

УДК 629.197

А. Л. МАКАРОВ¹, Д. К. МОЗГОВОЙ², В. С. ХОРОШИЛОВ¹,
А. С. БУШАНСКАЯ¹, В. М. ПОПЕЛЬ¹

¹ Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»,
Украина

² Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ, ИНВАРИАНТНЫХ К ПОВОРОТУ

Описан метод автоматизированной классификации подвижных объектов с использованием геометрических признаков, инвариантных к повороту. Для классификации малоразмерных объектов по геометрическим признакам сравнивались все объекты бинарного изображения по схеме «каждый с каждым» путем вычисления коэффициента взаимной корреляции между всеми значениями геометрических признаков объектов. Геометрические характеристики объектов, по которым проводилась классификация объектов на бинарном изображении, включали площадь объекта, длины главной и вспомогательной осей инерции, эксцентриситет эллипса с главными моментами инерции, площадь выпуклого многоугольника, описанного около объекта, эквивалентный диаметр круга с той же площадью, а также коэффициент выпуклости. Проведенные на различных спутниковых снимках исследования подтвердили, что поворот изображений на произвольный угол не влияет на результат классификации.

Ключевые слова: спутниковые снимки высокого пространственного разрешения, распознавание малоразмерных объектов, геометрические признаки, инвариантные к повороту, метод автоматизированной классификации.

Введение

Спутниковая съемка – это надежный источник оперативной, объективной и достоверной информации, широко используемый для решения различных управленческих и хозяйственных задач. В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является наиболее перспективной сферой применения космических технологий, в особенности, съемка высокого пространственного разрешения (табл. 1).

При обработке спутниковых снимков высокого пространственного разрешения наиболее сложной является задача поиска и распознавания малоразмерных объектов (сооружения, транспортные средства и т.п.) с использованием радиометрических, спектральных, текстурных, статистических, геометрических и др. дешифровочных признаков.

В качестве радиометрических дешифровочных признаков обычно используются значения верхнего и нижнего порога бинаризации (т.н. порог отсечения) для каждого спектрального канала снимка, которые подбираются вручную либо считываются из файла библиотеки дешифровочных признаков.

К геометрическим характеристикам относятся такие характеристики, как площадь, центр тяжести,

координаты описывающего прямоугольника, периметр, эксцентриситет и др.

Формулировка проблемы

Большинство существующих современных программных пакетов обработки спутниковых снимков (ERDAS, ENVI и др.) позволяют выполнять классификацию изображений или областей интереса в целом, как правило, только с учетом их спектральных признаков, не анализируя при этом геометрических свойств отдельных объектов.

Методы определения геометрических характеристик объектов на бинарных изображениях, основанные на анализе скелетонных (например, используемые при распознавании букв), не являются инвариантными относительно поворота и поэтому не могут быть использованы при распознавании подвижных объектов с произвольной ориентацией.

Задачей исследований являлась разработка методов и алгоритмов автоматизированной классификации малоразмерных объектов на спутниковых снимках с использованием геометрических признаков, инвариантных к повороту.

Таблица 1

Сравнительные технические характеристики спутников ДЗЗ высокого пространственного разрешения

Спутник	Год за-пуска	Страна	Разрешение		Точность геопривязки, м	Высота орбиты, км	Накло-нение орбиты	Поло-са захва-та, км	Макс. откло-нение от надира	Ско-рость пере-наце-ли-вания
			PAN/MS, м	Ра-диомет-рич., бит						
Ikonos	1999	США	1/4	11	23	680	98,1°	11	45°	1,6°/с
QuickBird	2001	США	0,6/2,4	11	23	450	98°	16,5	45°	0,6°/с
Eros B	2003	Израиль	0,7	10	н.д.	500	97,4°	7	45°	н.д.
OrbView-3	2003	США	1/4	11	н.д.	470	97°	8	50°	н.д.
Ресурс-ДК1, 2	2006	Россия	1/3	10	н.д.	360...610	70°	5...28	30°	н.д.
TerraSAR	2006	Германия	1 (SAR)	16	н.д.	514	97,4°	5	55°	н.д.
WorldView-1	2007	США	0,5/-	11	6,5	496	97,2°	17,6	40°	4,5°/с
KartoSat-2	2007	Индия	0,8	10	н.д.	630	97,9°	9,6	45°	н.д.
KompSat-2	2007	Корея	1/4	10	н.д.	685	98°	15	15°	н.д.
SkyMed-1,2	2007	Италия	1 (SAR)	8	н.д.	620	97,9°	10	н.д.	н.д.
GeoEye	2008	США	0,4/1,6	11	2,5	681	98,1°	15,2	60°	1,3°/с
SkyMed-3	2008	Италия	1 (SAR)	8	н.д.	620	97,9°	10	н.д.	н.д.
WorldView-2	2009	США	0,46/1,84	11	5	770	97,2°	5	40°	2,5°/с
TanDEM-X	2010	Германия	1 (SAR)	16	н.д.	514	97,4°	5	55°	н.д.
SkyMed-4	2010	Италия	1 (SAR)	8	н.д.	620	97,9°	10	н.д.	н.д.
KartoSat -2b	2010	Индия	0,8	10	н.д.	630	97,9°	26	45°	н.д.
Pleiades-1, 2	2011-12	Франция	0,5/2	н.д.	4,5	695	98°	20	50°	2°/с
SkySat-1, 2	2013-14	США	0,9/2,0	11	5	600	97°	8	н.д.	н.д.
WorldView-3	2014	США	0,46/1,84	11	3,5	770	98°	15	40°	2,5°/с

