

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 528.727+519.248+634.0.5

В. А. ИВАНОВ, Г. А. ИВАНЧЕНКО

(Новосибирск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АЭРОФОТОСНИМКОВ ЛЕСА

Ряд задач, решаемых на базе автоматизированного комплекса обработки изображений [1], реализованного в ИАиЭ СО АН СССР, связан с изучением и классификацией лесных участков по аэрофотоснимкам. В данной работе рассмотрены вопросы алгоритмического и программного обеспечения статистического анализа изображений лесных участков.

При создании алгоритмов использованы результаты работ [2, 3] по геометрическим вероятностям и точечным процессам. Обширная библиография, имеющаяся в указанных монографиях, позволяет не приводить подробного списка литературы.

Программное обеспечение, рассматриваемое в работе, условно можно разбить на две группы. К первой группе относятся программы, работающие непосредственно с изображениями, ко второй — программы, работающие с файлами данных на НМД, получаемыми программами первой группы.

Программы первой группы. Программа LESK. Одним из естественных путей проверки случайности распределения объектов на плоскости является проверка согласия выборочного распределения с распределением Пуассона

$$P(n, \lambda) = (\lambda^n/n!)e^{-\lambda}, \quad (1)$$

где n — число объектов на фиксированной площадке, λ — плотность объектов.

При построении выборочного распределения необходима «настройка» параметров, которая осуществляется в диалоговом режиме с визуализацией промежуточных этапов на экране телевизионного монитора. Для этого выбирается наиболее «типичный» фрагмент изображения (3×3 мм) обрабатываемого участка аэрофотоснимка; задается уровень плотности (по гистограмме), число крон на фрагменте и определяется средняя площадь кроны дерева (единицы биомассы); на обрабатываемом участке находится общее число единиц биомассы, необходимое для выбора размера фиксированной площадки и уровней дискретизации.

Выходные данные программы: распределение числа площадок с n точками, общая площадь крон, число «средних» деревьев.

Программа LESKRI. В приложениях к экологии используется теория пересечения случайных прямых с непересекающимися объектами на плоскости [2]. Объекты (кроны деревьев) пересекают секущую (прямую, проведенную через исследуемый участок) в интервалах длины l_0 , а фон — в интервалах длины l_1 . Программа для участка изображения при заданном числе секущих прямых строит распределения интервалов объекта и фона, которые могут быть использованы при оценке средних диаметров крон, расстояний между деревьями, плотности объектов (при известном распределении диаметров крон).

Программы формирования точечных полей. Следующие три программы предназначены для выделения и получения координат центров крон и их площадей с записью данных в файл на НМД. Особенности изображений лесных участков на аэрофотоснимках заключаются в возможной и значительной сомкнутости крон, в вариациях плотности крон и фона (даже на малых участках), низком разрешении и большом уровне шума. Эти особенности не позволяют полностью автоматизировать процесс выделения крон и оценки их параметров, что приводит к необходимости использования диалогового режима.

Программа LESRT. Для заданного участка изображения леса программа в диалоговом режиме позволяет найти центры крон деревьев. На экран TV-монитора выводится очередной фрагмент обрабатываемого участка; маркером отмечаются центры крон деревьев, координаты которых заносятся в буферный массив. После прохождения всего участка изображения координаты и данные о снимке записываются в файл на НМД. Программа применяется в наиболее сложных случаях при значительной сомкнутости крон и близких уровнях плотности крон и фона.

Программа LESART. Программа осуществляет полуавтоматическое выделение крон, получение оценок координат «центров тяжести» (ЦТ), площадей. Для обнаружения крон используется разбиение изображения на два класса (объекты, фон) по эталону. В качестве признака при разбиении на классы применяются выборочные значения средней плотности τ и ее дисперсии S^2 на элементарном фрагменте (ЭФ) (с минимальным размером 100×100 мкм и максимальным числом точек 20×20). За эталонные τ_0 и S_0^2 принимаются значения τ и S^2 ЭФ, указанного маркером на изображении, выведенном на экран TV-монитора.

