

# Метод оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой в инфракрасном диапазоне на сложном фоне

Ю.И. Якименко<sup>1</sup>, И.В. Якименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический пр., д. 1, Смоленск, 214013, РФ

## Аннотация

Предложен метод оптико-информационного обеспечения обнаружения в инфракрасном диапазоне с помощью пассивной оптико-электронной системы беспилотного воздушного судна на сложном фоне, образуемом излучением атмосферы в дальнем инфракрасном диапазоне (8 – 13 мкм). Атмосферный фон, на котором происходит обнаружение беспилотного воздушного судна, формируется излучением облачной атмосферы при наблюдении с земной поверхности. Особый интерес вызывает сложный фон, созданный кучевыми облаками различной балльности или другими классами облаков, имеющими разрывы. Принимаются следующие допущения: короткофокусная оптико-электронная система имеет широкое поле зрения, видеоинформация об артефакте и фоновой характеристике представлена в бинарном виде. Обработываемый видеопоток - это двумерный массив, элементы которого содержат информацию об уровне энергетической яркости излучения в выбранном направлении. Акценты направлены на необходимость мониторинга изменений структуры излучающего фона и отсутствие необходимости обрабатывать каждый кадр видеопотока.

## Ключевые слова

Инфракрасный диапазон, поле зрения, пассивная оптико-электронная система, роботизированная система, атмосферный фон, фоно-целое изображение, артефакт, беспилотное воздушное судно.

# Method of Optical Information Support for Detecting Artifacts by f Robotic System in the Infa-red Range on a Complex Background

Yu.I. Yakimenko<sup>1</sup>, I.V. Yakymenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "NRU MPEI" in Smolensk, Energeticheskoy pr., 1, Smolensk, 214013, Russian Federation

## Abstract

A method is proposed for opto-information support for detection in the infrared range using a passive optoelectronic system of an unmanned aircraft against a complex background formed by atmospheric radiation in the far infrared range (8–13 μm). The atmospheric background against which an unmanned aerial vehicle is detected is formed by the radiation of the cloudy atmosphere when observed from the earth's surface. Of particular interest is the complex background created by cumulus clouds of various magnitudes or other classes of clouds that have breaks. The following assumptions are made: a short-focus optical-electronic system has a wide field of view, video information about the artifact and the background characteristic is presented in binary form. The processed video stream is a two-dimensional array, the elements of which contain information about the level of radiance of the radiation in the selected direction. The emphasis is on the need to monitor

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: jakigor67@yandex.ru (Ю.И. Якименко); jakigor@rambler.ru (И.В. Якименко)

ORCID: 0009-0001-2631-5997 (Ю.И. Якименко); 0000-0002-1003-8403 (И.В. Якименко)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

changes in the structure of the emitting background and the absence of the need to process each frame of the video stream.

### Keywords

Infrared range, field of view, passive optoelectronic system, robotic system, atmospheric background, phono-target image, artifact, unmanned aerial vehicle.

## 1. Введение

Целью исследования является разработка метода оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой на сложном фоне при следующих допущениях:

- артефактом, подлежащим обнаружению, является беспилотное воздушное судно (БВС);
- информационным каналом роботизированной системы является пассивная оптико-электронная система (ПОЭС) с широким полем зрения, работающая в дальнем инфракрасном диапазоне (8 – 13 мкм);
- видеoinформация о находящихся в поле зрения ПОЭС фоне и артефактах после окончательной обработки представляется в бинарном виде.

Атмосферный фон (АФ), на котором происходит обнаружение БВС, формируется излучением облачной атмосферы при наблюдении с земной поверхности. Особый интерес вызывает сложный фон, созданный кучевыми облаками различной балльности или другими классами облаков, имеющими разрывы. ПОЭС в процессе приема и обработки излучения атмосферного фона и БВС формирует на оконечном устройстве видеопоток, каждый кадр которого представляет собой двумерный массив  $U_{N,M}$ , элементы которого содержат информацию об уровне энергетической яркости излучения в выбранном направлении.

