

И. В. МАНЬЛОВ

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ КЛАССОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСНИМКОВ

Сравниваются алгоритмы расчета евклидова расстояния и расчета расстояния Махаланобиса с целью повышения точности дешифровки аэрофотоснимков, используемых для оценки состояния сельскохозяйственных земель.

**Ключевые слова:** аэрофотоснимок, сельское хозяйство, цифровая классификация, дешифровка, анализ изображений, автоматизация.

В последнее время возросла потребность в достоверной информации о состоянии земель сельскохозяйственного назначения и в оценке их использования как для обеспечения деятельности агропромышленных предприятий, так и с целью охраны окружающей среды. Многие хозяйства по-прежнему отдают предпочтение полевым исследованиям и ручной дешифровке снимков, однако эти методы имеют целый ряд недостатков, к основным из которых можно отнести следующие:

- высокий субъективизм результатов, т.е. зависимость от опыта и предпочтений дешифровщика;
- низкая скорость получения результатов дешифровки;
- возрастающая стоимость дешифровки, связанная с увеличением площади сельскохозяйственных земель или количества снимков [1].

Алгоритмы автоматизированной дешифровки средствами вычислительной техники облегчают обработку и анализ информации, повышают скорость и достоверность результатов. Поэтому автоматизированная дешифровка является наиболее перспективной и востребованной в сегодняшнее время.

Чтобы выделить на аэрофотоснимке структуры площадей или обнаружить изменения, необходимо анализировать характеристики пространственного распределения пикселей изображения. В настоящее время одним из наиболее разработанных методов такого анализа является классификация объектов изображения.

Задача классификации — формализованная, в ней присутствует множество объектов, разделенных по некоторым признакам на классы. Задано конечное множество объектов (выборка), для которых известно, к каким классам они относятся, принадлежность остальных объектов неизвестна. Требуется построить алгоритм, позволяющий классифицировать произвольный объект из исходного множества.

Алгоритм расчета расстояния между объектами является ключевым элементом задачи классификации (от него зависит, к какому классу будет отнесена исследуемая точка аэрофотоснимка), алгоритм оценивает несходство, или расстояние между объектами [2].

При проведении съемки сверхлегкими летательными аппаратами, как правило, используется только три канала информации в видимом диапазоне спектра, но разрешение этих снимков значительно выше, чем при съемке из космоса. Поэтому далее в статье будут рассмотрены два алгоритма классификации именно аэрофотоснимков, полученных с высоты 1—3 км и имеющих три канала информации: красный, зеленый и синий ( $R$ ,  $G$  и  $B$ ) — алгоритмы расчета евклидова расстояния и расчета расстояния Махаланобиса.

Выбор данных алгоритмов обусловлен тем, что формула расчета евклидова расстояния — одна из самых простых и широко применяемых для расчета расстояния в  $N$ -мерном

пространстве, а формула расчета расстояния Махаланобиса — одна из самых сложных. Первый алгоритм требует значительно меньше вычислительных ресурсов, чем второй.

Для классификации аэрофотоснимков будем использовать метод классификации с обучением. Для этого перед проведением классификации необходимо выбрать на исходном снимке эталонные области (обучающие выборки) и присвоить им класс. Количество классов зависит от того, сколько областей необходимо получить на результирующем снимке. Такой подход позволяет не учитывать при сравнении алгоритмов расчета режимы съемки.

Для каждой обучающей выборки предварительно рассчитывается центр тяжести по следующей формуле:

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{ji}, \quad (1)$$

где  $m$  — количество точек в обучающей выборке;  $i$  — канал аэрофотоснимка.

Рассчитывается расстояние между центром тяжести обучающей выборки и исследуемой точкой аэрофотоснимка [3].

**Алгоритм расчета евклидова расстояния.** Наиболее простым алгоритмом расчета является евклидово расстояние, которое вычисляется по формуле:

$$D(X_j, X_i) = \sqrt[2]{\sum_{k=1}^N (X_{ki} - X_{kj})^2}, \quad (2)$$

где  $N$  — размерность пространства;  $X_{ki}$ ,  $X_{kj}$  — значения объектов  $i$  и  $j$  в  $k$ -м измерении.

Для снимков с тремя каналами  $R$ ,  $G$ ,  $B$  имеем:

$$D(X_j, X_i) = \sqrt[2]{(X_{Ri} - X_{Rj})^2 + (X_{Gi} - X_{Gj})^2 + (X_{Bi} - X_{Bj})^2}, \quad (3)$$

где  $X_{Ri}$ ,  $X_{Rj}$  — значение канала  $R$  объекта  $i$  и  $j$ ;  $X_{Gi}$ ,  $X_{Gj}$  — значение канала  $G$  объекта  $i$  и  $j$ ;  $X_{Bi}$ ,  $X_{Bj}$  — значение канала  $B$  объекта  $i$  и  $j$ .