Для разбиения обрабатываемого фрагмента на два класса по средним значениям в качестве критерия используется приближение [4]

$$\tau - \tau_0 > t_{1-\alpha}^v [(S^2 + S_0^2)^{1/2} / \sqrt{N}],$$

где $v = (N + 1) [(S^2 + S_0^2)^2 / (S^4 + S_0^4)] - 2$, N — объем выборки. Такое разбиение фрагмента на два класса в некоторой степени учитывает вариации плотности в отличие от простого разделения по уровню. Далее ЭФ, принадлежащие объектам, группируются по пороговому расстоянию от «центра тяжести» группы. Группировка позволяет во многих случаях разделить сомкнутые кроны, так как контуры в первом приближении можно представить окружностью. За центр кроны принимается «центр тяжести» группы, а за площадь — число ЭФ в группе. Для контроля найденные центры крон выводятся (в виде меток) на исходное изображение. В случае значительных ошибок оператор может, изменив параметры, повторить обработку фрагмента или использовать для обработки программу LESK. При удовлетворительном результате данные заносятся в буферный массив и осуществляется переход к следующему фрагменту. После обработки заданного участка данные о снимке (номер снимка, размер участка, число объектов), координаты и площади объектов заносятся в файл на НМД.

Программа LESARP. Программа по уровню плотности (задаваемому или определяемому по гистограмме плотностей) выделяет замкнутые объекты, вычисляет их «центры тяжести» и площадь на фрагменте изображения 3×3 мм с числом точек 256×256 . Данные о фрагменте заносятся в буфер, а после обработки всего участка записываются в файл на НМД. Программа применима для изображений с перекрывающимися объектами (разделимыми по уровню плотности с малыми ошибками).

Программы второй группы. Программы этой группы работают с файлами данных, представляющих массивы координат центров крон, полученных с изображений лесных участков.

Программа LESRRN. Пользователей прежде всего интересует вопрос: случайно ли размещение точек на изучаемом участке леса. Од-

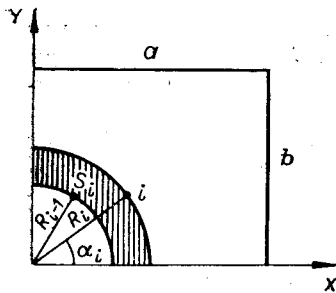


Рис. 1. Площадь S_i и угол α_i , соответствующие точке i .

ним из возможных путей является проверка согласия выборочного распределения расстояний до ближайшего соседа с теоретическим распределением расстояний случайного поля точек, порожденного пуассоновским процессом, которое имеет вид [2]

$$P(r) = 2\pi\lambda r e^{-\pi\lambda r^2}, \quad (2)$$

где λ — плотность точек на рассматриваемом участке.

Программа строит указанное выше распределение по данным о координатах точек, считываемых из файла на НМД, и находит теоретические частоты на основе соотношения (2). Для проверки согласия выборочного и теоретического распределений считается величина χ^2 . Кроме того, вычисляются среднее значение \bar{r} и среднеквадратичное отклонение от среднего S_r^2 .

Исследование полей центров крон естественного леса показало, что реальные выборочные распределения не описываются (2) (см. рис. 4), что связано с конечным размером крон для зрелого леса.

Программа PUASON. Проверка случайности размещения центров объектов менее чувствительна к размеру кроны, если рассматривать распределение площадей, связанных с объектом.

Для случайно размещенных на прямоугольной площадке со сторонами a и b точек строятся выборочные распределения площадей и углов. Предварительно точки упорядочиваются по расстоянию от начала координат до точки i , так что $R_{i-1} \leq R_i$. С каждой точкой i связана площадь S_i и угол α_i , показанные на рис. 1.