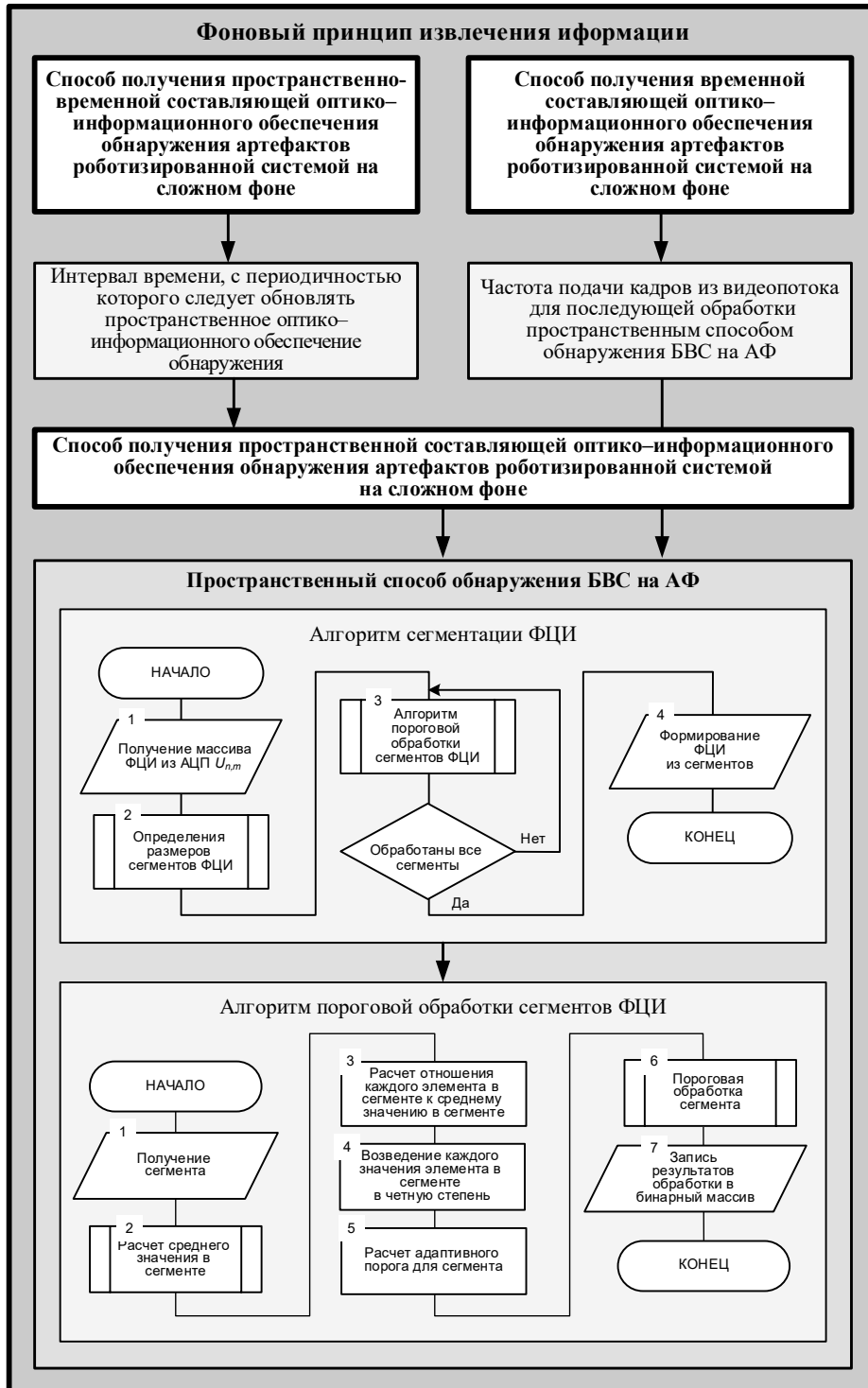
## 2. Основы метода оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов

Метод оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов на сложном фоне роботизированной системой основан на фоновом принципе извлечения информации [1–5]. Его суть заключается в том, что при отсутствии априорной информации о наличии БВС в поле зрения ПОЭС необходимо отслеживать локальные изменения одного или нескольких параметров пространственно-временной структуры излучения АФ, отличные от знаний о природных закономерностях. Изменения этих параметров происходят вследствие искажения природных закономерностей пространственной структуры излучения АФ излучением БВС (рисунок 1).

