

# Вопросы оперативной переработки визуальной информации в автоматизированной оптико-электронной системе наземно-космического мониторинга

Д.А. Ловцов<sup>1</sup>, Д.А. Гаврилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН, Ленинский проспект 51, Москва, Россия, 119991

**Аннотация.** Одной из важнейших задач обработки изображений является поиск объектов на спутниковых аэрокосмических снимках. Большинство из известных методов применимо только для обнаружения объектов большого размера. Поиск малых объектов, линейный размер которых не превышает десятка пикселей, представляет особую сложность. Кроме того, на аэрокосмических изображениях могут встречаться не только одиночные объекты, но и группы объектов одного типа, близко расположенных друг к другу, что также затрудняет автоматическое решение задачи отдельной локализации и классификации каждого объекта. Целью настоящей работы является решение задачи локализации и классификации малоразмерных одиночных объектов и групп объектов одного типа на крупноформатных изображениях. Для решения задачи используется построение триангуляции Делоне на множестве точек, обозначающих единичные объекты. Предложенный алгоритм позволяет успешно локализовывать группы объектов.

## 1. Введение

В настоящее время спутниковые аэрокосмические изображения используются для решения множества различных прикладных задач межотраслевого характера. Как правило, для решения поставленных задач необходимо использование географических свойств различных объектов, для определения которых необходимы качественная обработка и высокоточный анализ спутниковых снимков. Аэрокосмические изображения представляют собой огромные массивы визуальной информации и содержат сведения о сотнях квадратных километров земной поверхности. Одной из важнейших задач обработки изображений является поиск объектов на спутниковых аэрокосмических снимках [1]. Существующие методы решения данной задачи, как правило, базируются на нейронных сетях использующих сверточную и полносверточную архитектуру [2-5]. Однако, большинство из известных методов применимо только для обнаружения объектов большого размера. Поиск малых объектов, линейный размер которых не превышает десятка пикселей, представляет особую сложность. Кроме того, на аэрокосмических изображениях могут встречаться не только одиночные объекты, но и группы объектов одного типа, близко расположенных друг к другу, что также затрудняет автоматическое решение задачи отдельной локализации и классификации каждого объекта. Целью настоящей работы является решение задачи локализации малоразмерных групп объектов одного типа на крупноформатных изображениях.

## 2. Методы исследования

Для решения поставленной задачи на начальном этапе используется нейронная сеть, осуществляющая определение координат индивидуальных объектов [6]. Однако, в качестве объектов интереса могут выделяться не только требуемые объекты интереса, но и похожие объекты. Наибольший интерес при этом представляют не одиноко стоящие объекты, а их группы. В качестве дальнейшего метода решения поставленной задачи используется случайный процесс, в котором используются признаки, полученные из триангуляции Делоне [7].

Для решения задачи локализации групп объектов на аэрокосмическом снимке сначала выполняется построение триангуляции Делоне для точек из множества  $X$ , которые являются ответами нейронной сети по поиску одиночных объектов. В результате получается планарный граф  $G$ , содержащий в качестве вершин все точки из множества  $X$  и обладающий свойством, что каждое его ребро является диаметром соответствующей окружности, внутри которой не лежат другие вершины графа.

Поскольку ребра графа Делоне могут быть сколь угодно длинными при произвольном расположении точек множества  $X$ , из графа удаляются ребра, длина которых превышает фиксированное заранее заданное значение  $L$ . В результате получается совокупность  $M$  не связанных между собой связных компонент  $\{G_i\}_{i=1}^m$ , удовлетворяющих критерию компактной расположенности с параметром  $L$ .

При этом подмножество  $S = X$  считается компактно расположенным с параметром  $L$ , если максимальное расстояние между двумя его соседними точками не превосходит  $L$ .

$$\max_{(p_i, p_j) \in E(S)} \rho(p_i, p_j) \leq L, \quad (1)$$

где  $E(S)$  множество пар соседних точек

При этом подмножество  $S = X$  должно являться максимальным в том смысле, что ни одна другая точка множества  $X$  не может быть добавлена к нему так, что свойство (1) продолжит выполняться.