Для поля N точек в прямоугольной области распределения площадей и углов имеют вид

$$f(S) = (1/S_{cp}) e^{-S/S_{cp}} = \lambda e^{-\lambda S}, \quad (3)$$

где $S_{cp} = ab/N = 1/\lambda$, а

$$\varphi(\alpha) = (a/2b) \operatorname{tg} \alpha, \quad 0 \leq \alpha \leq \operatorname{arctg}(b/a), \quad (4)$$

$$\varphi(\alpha) = b/(2a \operatorname{tg} \alpha), \quad \operatorname{arctg}(b/a) < \alpha \leq \pi/2.$$

Для проверки согласия выборочных распределений с (3), (4) используется критерий χ^2 . Выходными данными программы являются выборочные и теоретические распределения площадей и углов, величины χ_r^2 , χ_α^2 .

Программа VOPLES. В прикладных задачах географии, экологии и т. п. широко используются клеточные модели [3, 5]. Наиболее

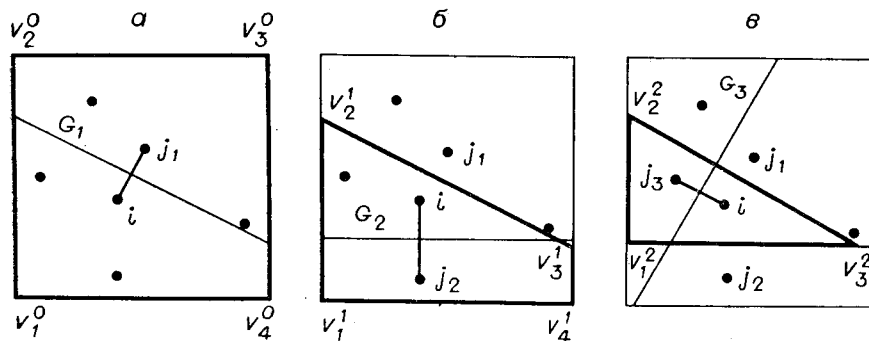


Рис. 2. Диаграмма построения полигона Вороного.

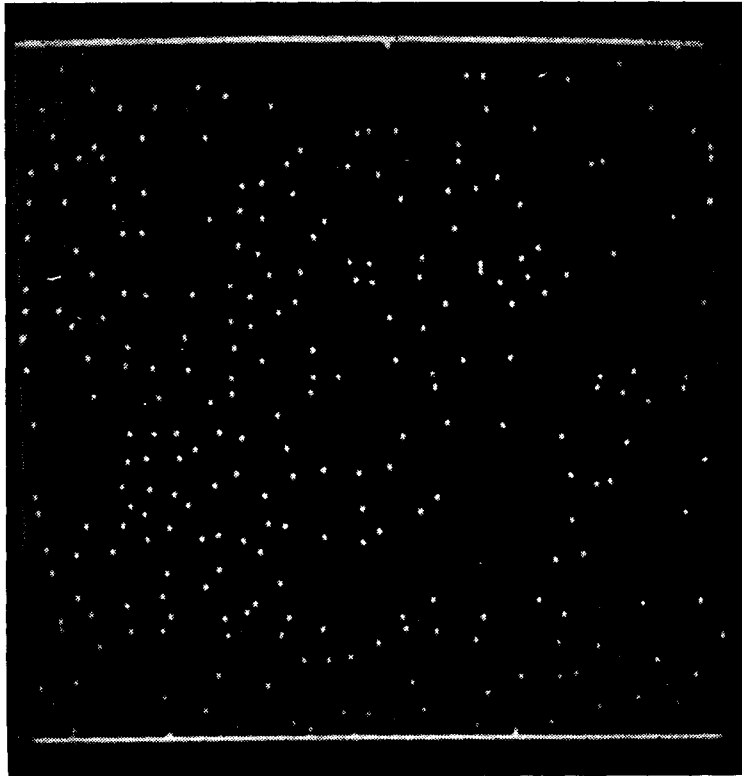


Рис. 3. Поле из 261 точки, полученное программой LESART на фрагменте изображения участка леса.

известны полигоны Вороного, позволяющие получить ряд важных распределений. Алгоритмы, предложенные рядом авторов для построения полигонов Вороного, включают $\theta N \ln N$ операций (N — число точек в области, θ — некоторая постоянная) и требуют значительного объема памяти. При реализации на мини-ЭВМ (например, ЕС-1010) целесообразно допустить алгоритмы с числом операций $\theta_1 N^2$, но с малым объемом используемой оперативной памяти.

