



ЭЛЕМЕНТЫ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Большая часть ГИС-технологий с точки зрения программной реализации представляет собой набор программных процедур и элементарных операций (утилит), на комбинации которых основываются способы структуризации и хранения пространственных данных в БД, преобразования данных и выполнения географического анализа.

4.1. Координатная привязка и трансформирование геоизображений

4.1.1. Пространственная привязка данных и преобразование проекций

Географическая привязка данных — первая и важнейшая процедура в создании ГИС. Позиционной базой для локализации как топографических, так и тематических элементов БД ГИС может служить либо цифровая карта-основа на исследуемую территорию, обеспечивающая привязку тематических данных с известной точностью, либо оцифрованный с высоким разрешением плановый аэроснимок (или фотоплан). Часто используют файлы координат характерных точек на территории, полученных с применением высокоточных приборов.

В зависимости от типа используемой информации пространственная привязка данных может быть двух видов:

- **прямая**, когда для позиционирования (геокодирования) данных используются географические координаты (широта и долгота), декартовы координаты; методы такой привязки являются *непрерывными*, поскольку координаты определяются по непрерывным шкалам, а их точность зависит только от точности измерительных приборов;
- **косвенная**, когда речь идет о привязке дискретных единиц земной поверхности и методы ее осуществления *дискретны*; эти методы позиционирования объекта вместо прямого указания, например, широты и долготы объекта, присваивают ему уникальный индекс — дают ключ, с помощью которого, при необходимости, можно по таблицам определить географические координаты; точность метода непосредственно связана с размером дискретного объекта, образующего основу системы географической привязки (см. раздел 4.2).

Для прямой координатной привязки двумерных растровых и векторных геоизображений, сведения разнородных пространственных данных в единую систему и интеграции их в базе данных ГИС, решения задач пространственного анализа необходимо установить систему координат — в общем случае задать геодезическую систему координат, проекцию, масштаб. После этого требуется выбрать способ преобразования (трансформирования) исходных данных в заданную систему координат. Совокупность таких процедур обычно называют **координатной привязкой** (реже калибровкой или регистрацией). Привязка производится и для того, чтобы можно было узнать географические (градусные или прямоугольные) координаты любой точки цифровой карты.

Национальные картографические службы используют определенные системы геодезических координат, задаваемые однозначно *типами картографических проекций, конкретными их параметрами, референц-эллипсоидами* и их *ориентировкой* для построения национальных опорных геодезических сетей и базирующихся на них систем топографических карт (выделенные понятия в совокупности составляют понятие Datum в английском языке).

В России используются две общеземные системы координат: ПЗ-90 и СК-42 (СК-95), а также Международная WGS-84, которая

применяется для обработки спутниковых измерений GPS. Эти системы очень близки друг к другу, о чем свидетельствуют численные значения параметров эллипсоидов, используемые в системах СК-42 (СК-95), WGS-84, ПЗ-90 (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Параметры эллипсоидов

Система	Большая полуось a	Эксцентриситет e^2
СК-42 (СК-95)	6 378 245 м	0,0 066 934 216
WGS-84	6 378 137 м	0,0 066 943 800
ПЗ-90	6 378 136 м	0,0 066 946 619

В большинстве ГИС-пакетов геодезическую систему координат и ее параметры можно выбрать из предлагаемого списка.

Различают два основных случая применения преобразования системы координат:

- когда система координат исходного набора пространственных данных должна быть изменена в соответствии с базовой системой координат ГИС;
- когда сетка прямоугольных координат, заданная системой управления дигитайзером, системой космической съемки или системой сканирования (строками и столбцами пиксельного изображения) должна быть изменена в соответствии с выбранной в БД ГИС проекцией и сеткой координат, базовой картой.

Координаты объектов (x, y) с помощью считывающих устройств задаются, как правило, в относительной системе координат (прямоугольной, полярной, растровой). Для их преобразования в географическую (φ, λ) или другую выбранную систему координат должны быть известны параметры проекции, либо координаты контрольных (опорных) точек для применения методов аналитического трансформирования.

Известно, что существует множество способов изображения криволинейной поверхности Земли на плоскости карты с использованием картографических проекций [Серапинас, 2005]. Качественный ввод информации с карт путем сканирования или ручного цифрования сохраняет проекцию, если же данные поступают из

нескольких источников, в базе данных может оказаться информация в разных системах координат.