### 2.1. Способ получения пространственной составляющей оптико-информационного обеспечения

Экспериментальные исследования пространственной структуры излучения АФ заключаются в оценке зависимости коэффициента пространственной корреляции  $R(n)$  различных форм облачности в горизонтальном направлениях между строками и в вертикальном направлениях между столбцами массивов элементов фоно-целевого изображения (ФЦИ).

Характерным отличием пространственной структуры излучения различных классов облачности являются размеры неоднородностей, которые определялись по значению коэффициентов пространственной корреляции между строками и столбцами массивов ФЦИ, принимающими значение выше уровня 0,5. Отсюда по уровню 0,5 коэффициента пространственной корреляции  $R(n)$  зная шаг углового сдвига между строками можно оценить угловые размеры по углу места ( $\varepsilon$ ), а между столбцами угловые размеры по азимуту ( $\beta$ ) неоднородностей АФ [6–8].

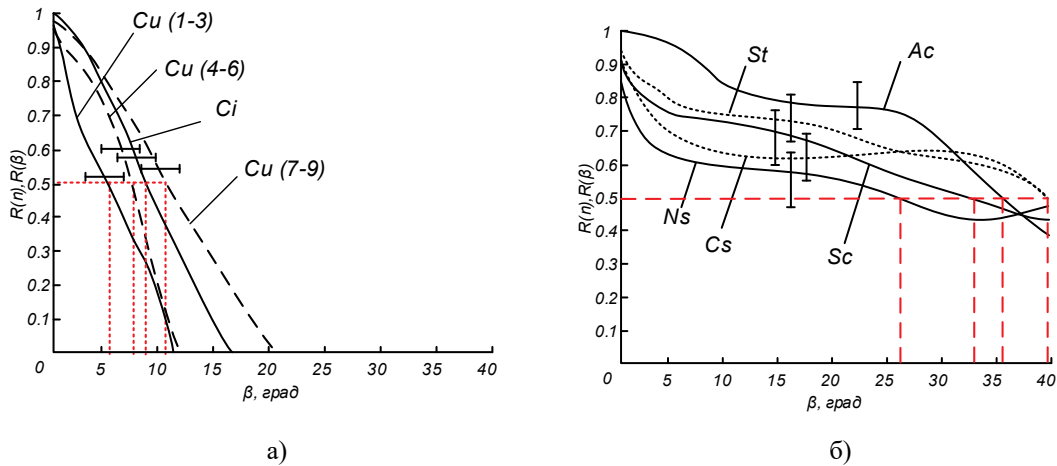


**Рисунок 1** – Метод оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой на сложном фоне

Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований позволили оценить в двух направлениях угловые размеры неоднородностей АФ, что стало основой пространственной составляющей оптико-информационного обеспечения обнаружения изображения БВС на АФ.

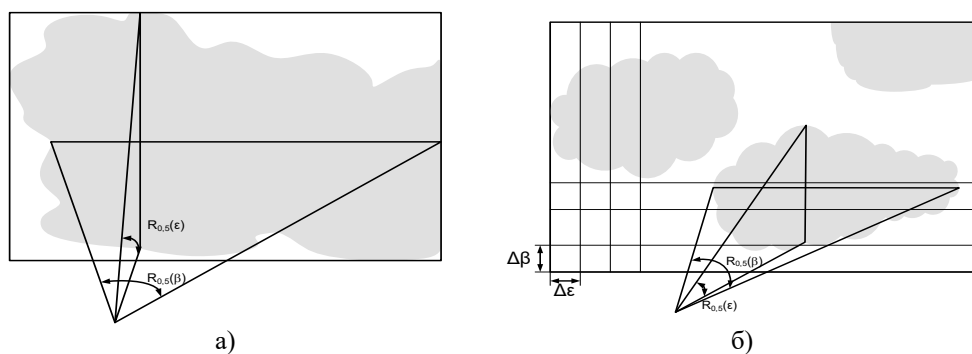
Анализ результатов исследований излучения неоднородностей АФ (рис. 4) позволил разделить их на две группы в зависимости от их углового размера:

- в первую группу входят те классы облачности, которые содержат мелкомасштабные неоднородности величиной  $5 - 15^\circ$  в вертикальном и горизонтальном направлениях: кучевая (Cu), высококучевая (Ac), перисто-кучевая (Cc) и перистая (Ci) (рисунок 2, а).
- вторая группа включает классы облачности, которые содержат крупномасштабные неоднородности с угловыми размерами, превышающими полученные ФЦИ, составляют  $25 - 40^\circ$ : слоистая (St), слоисто-кучевая (Sc), перисто-слоистая (Cs) формы облачности и ясное небо (рисунок 2, б) [1–5].



