неэффективными, так как требуют значительных мощностей зондирующих импульсов, что не является приемлемым в условиях мегаполисов, аэропортов и других техногенных объектов с развитыми телекоммуникационными системами.

Альтернативой радиолокационным способам обнаружения БВС могут стать пассивные способы обнаружения с помощью оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в различных спектральных диапазонах оптической области электромагнитного излучения.

К настоящему времени наиболее широкое использование получили ОЭС с рабочими спектральными диапазонами 3-5 мкм и 8-13 мкм [1-3], так как большинство летательных аппаратов пилотируемой авиации характеризуются наличием мощных источников собственного излучения именно в этих диапазонах.

Исследования индикатрис оптического излучения БВС в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-13 мкм, проведенные с помощью специализированного измерительного комплекса, позволили установить, что мощность излучения БВС в спектральном диапазоне 3-5 мкм существенно меньше мощности излучения в спектральном диапазоне 8-13 мкм (рисунок 1). Это объясняется тем, что в составе БВС используются относительно маломощные двигатели внутреннего сгорания (электродвигатели), интенсивно охлаждающиеся воздушным потоком от движителя (воздушного винта).

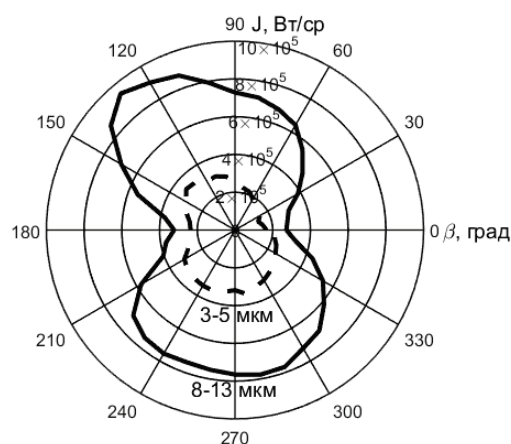


Рисунок 1 – Индикатрисы излучения БВС в спектральных диапазонах 3-5 мкм (пунктирная) и 8-13 мкм (сплошная)

Альтернативой использованию спектрального диапазона 3-5 мкм может стать применение диапазона 1,2-1,7 мкм [4], который может дополнить использование диапазона 8-13 мкм в дневных условиях. Это связано с тем, что днём в диапазоне 8-13 мкм яркость излучения облачных полей при некоторых метеоситуациях может превышать излучение БВС, что значительно снижает вероятность обнаружения.

Предварительная оценка дальности обнаружения БВС в спектральных диапазонах на равномерном фоне (рисунок 2) показала, что диапазон 8-13 мкм более информативен и обладает наибольшим показателем дальности обнаружения (1,5-2,5 км). Дальность обнаружения в диапазонах 1,2-1,7 и 3-5 мкм примерно одинакова и составляет 1-1,5 км. Предполагается, что применение в БВС электродвигателей значительно снизит показатели дальности обнаружения.

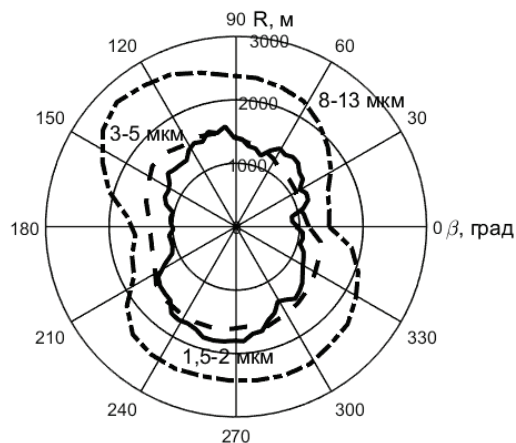


Рисунок 2 – Индикатрисы излучения БВС в спектральных диапазонах 1,2-1,7 мкм (сплошная) 3-5 мкм (пунктирная) и 8 – 13 мкм (штрихпунктирная)

Одним из направлений повышения эффективности ОЭС диапазона 1,2-1,7 мкм является совершенствование алгоритмов обработки изображений фона (ИФ). Для его реализации необходимо провести экспериментальные исследования пространственной структуры излучения облачных полей с целью выявления их свойств. Усовершенствование алгоритмов обработки ИФ предлагается проводить на основе фонового принципа извлечения информации, который является обратным традиционному, целевому принципу. В фоновом принципе полезным сигналом считается не излучение БВС (цель), а излучение атмосферы (фон). Выявленные изменения известных свойств пространственной структуры излучения атмосферы позволяют сделать вывод о возможном присутствии излучения БВС в этой области пространства.

2. Алгоритм обработки изображений, получаемых при помощи пассивных оптико-электронных систем

2.1. Способ обработки изображений фона, позволяющий выделить малоразмерный объект на фоне атмосферы в диапазоне 1,2-1,7 мкм

Одним из способов, применяемых для обработки изображений при поиске малоразмерных объектов, является разбиение изображения на сегменты. Размеры сегментов выбираются из соображения малого изменения критерия внутри сегмента.