Методы исследований

Пиксельная площадь бинарного объекта равна количеству ненулевых элементов изображения, принадлежащих объекту. При этом множество единичных отсчетов $g(x, y)$ с координатами (x, y) , принадлежащих области A , задается как

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in A, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Если координаты левого верхнего и правого нижнего углов прямоугольника, описывающего область, равны X_{\min}, Y_{\min} и X_{\max}, Y_{\max} соответственно, то площадь равна

$$S = \sum_{y=Y_{\min}}^{Y_{\max}} \sum_{x=X_{\min}}^{X_{\max}} g(x, y).$$

Центр тяжести области задается координатами (X_c, Y_c) , определяемыми как среднее значение (x, y) координат, принадлежащих области в соответствии с уравнением

$$X_c = \frac{1}{S} \sum_{(x, y) \in A} x,$$

$$Y_c = \frac{1}{S} \sum_{(x, y) \in A} y.$$

Определение координат центра тяжести объекта позволяет нормализовать положение объекта, определив положение начала координат в плоскости изображения, относительно которого положение объекта является центральным.

Если число граничных отсчетов области равно N , то длина периметра P равна сумме расстояний между соседними граничными точками

$$P = \sum_{i=1}^N r_i,$$

$$r_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}.$$

Отсчет является граничным, если хотя бы один отсчет из его окрестности не принадлежит области A .

Для оценки компактности объекта используют коэффициент формы, определяемый как отношение квадрата периметра к площади

$$K = \frac{p^2}{S}.$$

Для оценки округлости области используется коэффициент

$$C = \frac{m_A}{\sigma_A},$$

где m_A – среднее значение расстояний от центра тяжести области до граничных отсчетов,

$$m_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{ic};$$

σ_A – среднее квадратичное отклонение этих расстояний,

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (r_{ic} - m_A)^2};$$

r_{ic} – расстояние от i -того граничного отсчета до центра тяжести области.

Для оценки компактности объекта также используют радиусы вписанной и описанной окружностей.

Кроме того, для распознавания часто используют статистические моменты области.

Дискретный центральный момент m_{ij} области определяется следующим образом

$$m_{ij} = \sum_{(x,y) \in \text{Reg}} (x - \bar{x})^i (y - \bar{y})^j,$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in \text{Reg}} x,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{(x,y) \in \text{Reg}} y,$$

где n – общее количество пикселей в области.

Также для распознавания используют характеристики области, инвариантные по отношению к масштабированию, переносу, повороту.

Например, эксцентриситет, который характеризует удлиненность и нецентрированность объекта

$$\text{elongation} = \frac{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2}}{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2}}.$$

Для нормализации ориентации объекта при анализе бинарных изображений используется объект, описываемый эллипсом рассеяния.

В качестве ориентации выбирают направление собственного вектора x матрицы ковариации B координат отсчетов ненулевой яркости, то есть принадлежащих области A .

Собственный вектор должен соответствовать максимальному собственному значению λ матрицы ковариации

$$B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{12} & B_{22} \end{pmatrix},$$

где B_{ij} – центральные моменты второго порядка;

B_{11} – дисперсия;

x – координаты ненулевых отсчетов яркости;

B_{22} – дисперсия y -координаты ненулевых отсчетов яркости;

B_{12} – ковариация (x, y) -координат ненулевых отсчетов яркости.