Пусть на плоскости задано поле точечных объектов $\{a_j\}$. С каждой точкой a_i свяжем множество всех точек $x = (x_1, x_2)$ плоскости, для которых $R(a_i, x) = \min_{\{a_j\}} R(a_j, x)$, где $R(a_j, x)$ — расстояние от a_j до x . Мно-

жество всех точек x , удовлетворяющих неравенству $R(a_i, x) \leq R(a_j, x)$ ($j \neq i$), порождает полигоны Вороного V^i , которые содержат точку a_i , «закрывающую» от других точек a_j ($j \neq i$).

Предлагаемый алгоритм предназначен для построения полигонов Вороного в ограниченной выпуклой области плоскости с заданными координатами точечных объектов. Для простоты рассмотрим область в виде квадрата. Основу алгоритма составляет процедура построения полигона для любой точки множества $\{a_j\}$ без учета ранее построенных полигонов. Независимость построения полигонов приводит к $\theta_1 N^2$ операциям при построении мозаики для N точек.

Описание процедуры POLYGON. 0. Формируем начальный полигон V^0 (рис. 2, а) с вершинами V_p^0 ($p = \overline{1, 4}$), совпадающий с исходным точечным полем.

1. Вычисляем величину

$$r_i^v = \max_p \left(r^v = \sqrt{(x_i - x_p^v)^2 + (y_i - y_p^v)^2} \right) (p = \overline{1, m}),$$

где x_p^v, y_p^v — координаты вершин многоугольника V^l , m — число вершин многоугольника V^l .

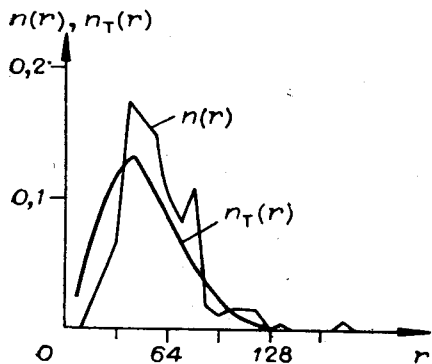


Рис. 4. Графики выборочного и теоретического распределений, полученных программой LESRRN.

Величина χ^2 для 29 степеней свободы равна 797,86, что противоречит гипотезе о случайном размещении точек. Среднее значение \bar{r} и среднеквадратичное отклонение равны соответственно 48 и 50.

2. Ищем точку j_{l+1} , такую, что $r_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$ будет минимальным для всех $j = 1, \dots, N$, кроме j_q ($q = \overline{1, l}$), для которых $r_{ij_1} \leq r_{ij_2} \leq \dots \leq r_{ij_l}$.

3. Проводим прямую G_{l+1} , проходящую через середину отрезка, соединяющего точки i, j_{l+1} , и перпендикулярную этому отрезку (для первой итерации $l=0$ — рис. 2, а); находим точки пересечения со сторонами полигона V^l . Если G_{l+1} пересекает стороны V^l , то переходим к п. 4, если нет — к п. 5.

4. Формируем новый полигон V^{l+1} (для $l=0$ — рис. 2, б, для $l=1$ — рис. 2, в) и переходим к п. 1.

5. Проверяем неравенство $r_{ij_{l+1}} > 2r_i^0$. Если неравенство выполняется, то построение полигона прекращается и переходим к п. 6, иначе переходим к п. 1.

6. Вычисляем площадь, длины граней, число соседей, периметр полигона для точки i и переходим к построению полигона для следующей точки.

Для ускорения работы процедуры при выполнении п. 2 можно не вычислять r_{ij}^2 для точек, координаты которых удовлетворяют неравенствам

$$|x_i - x_j| > r_p, |y_i - y_j| > r_p,$$

где r_p — некоторое пороговое расстояние.