Размер области вычисляется таким образом, чтобы выбранный критерий в ней изменялся мало. Наиболее распространенным является представление исходного изображения в областях, каждая из которых удовлетворяет некоторому критерию схожести. По критерию схожести способы сегментации изображений можно разделить на две группы: по критерию однородности и по критерию неоднородности. Критерием однородности для ИФ является пространственный радиус корреляции.

Следовательно, размеры сегментов не должны превышать значения пространственных радиусов корреляции, полученных в ходе анализа ИФ. Исходя из этого, разработан алгоритм обработки кадра ИФ (рисунок 3).

Сущность алгоритма заключается в том, что ИФ разделяется на сегменты, размеры которых определяются по значениям пространственного радиуса корреляции ИФ.

Это дает возможность перейти к обработке сегментов, в пределах которых излучение атмосферного фона стационарно.

Для каждого сегмента вычисляется пороговое значение γ :

$$\gamma = \frac{\max_{n,m} + \text{mean}_{n,m}}{2}, \quad (1)$$

где $\max_{n,m}$ — максимальное значение яркости сегмента кадра, $\text{mean}_{n,m}$ — среднее значение яркости сегмента кадра.

Далее для каждого элемента выбранного сегмента матрицы ИФ вычисляется новое значение энергетической яркости по формуле

$$Q_{n,m} = \left(\frac{B_{n,m}}{\gamma^2} \right) \cdot B_{n,m}, \quad (2)$$

где $B_{n,m}$ — значение яркости элемента кадра.

При таком подходе происходит увеличение энергетической яркости малоразмерного объекта (МО), примером которого является БВС, а значения элементов матрицы, содержащих фон — уменьшаются. После проведения нескольких итераций величины элементов сегмента, не содержащих МО, стремятся к нулю, выделяя те элементы, в которых предположительно может находиться искомый МО.

На основе контрастного способа [5] был разработан одноименный алгоритм (рисунок 3).

Алгоритм обработки кадра контрастным способом включает следующие операции:

1. Выбор типа облачности, на котором происходит обнаружение.
2. Считывание кадра неба из внешнего файла. Добавление шума в считанный кадр, включающего в себя возможные шумы в атмосфере и шум измерительного оборудования.
3. Разбиение кадра ИФ на сегменты, равные угловым размерам неоднородностей, соответствующих типу облачности (для кучевой облачности угловые размеры неоднородностей составляют 3-6°).
4. Расчет порога γ для каждого участка кадра.
5. Вычисление нового значения энергетической яркости для каждого элемента выбранного сегмента матрицы ИФ с учетом весового коэффициента $\left(\frac{B_{n,m}}{\gamma^2} \right)$ по формуле (2).
6. Объединение полученных сегментов в целый кадр.
7. Расчет порога γ для всего кадра, так как при выполнении пунктов 4-5 алгоритма корреляционные связи были нарушены, и вычисление новых значений яркости по формуле (1). После проведения нескольких итераций величины элементов, не содержащих МО, стремятся к нулю, выделяя те элементы, в которых предположительно может находиться искомый МО. Количество итераций зависит от выбора пользователя в зависимости от необходимой вероятности ложных тревог. В работе использовался критерий идеального наблюдателя.

Результаты применения контрастного алгоритма обработки кадра для выделения МО на фоне слоистой (St) облачности, перисто-кучевой (Cc) облачности и кучевой (Cu) облачности 4-6 балла показаны на рисунке 4.

8. Пороговая обработка сегмента ИФ, в результате которой величины элементов обрабатываемого сегмента $Q_{n,m}$ сравниваются с адаптивным пороговым значением γ .

Далее, в соответствии с решающим правилом

$$Q'_{n,m} = \begin{cases} 1, & \text{если } Q_{n,m} \geq \gamma \\ 0, & \text{если } Q_{n,m} < \gamma \end{cases} \quad (3)$$

принимается решение об обнаружении МО в сегменте.