Как видно из формулы алгоритма расчета евклидова расстояния, не учитывается ориентация точек обучающей выборки в пространстве [4]. Для обучающих выборок, которые состоят из точек, равноудаленных от центра тяжести, это не имеет значения. Но для реальных обучающих выборок, в которых присутствуют точки с разными значениями цветовых составляющих  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , это приводит к увеличению количества неверно классифицированных областей аэрофотоснимков.

В качестве примера возьмем две обучающие выборки  $X_1$  и  $X_2$  (луг и дорога). Взаимное расположение точек обучающей выборки в трехмерном пространстве  $R$ ,  $G$  и  $B$  показано на рис. 1: указана произвольная точка  $N$  и два расстояния  $D(N, X_1)$  и  $D(N, X_2)$ , вычисленные по формуле (3). Расстояние  $D(N, X_1)$  меньше расстояния  $D(N, X_2)$ , и точка  $N$  будет классифицирована как класс  $X_1$ . Видно, что точка  $N$  находится ближе к классу  $X_2$  и должна быть отнесена к нему. Такая ошибка классификации вызвана тем, что обучающие выборки имеют эллипсоидное распределение точек в пространстве.

Как видно из формулы алгоритма расчета евклидова расстояния, не учитывается ориентация точек обучающей выборки в пространстве [4]. Для обучающих выборок, которые состоят из точек, равноудаленных от центра тяжести, это не имеет значения. Но для реальных обучающих выборок, в которых присутствуют точки с разными значениями цветовых составляющих  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , это приводит к увеличению количества неверно классифицированных областей аэрофотоснимков.

В качестве примера возьмем две обучающие выборки  $X_1$  и  $X_2$  (луг и дорога). Взаимное расположение точек обучающей выборки в трехмерном пространстве  $R$ ,  $G$  и  $B$  показано на рис. 1: указана произвольная точка  $N$  и два расстояния  $D(N, X_1)$  и  $D(N, X_2)$ , вычисленные по формуле (3). Расстояние  $D(N, X_1)$  меньше расстояния  $D(N, X_2)$ , и точка  $N$  будет классифицирована как класс  $X_1$ . Видно, что точка  $N$  находится ближе к классу  $X_2$  и должна быть отнесена к нему. Такая ошибка классификации вызвана тем, что обучающие выборки имеют эллипсоидное распределение точек в пространстве.

**Алгоритм расчета расстояния Махаланобиса.** Для более точной классификации аэрофотоснимков необходимо учитывать размеры области, занимаемой точками обучающей выборки, и ориентацию этой области в пространстве. Такой алгоритм впервые был сформулирован индийским статистиком Махаланобисом в 1936 г. и называется расстоянием Махаланобиса [5].

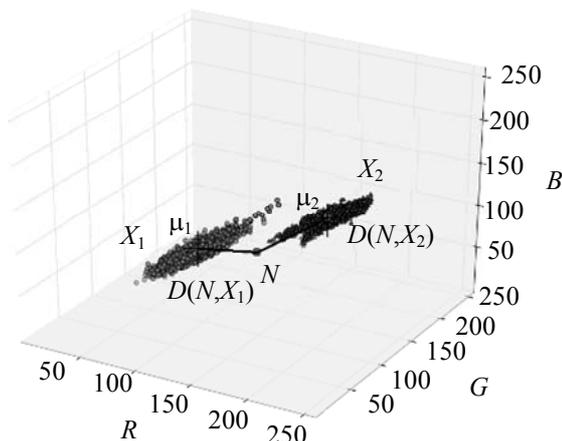


Рис. 1

Формально расстояние Махаланобиса от многомерного вектора  $\mathbf{X}=(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)^T$  до множества со средним значением  $\mu=(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N)^T$  и матрицей ковариации  $\mathbf{S}$  определяется следующим образом:

$$D_M(X) = \sqrt{(X - \mu)^T \mathbf{S}^{-1} (X - \mu)}, \quad (4)$$

где  $D_M(X)$  — расстояние Махаланобиса.

Ковариационная матрица в теории вероятностей — это матрица, составленная из попарных ковариаций элементов двух случайных векторов и являющаяся обобщением дисперсии для многомерной случайной величины. Собственные векторы и собственные числа этой матрицы позволяют оценить размеры и форму облака распределения такой случайной величины, аппроксимировав его эллипсоидом. Из рис. 1 видно, что аппроксимация эллипсоидом очень хорошо описывает массив точек обучающих выборок  $X_1$  и  $X_2$ .

