

УДК 007.52:004.896:004:94

# АЛГОРИТМЫ СРАВНЕНИЯ ИНВАРИАНТОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ МЕСТНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ БЛА

**С.В. Кулешов***СПб ФИЦ РАН*Россия, 15267, Санкт-Петербург, 14-линия., 39  
E-mail: kuleshov@iias.spb.su**А.А. Зайцева***СПб ФИЦ РАН*Россия, 15267, Санкт-Петербург, 14-линия., 39  
E-mail: cher@iias.spb.su**А.Ю. Аксенов***СПб ФИЦ РАН*Россия, 15267, Санкт-Петербург, 14-линия., 39  
E-mail: a\_aksenov@iias.spb.su

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, визуальная навигация, инвариантное представление, алгоритмы сравнения, обработка изображений.

**Аннотация:** В докладе предлагается решение задачи визуальной навигации (то есть локализации места положения беспилотного летательного аппарата (БЛА) с применением только средств технического зрения) в условиях нестабильной работы средств глобального позиционирования. Предлагаются алгоритмы сравнения инвариантов представления окружающей среды, хранимых в памяти БЛА, с представлением, формируемым с использованием бортовых камер.

## 1. Введение

В задачах автономной визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов без использования систем глобального и радио- позиционирования, как правило, используются разновидности специально сформированных структур данных, основанных на визуальном представлении окружающей среды, инвариантном к условиям освещения, погодным условиям и времени года [1].

В ряде работ для такого инвариантного представления используется кластеризация изображений по основным классам объектов, находящихся на земной поверхности и доступных к визуальному наблюдению в оптическом диапазоне (строения, дороги, водные поверхности, лесные поверхности, песчаные поверхности, каменистые поверхности и др.) [2-4]. Пример такого инвариантного представления приведен на рис. 1.

Актуальной проблемой при этом является разработка алгоритмов быстрого получения инвариантного представления окружающей среды, видимой с беспилотного летательного аппарата, и быстрого робастного сравнения с аналогичным инвариантным представлением карты местности в процессе движения с использованием только

бортовой аппаратуры, ограниченной, по определению, быстродействием и объемом доступной памяти.



Рис. 1. Пример карты для 2 классов объектов (строения и дороги).

В данной работе предлагается подход к сравнению инвариантных представлений окружающей среды на основе поиска признаков в фазовом пространстве, построенном на основе локализации объектов, ориентированных по некоторому направлению  $d_i$  по отношению к центру изображения камеры наблюдения БЛА. Иллюстрация процесса преобразования изображения окружающей местности в фазовое пространство приведена на рис. 2.

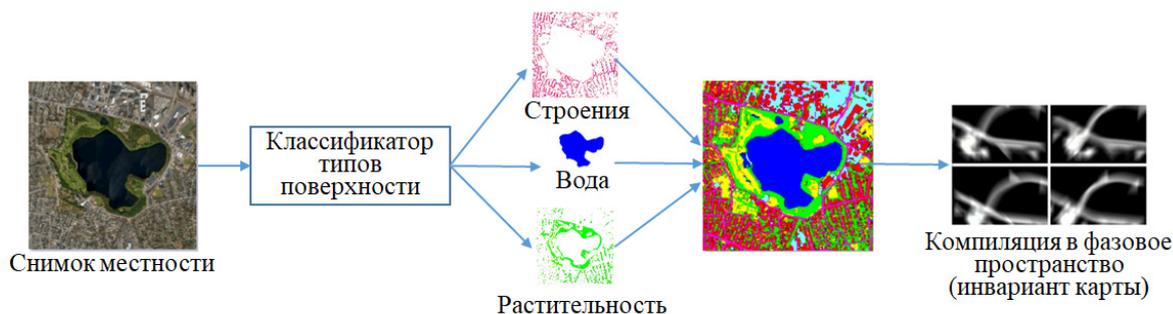


Рис.2. Иллюстрация процесса преобразования изображения окружающей местности.