Для решения задачи классификации рассматриваются только компоненты, количество вершин в которых больше некоторого заданного порога  $T$ , меньшие компоненты не рассматриваются из-за недостаточности информации о взаимном расположении объектов. Данное условие позволяет обеспечить выполнение количественного критерия для всех компонент, остающихся в рассмотрении.

Отобранные компоненты удовлетворяют критерию компактной расположенности (1) с параметром  $L$ , для выполнения группового критерия проверяется их соответствие критериям особого геометрического расположения элементов.

Множество компактно расположенных точек считается множеством с особым геометрическим расположением элементов, если отрезки, соединяющие соседние точки этого множества, имеют близкие направления, попадающие в сектор с угловой величиной  $\alpha$ . Первое условие множества с особым геометрическим расположением элементов имеет следующий вид:

$$\max_{(\alpha_i, \alpha_j) \in E(S)} |\alpha_i - \alpha_j| \leq \alpha, \quad (2)$$

Для проверки условия (2) применяется преобразование Хафа.

Для каждого ребра компоненты составляется уравнение прямой, на которой оно лежит, в общем виде через координаты двух вершин:

$$A_x + B_y + C = 0, \text{ где } A = (y_1 - y_2), B = (x_1 - x_2), C = (x_1 y_1 - x_2 y_2).$$

Для перпендикуляра к этой прямой верно, что его длина равна

$$p = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot \text{sign}(C)},$$

и для угла  $\theta$  с положительным направлением оси  $Ox$  выполнено:

$$\cos \theta = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot \text{sign}(C)}.$$

На основании полученных данных строится аккумуляторный массив, каждая ячейка которого соответствует интервалу в пределах от 0 до максимальной длины перпендикуляра по

одной размерности, и от 0 до 180 градусов по другой. Такие пределы являются достаточными, поскольку точка начала отсчета всегда расположена в левом нижнем углу изображения. В качестве разбиения на интервалы по углу, составляемому перпендикуляром с осью  $Ox$ , выбирается разбиение с пересекающимися посередине интервалами, если угловая величина одного интервала равна  $\alpha$ , то первый интервал будет включать значения углов  $[0, \alpha]$ , второй  $[\frac{\alpha}{2}, \frac{3\alpha}{2}]$  и т.д.

Определяется, какому интервалу по углу соответствует элемент с наибольшим числом соответствующих ему ребер. Все эти ребра образуют подграф  $G'_i$  графы-компоненты. Связные компоненты этого подграфа уже удовлетворяют критерию компактности (1) и первому условию (2) особого геометрического расположения элементов.

Поскольку классифицировать необходимо всю локализованную совокупность точек, а не только вершины найденного подграфа  $G'_i$ , для принятия решения подсчитываются числовые характеристики, описывающие локализованную совокупность точек, в том числе:

- число вершин,
- число ребер,
- доля вершин, входящих в подграф  $G'_i$ ,
- доля ребер, входящих в подграф  $G'_i$ ,
- максимальный размер (по вершинам) компоненты связности подграфа  $G'_i$ .

Множество компактно расположенных точек считается множеством с особым геометрическим расположением элементов, если эти точки расположены на плоскости в виде двумерной прямоугольной решетки, то есть если в нем можно выделить два перпендикулярных направления, вдоль которых расположены все отрезки, соединяющие соседние точки. Второе условие множества с особым геометрическим расположением элементов имеет следующий вид: множество точек  $\mathbb{S}$  считается множеством с особым геометрическим расположением элементов, если в нем можно выделить два (возможно, пересекающихся) подмножества  $\mathbb{S}_1, \mathbb{S}_2: \mathbb{S}_1 \cup \mathbb{S}_2 = \mathbb{S}$  таких, что

$$\frac{\pi}{2} - \beta \leq |\alpha_1 - \alpha_2| \leq \frac{\pi}{2} + \beta, \forall \alpha_1 \in A(\mathbb{S}_1), \alpha_2 \in A(\mathbb{S}_2). \quad (3)$$

Для проверки второго условия (3) извлекаются дополнительные признаки из аккумуляторного массива, построенного в ходе применения преобразования Хафа.