**Рисунок 2** – Зависимости коэффициента пространственной корреляции  $R(n)$  АФ различных форм облачности в горизонтальных направлениях ( $\beta$ ) между строками ФЦИ

На основе полученных знаний о пространственных спектрах неоднородностей АФ и точечных изображений БВС был разработан пространственный способ обнаружения БВС на АФ (рисунок 1). Сущность способа заключается в предварительной сегментации ФЦИ перед применением алгоритма пороговой обработки, что отличает его от известных способов (рисунок 1). Определение размеров сегментов проводится в соответствии со способом получения пространственной составляющей оптико-информационного обеспечения обнаружения (рисунок 3 а, б). Это позволяет считать, что в пределах углов, ограниченных размерами выявленных неоднородностей, случайный процесс излучения АФ можно считать стационарным, поскольку его пространственный спектр не содержит высокочастотных составляющих. В противоположность этому случайный процесс излучения БВС пространственный спектр всегда содержит высокочастотные составляющие, что позволяет выработать решающее правило для алгоритма пороговой обработки сегментов ФЦИ.



**Рисунок 3** – Пространственная структура излучения АФ: а) с крупномасштабными неоднородностями, б) с мелкомасштабными неоднородностями

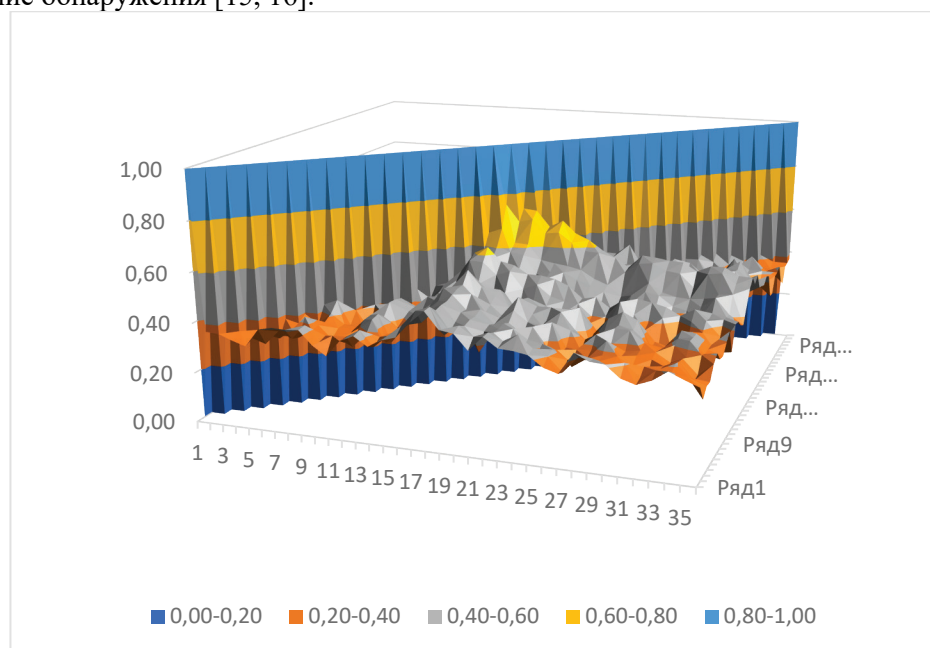
Таким образом, предложенный пространственный способ обнаружения БВС на АФ позволяет путем последовательного применения алгоритма сегментации и алгоритма пороговой

обработки сегментов ФЦИ получить информацию о наличии артефактов в поле зрения ПОЭС представленную в бинарном виде с возможностью определения координат БВС [6–8].