Для подготовки структуры данных (инвариантного представления) для навигации в алгоритме используются бинаризованные изображения областей, содержащие объекты определенного класса (рис. 3). Затем производится расчет количества объектов, попадающий в сектор, соответствующий направлению  $d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ , где  $n$  – количество плоскостей фазового пространства, содержащих инвариантное представление карты.

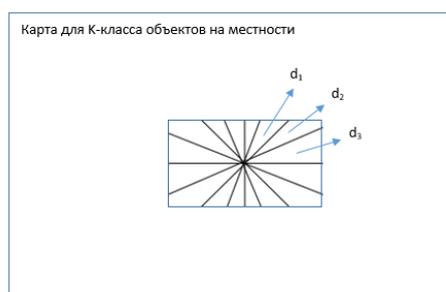


Рис.3. Иллюстрация выбора направления для построения промежуточного представления карты классов.

Результаты сохраняются в виде многомерного фазового пространства, примеры сечений которого для карты, приведенной на рис. 1, приведены на рис. 3. Технически структура данных сохраняется в виде базы данных ключ-значений для быстрого поиска местоположения в процессе работы [5].

При движении БЛА производится сравнение параметров для изображения, полученного с бортовой камеры БЛА, вычисленных аналогично алгоритму, приведенному выше, но не для каждой точки карты, а для центральной точки изображения с камеры. Затем производится поиск бинарных признаков в фазовом пространстве в базе данных с получением на выходе множества координат, соответствующих возможным точкам нахождения БЛА. Комплексирование полученных множеств с ранжированием результатов позволяет получить матрицу оценки возможного положения БЛА на карте. Мощность множества возможных координат определяется точностью работы алгоритма и зависит от условий съемки, соответствия сравниваемых инвариантных представлений (например, времени, прошедшего между получением снимков), присутствия в поле зрения камеры идентифицируемых объектов (строений и дорог). Общая схема работы системы визуальной навигации приведена на рис. 4.