Собственные значения λ находятся из уравнения

$$(B - \lambda E)x_\lambda = 0,$$

где E – единичная матрица,

x_λ – собственный вектор, соответствующий числу λ .

Собственное значение λ матрицы ковариации определяется из уравнения

$$B - \lambda E = 0.$$

По бинарному изображению оцениваются параметры аппроксимирующего эллипса: малая полуось, большая полуось b и угол наклона большой оси эллипса φ в соответствии с описанным статистическим подходом к нормализации бинарного изображения объекта.

Размеры полуосей эллипса определяются следующим образом. Определяется соотношение собственных чисел матрицы ковариации (полуосей эллипса):

$$k = \sqrt{\frac{\text{abs}(\lambda_2)}{\lambda_1}},$$

где λ_1 – большее собственное значение,

λ_2 – меньшее собственное значение.

Если отношение малой и большой полуосей эллипса равно $a/b = k$, то площадь эллипса $S_{\text{square}} = \pi ab = \pi kb^2$.

Большая полуось эллипса равна:

$$b = \sqrt{S_{\text{square}}/\pi k},$$

где $S_{\text{square}} = S$ – площадь бинарного изображения (количество отсчетов с ненулевой яркостью).

Малая полуось эллипса определяется из уравнения $a = kb$.

Алгоритм обработки спутникового снимка

Разработан алгоритм автоматизированной классификации подвижных малоразмерных объектов на спутниковых снимках с использованием радиометрических и геометрических признаков, который позволяет выделять нужные классы объектов независимо от их ориентации на снимке.

Структура алгоритма:

- выделение области интереса на снимке;
- бинаризация выделенной области по заданному порогу;
- морфологическая фильтрация бинаризованных объектов;
- сегментация отфильтрованных бинарных объектов;
- фильтрация сегментированных объектов по площади;
- определение геометрических признаков объектов;
- вычисление коэффициента взаимной корреляции геометрических признаков объектов;
- классификация объектов по геометрическим признакам с учетом заданного порога (критерия близости классов);
- оптимизация параметров классификации с целью получения требуемого количества классов.

Геометрические характеристики объектов, по которым проводилась классификация объектов на бинарном изображении, включают:

- площадь объекта – количество пикселей объекта;
- длины главной и вспомогательной осей инерции – длины осей, которые представляют собой направления в объекте, совпадающие с полуосями эллипсоида инерции;
- эксцентриситет – эксцентриситет эллипса с главными моментами инерции, равными главному моменту инерции объекта;

– площадь многоугольника – площадь выпуклого многоугольника, описанного около объекта;

– эквивалентный диаметр, т.е. диаметр круга с той же площадью, что и объект; вычисляется по формуле $\sqrt{4S/\pi}$, где S – площадь объекта;

– коэффициент выпуклости – коэффициент, который равен отношению S_c/S , где S – площадь объекта; S_c – площадь многоугольника.

Для классификации малоразмерных объектов по геометрическим признакам необходимо сравнить все объекты бинарного изображения по схеме «каждый с каждым» путем вычисления коэффициента взаимной корреляции r между всеми значениями геометрических признаков объектов:

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{1k} - \bar{x}_1)(x_{2k} - \bar{x}_2)}{\sqrt{D_1 \cdot D_2}},$$

где x_1 и x_2 – средние значения по двум выборкам;

x_{1k} и x_{2k} – текущие значения выборки;

n – количество элементов выборки;

D_1 и D_2 – средние дисперсии по двум выборкам.

Далее устанавливается пороговое значение коэффициента взаимной корреляции, и выделяются пары объектов, для которых значение коэффициента корреляции выше порогового. Оценка полученных пар объектов с целью объединения объектов в классы производится на основании полученной при счете таблицы.

Устанавливаемое пороговое значение коэффициента корреляции зависит от того, насколько сильно различаются объекты, объединяемые в один класс, и сами классы между собой. Таким образом, пороговое значение может быть нечувствительным к изменению объектов, грубым, тогда в предельном случае все объекты объединяются в один класс, или более чувствительным к малейшим отличиям между объектами, тогда в предельном случае создаются классы, и в каждый класс попадает только один объект. Поэтому очень важно подобрать оптимальное пороговое значение, которое позволит получить требуемое количество классов.

Результаты исследований

В ходе исследований работы алгоритма автоматизированной классификации объектов был использован фрагмент мультиспектрального спутникового снимка с субметровым пространственным разрешением, содержащий малоразмерные подвиж-

ные объекты.