Расстояние Махаланобиса — это расстояние между заданной точкой и центром тяжести, деленное на ширину эллипсоида в направлении заданной точки. Если матрица ковариации является единичной, то расстояние Махаланобиса становится равным расстоянию Евклида. Если матрица ковариации диагональная (но необязательно единичная), то получившаяся мера расстояния равна нормализованному евклидовому расстоянию.

**Оценка эффективности алгоритмов расчета расстояния.** Для оценки эффективности алгоритмов было разработано программное обеспечение, которое позволяет производить классификацию объектов на аэрофотоснимках с использованием вышеописанных алгоритмов и оценивать точность распознавания классов.

Результаты классификации по алгоритму расчета евклидова расстояния отражены на рис. 2, а, по алгоритму Махаланобиса — на рис. 2, б.

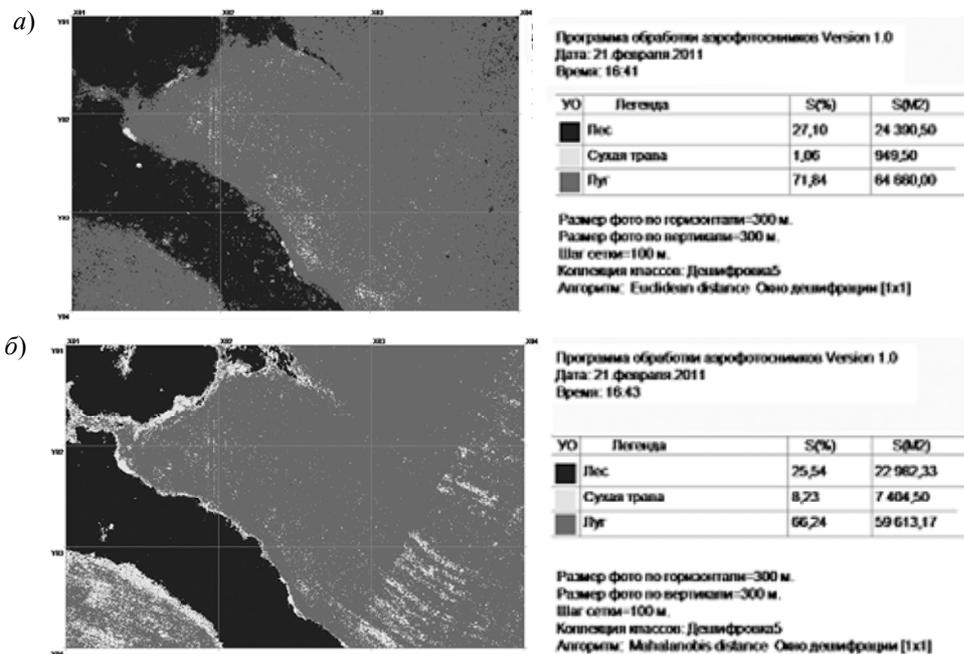


Рис. 2

Для оценки точности классификации фрагмент, показанный на рис. 2, был обработан в программе MultiSpec с использованием тех же обучающих выборок. Это обработанное фото было использовано в качестве эталона при оценке точности классификации по двум алгоритмам: построения матрицы ошибок и расчета индекса каппа-статистики.

Матрица ошибок формируется следующим образом: элемент  $X_{kl}$  матрицы ошибок равен числу пикселей класса  $k$ , распознанных как класс  $l$ . Элемент матрицы  $X_{kk}$  равен числу пикселей класса  $k$ , распознанных как класс  $k$ . Число правильно классифицированных пикселей предполагается на диагонали матрицы. На основе матрицы ошибок при обобщении результатов

правильно классифицированных точек был использован так называемый индекс каппа-статистики, вносящий поправку на случайность, он вычисляется по формуле [6]:

$$K = \frac{Z \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m X_{kl} - \sum_{k=1, l=1}^m S_k T_l}{Z^2 - \sum_{k=1, l=1}^m S_i T_j}, \quad (5)$$

где  $Z$  — общее число пикселей;  $m$  — число классов;  $S_k = \sum_{l=1}^m x_{kl}$  — сумма элементов  $k$ -строки;

$T_l = \sum_{k=1}^m x_{kl}$  — сумма элементов  $l$ -го столбца.

Дополнительно рассчитывается и общая точность распознавания классов ( $ii$ ) по следующей формуле:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^m X_{ii}}{Z}. \quad (6)$$

Кроме этого используется степень согласованности сравниваемых снимков на основе индекса каппа-статистики, представленная в таблице [7].

#### Критерии согласованности данных классификации

$K$	Согласованность
$<0$	Нет согласованности
$0-0,20$	Незначительная
$0,21-0,40$	Слабая
$0,41-0,60$	Умеренная
$0,61-0,80$	Значительная
$0,81-1,00$	Высокая

Результаты оценки точности классификации по алгоритму расчета евклидова расстояния приведены на рис. 3, а, по алгоритму Махаланобиса — на рис. 3, б.