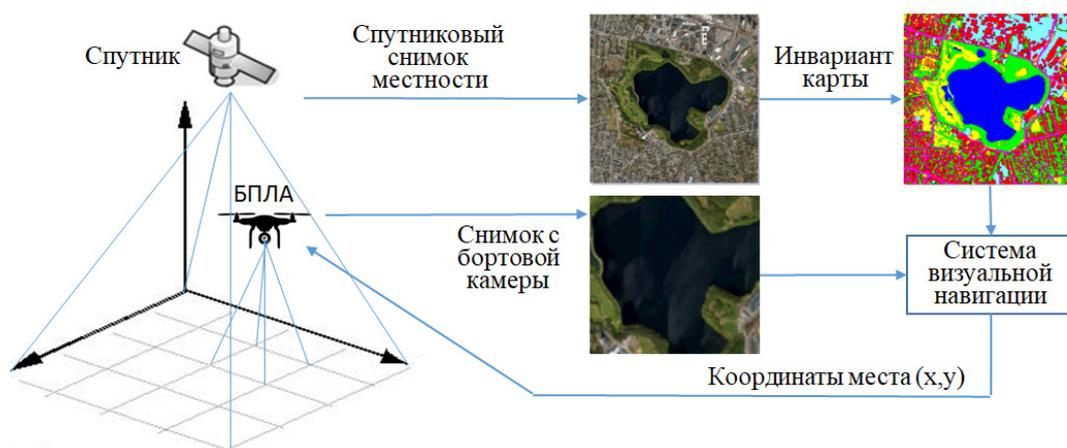


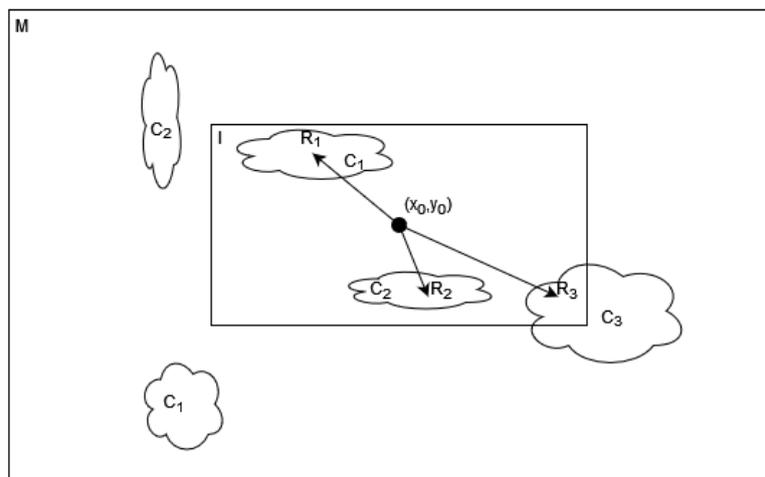
Рис.4. Общая схема работы системы визуальной навигации.

## 2. Алгоритм сравнения инвариантов карты, основанный на векторно-классовом представлении

Пусть на карте  $M$  имеется множество площадных объектов (имеющих сравнительно большую площадь по сравнению с другими объектами на изображении), относящихся к возможным классам  $C_i$ .

Для каждого пиксела  $(x_0, y_0)$  карты  $M$  предварительно рассчитываются характеристики области  $I$  с центром в точке  $(x_0, y_0)$ , соответствующей по размеру кадру с бортовой камеры. Характеристиками области  $I$  будем считать множество радиус-векторов, направленных из точки  $(x_0, y_0)$  в точки, соответствующие центрам масс объектов, попавших в область  $I$ . В случае, когда объект класса  $C_i$  попадает в область  $I$  частично, он ограничивается теми пикселями, которые полностью находятся внутри области  $I$  (на рисунке 5 радиус-вектор  $R_3$  направлен в центр масс сокращенной области  $C_3$ ). Объекты, не попадающие в область  $I$  хотя бы частично, не рассматриваются.

Данная процедура повторяется для всех точек карты  $M$ , формируя двумерный массив списков радиус-векторов для каждой точки карты  $M$ .



**Рис.5.** Иллюстрация алгоритма сравнения инвариантов карты на основе радиус-векторов, ориентированных в центр области класса.

Разрабатываемый алгоритм предполагает сравнение характеристических величин изображения  $I^*$ , полученного с камеры с характеристиками области  $I$  в точке  $(x_i, y_i)$  с вычислением меры различия  $d$  между данными характеристическими величинами и формирования списка потенциально возможных точек расположения изображения  $I^*$  на карте  $M$ , упорядоченными по увеличению меры  $d$ .

Применение данного алгоритма возможно при сравнении изображений  $I^*$  того же размера и в той же пространственной ориентации, что и на этапе подготовки.

### 3. Алгоритм циклического кругового сравнения инвариантов карты

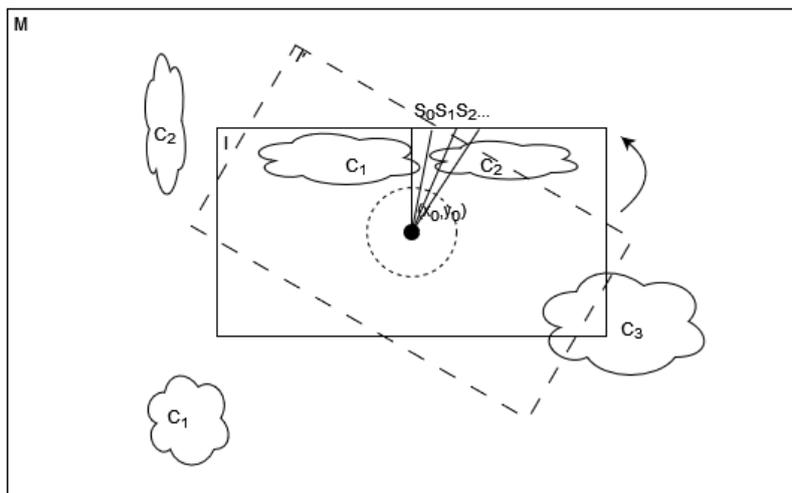
От указанного выше ограничения свободен алгоритм циклического кругового сравнения.

