

ВЫДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

А.А.Бучнев, В.П.Пяткин, Г.И.Салов

Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН

Аннотация

Предлагаются непараметрические статистические критерии для выделения структур заданной формы на аэрокосмических изображениях (АИ). Кратко обсуждаются некоторые прикладные задачи дистанционного зондирования, для решения которых эффективно использование предлагаемых критериев. Рассматриваются также вопросы, связанные с программной реализацией соответствующих алгоритмов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, цифровая обработка изображений, непараметрический статистический критерий, выделение контуров, выделение линейных элементов, программное обеспечение.

1. Статистические методы в некоторых задачах дистанционного зондирования Земли

Программа прикладных дистанционных исследований Земли из космоса обширна и разнообразна [1]. Кратко остановимся на задачах дистанционного зондирования Земли, для которых важна задача выделения линейных и кольцевых структур на АИ. Прежде всего это геологические исследования Земли из космоса. Материалы аэрокосмических съемок, показавшие повсеместное распространение линейных и кольцевых образований в структуре земной коры, обусловили широкий интерес к ним со стороны геологов. Предварительные результаты свидетельствуют о перспективности статистического подхода к выделению на АИ линейных и кольцевых структур. Так обработка аэрофотоснимков восточной части Сибирской платформы Якутской кимберлитоносной провинции показала геологически значимую корреляцию выделенной статистическим методом системы линейных элементов и типов зон разрывных нарушений [2].

Статистический метод выделения линейных и кольцевых структур на АИ оказался достаточно эффективным при решении ряда задач экологических исследований Земли из космоса. В проблеме космической охраны Земли существует настоятельная необходимость изучения процессов падения небесных тел на Землю и картирование мест их падения. Вычислительные эксперименты с реальными АИ подтверждают эффективность предложенного статистического подхода к выделению импактных кратеров на поверхности Земли [3].

Еще одна задача экологической программы исследования Земли из космоса связана с изучением и картированием сейсмоопасных регионов по данным цифровой обработки аэрокосмических изображений и комплекса наземных наблюдений. С использованием

статистического подхода была проведена автоматизированная обработка космических снимков района Спитакского землетрясения и выделены две новые крупные дизъюнктивные зоны, не совпадающие с зонами известных глубинных разломов, и, по-видимому, играющие более существенную роль в тектонической структуре территории, чем это представлялось ранее. Полученные результаты могут служить основой для разработки новой технологии выделения дизъюнктивных зон, аномальных с точки зрения сейсмоопасности. Метод должен повысить точность и достоверность картирования сейсмоопасных районов Земли [4].

2. Схема обнаружения объектов

При обработке АИ с целью обнаружения на них представляющих интерес объектов в силу целого ряда причин предпочтение отдается статистическому подходу [1,5]. Основная из них состоит в том, что вследствие случайного характера природных процессов данные дистанционных измерений (спектросовмещенные изображения) содержат много случайных вариаций, маскирующих различия значений яркости изображения в точках области объекта и в точках области фона. Случайные величины, значения которых получаются в результате измерений (наблюдений) в точках изображения, будем называть наблюдаемыми случайными величинами. В подобной ситуации надежные критерии обнаружения могут быть построены только с помощью вероятностного (статистического) подхода. При этом могут быть получены даже оптимальные критерии, если распределения вероятностей значений наблюдаемых величин в точках области объекта и в точках области фона известны заранее. Однако на практике такие условия, к сожалению, бывают очень редко. В типичной ситуации упомянутые распределения вероятностей не известны наблюдателю. Известно лишь, что они непрерывные, а присутствие объектов, интересующих исследователя, проявляется на изображении в том, что случайные величины, наблюдаемые в точках области объекта, статистически больше (или меньше) величин, наблюдаемых в точках области фона. В такой ситуации для обнаружения объектов эффективны так называемые непараметрические критерии, так как распределения статистик, используемых в этих критериях, не зависят от (неизвестных наблюдателю) распределений наблюдаемых величин, когда в поле зрения объекты отсутствуют.