Переход из одной картографической проекции в другую осуществляют по формулам проекций, и для распространенных проекций соответствующие стандартные программы имеются во многих ГИС-пакетах.

Для выбора оптимальной картографической проекции и координатной сетки следует определить преимущественные направления применения базы пространственных данных. Во многих базах векторных пространственных данных используют географическую (сфероидальную) систему координат (ϕ , λ), при этом параметры сфероидов могут быть разными. Часто, чтобы избежать проблем с координатной привязкой, исходные векторные слои данных рекомендуется создавать в этой системе координат, поскольку во многих ГИС-пакетах запрограммированы формулы пересчета географических координат в стандартные картографические проекции (рис. 4.1). Плоские изображения на снимках обычно не трансформируют в географическую систему координат, но это можно сделать.

Пространственную привязку иногда удобнее выполнять не в ГИС-пакете, а с использованием специализированных программ, например, такой как OziExplorer.

Часто, когда возникает потребность применения новой проекции, стоит проверить, не является ли она одним из видов стандартных картографических проекций, поддерживаемых в ГИС-пакетах, но со специфическим набором ее параметров.

В некоторых случаях, когда пользователь имеет дело с действительно новым типом картографической проекции, со своим специфическим, принципиально отличным от других, типом проектирования и, соответственно, описывающим его математическим аппаратом, требуется написание собственной программы с помощью библиотек разработчика в выбранном ГИС-пакете.

При создании ГИС городов или участков территории, отводимой под строительство крупных инженерных сооружений, вводят местную систему координат в проекции Гаусса-Крюгера с нестандартным осевым меридианом и своими размерами зоны по долготе с тем, чтобы уменьшить величины линейных искажений либо упростить их учет. При этом структура формул проекции не изменится. Во всех случаях применения местных систем координаты

геодезических пунктов могут быть пересчитаны в государственную систему плоских координат в стандартной зоне.



а



б

Рис. 4.1. Системы координат сферическая (а) и прямоугольная (б)

Для топографических карт ряда стран в шестиградусных зонах применяется проекция UTM (универсальная поперечная проекция Меркатора). Эта проекция отличается от проекции Гаусса-Крюгера

тем, что в ней на среднем меридиане масштаб равен не единице, а 0,9996. В проекции УТМ может использоваться как левая система координат (ось x направлена на север, ось y — на восток), так и правая (ось x направлена на восток, ось y — на север).

Каждой картографической проекции соответствует система координат, определяемая типом координатной сетки на карте. Преобразование географических координат в координаты прямоугольной сетки для большинства проекций также может быть выполнено по соответствующим формулам. В ряде случаев эти формулы относительно просты, особенно когда поверхность Земли предполагается сферической. Использование формул для преобразования систем координат прямоугольных сеток (в том числе дигитайзеров и сканеров) в географическую систему координат требует точного определения всех параметров проекции.

Для задания параметров необходимо знать, например, в какие зоны попадают листы карты, какие у них центральные меридианы и где проходит граница зон. Для номенклатурных листов карт номер зоны определяется по номеру листа. Если на картах нет маркировки, можно воспользоваться картами более мелкого масштаба, имеющими градусную сетку, мелкомасштабными картами, найденными в географических атласах или в Интернете.

Применение процедур координатной привязки данных требует предварительного анализа их источников. Дело в том, что масштаб исходного документа чаще всего не фиксируется в качестве атрибута набора данных, однако он является важным показателем точности. На картах одного и того же района в разных масштабах по-разному показываются одни и те же объекты, поэтому автоматическое объединение данных невозможно. Например, если большая часть исходных карт для создания БД ГИС имеет масштаб 1:250 000, а единственная карта составлена в масштабе 1:8 000 000, то при ее объединении с другими слоями пользователь может посчитать, что эти данные имеют такую же точность, что и остальные; на самом же деле они настолько генерализованы, что иногда становятся просто бесполезными.