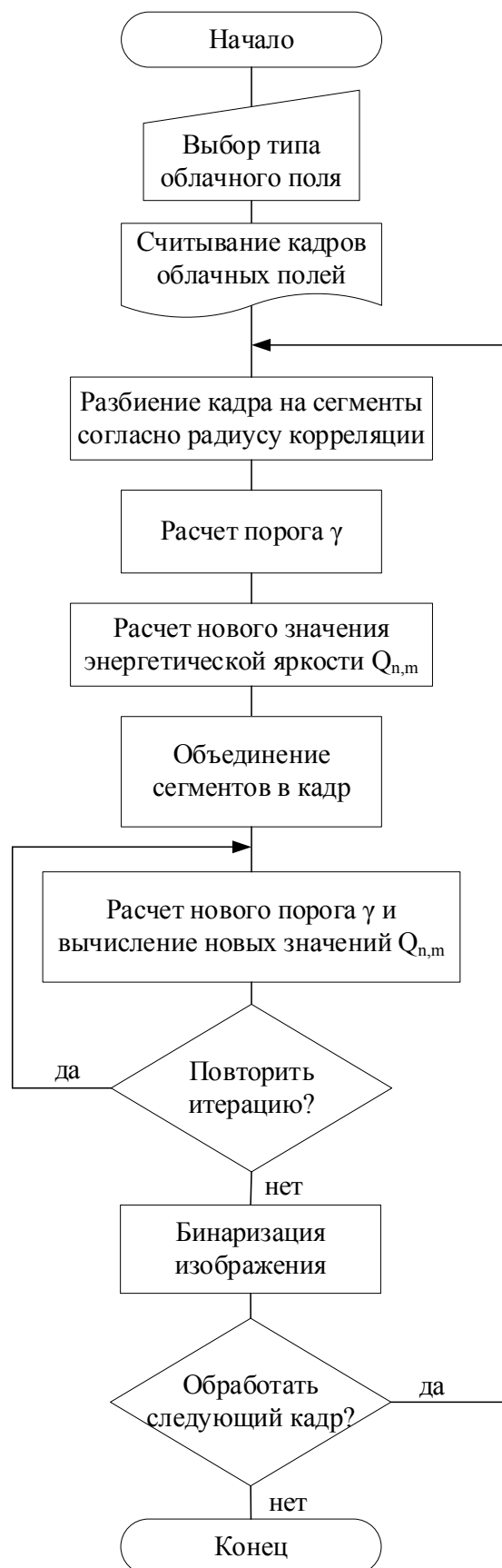


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма обработки кадра контрастным способом

