

УДК 504.064

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ДЕШИФРИРОВАНИЮ СНИМКОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

О. С. Бутенко, канд. техн. наук
(Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского (ХАИ))

С. И. Березина, канд. техн. наук
(Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского (ХАИ))

Г. Я. Красовский, д-р техн. наук, профессор
(Институт проблем национальной безопасности
РНБО Украины)

Рассмотрены новые методологии детального анализа обработки космических снимков, которые заключаются в иерархическом построении данных изображений в виде критериальных деревьев, а также в использовании фрактального анализа и нечеткой логики при тематическом дешифровании

Розглянуті нові методології детального аналізу космічних знімків, які полягають в ієрархічній побудові даних зображень у вигляді критеріальних дерев, а також у використанні фрактального аналізу і нечіткій логіці при тематичному дешифруванні

New methodologies of the detailed analysis of treatment of space pictures which consist in the hierarchical construction of these images as criterion trees are considered, and also in using of fractal analysis and fuzzy logic for the thematic decoding

Введение

Классический способ тематического дешифрования, а особенно совместный анализ снимков одной и той же территории, полученных в разные моменты и с различным пространственным разрешением — затруднителен. Поэтому был предложен способ иерархического построения данных изображений в виде критериальных

© О. С. Бутенко, С. И. Березина, Г. Я. Красовский, 2008

деревьев, заключающийся в рекурсивном разбиении негомогенные подматриц до степени гомогенности.

В качестве критериев разбиения используются признаки, имеющие различные приоритеты, согласно которым в соответствие каждому из блоков (подматриц) ставятся весовые коэффициенты из интервала от 0 до 1. Анализ снимков, основанный на построенных квадродеревьях, является наиболее целесообразным, поскольку предусматривается анализ не всего снимка, а только той его части, которая согласно априорным данным представляет наибольший интерес. Однако для сравнения двух снимков, полученных из разных источников решено разбивать снимок на ячейки по географическим координатам, что дает возможность привязки объектов с точностью до 60 сантиметров без применения сложного математического аппарата.

Анализ квадродеревьев эталонного снимка и квадродерева, построенного на новом снимке (в частности оверлейные операции) дает возможность обнаружения различных изменений (несовпадений), расчет площади этих изменений, точное определение координат и пр. После проведения процедуры камерального дешифрирования можно сделать вывод о характере изменения, и с учетом разницы во времени съемок данной территории выдать прогноз о скорости передвижения, направлении перемещения и возможной зоне распространения пятен различной этимологии.

Наличие не 2-х, а более снимков позволяет проводить более качественный анализ и выдавать прогноз с более высокой степенью точности, поскольку при этом появляются дополнительные априорные данные и возможность анализа и сравнения не только эталонного снимка с остальными, но и совокупности снимков, а также произвести расчеты, связанные со временем получения снимков и проявлении изменений в этот период времени.

Следует отметить, что при поиске пересечений сегментов крупных объектов могут возникать ошибки, связанные с отсутствием сведений о топологической структуре объектов. Поэтому возникают проблемы поиска пересечения полигонов. Анализ возникших проблем затрагивает вопросы создания и комплексирования новых критериев анализа уже построенного “критериального дерева”, содержащих большое число переменных и факторов, взаимодействующих друг с другом, реагирующих на изменения каждой

другой переменной и т.п. Поэтому для решения указанных проблем предлагается использование нечеткой логики, так как “критериальное дерево” в конечном итоге представляет собой гиперграфовую структуру, и тем самым появляется возможность рассматривать в качестве вершин графа — критерий взаимосвязи дуг (ребер) графа и определения степени принадлежности какого-либо элемента к определенному объекту (в диапазоне от 0 до 1).

Таким образом, использование нечеткой логики дает возможность провести более детальный анализ критериальных элементов и их полигональных соединений с учетом всех возможных переменных и факторов, входящих в состав критериев.

Использование рассмотренных выше методов построения критериальных деревьев, методы привязки их узловых точек, а также использование фрактального анализа и нечеткой логики при тематическом дешифрировании дает большие возможности учета дополнительных дешифровочных признаков, которые при стандартных методах дешифрирования обычно отсеиваются.