4.1.2. Алгоритмы трансформирования геоизображений

Аналитические методы преобразования систем координат применяются для различных целей, включая:

- взаимную регистрацию карт с разными системами координат для небольших территорий (для больших территорий необходимо преобразование проекций);
- осуществление небольших преобразований проекций;
- изменение разрешения изображений в нецелое число раз;
- регистрацию данных дистанционного зондирования в прямоугольной системе координат.

Разные цели преобразования систем координат требуют применения разных методов, однако независимо от конкретного приложения включают выполнение аналогичных наборов процедур:

- 1) выбор способа трансформирования;
- 2) локализация контрольных, или опорных, точек (наземных или с карты, эталонного снимка), установка их связей в разных системах;
- 3) расчет ошибок и оценка результатов трансформирования;
- 4) создание выходного файла преобразованного геоизображения (для снимков еще выполняется переопределение значений пикселей изображения (см. раздел 8.2)).

Аффинные (линейные) способы трансформирования. Эти способы предназначены для осуществления операций параллельного переноса, изменения масштаба, поворота, зеркального отражения или их сочетаний. Их можно использовать для проектирования исходных изображений в картографическую проекцию, преобразования проекций и трансформирования сравнительно небольших областей изображения. С их помощью можно убрать небольшие искажения типа растяжения, сжатия и поворота, которые связаны со свойствами цифруемой бумажной карты.

При аффинных преобразованиях сохраняется параллельность линий. Это класс линейных преобразований, которые могут быть выполнены с помощью полиномов первой степени с 6 неизвестными коэффициентами:

$$u = a_1 + a_2x + a_3y; \quad (4.1)$$

$$v = b_1 + b_2x + b_3y,$$

где (u, v) — векторные или растровые координаты положения опорных точек до преобразования (в исходной координатной системе), а (x, y) — после преобразования (в эталонной координатной системе).

На рисунке 4.2 показано, как меняются сетки сканированного геоизображения при разных способах аффинного трансформирования.

Для привязки данных в одинаковых системах координат, но имеющих разные линейные единицы карты (например, метры и мили), для замены единиц применяют частный случай аффинного преобразования — преобразование подобия, аналогичное преобразованию масштаба. Для нахождения четырех коэффициентов уравнений преобразования требуются две опорные точки.

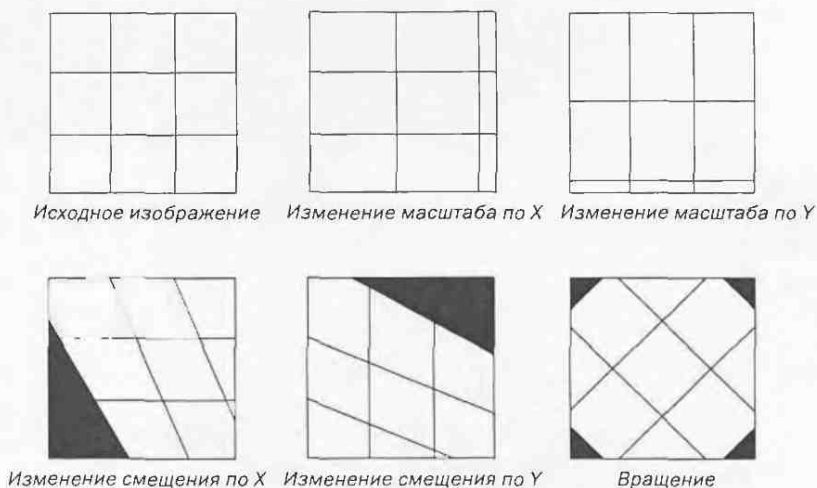


Рис. 4.2. Примеры аффинного трансформирования

Нелинейные способы трансформирования позволяют корректировать произвольные (нелинейные, несистематические) искажения изображений. Нелинейные методы трансформирования реализуются полиномами второй степени и выше. Полиномиальные уравнения n -й степени для выполнения трансформирования n -го порядка имеют следующую форму:

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6xy + \dots + a_mx^m; \quad (4.2)$$

$$v = b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6xy + \dots + b_my^m.$$

где: a_m, b_m — коэффициенты полиномов (число которых равно k), n — их степень, m — число опорных точек и $m = k/2$.