Предварительная обработка снимка заключалась в преобразовании исходного RGB снимка в градации серого и выделении области для анализа (рис. 1 и 2). Затем выполнялись бинаризация, морфологическая фильтрация, сегментация и фильтрации по площади (рис. 3 и 4). В результате было получено изображение, содержащее только объекты, которые представляют интерес для проведения последующей их классификации.

Геометрические признаки всех объектов бинарного изображения были посчитаны и сведены в таблицу (табл. 2). Следует отметить, что все значения геометрических свойств объектов нормированы до единицы и приведены в пикселях.

Для визуального анализа близости свойств распознанных объектов (см. рис. 4) были построены графики нормированных геометрических характеристик каждого объекта от 2 до 10 (рис. 5).



Рис. 1. Исходный RGB снимок



Рис. 2. Снимок в градациях серого

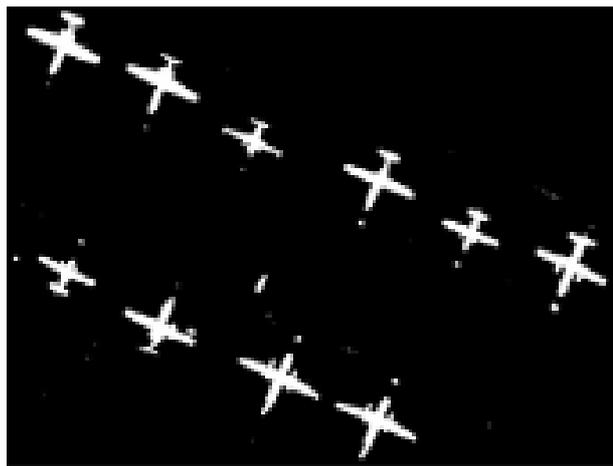


Рис. 3. Результат бинаризации

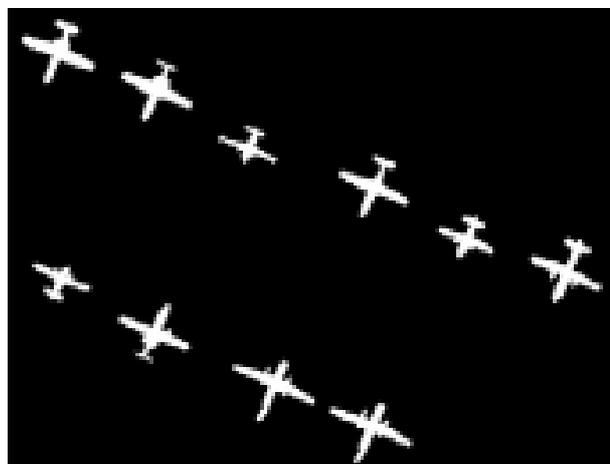


Рис. 4. Результат фильтрации по площади

В ходе обработки получается таблица (табл. 3), с помощью которой легко определить, какие объекты принадлежат одному и тому же классу при конкретном ПЗ свойств каждого класса (рис. 6).

Графики свойств при объединении объектов в три класса приведены на рис. 7.

Объекты, согласно таблице ($ПЗ = 0,95$), были объединены в четыре класса, графики свойств которых приведены на рис. 8.

Если брать $ПЗ = 0,8$, то классов образуется три, т.е. два наиболее близких по геометрическим характеристикам класса из четырех классов при $ПЗ = 0,95$ объединяются в один. Объект, который был выделен в отдельный класс при $ПЗ = 0,95$, переходит в первый класс при $ПЗ = 0,8$. При $ПЗ = 0,99$ объекты объединяются в семь классов, поскольку второй и третий классы, образованные при $ПЗ = 0,95$, распадаются на пять классов, а первый и четвертый классы сохраняются.

Таблица 2

Геометрические признаки объектов бинарного изображения

№ объекта \ Свойство	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Площадь объекта	0,25	0,13	0,20	0,22	0,11	0,22	0,22	0,20	0,14	0,24
Длина главной оси инерции	0,84	0,67	0,83	0,86	0,67	0,95	0,94	0,81	0,65	0,78
Длина вспомогательной оси инерции	0,69	0,46	0,59	0,60	0,43	0,63	0,63	0,68	0,50	0,76
Эксцентриситет	0,56	0,72	0,70	0,71	0,76	0,74	0,73	0,54	0,63	0,23
Площадь многоугольника	0,52	0,25	0,46	0,48	0,26	0,55	0,55	0,49	0,28	0,53
Эквивалентный диаметр	0,56	0,41	0,50	0,53	0,38	0,53	0,53	0,51	0,43	0,55
Коэффициент выпуклости	0,48	0,52	0,43	0,45	0,44	0,40	0,40	0,41	0,52	0,45