Методы дистанционного зондирования Земли из космоса позволяют получать различные виды данных об объектах и явлениях в глобальном масштабе с высоким пространственным и временным разрешением. Космические снимки Земли формируют информацию о физических, химических, биологических, геометрических параметрах объектов наблюдения в различных условиях и с определенной периодичностью. Данные космических наблюдений при мониторинге Земли используются совместно с другими источниками информации. При этом обработка данных осуществляется с помощью различных ГИС технологий.

Однако использование известных ГИС-пакетов, таких как, например, ERDAS IMAGIN для решения ряда задач не всегда оправдано. Это связано, прежде всего, с большим количеством функций, которые выполняют данные пакеты (которые не всегда используются при решении определенных задач, связанных с тематическим дешифрированием), а также с высокой стоимостью этих пакетов. Актуальность и перспективность использования спутниковой информации, а также проблемы, связанные непосредственно с ее обработкой приводят к поиску новых или модернизации старых методик для изучения природных ресурсов региона и развития опасных экологических ситуаций (в данной статье

рассматриваются прибрежные зоны и водные акватории Черного и Азовского морей).

Таким образом, более целесообразна разработка отдельных специализированных модулей, основанных на ГИС-технологиях, в которых будут использованы методы, позволяющие быстро и с высокой степенью точности решать ряд задач по обнаружению, идентификации и определению качественных и количественных характеристик различного вида объектов.

В основе предлагаемого метода предлагается производить детальный анализ снимков одной и той же территории через определенный период времени. Анализ основан на построении и затем сравнении эталонного снимка со всеми последующими по принципу вычитания и геометрического анализа “квадродеревьев”. При этом подготовительный этап построения эталонного снимка включает в себя несколько блоков: блок фотограмметрической обработки, построение фототриангуляционной сети, устранения совокупности случайных факторов, построения квадратомиического дерева.

Блок фотограмметрической обработки.

В задачу анализа любого снимка, полученного с помощью аэрокосмической системы, прежде всего, входит определение его масштаба, установление количественных характеристик искажений, вызванных как внешними, случайными причинами, так и геометрией построения изображения. Математические зависимости, которые выражают основные геометрические свойства одиночного снимка, могут быть найдены на основании связи координат точек на произвольном аэроснимке с координатами соответствующих точек на горизонтальном аэроснимке и с координатами этих же точек на объекте.

Так как рассматривается участок морской поверхности, имеющей неоднородный характер, но с точки зрения рельефа практически горизонтальный, причиной изменения масштаба аэроснимка являются как заранее заданные, так и случайные отклонения оптической оси аэрофотоапарата (АФА) от вертикального положения. В общем случае масштаб изменяется не только при переходе от одной точки аэроснимка к другой, но и при изменении направления в одной и той же точке. Таким образом, масштаб аэрофотоснимка в разных его точках можно определить по известной формуле [2]

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} K^2 [(K \cos \varphi + c \sin \varphi)^2 + \sin^2 \varphi]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\text{где } K = \cos \alpha - \frac{y}{f} \sin \alpha; \quad c = \frac{x}{f} \sin \alpha$$

где K , c — постоянные величины для данной точки аэроснимка; f — фокусное расстояние АФА; φ — угол направления на снимке, связанный с соответствующим углом на местности Ψ соотноше-

нием $\operatorname{tg}(\varphi - \psi) = \frac{\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\psi}{1 + \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\psi}$; α — угол наклона аэроснимка (от-

клонение оптической оси АФА от вертикального положения); x , y — координаты точки снимка, по направлению из которой определяется значение масштаба.