Предлагается следующая схема обнаружения объектов. Последовательно (или параллельно) анализируются (почти) все возможные положения объектов, интересующих исследователя. Для каждого возможного положения решение о наличии объекта принимается по результату проверки с помощью подходящего критерия гипотезы однородности величин, наблюдаемых

соответствующим образом. Будем считать, что при исследовании каждого возможного положения объекта все наблюдаемые величины берутся в достаточно отдаленных друг от друга точках на изображении так, чтобы они могли рассматриваться как статистически независимые в совокупности, когда в поле зрения объект отсутствует.

3. Критерий для совместного обнаружения противоположащих контуров объекта

Обратимся сначала к общему случаю. Обнаружение нечетких круговых элементов - объектов, по форме близких к кругу (диску), и других достаточно широких объектов, когда предположение однородности фона даже лишь по ширине объекта не совсем реалистично, возможно путем обнаружения их контуров. При этом обнаружение представляющего интерес объекта, по-видимому, более эффективно путем совместного обнаружения двух его противоположащих контуров [5]. Все наблюдения разумно выполнять на последовательности пар нормалей к проверяемым положениям контуров в симметричных относительно этих положений точках. Пусть для $i = 1, \dots, k$ $\zeta'_{i1}, \dots, \zeta'_{im}$ и $\xi'_{i1}, \dots, \xi'_{in}$ ($m, n \geq 1$) - величины, наблюдаемые в точках на линии i -й нормали к проверяемому положению первого контура объекта соответственно по одну сторону от этого положения - в точках проверяемой области объекта и по другую - в точках области фона, а $\zeta''_{i1}, \dots, \zeta''_{im}$ и $\xi''_{i1}, \dots, \xi''_{in}$ - величины, наблюдаемые аналогично на линии i -й нормали к проверяемому положению противоположащего контура, возможно параллельного (или симметричного) первому. Если в поле зрения объект отсутствует, то величины $\zeta'_{i1}, \dots, \zeta'_{im}$, $\xi'_{i1}, \dots, \xi'_{in}$ (аналогично $\zeta''_{i1}, \dots, \zeta''_{im}$, $\xi''_{i1}, \dots, \xi''_{in}$), принадлежащие сравнительно близким точкам на изображении, будут иметь (по крайней мере приближенно) одну и ту же функцию распределения вероятностей. Для совместного обнаружения противоположащих контуров объекта достаточно проверить сложную гипотезу H_0 : для каждого $i = 1, \dots, k$ величины ζ'_{is} и ξ'_{it} и одновременно ζ''_{is} и ξ''_{it} ($s = 1, \dots, m$, $t = 1, \dots, n$) стохастически равны (объект отсутствует) при сложной альтернативной гипотезе H_1 : величины ζ'_{is} и соответственно ζ''_{is} ($s = 1, \dots, m$) одновременно либо больше либо меньше величин ξ'_{it} и соответственно ξ''_{it} ($t = 1, \dots, n$) (объект присутствует). Удобный непараметрический критерий для проверки этой гипотезы

можно построить по значениям двух пар статистик Манна-Уитни:

$$\begin{aligned} \mu_i^+ &= \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \left\{ \zeta'_{is} > \xi'_{it} \right\}, \\ \mu_i^- &= \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \left\{ \zeta'_{is} < \xi'_{it} \right\}, \\ \mu_i^{+''} &= \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \left\{ \zeta''_{is} > \xi''_{it} \right\}, \\ \mu_i^{-''} &= \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \left\{ \zeta''_{is} < \xi''_{it} \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

(здесь и ниже $I\{\cdot\}$ - индикатор события $\{\cdot\}$, равный 1 или 0 в зависимости от того, произошло или не произошло событие $\{\cdot\}$) путем "параметризации" задачи вводом (полных) групп событий A_i , B_i и $C_i = \overline{A_i \cup B_i}$. Параметризация позволяет получить более мощный критерий, чем критерий, основанный просто на суммах статистик Манна-Уитни [5]. При