Возможно также исключение пп. 1 и 5, если выход из процедуры (переход к 6) осуществлять по пороговому числу точек K_P , не дающих пересечения G_{l+1} с V^l . Введение таких эвристик позволяет уменьшить число операций, т. е. величину θ_l в $\theta_l N^2$, а возможные ошибки практически не влияют на получаемые распределения. Для реальных точечных полей число ошибок в построении одной стороны полигона не превышало 1% от общего числа точек. Рассмотренный алгоритм реализован программой VOPLES. Исходные данные программы аналогичны программам LESRRN, PUASON. Выходными данными являются распределения числа соседних точек, длин граней, площадей полигонов, периметров.

В [3] для случая пуассоновского поля приведены первые и вторые моменты указанных характеристик, распределение площадей, по-

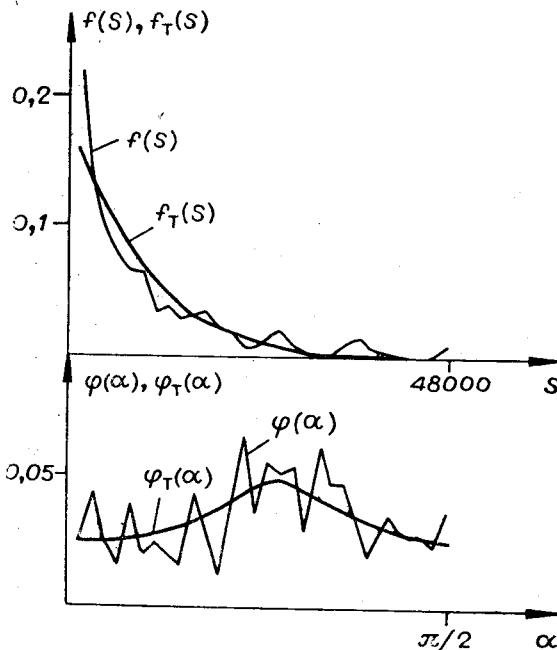


Рис. 5. Графики теоретических и выборочных распределений площадей и углов $f(S), f_T(S)$ и $\varphi(\alpha), \varphi_T(\alpha)$, полученные программой PUASON.

Величины $\chi_f^2 = 47,76, \chi_\varphi^2 = 31,90$ с $\nu = 29$ позволяют принять нулевую гипотезу с уровнем значимости 0,02.

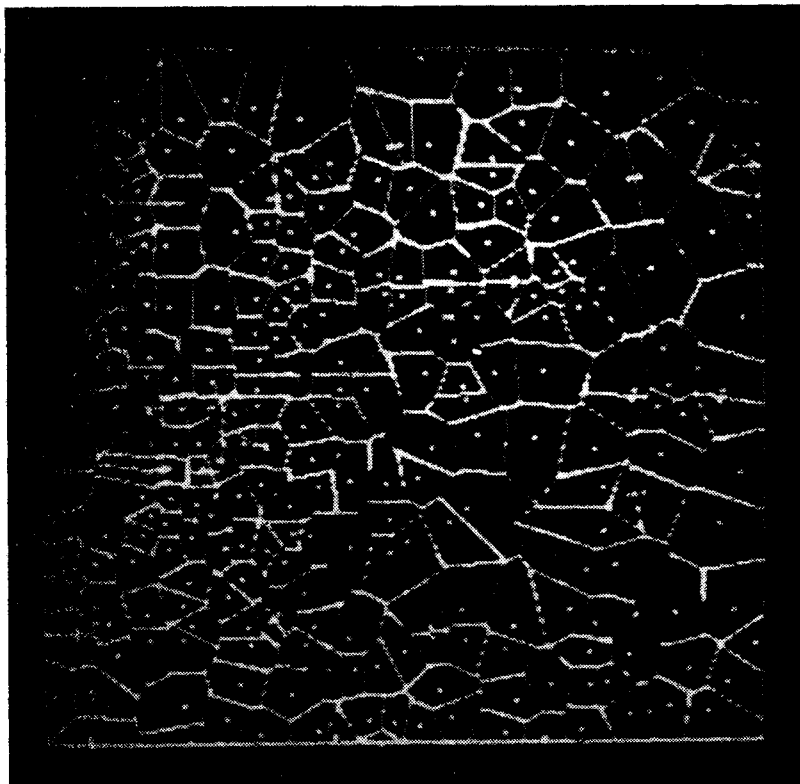


Рис. 6. Полигоны Вороного, построенные программой VOPLES.