В случае, когда угол наклона планового аэроснимка незначительный для определения масштаба можем использовать следующую формулу для определения масштаба планового аэроснимка в произвольной точке по направлению φ :

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left\{ 1 - \frac{\alpha}{f} \left[y(1 + \sin^2 \varphi) + \frac{1}{2x} \sin 2\varphi \right] \right\}, \quad (2)$$

$$\text{где } K = 1 - \frac{y}{f} \alpha, \quad c = \frac{x}{f} \alpha.$$

Смещение точки на снимке δ_r , вызванное его наклоном вызванное углом можно компенсировать с помощью соотношения

$$\delta_r = -\frac{r^2 \sin \varphi \sin \alpha}{f - r \sin \alpha \sin \varphi}, \quad (3)$$

r — радиус-вектор, который соединяет точку нулевых искажений с произвольной точкой наклонного снимка

Для проведения дальнейшей фотограмметрической обработки необходимо знать параметры, определяющие положение плоскости аэрофотоснимка относительно центра проекций S , (элементы внутреннего ориентирования), к которым относятся координаты главной точки аэрофотоснимка x_0 , y_0 и фокусное расстояние объектива аэрофотоаппарата f , и параметры, определяющие положение аэрофотоснимка в пространстве в момент фотографирования в общей системе координат на местности, (элементы внешнего ориентирования) к которым относятся X_s , Y_s , Z_s — координаты точки фотографирования; α — продольный угол наклона аэроснимка; ω — поперечный угол наклона аэроснимка; χ — угол поворота аэроснимка.

Приближенные значения элементов внешнего ориентирования с невысокой точностью должны быть указаны в комментариях к снимку.

Для вычисления поправок к заданным элементам ориентирования воспользуемся формулами, выражающими зависимость между координатами x и y точки снимка и координатами X , Y , Z соответствующей точки местности:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}; \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где x_0 , y_0 — координаты главной точки аэрофотоснимка.

Поскольку приближенные значения элементов ориентирования снимка известны, то координаты x и y изображения опорных точек на снимке легко вычисляются по данным формулам и обозначаются через (x) и (y) . Очевидно, вычисленные координаты будут отличаться от измеренных. Обозначая исправления к приближенным значениям элементов ориентирования через δx , δy , δz , $\delta \alpha$, $\delta \omega$, $\delta \chi$, δf , δx_0 и δy_0 и считая, что имеем избыточные измерения, составим уравнения исправлений:

$$\begin{aligned}
 (x) + \frac{\partial x}{\partial X_s} dX_s + \frac{\partial x}{\partial Y_s} \delta Y_s + \frac{\partial x}{\partial Z_s} \delta Z_s + \frac{\partial x}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial x}{\partial \omega} \delta \omega + \\
 + \frac{\partial x}{\partial \chi} \delta \chi + \frac{\partial x}{\partial f} \delta f + \frac{\partial x}{\partial x_0} \delta x_0 \frac{\partial x}{\partial y_0} \delta y_0 - x = v,
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 (y) + \frac{\partial y}{\partial X_s} \delta X_s + \frac{\partial y}{\partial Y_s} \delta Y_s + \frac{\partial y}{\partial Z_s} \delta Z_s + \frac{\partial y}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial y}{\partial \omega} \delta \omega + \\
 + \frac{\partial y}{\partial \chi} \delta \chi + \frac{\partial y}{\partial f} \delta f + \frac{\partial y}{\partial x_0} \delta x_0 \frac{\partial y}{\partial y_0} \delta y_0 - y = v'.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Уравнения решаются при условии $[pv^2 + p'v'^2] = \min$ методом последовательных приближений. Для этого сначала измеряют координаты опорных точек на аэроснимке. Потом по приближенному значению элементов ориентирования (начальное приближение) вычисляют координаты (x) и (y) тех же опорных точек на снимке и коэффициенты уравнений исправлений. Решают уравнения исправлений, в результате чего получают исправление к начальному приближению. Введя эти исправления, получают первое приближение неизвестных. Используя первое приближение, снова вычисляют величины (x) и (y) и коэффициенты уравнений исправлений. Составляют новые уравнения исправлений, в результате решения которых получают исправление к первому приближению и второе приближение неизвестных.

Вычисления продолжают до тех пор, пока исправления станут меньше допустимого значения. Если элементы внутреннего ориентирования указаны в комментариях к снимку, то в уравнениях будет только шесть неизвестных, для определения которых необходимо иметь не менее трех опорных точек.