$m = n = 1$ $A_i = \left\{ \mu_i^+ = 1, \mu_i^{+''} = 1 \right\}$, $B_i = \left\{ \mu_i^- = 1, \mu_i^{-''} = 1 \right\}$. В общем случае для выбора события A_i и аналогично с ним события B_i все возможные события вида $\left\{ \mu_i^+ = u_i, \mu_i^{+''} = v_i \right\}$ и $\left\{ \mu_i^- = u_i, \mu_i^{-''} = v_i \right\}$ удобно расположить в две матрицы, строки и столбцы которых перенумерованы от 0 до $m \times n$, так, чтобы номер строки события совпадал с u_i , а номер столбца с v_i . Тогда согласно (1) максимальное допустимое событие A_i (B_i) представляет собой объединение всех событий, расположенных ниже побочной диагонали первой (второй) матрицы. Наиболее подходящее же событие A_i (B_i) является, вообще говоря, подмножеством максимального допустимого события (см. также [5]). В силу подобного выбора событий A_i и B_i вероятности $P_A = P(A_i)$ и $P_B = P(B_i)$ при H_0 имеют одно и то же значение, скажем P_A^0 . Относительно вычисления P_A^0 см. [5].

Таким образом, для обнаружения контуров достаточно проверить простую гипотезу $H_0^* : P_A = P_B = P_A^0$ при сложной альтернативной гипотезе $H_1^* : P_A \neq P_B$. Несмещенный и (по крайней мере при больших k) равномерно наиболее мощный критерий для проверки этой гипотезы основан на числах

v_A, v_B, v_C осуществившихся (при всех $i = 1, \dots, k$) событий A_i, B_i, C_i соответственно. Он отклоняет гипотезу H_0^* , когда $|v_A - v_B| > h(v_A + v_B)$, где $h(v_A + v_B) = 2\lambda(v_A + v_B) - (v_A + v_B)$, $\lambda(z)$, - наименьшее целое число такое, что

$$\sum_{i=\lambda+1}^z \binom{z}{i} 2^{-z} \leq \alpha/2,$$

при этом уровень значимости критерия может получиться значительно меньше α . Относительно вычисления истинного значения его см. [5].

4. Критерий для обнаружения нечетких линейных и кольцевых элементов

Линейный элемент - это вытянутый почти в линию нечеткий и неоднородный по длине объект. Тогда как кольцевой элемент представляет собой близкое к круговому нечеткое кольцо, т.е. замкнутую нечеткую полосу. Эти объекты можно обнаружить с помощью по существу одного и того же критерия - для обнаружения полосы заданной формы. Для этого наблюдения следует выполнять на последовательности нормалей к центральной линии проверяемого положения полосы. Пусть на i -й ($i = 1, \dots, k$) нормали наблюдаются величины

$$\xi_{i1}, \dots, \xi_{in},$$

$$\zeta_{i1}, \dots, \zeta_{im}, \psi_{i1}, \dots, \psi_{in} \quad (m, n \geq 1),$$

причем величины $\xi_{i1}, \dots, \xi_{in}$ принадлежат точкам, расположенным равномерно поперек проверяемого положения полосы, ожидаемой ширины, а величины

$$\zeta_{i1}, \dots, \zeta_{im} \text{ и } \psi_{i1}, \dots, \psi_{in} - \text{точкам, находящимся по}$$

разные стороны от этого положения. Для случая линии $m = 1$. Проверяемая гипотеза H_0 заключается в том, что на каждой нормали величины стохастически равны, а альтернативная H_1 - при всех i величины $\xi_{i1}, \dots, \xi_{im}$ стохастически либо больше либо меньше, чем

$$\zeta_{i1}, \dots, \zeta_{im} \text{ и } \psi_{i1}, \dots, \psi_{in}.$$

Приведенная выше схема "параметризации" применима и здесь. При $n = m = 1$

$$A_i = \{\zeta_i > \xi_i, \zeta_i > \psi_i\},$$

$$B_i = \{\zeta_i < \xi_i, \zeta_i < \psi_i\}$$

В общем случае события A_i, B_i и C_i определяются значениями следующих статистик Манна-Уитни:

$$\mu_{i1}^+ = \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \{ \zeta_{is} > \xi_{it} \},$$

$$\mu_{i1}^- = \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \{ \zeta_{is} < \xi_{it} \},$$

$$\mu_{i2}^+ = \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \{ \zeta_{is} > \psi_{it} \},$$

$$\mu_{i2}^- = \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n I \{ \zeta_{is} < \psi_{it} \}.$$

Для выбора событий A_i и B_i также удобно ввести две матрицы всех возможных событий вида $\{\mu_{i1}^+ = u, \mu_{i2}^+ = v\}$ и $\{\mu_{i1}^- = u, \mu_{i2}^- = v\}$.