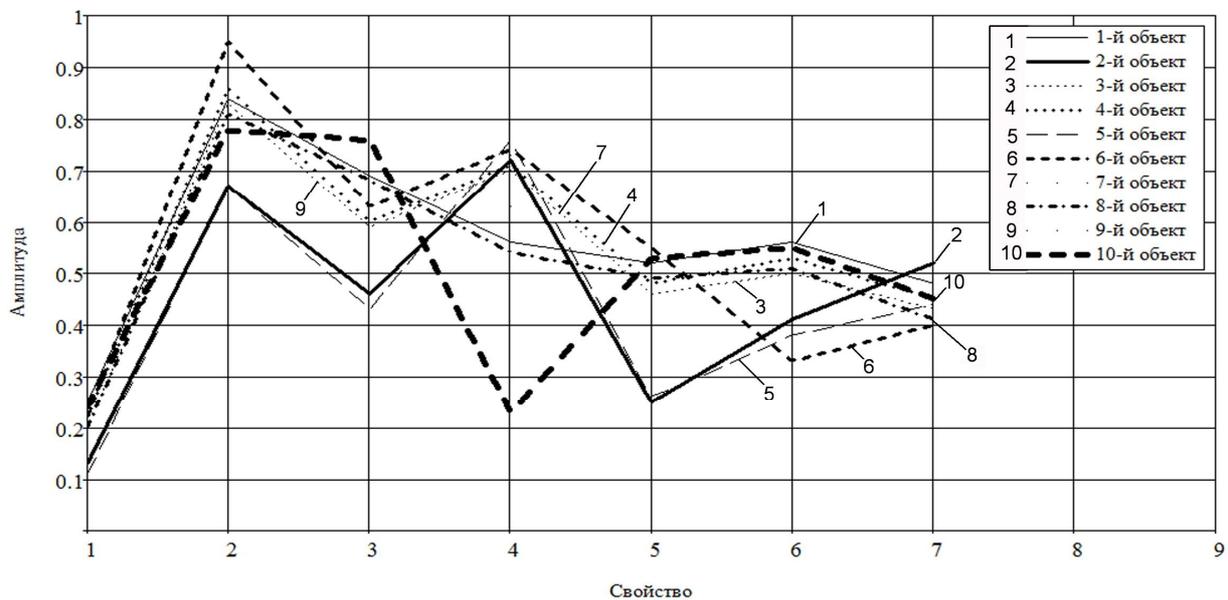


Рис. 5. Нормированные геометрические характеристики 10-ти объектов

Таблица 3

Объединение объектов в классы (ПЗ = 0,95)

№ объекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0
5	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
6	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0
7	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Выводы

Разработан метод автоматизированной классификации подвижных объектов с использованием геометрических признаков, инвариантных к повороту.

С целью экспериментальной отработки предложенного метода разработана программа, позволяющая получать очищенные от шума бинарные изображения и классифицировать отфильтрованные объекты по геометрическим признакам при произвольной ориентации спутникового снимка или отдельных объектов, а также строить графики свойств каждого объекта и каждого класса при различных пороговых значениях свойств каждого класса.

Проведенные на различных спутниковых снимках исследования подтвердили, что поворот изображений на произвольный угол не влияет на результат классификации.