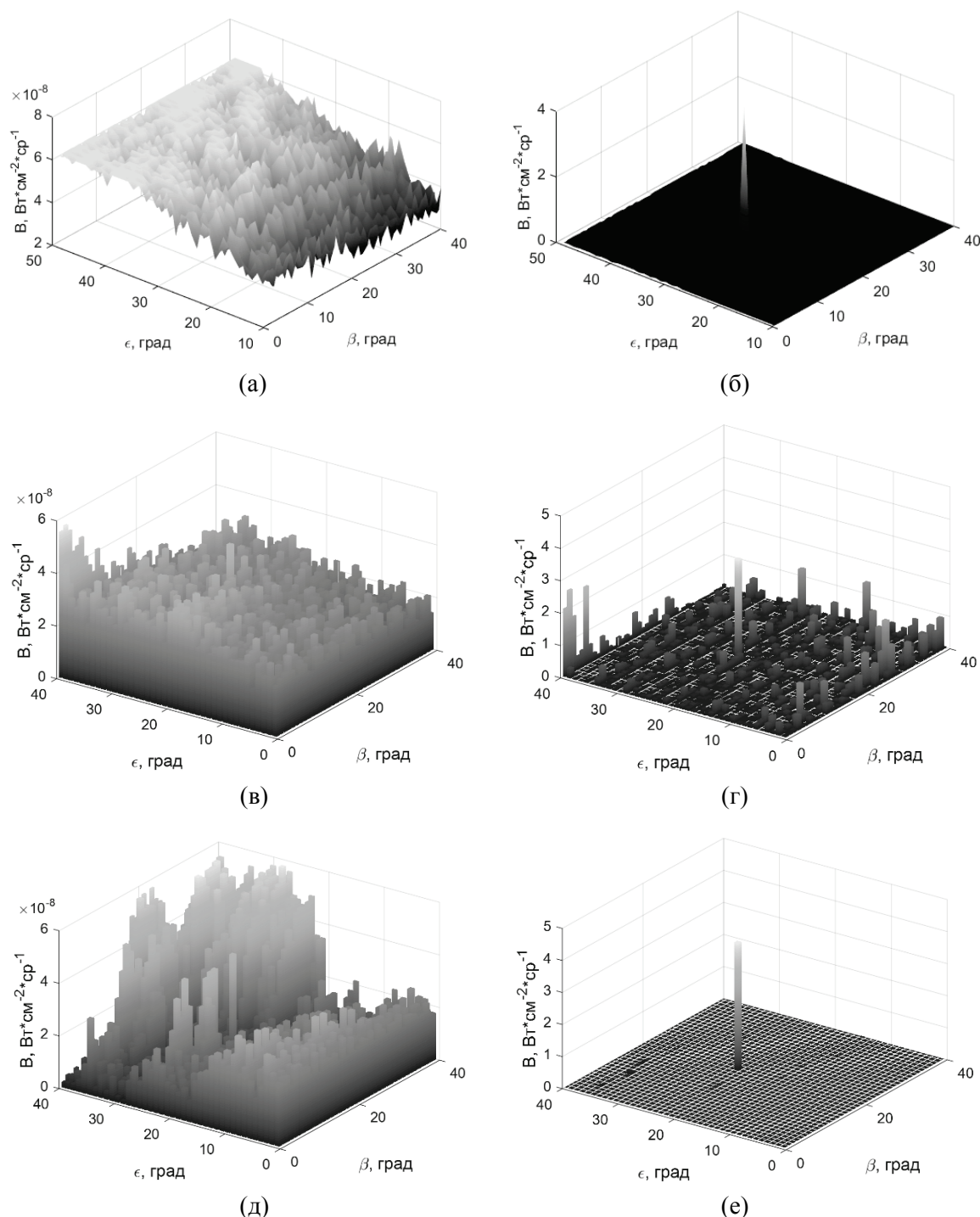


Рисунок 4 – Результаты применения контрастного метода выделения МО на фоне высококучевой (Ас) облачности (а-б), перисто-кучевой (Сс) облачности (в-г) и кучевой (Си) облачности 4-6 балла (д-е)

2.2. Оценка эффективности обнаружения малоразмерных объектов на фоне атмосферы в диапазоне 1,2-1,7 мкм

Для оценки эффективности метода обнаружения, основанного на фоновом принципе, проведем сравнение с пороговым методом [6], метод пространственной фильтрации точечных объектов [7] и методом селекции изображения точечной цели [8]. Наибольшую сложность при обнаружении МО представляет облачность с мелкомасштабной структурой. Поэтому анализ

вероятности обнаружения проводился на фоне ясного неба и кучевой облачности (1-3, 4-6, 7-9 баллов).

В работе исследовалась возможность обнаружения МО в диапазоне от 0,5 до 1,5 км (рисунок 5).

МО помещается на реальные кадры распределения энергетической яркости неба в случайную точку. В зависимости от дальности меняется энергетическая яркость объекта.

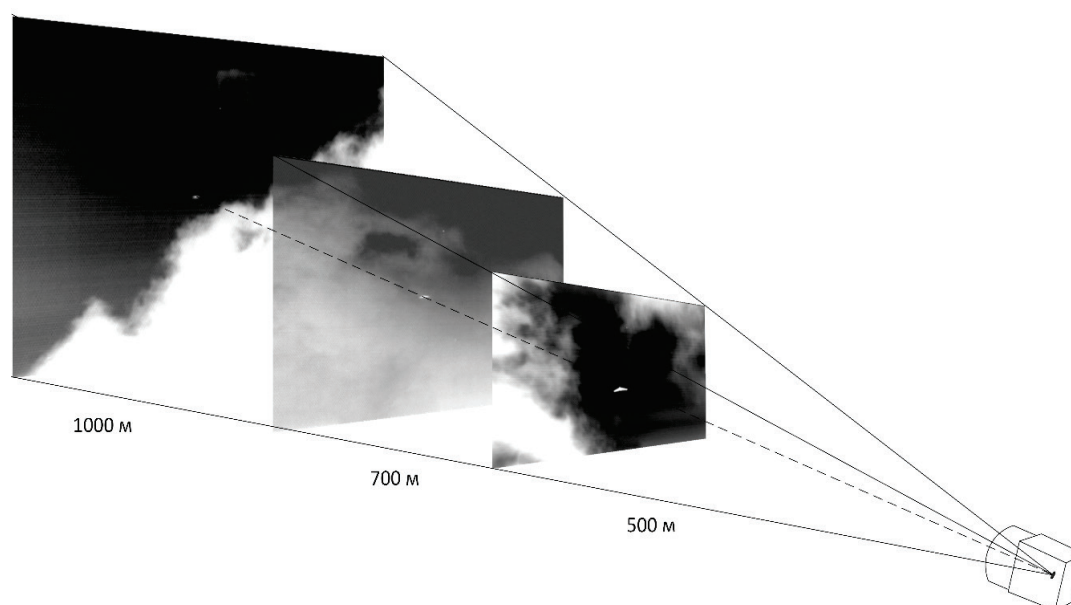


Рисунок 5 – Зависимость угла наблюдения МО от дальности

Алгоритм обнаружения МО на фоне атмосферы (рисунок 6):