После уточнения элементов внутреннего ориентирования пересчет экранных координат в географические и наоборот производится численными методами. На рис. 1 представлен снимок г. Евпатории, приведенный к географическим координатам. Для сравнения он наложен на векторную карту.

Устранение совокупности случайных факторов связано с необходимостью приведения снимков к единому виду, т. е. предвари-



Рис. 1. Снимок Евпатории, приведенный к географическим координатам.

тельной обработки снимков, направленной на устранение различных искажений изображения обусловленных: несовершенством регистрирующей аппаратуры; влиянием атмосферы; помехами, связанными с передачей изображений по каналам связи; геометрическими искажениями, связанными с методом космической съёмки; условиями освещения подстилающей поверхности и другими факторами. Тематическая обработка космических снимков — это комплекс операций со снимками, который позволяет извлечь из них информацию, представляющую интерес с точки зрения решений различных тематических задач.

Применяемая при обработке космических снимков пространственно-частотная фильтрация изображения заключается в разложении исходного изображения в спектр пространственных частот, устранении гармоник, обусловленных помехами, и обратном преобразовании сигнала. Для расчёта пространственного спектра могут использоваться различные спектральные преобразования: Фурье, Адамара, косинусов и др. При этом используют специально разработанные алгоритмы, удобно реализуемые на ЭВМ и сокращающие время вычислений: быстрое преобразование Фурье (БПФ), быстрое преобразование Адамара (БПА) и т. д. Для устранения

случайных помех чаще всего применяют низкочастотную фильтрацию. В этих целях разработан ряд эвристических алгоритмов, обеспечивающих сглаживание изображений, например алгоритм медианной фильтрации, различные усредняющие фильтры и др. Для реализации алгоритмов фильтрации исходное изображение обрабатывают скользящим окном, форма и размеры которого определяются характером и параметрами устраняемых шумов [3].

Однако после такой обработки происходит размыв границ и в связи с этим необходимы дополнительные операции по их наведению. Также удаляются характерные мелкомасштабные признаки, которые не связаны с дефектами снимка, что усложняет процесс дешифрования.

Построение квадродерева.

В геоинформационных системах широко распространена растровая модель данных. Растры применяются для хранения и обработки данных дистанционного зондирования, для представления цифровых моделей рельефа, при визуализации геоданных и т.д. Существует множество вариантов кодирования растровых структур. Некоторые из них более экономно расходуют память, другие позволяют получать более быстрые алгоритмы.

Классический способ тематического дешифрования, а особенно совместный анализ снимков одной и той же территории, полученных в разные моменты времени и с различным пространственным разрешением — затруднителен. Поэтому был предложен способ иерархического построения данных изображений в виде критериальных деревьев, заключающийся в следующем.

В основу разбиения положен порядок сканирования Мортонa [4], заключающийся в иерархическом разбиении на квадранты. Мортон предложил принцип сканирования ячеек таким образом, чтобы охватить линией обхода эти двумерные пятна (рис. 2). Для растра размером 2×2 применяется обычный порядок сканирования. На следующем уровне матрица размера 4×4 складывается из четырех матриц размера 2×2 , расположенных в таком же порядке, как ячейки матрицы 2×2 . Аналогично формируется линия сканирования любой матрицы порядка $2n$. Матрица формируется уровень за уровнем, повторяя один и тот же шаблон размера 2×2 .

Географические объекты образуют на растровом изображении различные по своей структуре неоднородные пятна, занимающие

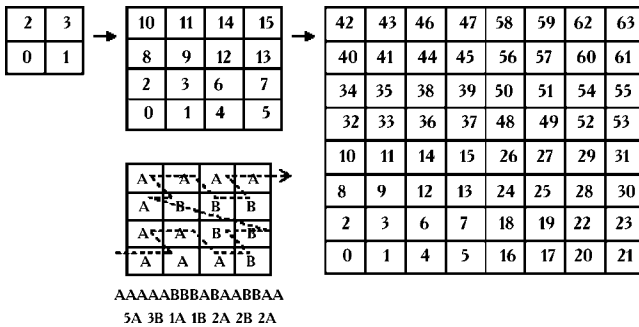


Рис. 2. Порядок сканирования растра по Мортону.