лученное моделированием, а также возможные приложения данной программы. Применительно к изображениям лесных участков анализ полигонов Вороного для точек, представляющих центры кроны деревьев, позволяет оценить состояние леса, тенденции к группировке деревьев или регулярному размещению.

Программа GROUPK проводит выделение связанных групп в множестве данных, представляющих случайное точечное поле. Предполагается, что две точки i, j принадлежат одной группе, если расстояние $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ между ними меньше, чем некоторое пороговое расстояние P_r . Для получения «естественных» групп выбор порога очень важен.

Так как в качестве множества данных рассматривается фрагмент аэрофотоснимка леса размером $NX \times NY$, то выбор порога связан с количеством деревьев (КД) на этом фрагменте [2]:

$$P_r = K \times NX \times NY / (\pi \text{КД}),$$

где K — задаваемый параметр.

Алгоритм выделения групп заключается в следующем. Выбираем произвольно одну из точек в качестве начальной и считаем ее первой точкой группы. Затем находим все ближайшие точки, расстояние до которых от первой точки меньше порогового расстояния, и включаем их в группу. Далее берем вторую точку группы и находим все точки, ближайšie к ней (из тех, что еще не вошли в эту группу). Эту процедуру повторяем до тех пор, пока для каждой из точек группы расстояние до оставшихся будет больше P_r . Далее некоторую не включенную в группу точку считаем начальной для следующей группы и повторяем процесс формирования групп. Одновременно с выделением групп находятся координаты их центров (как центры тяжести точек, попавших в группу).

Пороговое расстояние	$P_r=53$					$P_r=75$										
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	8	9	11	13	48
Число точек в группе																
Число групп	133	44	5	5	1	57	15	8	4	5	2	2	1	1	1	1

Для точечного процесса Пуассона можно указать среднее число групп всех размеров на единицу площади [3]:

$$C \simeq (\pi P_r^2 \lambda^2) / \exp(\pi P_r^2 \lambda - 1),$$

где λ — плотность точек.

Выходными параметрами программы для различных пороговых расстояний являются следующие характеристики групп: число элементов, координаты центров, средний радиус и среднее квадратичное отклонение радиуса для каждой группы, среднее расстояние между точками группы и среднее квадратичное отклонение этого расстояния.

Программа позволяет проводить анализ точечных случайных полей на групповое размещение, что имеет важное значение для оценки состояния и прогнозирования развития леса.

Таким образом, разработано математическое обеспечение первичного статистического анализа аэрофотоснимков леса, применимое и к другим изображениям точечных объектов.

Результаты работы некоторых программ иллюстрируются рис. 3—6, таблицей, в которой представлены распределения групп для различных пороговых расстояний P_r . Начальное значение может быть получено программой LESRRN или оценено как среднее значение расстояния до ближайшего соседа для случайного размещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерихин Ю. Е. и др. Автоматизированный комплекс обработки изображений.— Автометрия, 1980, № 4.
2. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности.— М.: Наука, 1972.
3. Getis A., Boots B. Models of Spatial Processes.— L.: Cambridge, 1978.
4. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами.— М.: Мир, 1973.
5. Ripley B. D. Modelling Spatial Patterns.— J. of the Royal Statist. Soc., 1977, vol. B39, N 2.

Поступила в редакцию 18 января 1982 г.

УДК 681.3.06

Н. С. ЯКОВЕНКО

(Новосибирск)

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Введение. Данная статья является развитием работы [1]; в ее цели входит описание организации программного обеспечения автоматизированного комплекса обработки аэрокосмической информации [2], которое реализовано на ЭВМ ЕС-1010 — управляющей ЭВМ системы.

Математическое обеспечение комплекса можно подразделить на три уровня. Базовые программные модули нижнего уровня (системное про-