1. Ввод исходных метеорологических данных (давление, температура, влажность воздуха, метеорологическая дальность видимости), полученных перед проведением измерений с помощью переносной метеостанции.
2. Считывание матрицы $U_{N,M}$ значений энергетической яркости ИФ размером $N \times M$, где N — значение азимута, а M — значение угла места. Кадр выбирается случайным образом из пачки кадров, полученных в ходе измерений.
3. Считывание таблиц коэффициентов из внешнего файла (спектральных коэффициентов пропускания ИК излучения углекислым газом и водяным паром, зависимость упругости насыщающих паров воды от температуры воздуха, зависимость спектрального коэффициента рассеяния атмосферы при разных метеорологических дальностях видимости).
4. Вычисление вектора T_R , элементами которого являются значения интегрального коэффициента пропускания атмосферы для диапазона 1,2-1,7 мкм для расстояний 0,5-1,5 км.
5. Вычисление матрицы B_R , элементами которой являются значения энергетической яркости излучения МО при разных углах крена и тангажа, находящегося на разном расстоянии в диапазоне 0,5-1,5 км.
6. Расположение МО в случайном месте кадра. Величина энергетической яркости выбирается случайным образом из рассчитанной матрицы B_R .
7. Параллельная обработка полученного кадра при помощи порогового метода, метода пространственной фильтрации точечных объектов, метода селекции изображения точечной цели и контрастного способа.
8. Вывод изображений и сравнение результатов обработки.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма обработки изображения контрастным способом с использованием пакета Scilab проведено имитационное моделирование с применением результатов, полученных в результате проведения исследований атмосферы при помощи измерительно-вычислительного комплекса.

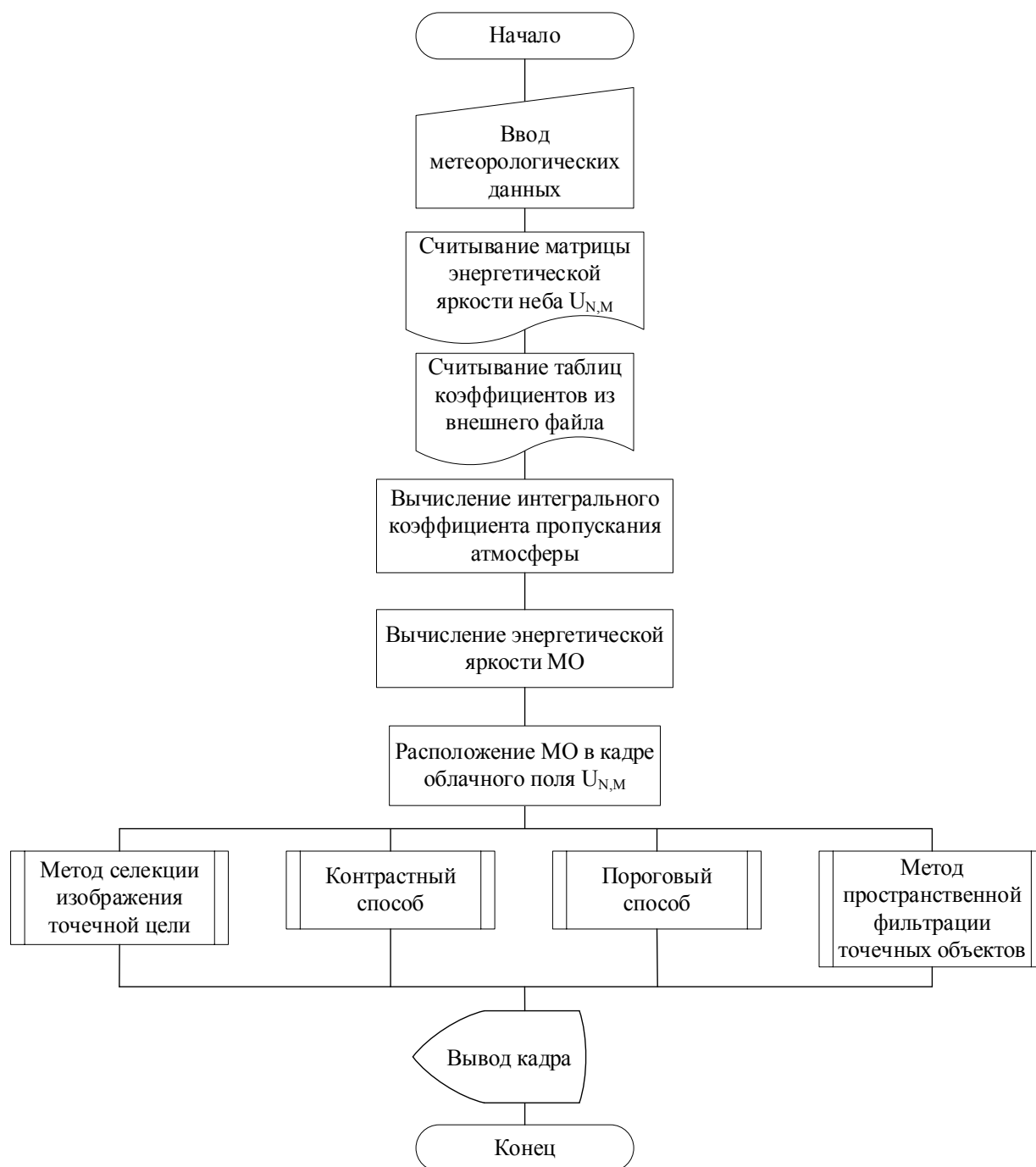


Рисунок 6 — Блок-схема алгоритма работы программы

Модели фона реализованы в виде матрицы $U_{N,M}$, в каждом элементе $u_{n,m}$ которой записаны сигналы, пропорциональные энергетической яркости излучения атмосферы. Модели излучения МО представлены индикатрисой, полученной с помощью измерительно-вычислительного комплекса.