Пусть на карте  $M$  имеется множество площадных объектов, относящихся к возможным классам  $C_i$  (рис. 6). Для каждого пиксела  $(x_0, y_0)$  карты  $M$  предварительно рассчитываются характеристики области  $I$  с центром в точке  $(x_0, y_0)$ , соответствующей по размеру кадру с бортовой камеры. Характеристиками области  $I$  для точки  $(x_0, y_0)$  будем считать двумерную матрицу  $H$  размером  $K \times N$ , где  $K$  – число классов объектов,  $N$  – число выделенных секторов  $S$  круга с центром в точке  $(x_0, y_0)$ . Значение элемента  $H_{c,j}$  данной матрицы соответствует количеству пикселей класса  $C_c$ , находящихся в секторе  $S_j$ . Данная структура вычисляется однократно при предполетной подготовке.

Операция сравнения производится путем вычисления величины отклонения

$$\Delta_{x,y} = \sum_{c=1}^K \sum_{j=0}^{N-1} |H_{c,j} - h_{c,j}|$$

для каждой точки  $(x,y)$  карты  $M$ , где  $H_{c,j}$  элемент инварианта карты  $M$ ,  $h_{c,j}$  – элемент инварианта изображения  $I$ . Результатом сравнения является список точек  $(x,y)$ , упорядоченный по возрастанию значения  $\Delta_{x,y}$  для  $\Delta_{x,y} < const$ .



**Рис.6.** Иллюстрация алгоритма сравнения инвариантов карты на основе циклического кругового сравнения.

Применение данного алгоритма возможно при сравнении изображений  $I$  того же размера, что и на этапе подготовки, но в произвольной пространственной ориентации (повороте)  $\Gamma$  путем циклического сравнения при  $d' = (d+s) \bmod N$  для  $s=0..N$  – величина поворота изображения  $I$ , выраженная в количестве секторов  $S$ .

## 4. Заключение

Скорость работы предложенных алгоритмов сравнения оценивается как  $O(m)$ , где  $m$  – количество элементов исходной карты (в случае бинаризованного изображения класса объектов – количество пикселей данного изображения). Первый алгоритм обеспечивает более высокую скорость поиска при локализации БЛА, но требует знания курсового угла аппарата. Второй алгоритм более медленный, но не требует априорной информации об угле поворота БЛА. Алгоритмы сравнения инвариантных изображений совместно с нейросетевым классификатором типов подстилающей поверхности изображений могут применяться в бортовых системах визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов в режиме их автономной эксплуатации.

## Список литературы

1. Кулешов С.В., Зайцева А.А. Варианты реализации системы технического зрения для автовзлета и автопосадки БАС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. DOI 10.23683/2311-3103-2018-1-284-293.
2. Monnier T., Groueix T., Aubry M. Deep transformation-invariant clustering // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. P. 7945-7955.
3. Ji X., Henriques J.F., Vedaldi A. Invariant information clustering for unsupervised image classification and segmentation // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2019. P. 9865-9874.
4. Markiewicz J., Abratkiewicz K., Gromek A., Ostrowski W., Samczyński P., Gromek D. Geometrical Matching of SAR and Optical Images Utilizing ASIFT Features for SAR-based Navigation Aided Systems // Sensors. 2019. Vol. 19(24). P. 5500.
5. Кулешов С.В., Зайцева А.А., Аксенов А.Ю., Шальнев О.И. Подход к сравнению инвариантных представлений окружающей среды для визуальной навигации робототехнических комплексов // XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023) Материалы мультikonференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года / Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Т. 1. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. С. 177-180.