определенную площадь. Географические данные обычно автокоррелированы. Предлагается разбиение снимка на квадранты с последовательной индексацией по Мортону до тех пор, пока внутри квадранта не будет достигнут уровень гомогенности (т. е. содержание одинаковых ячеек). Таким образом, происходит рекурсивное разбиение негетерогенных подматриц (квадрантов и подквадрантов) до тех пор, пока не достигнем гомогенности всех подматриц. Таким способом получим адаптивное разрешение растрового изображения, где участки с меньшей плотностью информации представлены крупными блоками ячеек, а с большей плотностью — мелкими блоками ячеек (рис. 3).

В качестве критериев разбиения используются признаки, имеющие различные приоритеты, согласно которым в соответствие каждому из блоков (подматриц) ставятся весовые коэффициенты из интервала от 0 до 1. Например, 1-й признак — явные дешифровочные признаки из набора стандартов (земля — вода и пр), 2-й признак — наиболее вероятные зоны загрязнения по большинству факторов (загруженные трассы, скопление различных предприятий и пр.), следующим признаком может служить зона с меньшим количеством факторов и т. д. То есть каждому фрагменту, являющемуся элементом определенной зоны присваивается свой собственный атрибут в соответствии с вероятностью попадания в наиболее опасную зону и каждому узлу зоны — свой пространственный индекс. Минимальный элемент разбиения в дальнейшем будет именоваться как критериальный элемент, т. е. элемент разбиения, зависящий от наибольшего количества факторов

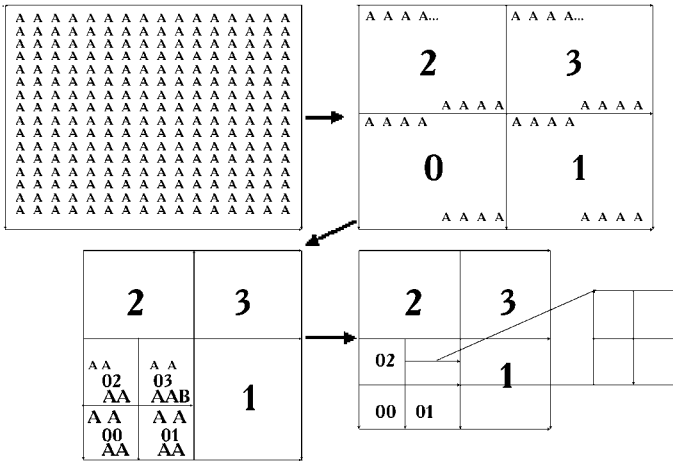


Рис 3. Разбиение раstra на гомогенные блоки.

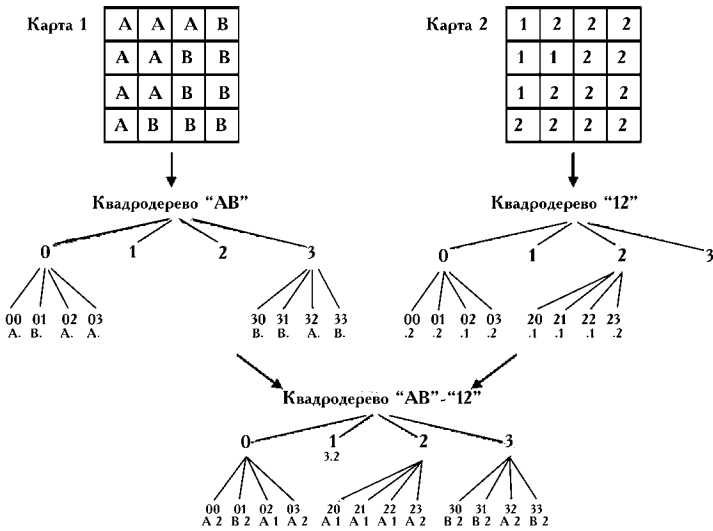


Рис. 4. Оверлейная операция на квадродереве.