Для проведения математического моделирования процесса обработки ИФ из базы моделей излучения атмосферы отобраны около 200 изображений $U_{N,M}$. В набор ИФ $U_{N,M}$ включены результаты дневных измерений в зимне-весеннее время года. Для каждого кадра проводилась подстановка БВС в случайную позицию 1000 раз. При этом яркость БВС выбиралась случайным образом из таблицы зависимости силы излучения от расстояния (0,5-1,5 км). В результате обработки различными способами были получены изображения, по которым определялась эффективность способа. В качестве примера в работе приведены изображения до (рисунок 7) и

после обработки для следующих условий: ясно (рисунок 8), кучевая облачность 1-3 балла (рисунок 9).

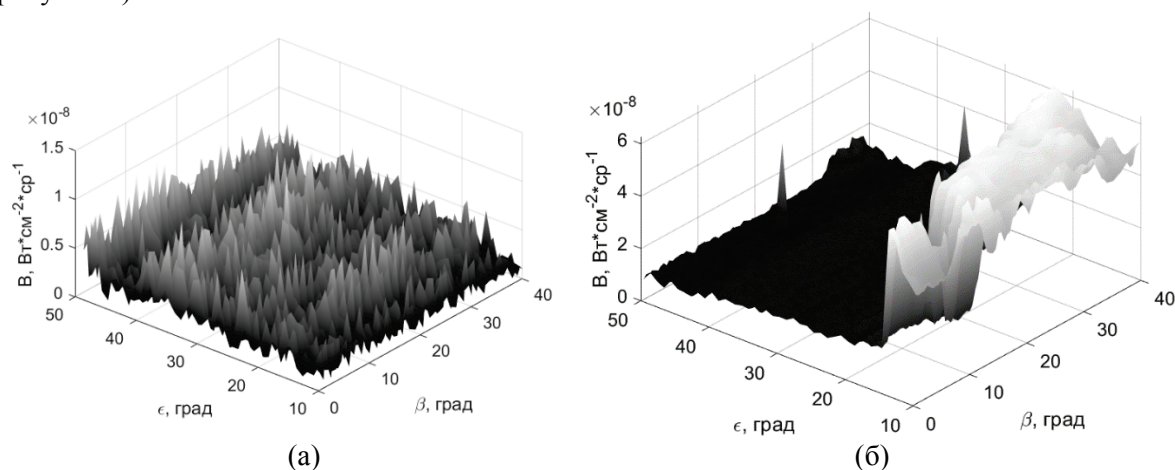


Рисунок 7 — Изображения ясного неба (а) и кучевой облачности 1-3 балла (б) до обработки

Для того, чтобы определить вероятность обнаружения МО при помощи предлагаемого способа, было проведено математическое моделирование процесса обработки ИФ.