## 2.2. Способ получения пространственно-временного составляющей оптико-информационного обеспечения

Процесс излучения АФ связан с термодинамическими и турбулентными процессами, происходящими в атмосфере, и являются случайным нестационарным как по пространству, так и по времени. Известно, что все случайные процессы при длительном рассмотрении по своей природе всегда нестационарны, но для каждого из них существует ограниченный интервал времени, когда случайный процесс можно считать стационарным. Для того, чтобы пространственное оптико-информационное обеспечение в рамках метода обнаружения содержало стационарные характеристики случайного процесса излучения АФ, необходимо их периодически уточнять.

Такую периодичность можно оценить, используя способ получения пространственно-временной составляющей оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов на сложном фоне (рисунок 1). Основой такого способа является расчет коэффициента взаимной корреляции между поступающими через равные промежутки времени кадрами видеопотока. Интервал времени, соответствующего уровню 0,5 коэффициента взаимной корреляции кадрами видеопотока (рисунок 4), позволяет оценить время стационарности – «время жизни» характеристик пространственной структуры АФ, т.е. интервал времени (радиус корреляции), с периодичностью которого следует обновлять пространственное оптико-информационное обеспечение обнаружения [15, 16].



**Рисунок 4** – Одни из результатов оценки коэффициента взаимной корреляции  $R(t)$  между кадрами видеопотока, взятыми через 1 мин., при наблюдении кучевой облачности ( $Cu$ ) с переменной балльностью

Анализ результатов показал, что радиус корреляции  $R(\tau) = 0,5$  при наблюдении кучевой облачности ( $Cu$ ) изменяется в интервале от 15–20 с до 25–35 мин. На рисунке 3 представлены результаты оценки радиус корреляции  $R(\tau) = 0,5$ , при взятии кадров из видеопотока через 1 мин., при наблюдении кучевой облачности ( $Cu$ ). Фиксация видеопотока проводилась в течении 35 мин при этом балльность кучевой облачности ( $Cu$ ) изменялась от 1 – 3 баллов в начале наблюдения до 7 – 9 баллов на 15 – 23 мин. и последующим уменьшению дальности до 4 – 6 баллов до конца записи. Аналогичные изменения радиуса корреляции фиксировались при анализе еще 150 видеопотоков с изменением балльности выбранного класса облаков [15, 16].

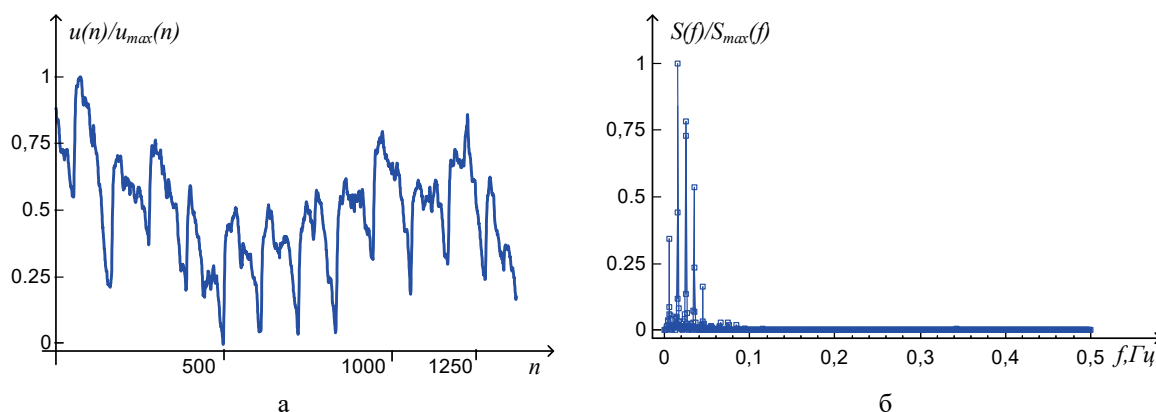
Таким образом, результаты эксперимента по оценки коэффициента взаимной корреляции  $R(t)$  между кадрами видеопотока с изменением балльности кучевой облачности ( $Cu$ ) позволили выявить закономерность – чем выше балльность, тем больше радиус корреляции  $R(\tau) = 0,5$  и наоборот – чем ниже балльность, тем он меньше. Исходя из этого, предложенный способ позволяет оценить время стационарности – «время жизни» характеристик пространственной структуры АФ, т.е. интервал времени (радиус корреляции), с периодичностью которого следует обновлять пространственное оптико-информационное обеспечение обнаружения (рисунок 1).