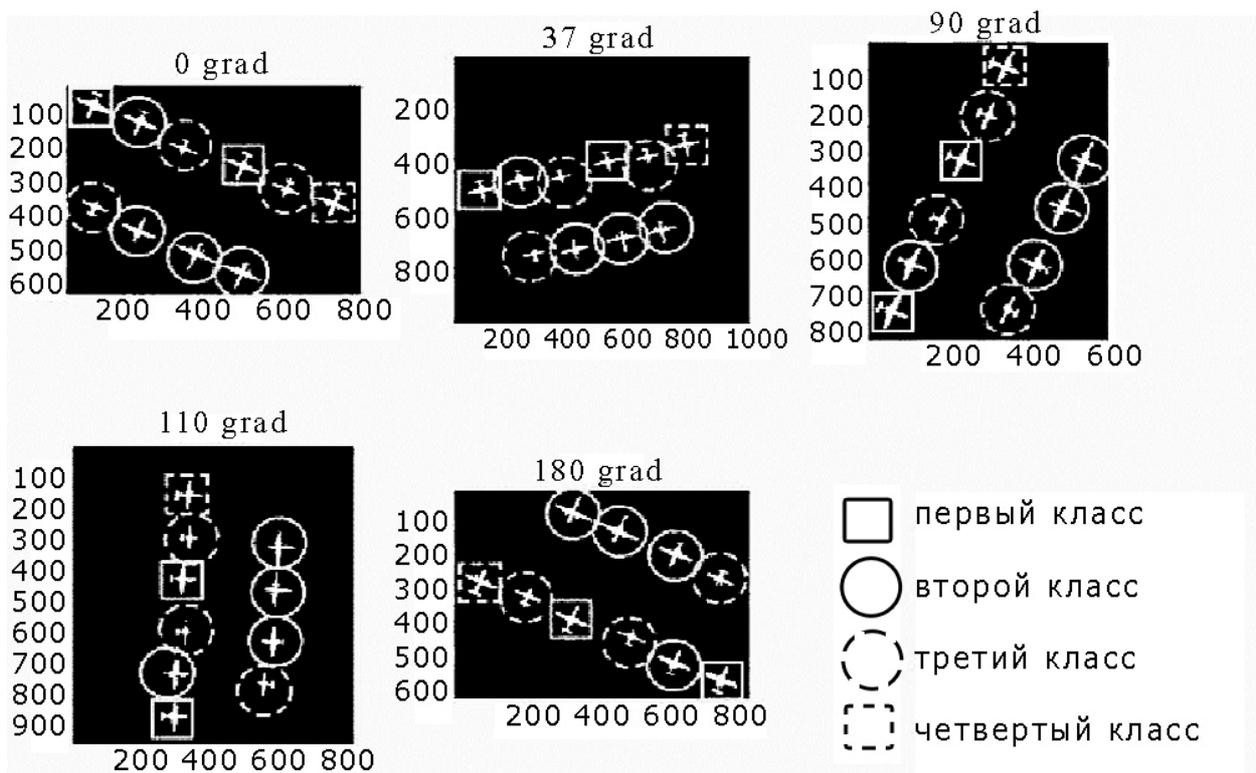


Рис. 6. Классификация по геометрическим признакам при произвольной ориентации объектов