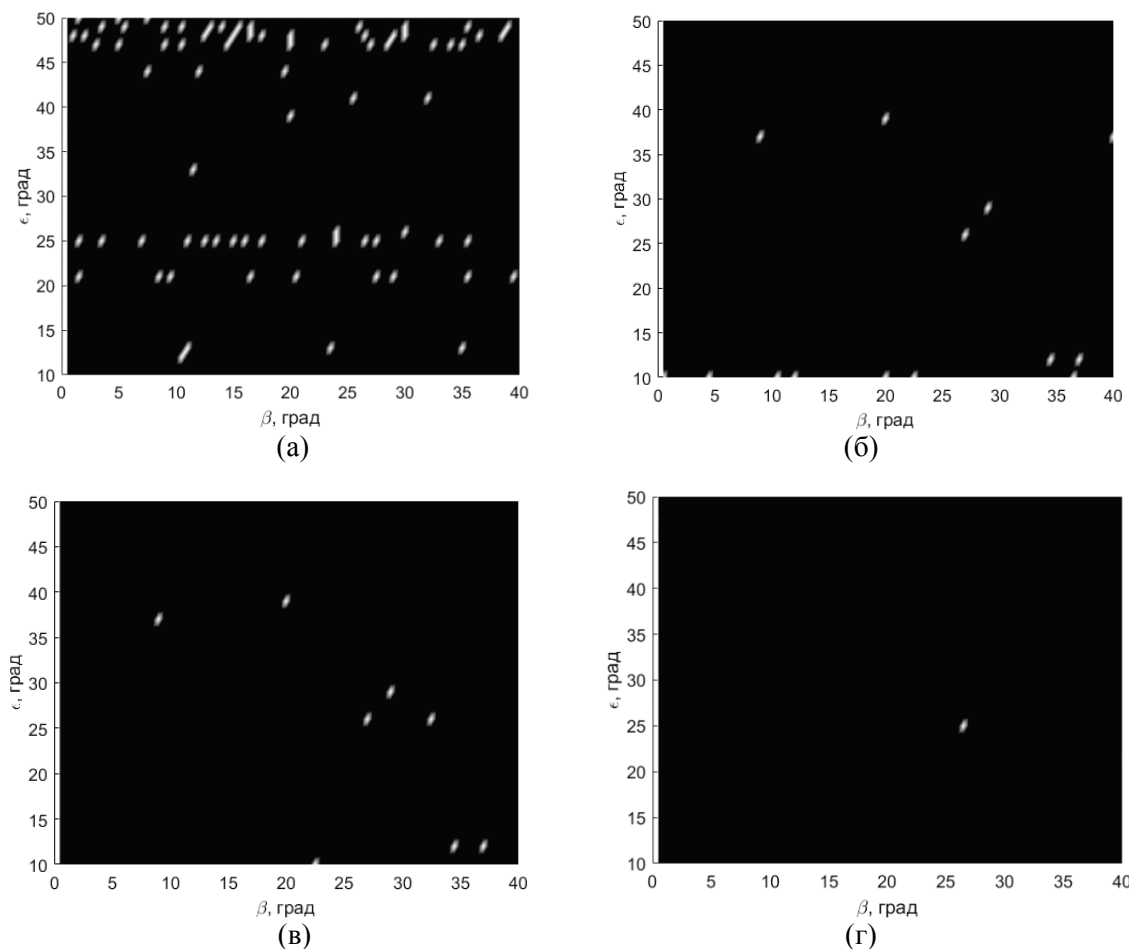


Рисунок 8 — Результат обработки изображения ясного неба пороговым методом (а), методом пространственной фильтрации точечных объектов (б), методом селекции изображения точечной цели (в) и контрастным способом (г)

На выбранных ИФ $U_{N,M}$ формируют сигнал МО $\Delta \bar{B}_{n,m} = \Delta \bar{B}_y(\varepsilon, \beta)$ путем «добавления», т.е. имитацией появления МО в выбранном пикселе $u_{n,m}$ ИФ.

В результате «добавления» энергетическая яркость МО прибавляется к значению яркости атмосферы, находящейся за ним.