Множество компактно расположенных точек считается множеством с особым геометрическим расположением элементов, если расстояние между всеми парами соседних точек имеют достаточно малый разброс с параметром  $\gamma$ . В качестве меры разброса используется среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ . Третье условие множества с особым геометрическим расположением элементов имеет следующий вид: множество точек  $\mathbb{S}$  считается множеством с особым геометрическим расположением элементов случае

$$\sigma(\mathbb{S}) = \sqrt{\frac{1}{|E(\mathbb{S})|} \sum_{(p_i, p_j) \in E(\mathbb{S})} (\rho(p_i, p_j) - \hat{r})^2} \leq \gamma, \text{ где } \hat{r} = \frac{1}{|E(\mathbb{S})|} \rho(p_i, p_j). \quad (4)$$

Для проверки третьего условия (4) подсчитываются характеристики связных компонент подграфа  $G'_i$ . Для каждого подграфа  $G'_i$  вычисляются:

- среднее число ребер в его компонентах связности,
- средняя длина его ребер,
- стандартное отклонение длин его ребер,
- отношение стандартного отклонения длин ребер к их средней длине.

### 3. Результаты исследования

Для решения задачи на предварительном этапе применялась нейронная сеть, результатом работы которой являлись координаты центров индивидуальных объектов (рисунок 1). На вход представленному алгоритму подавалось аэрокосмическое изображение местности в оттенках серого, а также список координат объектов по ответу нейросети.

На множестве заданных точек строится триангуляция Делоне. Из триангуляции удаляются ребра, длина которых превосходит заданное значение  $L$ . В результате получается граф,

разбиваемый на большое количество компонент связности. Рассматриваются компоненты связности, содержащие не менее  $T$  вершин (рисунок 2).

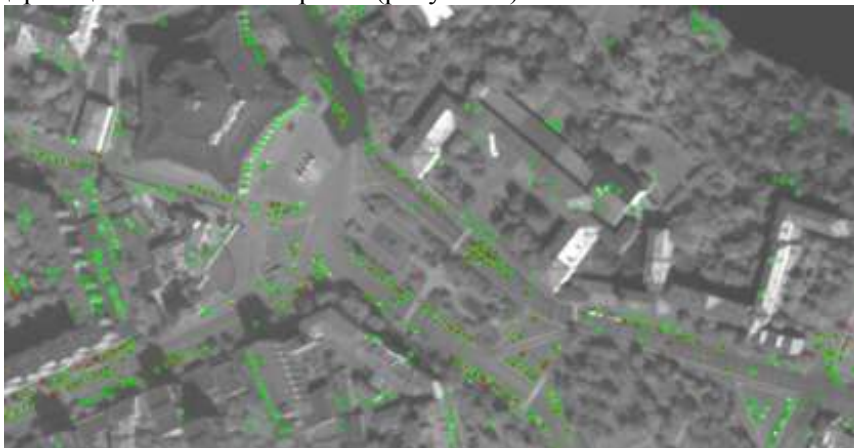


Рисунок 1. Пример фрагмента аэрокосмического изображения.

Далее вычисляются описанные в алгоритме числовые характеристики описанных подграфов и проверяются критерии связности

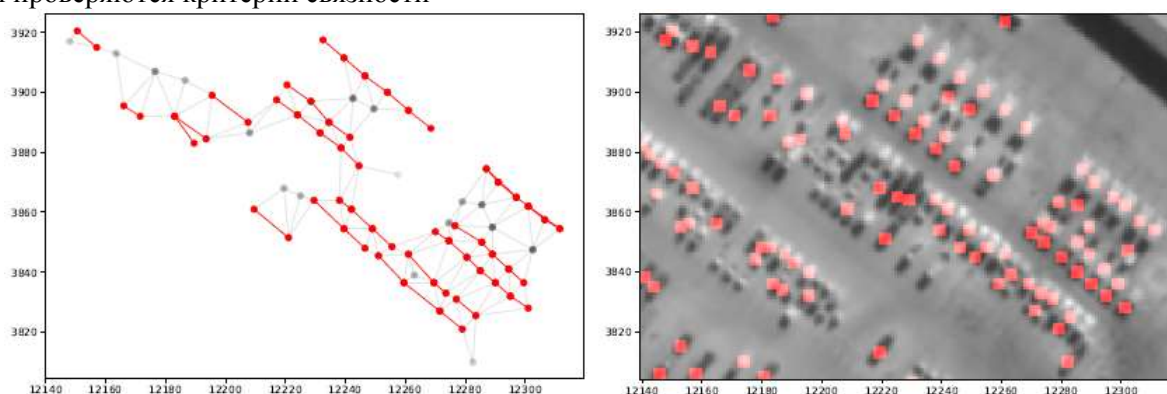


Рисунок 2. Примеры компонент связности.