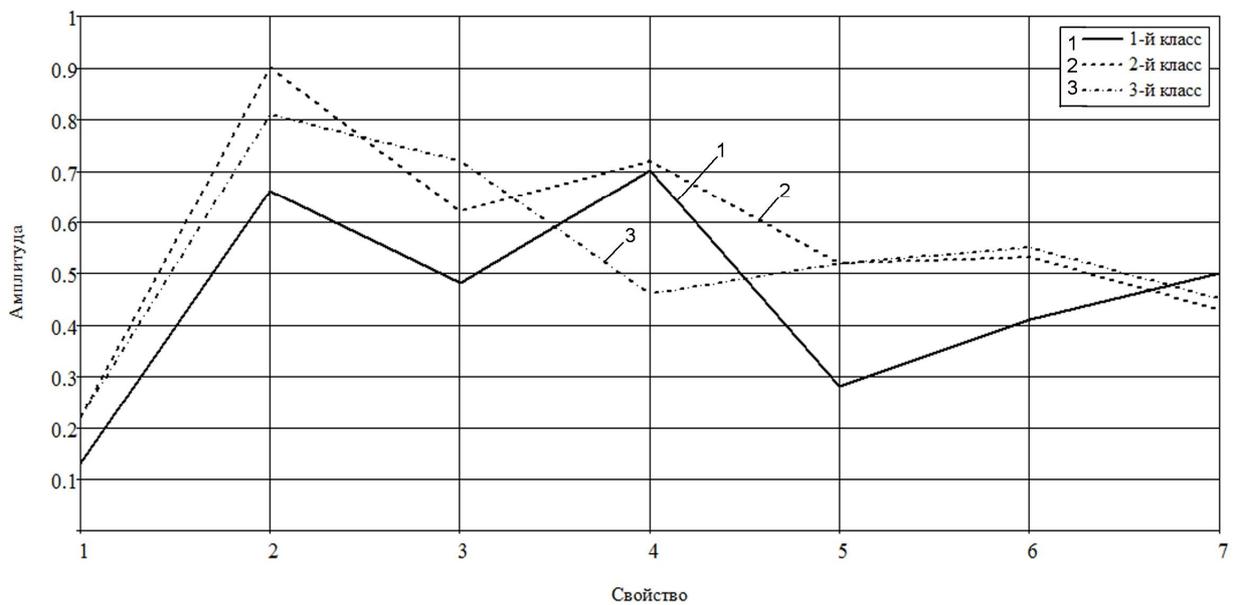


Рис. 7. Объединение 10-ти объектов в 3 класса

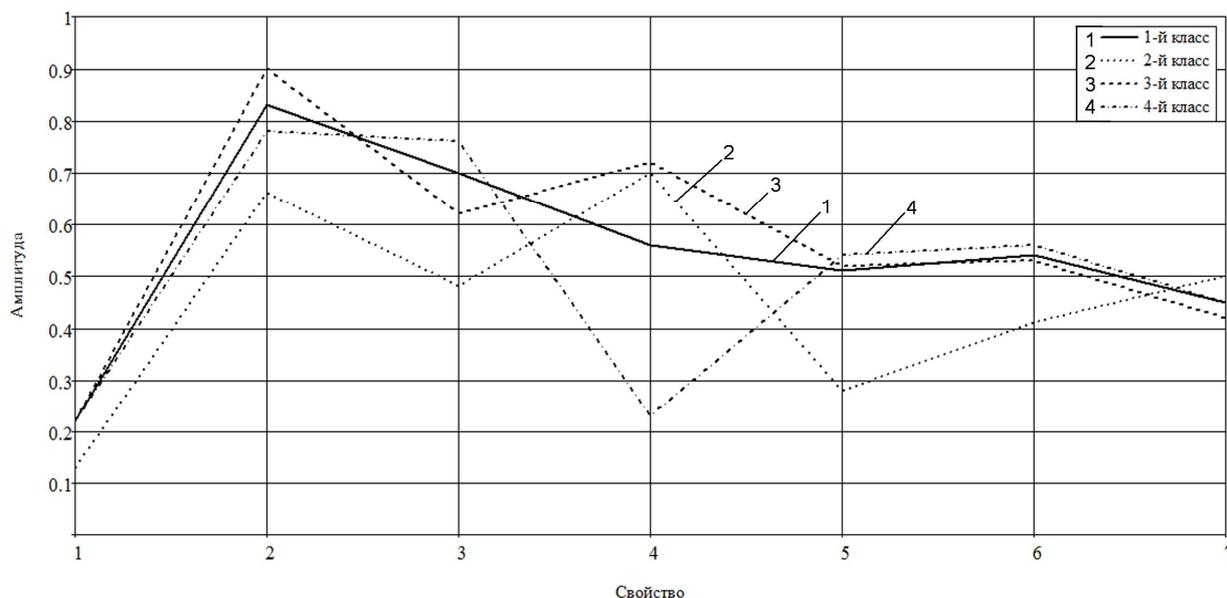


Рис. 8. Объединение 10-ти объектов в 4 класса

Литература

1. Мозговой, Д. К. Классификация малоразмерных объектов с использованием радиометрических и геометрических признаков [Текст] / Д. К. Мозговой, В. И. Волошин, И. Н. Водопьянов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Ракетно-космічна техніка». – 2006. – Вип. 10, Т. 2. – С. 236 – 238.

2. Мозговой, Д. К. Классификация малоразмерных объектов на спутниковых снимках [Текст] / Д. К. Мозговой, О. В. Кравец // Екологія та ноосферологія. – 2009. – Т. 20, № 3-4. – С. 26-30.

3. Мозговой, Д. К. Распознавание объектов с использованием радиометрических и геометрических признаков [Текст] / Д. К. Мозговой, И. Н. Водопьянов // Наукові проблеми розробки, модернізації та застосування інформаційно-вимірвальних систем космічного і наземного базування : тези доп., ч. 1: XV наук.-техн. конф., 20-21 квітня 2006 р. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – С. 19.

4. Мозговий, Д. К. Підвищення інформативності супутникової зйомки малорозмірних об'єктів земної поверхні [Текст] / Д. К. Мозговий // Програма наук. конф. за підсумками наук.-досл. роботи університету за 2012 рік. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2012. – С. 92.

5. Мозговой, Д. К. Классификация малоразмерных объектов с использованием радиометрических и геометрических признаков [Текст] / Д. К. Мозговой, В. И. Волошин, И. Н. Водопьянов // VI Украинская конф. по космическим исследованиям. Сб. тезисов. 3-8 сентября 2006 г. – Евпатория : НЦУИКС, 2006. – С. 119.