разбиения (переменных) явно и неявно выраженных. При сканировании растра по Мортону линия сканирования представляет собой фрактал, что позволяет использовать при идентификации объектов и прогнозировании различных ситуаций элементы фрактального анализа. Такой подход к организации данных позволяет получать быстрые способы доступа к пространственным данным, производить операции вычисления площади, реализовывать оверлейный алгоритм и алгоритмы определения смежности ячеек (рис. 4).

Анализ снимков, основанный на построенных на построенных квадродеревьях, является наиболее целесообразным, поскольку предусматривается анализ не всего снимка, а только той его части, которая, согласно априорным данным, представляет наибольший интерес. Однако для сравнения двух снимков полученных из разных источников решено разбивать снимок на ячейки по географическим координатам. И затем использовать такие критериальные деревья для взаимного анализа. Пример разбиения на ячейки для сканирования по Мортону представлен на рис. 5.



Рис. 5. Пример разбиения снимка на ячейки по географическим координатам.

Построение фототриангуляционной сети

Для проведения анализа влияния рельефа морского дна на дешифровочные признаки изображения необходимо построение

фототриангуляционной сети. Для этого воспользуемся известными методами [5].

Все сети строят исходя из общего принципа геодезии — от общего к частному. Сначала создается редкая сеть пунктов (в данном случае в характерных точках рельефа), координаты которых определены с высокой точностью. Затем эта сеть стужается сетями с меньшими расстояниями между узлами, однако координаты пунктов этих более плотных сетей определялись соответственно с меньшей точностью. Такой принцип построения позволяет обеспечить нужный участок пунктами с известными координатами такой плотности, которая необходима для производства различных работ и решения других важных проблем (наука, проблемы экологии, метеорология, навигация, поиск полезных ископаемых, задачи обороны страны и т. д.).

Построение лоций на снимке в виде отдельного слоя по опорным точкам рельефа морского дна.

Для сохранения дешифровочных признаков откажемся от общепринятых методов трансформирования аэрофотоснимков. И будем строить квадродеревья по географическим координатам, а информацию о гомогенности получать непосредственно из нетрансформированных снимков.

Для построения сети и соответственно привязки узловых точек сети к координатам опорных точек использует принцип аналитического трансформирования, заключающийся в вычислении координат точек горизонтального снимка по измеренным координатам наклонного снимка. При уточненных элементах ориентирования получим последовательно матрицы поворотов на каждый из угловых элементов внешнего ориентирования.

При повороте снимка на угол ω получим матрицу поворота [1]

$$A_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Соответственно при повороте на углы α и χ получим матрицы поворотов

$$A_{\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$A_{\chi} = \begin{bmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Общая матрица поворотов получается последовательным перемножением матриц отдельных поворотов

$$A = A_{\alpha} A_{\omega} A_{\chi}. \quad (10)$$

Перемножив последовательно матрицы A_{α} , A_{ω} и A_{χ} , найдем значения направляющих косинусов для системы поворотов на углы α , ω , χ , наклонного аэроснимка при преобразовании его в горизонтальный:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \cos \alpha \cos \chi - \sin \alpha \sin \omega \sin \chi \\ a_2 = -\cos \alpha \sin \chi - \sin \alpha \sin \omega \cos \chi \\ a_3 = -\sin \alpha \cos \omega \\ b_1 = \cos \omega \sin \chi \\ b_2 = \cos \omega \cos \chi \\ b_3 = -\sin \omega \\ c_1 = \sin \alpha \cos \chi + \cos \alpha \sin \omega \sin \chi \\ c_2 = -\sin \alpha \sin \chi + \cos \alpha \sin \omega \cos \chi \\ c_3 = \cos \alpha \cos \omega \end{array} \right. \quad (11)$$

При малых значениях углов α , ω , χ , когда полученные зависимости раскладывают в ряд Тейлора, значения углов α , ω , χ

принимают следующие приближенные значения:

$$\begin{array}{lll} a_1 \approx 1; & a_2 \approx -\chi; & a_3 \approx -\omega; \\ b_1 \approx \chi; & b_2 \approx 1; & b_3 \approx -\alpha; \\ c_1 \approx \omega; & c_2 \approx \alpha; & c_3 \approx 1. \end{array}$$

В матричной форме записи рассмотренные выражения можно представить [1]:

$$\|A\| = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$\|A\|^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Анализ каталогов снимков.