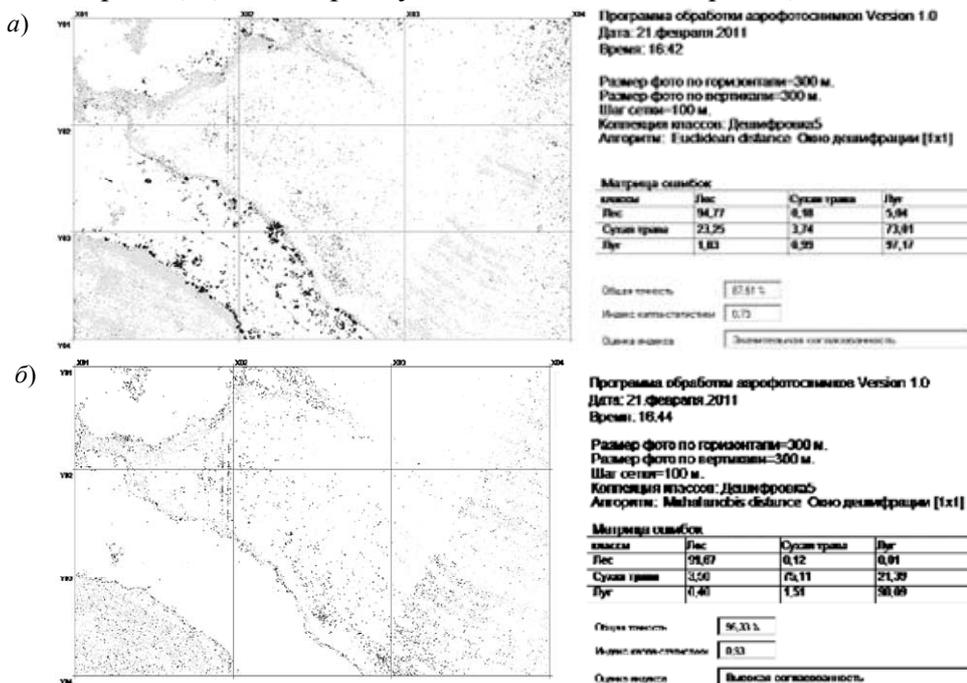


Рис. 3

Анализ матрицы ошибок показывает, что точность распознавания класса „сухая трава“ при использовании алгоритма расчета евклидова расстояния составляет всего 3,74 %, при использовании алгоритма Махаланобиса точность повышается до 75,11 %. Точность распознавания классов „лес“ и „луг“ при использовании алгоритма Махаланобиса также выше.

Для алгоритма Махаланобиса индекс каппа-статистики составил 0,93, а для евклидова расстояния всего 0,73. Следовательно, при обработке аэрофотоснимка алгоритмом Махаланобиса точность распознавания классов на 20 % лучше, чем при использовании алгоритма расчета евклидова расстояния.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что алгоритм Махаланобиса более эффективен для классификации аэрофотоснимков реальных объектов, он позволяет значительно повысить точность дешифровки различных объектов при прочих равных условиях проведения аэрофотосъемки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вандышева Н. В., Василенко Г. И., Гуров А. Ф. Мониторинг сельскохозяйственных земель на базе разно-масштабных спутниковых данных // Исследование земли из космоса. 2003. № 3. С. 73.
2. Орешкина Л. В. Обнаружение и распознавание класса объектов на многозональных изображениях дистанционного зондирования // Информатика. 2005. № 2. С. 80.
3. Пятницкий М. А. Распознавание образов и биоинформатика [Электронный ресурс]: <[http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog\\_bioinf.html](http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog_bioinf.html)>.
4. Методы кластерного анализа [Электронный ресурс]: <<http://kpi.ua/do/work/RGR/DATAMINING/clusteranalysismethods.html>>.
5. Расстояние Махаланобиса [Электронный ресурс]: <[http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние\\_Махаланобиса](http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние_Махаланобиса)>.
6. Заславский А. А., Пригарина Т. А. Оценка согласованности субъективных классификаций при заданных классах // Социология: методология, методы и математическое моделирование. 1993—1994. № 3—4. С. 90.
7. Курбанов Э. А. Оценка зарастания земель запаса республики Марий Эл по данным дистанционного зондирования [Электронный ресурс]: <<http://csfm.marstu.net/>>.

#### *Сведения об авторе*

**Игорь Владимирович Маньлов**

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения; E-mail: igorman1@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
микро- и нанотехнологий  
аэрокосмического приборостроения

Поступила в редакцию  
24.12.10 г.