#### 4. Заключение

В настоящей работе предложен алгоритм локализации групп объектов на аэрокосмических изображениях. Описаны критерии позволяющие формализовать понятие группы объектов, в том числе критерий компактности, количественный критерий, критерий особого геометрического расположения элементов. Предложенный способ позволяет успешно решать задачу локализации групп однотипных объектов. Для решения задачи используется построение триангуляции Делоне на множестве точек, обозначающих единичные объекты. Предложенный метод успешно используется при создании автоматизированных оптико-электронных систем наземно-космического мониторинга обеспечивающих переработку многоаспектной визуальной информации [8-9] и позволяет значительно повысить эффективность использования имеющихся методов и средств детектирования, локализации и классификации изображений, и улучшить качество распознавания визуальной информации.

#### 5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-011-00-672.

#### 6. Литература

- [1] Гаврилов, Д.А. Нейросетевой алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения объекта интереса в видеосигнале // 16 Национальная конференция по искусственному интеллекту, 2018. – С. 188-190.

- [2] Огурцов, А. Глубокое обучение с R и Keras на примере Carvana Image Masking Challenge [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/company/ods/blog/340212/> (11.02.2020).
- [3] Carvana Image Masking Challenge–1st Place Winner’s Interview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://blog.kaggle.com/2017/12/22/carvana-image-masking-first-place-interview/> (11.02.2020).
- [4] Ronneberger, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / T. Ronneberger, O. Fischer, P. Brox // MICCAI, 2015. – P. 1-8.
- [5] Guo, S. Random Forests and VGG-NET: An Algorithm for the ISIC 2017 Skin Lesion Classification Challenge / S. Guo, Y. Luo, Y. Song [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1703/1703.05148.pdf> (11.02.2020).
- [6] Gavrilov, D.A. A Method for Aircraft Labeling in Remote Sensing Images Based on Continuous Morphological Models / D.A. Gavrilov, L.M. Mestetskiy, A.B. Semenov // Programming and Computer Software. – 2019. – Vol. 45(6). – P. 303-310. DOI: 10.1134/S0132347419060025.
- [7] Favreau, J.D. Extracting Geometric Structures in Images with Delaunay Point Processes / J.D. Favreau, F. Lafarge, A. Bousseau // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2890586.
- [8] Automated special purpose optical electronic system’s functional diagnosis / D.A. Lovtsov, D.A. Gavrilov // Proceedings of International Seminar on Electron Devices Design and Production – Prague, Czech Republic: IEEE, 2019. – P. 70-73. DOI: 10.1109/SED20198798409.
- [9] Gavrilov, D.A. Quality assessment of objects detection and localization in a video stream // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman, ser. “Priborostroenie”. – 2019. – Vol. 125(2). – P. 40-55. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-2-40-55.

## Processing of visual information in the automated optoelectronic system of ground-space monitoring

D.A. Lovtsov<sup>1</sup>, D.A. Gavrilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lebedev Institute of Precise Mechanics and Computer Engineering (IPMCE), Leninsky prospect 51, Moscow, Russia, 119991

**Abstract.** One of the most important tasks of image processing is the search for objects in satellite aerospace images. Most of the known methods are applicable only for detecting large objects. The search for small objects whose linear size does not exceed a dozen pixels is particularly difficult. In addition, aerospace images can contain not only single objects, but also groups of objects of the same type, close to each other, which also makes it difficult to automatically solve the problem of separate localization and classification of each object. The aim of this work is to solve the problem of localization and classification of small single objects and groups of objects of the same type in large format images.