Всякий последующий снимок, полученный через определенный период времени, должен быть подвергнут аналогичной обработке. Анализ квадродеревьев эталонного снимка и квадродерева, построенного на новом снимке (в частности операции наложения, вычитания и т. д.) дает возможность обнаружения различных изменений (несовпадений), расчет площади этих изменений, точное определение координат и пр. После проведения процедуры камерального дешифрирования можно сделать вывод о характере изменения, и с учетом разницы во времени съемок данной территории выдать прогноз о скорости передвижения, направлении перемещения и возможной зоне распространения пятен различной этимологии.

Наличие не 2-х, а более снимков позволяет проводить более качественный анализ и выдавать прогноз с более высокой степе-

ню точности, поскольку при этом появляются дополнительные априорные данные и возможность анализа и сравнения не только эталонного снимка с остальными, но и совокупности снимков, а также произвести расчеты, связанные со временем получения снимков и проявлении изменений в этот период времени.

Следует отметить преимущества использования пространственных индексов, построенных на деревьях, которые более эффективны по сравнению с независимым упорядочиванием объектов по их плановым координатам, так как в этом случае учитывается пространственный характер данных. Однако индексирование деревьями наиболее целесообразно для мелких объектов (особенно для точек). Большим объектам обычно соответствуют крупные блоки. Для них часто требуется определять пересечения с другими объектами. Но в случае, когда один и тот же объект занимает несколько ячеек или когда некоторая точка находится на границе объекта, возникает неопределенность при их расположении или взаимодействии объектов друг с другом. Например, чтобы получить оверлей двух полигонов, вначале необходимо вычислить и проанализировать все пересечения между их границами. Более того, точность представления координат сегментов в машинной форме более высока, чем погрешности оцифровки и векторизации. Поэтому при поиске пересечений сегментов полигона могут возникать ошибки, связанные с отсутствием сведений о топологической структуре объектов. Поэтому возникают проблемы поиска пересечения полигонов:

- а) пересекающиеся сегменты;
- б) ложные пересечения сегментов смежных полигонов;
- в) расщепленные полигоны.

Таким образом, необходимо так составлять оверлейные алгоритмы, чтобы различать эти ситуации. Полигоны, образуемые при оверлее двух полигонов с ошибочно векторизованными общими границами, будут расщепленными. Расщепленные полигоны могут быть устранены либо в процессе оверлейной операции, либо после ее выполнения. В большинстве коммерческих ГИС используется первый подход, заключающийся в “нечетком” представлении линий. При этом для каждой линии задается уровень толерантности, связанный с возникающей из-за ошибок векторизации неопределенностью геометрии линии. Поиск пересечений ведется для

“полос”, заданных самой линией и уровнем толерантности. Для устранения расщепленных полигонов после оверлейной операции необходимо определить критерии, по которым расщепленный полигон можно отличить от настоящего. Стандартными признаками расщепленных полигонов являются обычно небольшая площадь и вытянутая форма. Чаще всего такой объект состоит из двух дуг. Также для расщепленных полигонов характерны “перемежающиеся” атрибуты [2].

Анализ возникших проблем затрагивает вопросы создания и комплексирования новых критериев анализа уже построенного “критериального дерева”, содержащих большое число переменных и факторов, взаимодействующих друг с другом, реагирующих на изменения каждой другой переменной и т.п. Поэтому для решения указанных проблем предлагается использование нечеткой логики, основная идея которой заключается в следующем [6]. Поскольку “критериальное дерево” в конечном итоге представляет собой гиперграфовую структуру, то можно рассматривать в качестве вершин графа — критерий взаимосвязи дуг (ребер) графа. От вершины u к вершине v проводится дуга, если изменение критерия u оказывает непосредственное существенное воздействие на критерий v . И, наконец, эта дуга имеет знак плюс, если воздействие является “усилением” (при прочих равных условиях увеличение u приводит к увеличению v и уменьшение u — к уменьшению v), и знак минус, — если воздействие вызывает “торможение” (при прочих равных условиях увеличение u приводит к уменьшению v и уменьшение u — к увеличению v). Примером такого описания может служить граф, приведенный на рис. 6.