Таким образом, приходим к идентичному критерию - гипотеза H_0 отклоняется, когда $|v_A - v_B| > h(v_A + v_B)$ (см. также [5]).

Программная реализация алгоритмов обнаружения круговых и линейных объектов является частью программного комплекса по обработке аэрокосмических изображений [6]. Приведенные ниже рисунки демонстрируют работу детектора линейных элементов. На рис. 1 находится исходный аэрокосмический снимок (один



Рис. 1

из районов Томской области), переданный в ИВММГ СО РАН из Западно-Сибирского Регионального центра приема и обработки спутниковых данных через сеть ИНТЕРНЕТ. Рис. 2 иллюстрирует обнаружение линейных элементов на



Рис. 2

этом снимке. Для работы обнаружителя задаются следующие параметры: минимальная и максимальная длины линейных элементов для анализа изображения, коэффициент увеличения длины при переходе к

следующему элементу, коэффициент смещения центра окружности при анализе изображения, допустимый уровень вероятности обнаружения ложных элементов, расстояние от предполагаемого положения объекта для анализа значений пикселей изображения. На рис. 3 приведена гистограмма



Рис. 3

распределения обнаруженных объектов по углам наклона к положительному направлению оси x .

Литература

1. Дистанционное зондирование: количественный подход. //Перевод с англ. Пяткина В.П. и Юдиной О.А. под ред. А.С.Алексеева.- М.:Недра, 1983,-415с.
2. Об одном статистическом подходе к задаче автоматизированного выделения линейных элементов на аэрокосмических снимках. //Л.П.Аргунов, В.П.Пяткин ,Салов Г.И. и др. - ДАН, 1988, т.299, N 1, с.76-79.
3. Alekseev A.S., Pyatkin V.P., Salov G.I.. Crater Detection in Aero-space Imagery Using Simple Nonparametric Statistical Tests.//Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, V.179, 1993, p.793-799.
4. Особенности строения зон глубинных разломов северной Армении по данным автоматизированной обработки космических снимков.//Асмус В.В., Пяткин В.П. и др. Труды НПО "Планета" Методы и средства обработки аэрокосмических данных о параметрах природной среды. Серия В, 1991, с.151-179.
5. Салов Г.И. О мощности непараметрических критериев для обнаружения протяженных объектов на случайном фоне.// Автометрия. 1997. N 3. с. 60-75.
6. Бучнев А.А., Калантаев П.А., Пяткин В.П., ИНТРАNET- архитектура региональной интегрированной системы для обработки аэрокосмических изображений. VIII-ая Международная конференция по компьютерной графике и визуализации. ГРАФИКОН-98. Москва, 1998, с.82-85.

Сведения об авторах

Бучнев Алексей Александрович, к.т.н., с.н.с.

Родился в 1947 году. Закончил Красноярский Государственный университет, математический факультет, в 1972 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 1989 году. С.н.с. лаборатории обработки изображений Института Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН, кандидат технических наук, лауреат Государственной премии СССР(1988 год). Область научных интересов - алгоритмы и программное обеспечение машинной графики и систем обработки изображений. Автор 47 научных публикаций.

Пяткин Валерий Павлович, д.т.н., профессор, зав.лабораторией

Родился в 1939 году. Закончил факультет вычислительной техники Московского энергетического института в 1963 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 1970 году, а докторскую в 1987 году. Заведующий лабораторией обработки изображений Института Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии технологических наук России. Специалист в области обработки изображений, космической геоинформатики, ГИС- и Web- технологий. Автор 180 научных работ, в том числе 5 монографий.

Салов Геннадий Иосифович, к.т.н.,с.н.с.

Родился в 1937 году. Закончил радиотехнический факультет Львовского политехнического института в 1960 году. Защитил кандидатскую диссертацию в 1971 году. С.н.с. лаборатории обработки изображений Института Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН,, кандидат технических наук. Область научных интересов: математическая статистика, цифровая обработка изображений. Автор 32 научных публикаций.

**Лаборатория обработки изображений
Институт Вычислительной Математики и
Математической Геофизики СО РАН
630090,Новосибирск,
Проспект ак. Лаврентьева 6
Телефон.: 007-3832-342-332
E-mail: pvp@ooi.sccc.ru, baa@ooi.sccc.ru,
sgi@ooi.sccc.ru**