6. Кравец, О. В. Классификация малоразмерных объектов на спутниковых снимках [Текст] / О. В. Кравец, В. М. Корчинский, Д. К. Мозговой // XI Міжнародна молодіжна наук.-практ. конф. «Людина і космос» : Збірник тез. – Дніпропетровськ : НЦАОМ, 2009. – С. 482.

7. Мозговий, Д. К. Методика супутникової зйомки малорозмірних слабоконтрастних об'єктів [Текст] / Д. К. Мозговий // Програма наук. конф. за підсумками наук.-досл. роботи університету за 2010 рік. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2010. – С. 108.

8. Мозговой, Д. К. Распознавание малоразмерных объектов с использованием библиотеки классов [Текст] / Д. К. Мозговой, О. В. Кравец // Екологія та ноосферологія. – 2009. – Т. 20, №3-4. – С. 71-75.

Поступила в редакцію 5.02.2015, рассмотрена на редколлегии 15.05.2015

**МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНИХ ОЗНАК,
ІНВАНІАНТНИХ ДО ПОВОРОТУ**

О. Л. Макаров, Д. К. Мозговой, В. С. Хорошилов, О. С. Бушанская, В. М. Попель

Описано метод автоматизованої класифікації рухомих об'єктів з використанням геометричних ознак, інваріантних до повороту. Для класифікації малорозмірних об'єктів за геометричними ознаками порівнювалися всі об'єкти бінарного зображення за схемою «кожен з кожним» шляхом обчислення коефіцієнта взаємної кореляції між усіма значеннями геометричних ознак об'єктів. Геометричні характеристики об'єктів, по яких проводилася класифікація об'єктів на бінарному зображенні, включали площу об'єкта, довжину головної і допоміжної осей інерції, ексцентриситет еліпса з головними моментами інерції, площу опуклого багатокутника, описаного близько об'єкта, еквівалентний діаметр кола з тією ж площею, а також коефіцієнт опуклості. Проведені на різних супутникових знімках дослідження підтвердили, що поворот зображень на довільний кут не впливає на результат класифікації.

Ключові слова: супутникові знімки високого просторового дозволу, розпізнавання малорозмірних об'єктів, геометричні ознаки, інваріантні до повороту, метод автоматизованої класифікації.

**THE METHOD OF AUTOMATED CLASSIFICATION OF MOVING
OBJECTS WITH USING GEOMETRICAL CHARACTERISTICS WHICH ARE
INVARIANT TO ROTATION**

A. L. Makarov, D. K. Mozgovej, V. S. Khoroshilov, O. S. Bushanska, V. M. Popel'

The method of automated classification of moving objects with using geometrical characteristics which are invariant to rotation was described. All objects of binary image were compared using "each to each" method by calculating the cross-correlation coefficient between all values of geometrical characteristics of objects in order to classify low-sized objects in compliance with geometrical characteristics. Geometric characteristics of objects, which were used to classify objects in a binary image included an area of the object, the length of the major and minor axes of inertia, the eccentricity of the ellipse with principal moments of inertia, the area of a convex polygon described by the object, the equivalent diameter of a circle with the same area, as well as the ratio convexity. The rotation of images to any angle doesn't affect to the result of classify, that was confirmed by carried out researches at different satellite images.

Keywords: satellite images of high spatial resolution, detection of low-sized objects, geometric features that are invariant to rotation, automated classification method.

Макаров Александр Леонидович – канд. техн. наук, Заслуженный машиностроитель Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, Заместитель Генерального конструктора по вопросам создания и эксплуатации космических аппаратов, спутниковых систем, контрольно-измерительных и информационно-управляющих средств ракетно-космического и наземного сегментов, Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное" им. М. К. Янгеля", Днепропетровск, Украина.

Мозговой Дмитрий Константинович – канд. техн. наук, доцент, факультет физики, электроники и компьютерных систем, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: m-d-k@i.ua.

Хорошилов Виктор Сергеевич – д-р техн. наук, проф., Заслуженный деятель науки и техники Украины, начальник расчетно-теоретического сектора конструкторского бюро космических аппаратов, систем и комплексов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Бушанская Александра Сергеевна – аспирант, факультет физики, электроники и компьютерных систем, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: V.alexandras@mail.ru.

Попель Валерий Михайлович – заместитель начальника отдела антенно-фидерных и СВЧ устройств КБ космических аппаратов, систем и комплексов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: dk@dfdk.dp.ua.