Как видно из рисунка, выносятся только предположение о том, что любой элемент лишь в некоторой степени принадлежит данному множеству. Основной способ описания нечеткого множества — определение степени принадлежности его элементов числом интервала $[0, 1]$: 1 — “принадлежит”; 0 — “не принадлежит” [6].

Нечеткое высказывание дает возможности определения степени истинности либо ложности, т. е. предположения о принадлежности какого-либо элемента к определенному объекту (в диапазоне от 0 до 1). Нечеткое высказывание, имеющее значение степени истинности, равное 0,5, является индифферентностью.

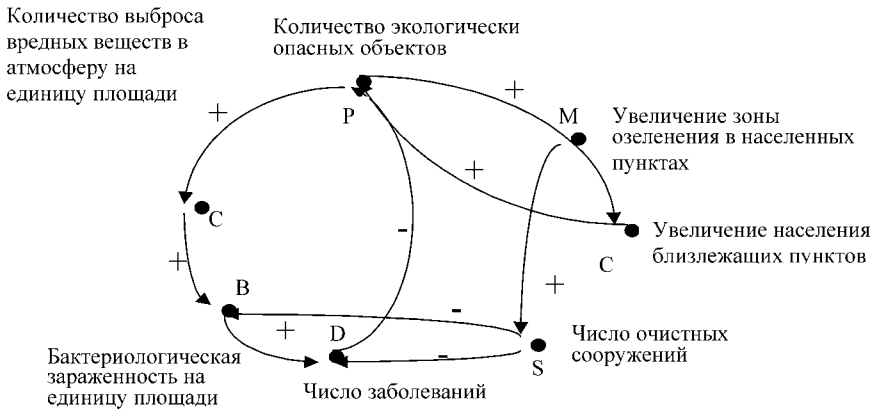


Рис. 6. Граф анализа проблем очистки от загрязнения при выбросе производственных отходов

В отличие от булевой логики, в теории нечетких множеств используется большое количество логических систем, которые позволяют представить различные варианты человеческой интуиции при приближенных рассуждениях.

Используя нечеткие множества, необходимо определить “вес” или степень, с которой окружающие объекты на изображении находятся в соотношении друг с другом. Нечеткие отношения выражают причинно-следственные связи между объектами и явлениями. При этом возможны различные бинарные нечеткие отношения, связывающее друг с другом два объекта, элемента и т. п.

Таким образом, использование нечеткой логики дает возможность провести более детальный анализ критериальных элементов и их полигональных соединений с учетом всех возможных переменных и факторов, входящих в состав критериев.

Использование рассмотренных выше методов построения критериальных деревьев, методы привязки их узловых точек, а также использование фрактального анализа и нечеткой логики при тематическом дешифрировании дает большие возможности учета дополнительных дешифровочных признаков, которые при стандартных методах дешифрирования обычно отсеиваются.

* * *

1. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике / под общ. ред. Арамановича И. Г. — М.: Наука. Гл. ред. ф.-м. лит., 1970.
2. *Попов М. А., Моисеев В. Л.* Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков: ч. 1. — К.: КВВАИУ, 1991. — 224 с.
3. *Красовський Г. Я., Петросов В. А.* Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст. — К.: Наук. думка. — 2003.
4. Алгоритмы и структуры данных геоинформационных систем: Методические указания для студентов специальности 071903 — “Геоинформационные системы” / Сост. И. В. Варфоломеев, И. Г. Ермакова, А. С. Савельев. — Красноярск: КГТУ, 2003. — 34 с.
5. *Федотов Г. А.* Инженерная геодезия. — М.: Высш. шк., 2004. — 463 с.
6. *Соколов Ю.* Применение нечетких множеств в экспертных системах и системах управления / Учебное пособие. — Харьков: “ХАИ”, 1999.

Отримано: 10.02.2008 р.