### 2.3. Способ получения временной составляющей оптико-информационного обеспечения

Кроме рассмотренного выше актуальным остается вопрос о целесообразности обработки всех кадров видеопотока, формируемым ПОЭС в процессе обработки алгоритмами пространственного способа обнаружения БВС на АФ (рисунок 5). Была выдвинута гипотеза о том, что частота основной гармоники спектральной плотности мощности (СПМ) флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ будет ниже кадровой частоты ПОЭС [9–14]. Следовательно, существует возможность уменьшить количество кадров из видеопотока, подвергающихся обработке алгоритмами в рамках пространственного способа обнаружения БВС на АФ.

Для нахождения оптимальной частоты обработки кадров был разработан способ получения временной составляющей оптико-информационного обеспечения. Оценка временной изменчивости проводилась путем оценки частоты основной гармоники СПМ флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ, образованных различными классами облачности и согласование с ней частоту подачи кадров для обработки из видеопотока.

Для получения оценок СПМ были проведены измерения флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ в фиксированных направлениях по углу места ( $\varepsilon$ ) в пригоризонтной области с частотой дискретизации, в тысячу раз выше кадровой развертки. При этом значение азимута ( $\beta$ ) оставалось постоянным в течение нескольких минут. В каждом исследованном направлении были получены последовательности из нескольких тысяч значений ( $N$ ) флуктуаций яркости излучения ( $u(n)$ ) неоднородностей АФ (рисунок 5, а) для различных классов и баллов облачности [1–5].



**Рисунок 5** – Значения флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ при кучевой облачности ( $Cu$ ) 6 баллов в фиксированном по направлению угле места ( $\varepsilon$ ) наблюдения (а); спектральная плотность мощности, полученная с применением периодограммного метода (б)

Полученные массивы были подвергнуты статистической обработке с применением периодограммного метода оценки СПМ. Благодаря эффективности алгоритма БПФ периодограммный метод оценки СПМ получил широкое распространение:

$$S(f) = \frac{1}{NT} \left[ T \sum_{n=0}^{N-1} u(n) e^{-j2\pi f n T} \right]^2,$$

где  $u(n)$  – флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ;  
 $T$  – период дискретизации.

Периодограмма СПМ является случайной величиной, следовательно нуждается в статистическом усреднении. Для сглаживания периодограммы необходимо применять усреднение по всему ансамблю  $N$ . За период наблюдения процесс излучения неоднородностей АФ обладает свойствами эргодичности и стационарности.

Исходя из этого, СПМ излучения неоднородностей АФ усреднялись по множеству периодограмм, получаемых по неперекрывающимся сегментам исходной последовательности  $u(n)$  по вдоль одной реализации методом Бартлетта.

Результатами статистических исследований стал интервал 0,08–0,25 Гц оценки области основных частоты гармоник СПМ флуктуаций яркости излучения неоднородностей АФ, образованных облачностью различных классов и баллов. Исходя из полученных результатов, появилась возможности выбора оптимальной частоты подачи кадров из видеопотока для последующей обработки пространственным способом обнаружения БВС на АФ на частотах значительно ниже (до 1 Гц), чем кадровая частота (50 Гц) видеопотока (рисунок 4, б).

### 3. Выводы

Таким образом, разработанный метод оптико-информационного обеспечения обнаружения артефактов роботизированной системой на сложном фоне основанный на фоновом принципе извлечения информации состоит из трех способов получения необходимых составляющих оптико-информационного обеспечения: временного; пространственно-временного; пространственного.