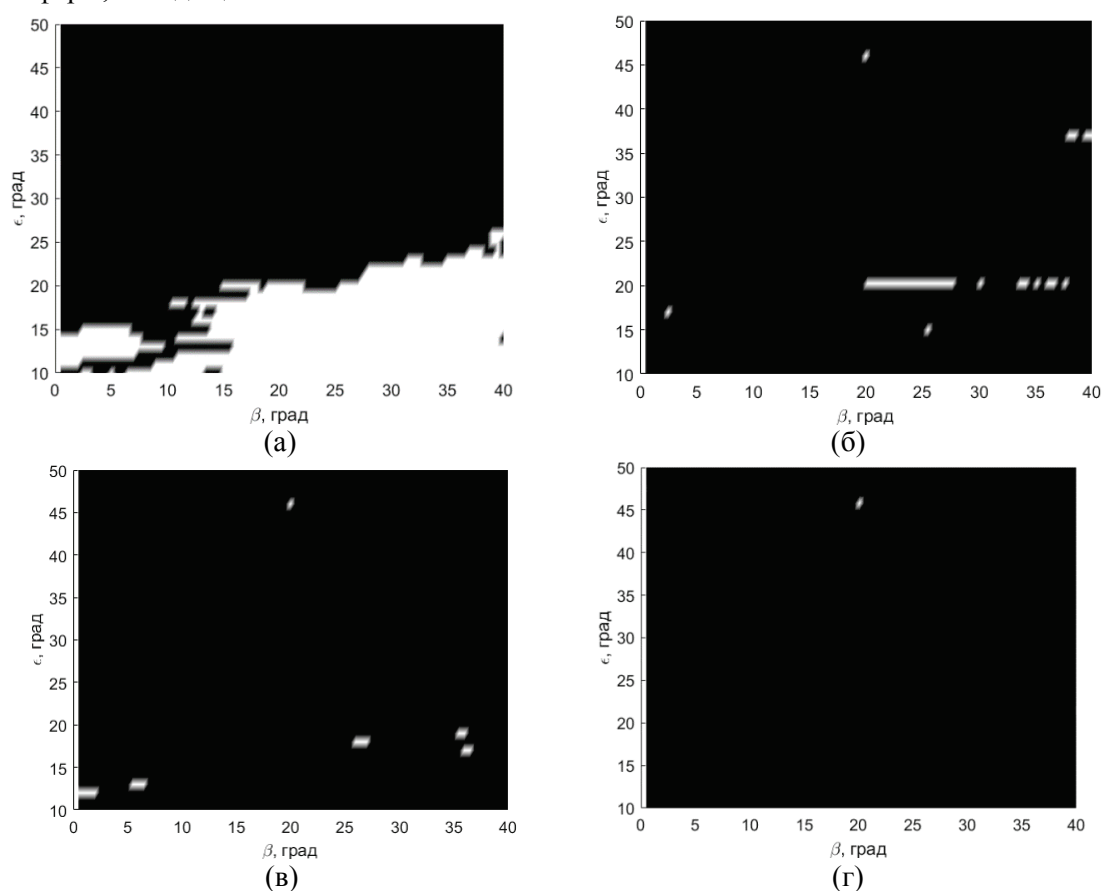


Рисунок 9 — Результат обработки изображения кучевой облачности 1-3 балла пороговым методом (а), методом пространственной фильтрации точечных объектов (б), методом селекции изображения точечной цели (в) и квадратичным способом (г)

Анализ результатов математического моделирования подтвердил работоспособность предлагаемого способа обработки ИФ. На основе полученных бинарных изображений рассчитана вероятность обнаружения МО на фоне атмосферы в зависимости от дальности до наблюдателя (рисунок 10). В работе приведена вероятность обнаружения МО для тангажа 0° (БВС летит в направлении ОЭС).

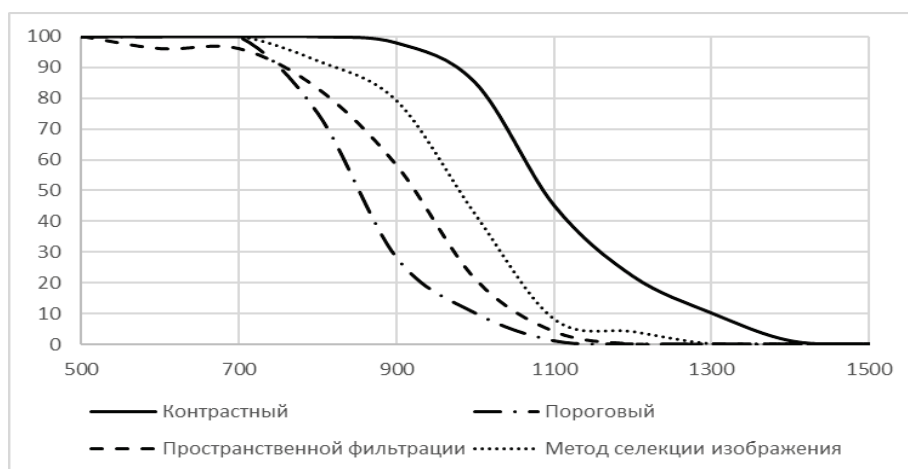


Рисунок 10 — Результаты полунатурного математического моделирования процесса обнаружения беспилотного воздушного судна на фоне атмосферы в диапазоне 1,2-1,7 мкм

Проведенное имитационное математическое моделирование процесса обнаружения МО на фоне атмосферы, направленное на оценку эффективности обнаружения ОЭС, работающих в диапазоне 1,2-1,7 мкм, подтвердило работоспособность и эффективность контрастного алгоритма. Дальность обнаружения МО возросла в среднем на 10% по сравнению с методами, в основе которых целевой принцип обнаружения.

3. Благодарности

Выражаю благодарность АО «НИИ СТТ» за предоставленную модель беспилотного воздушного судна для проведения измерения энергетической яркости.

4. Список источников

- [1] Якименко И.В. Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптико-электронными системами. Монография. — 2-е изд., испр и доп — С-Петербург: Лань, 2014. 176с.
- [2] Алленов А.М., Иванов Н.П. Временная изменчивость пространственной структуры излучения неба в диапазоне 8–13 мкм при кучевой облачности // Оптический журнал. № 3, т. 68, 2001. С. 43–44.
- [3] Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин // М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
- [4] Смолин В.А. Исследование возможности обнаружения беспилотного летательного аппарата на атмосферном фоне в ближнем инфракрасном диапазоне // М.: Радиотехника, 2017. №10 С. 175–183.
- [5] Смолин В.А. Статистические модели пространственной структуры излучения атмосферы в диапазоне 1,5-2 мкм: дис. на соискание ученой степени к-та техн. наук: 05.11.07 / Национальный исследовательский университет «МЭИ». М., 2021. 107 с.
- [6] Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э. Сегментация изображений: методы пороговой обработки // Зарубежная радиоэлектроника, 1987. № 10. С. 6–24.
- [7] Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. Обработка изображений в пассивных обзорно-поисковых оптико-электронных системах // Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т приклад. физики. – Минск : Беларуская навука, 2014. 116 с.
- [8] Алпатов Б.А., Блохин А.Н., Муравьев В.С., Алгоритм обработки изображений для систем автоматического сопровождения воздушных объектов // Цифровая обработка сигналов, 2010. №4.