Способ получения временной составляющей оптико-информационного обеспечения позволяет оптимизировать выбор частоты подачи кадров из видеопотока для последующей обработки пространственным способом обнаружения БВС на АФ. Способ получения пространственно-временной составляющей оптико-информационного обеспечения позволяет оптимизировать интервал времени, с периодичностью которого следует обновлять выбор размера сегмента. Это составляет основу способа получения пространственной составляющей оптико-информационного обеспечения, необходимые для реализации пространственного способа обнаружения БВС на АФ, состоящего из алгоритма сегментации ФЦИ и алгоритма пороговой обработкой.

Применение метода оптико-информационного обеспечения обнаружения позволит представить роботизированной системе информацию о наличие артефактов в поле зрения ПОЭС в виде бинарного ФЦИ, что в дальнейшем обеспечит возможностью определения координат БВС в пространстве.

### 4. Список источников

- [1] Якименко, И. В. Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптико-электронными системами: монография / И. В. Якименко. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 176 с.
- [2] Результаты экспериментальных исследований пространственной структуры излучения атмосферы в диапазоне 1,5 – 2 мкм/ И.В. Якименко, А.М. Мищенко, С.С. Рачковский, В.А. Смолин // М.: Светотехника. - 2018. № 1. - С. 40-44.
- [3] Results of spatial structure of atmosphere radiation in a spectral range (1.5-2)  $\mu\text{m}$  research / I.V. Yakimenko, A.M. Mishchenko, S.S. Rachkovsky, V.A. Smolin // Light & Engineering, 2018. Volume 26, number 3, pp. 7-13.
- [4] Statistical models of the radiance spatial structure of clouds of different types in the 1.5–2  $\mu\text{m}$  range/ I.V. Yakimenko, Yu.I. Yakimenko, V.A. Smolin, D.S. Rasskaza // Proceedings of



- International Symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics» (ISARD-2019). Saint-Petersburg State University, 2019. pp. 220-221.
- [5] Contrast method for detecting unmanned aircraft in the range of 1.5 – 2 microns / I.V. Yakimenko, D.S. Naroda, V.A. Smolin // Proceedings of International Symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics» (ISARD-2021). Saint-Petersburg State University, 2021. pp. 46-50.
- [6] Optical Information Support for Artifact Detection robotic system on a complex background/ I.V. Yakimenko, Yu.I. Yakimenko, V.I. Bobkov, V.A. Smolin, I.V. // Proceedings of International Symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics» (ISARD-2023). Saint-Petersburg State University, 2023. pp. 80-82.
- [7] Оптико-информационный метод обнаружения беспилотных воздушных судов роботизированной оптико-электронной системой/ В.А. Смолин, И.В. Якименко, Д.С. Рассказа // 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, с. 548-558.
- [8] Смолин В.А. Исследование возможности обнаружения беспилотного летательного аппарата на атмосферном фоне в ближнем инфракрасном диапазоне // М.: Радиотехника, 2017. №10 С. 175-183.
- [9] Алпатов Б.А., Блохин А.Н., Муравьев В.С., Алгоритм обработки изображений для систем автоматического сопровождения воздушных объектов // Цифровая обработка сигналов, 2010. №4. С. 12–17.
- [10] Агеев А.М., Бондарев В.Г., Проценко В.В., Обоснование выбора источников излучения для системы технического зрения в задаче автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, №2. С. 239–245.
- [11] Шубин Н.Ю., Муравьев В.С., Муравьев С.И., Нейросетевой алгоритм обнаружения малоразмерных объектов на облачных фонах //
- [12] Шарак Д.С., Хижняк А.В., Мамченко А.С., К вопросу об обосновании применения комплексирования изображений для систем автоматического сопровождения в условиях сложного фона // Журнал радиоэлектроники, № 5, 2019. С. 1– 12.
- [13] Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И., Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
- [14] Алпатов Б.А., Стротов В.В., Алгоритм оценки параметров геометрических преобразований изображений при мультиспектральном наблюдении // Цифровая обработка сигналов, 2010. №4. С. 1–6.
- [15] Якименко Ю.И., Бобков В.И., Якименко И.В., Метод обнаружения артефактов на сложном фоне оптико-электронной системой // Фотоника, 2023. №4.
- [16] Алленов А.М., Иванова Н.П. Временная изменчивость пространственной структуры излучения неба в диапазоне 8–13 мкм при кучевой облачности // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 3. С. 43–44.