В методах трансформирования, основанных на полиномиальной аппроксимации, для нахождения коэффициентов полиномов (a_i , b_i) используют координаты наземных или снятых с эталонного снимка контрольных точек, а число коэффициентов полиномов, используемых для пересчета пары координат, связано с его степенью соотношением $k = (n + 1)(n + 2)$. Полиномы 2-й степени используют для трансформирования изображений больших территорий с учетом кривизны земной поверхности, в случае искажения данных, например, вносимых камерой, а также для преобразования географических координат (φ , λ) в прямоугольную систему. Полиномы 3-й степени используют при сканировании деформированных карт, в случаях дефектных аэрофотоснимков и для улучшения радарных изображений. Полиномы 4-й степени используют редко, обычно в случае сильно искаженных снимков.

Метод резинового листа. Часто для создания баз пространственных данных исходная информация предоставляется на листах карт неизвестных проекций. Иногда это контурные карты с неадекватными деталями проекции. В ряде случаев можно подобрать подходящую проекцию и считать ее лучшей. Альтернативным решением будет трансформирование с использованием так называемого метода резинового листа (rubber sheet), которое обеспечивает среднее из неопределенной и хорошо известной проекции, основываясь на предположении, что эти системы возможно задать некоторыми контрольными точками, положение которых известно в обеих системах координат. Такие контрольные точки аналогичны соответствию расположения объектов, которые четко распознаются на картах, представленных в разных системах.

Преобразование по методу резинового листа используется не только при слабовыраженных координатных системах и проекциях, но и для устранения значительных геометрических искажений, вызванных несовершенной регистрацией при создании карты, недостаточным геодезическим контролем исходных данных или другими причинами. Важное его приложение связано с регистрацией спутниковых изображений в географической или сеточной координатных системах, при которой геометрия проектирования поверхности Земли в систему координат космического изображения не может быть точно определена. Другая проблема связана с цифрованием

карт с помощью дигитайзера или сканера, когда соединяются или накладываются разные листы карты или необходимо устранение ошибок цифрового сканирования из-за неровностей бумаги или неплотного прижима.

Метод резинового листа основан на применении полиномиальной аппроксимации и установке связей идентичности. Связь идентичности — это связь, обеспечивающая указание одних и тех же точек местности (или точек геоизображений (рис. 4.3)). Идентичность связывает изображения подобно кнопкам, удерживающим определяемые связями местоположения. В этом случае уравнения вида (4.2) описывают нелинейные (кривые) поверхности и дают эффект наложения «резинового листа», при котором точки преобразуются неодинаково и преобразования не являются аффинными (параллельные линии становятся непараллельными, возможно кривыми). Подобные преобразования могут быть кусочно-линейными, при этом изображение делится на части, для каждой из которых применяются свои уравнения преобразований, а на границах частей уравнения должны удовлетворять требованиям непрерывности.

Обычно нелинейные преобразования обеспечивают хорошую точность, в том смысле, что координаты опорных точек верно воспроизводятся в другой системе. Однако если имеется погрешность измерений (а она в той или иной степени имеется всегда), то нелинейные преобразования могут давать большую точность для опорных точек, но меньшую точность — в среднем. В этой ситуации следует исключить точки с более низким показателем точности и повторить процесс. В любом случае число опорных точек должно удовлетворять соотношению

$$m > (n + 1)(n + 2)/2, \quad (4.3)$$

где n — степень полинома.

Этот метод может быть применен и при трансформировании в заданную картографическую проекцию при сложных формулах перехода или отсутствии необходимой программы.

Для преобразования координат цифровых аэроснимков в плановую систему координат применяют специализированное преобразование — проективное. Для нахождения восьми его параметров необходимы минимум четыре связующие точки.

4.1.3. Определение координат контрольных точек

Для регистрации двух или более наборов данных необходимо выбрать ряд опорных (контрольных, ключевых) точек, положение которых определяется на местности или на каждом из геоизображений.

В общем случае наборы контрольных точек состоят из $2N$ пар координат и разделяются на:

- исходные координаты (u_k, v_k) — координаты контрольных точек трансформируемого изображения (обычно номера строк и столбцов);
- эталонные координаты (x_k, y_k) — координаты точек карты или эталонного изображения, в проекцию которого трансформируется (или регистрируется) исходное изображение (метры, градусы или номера строк и столбцов) (рис. 4.3).

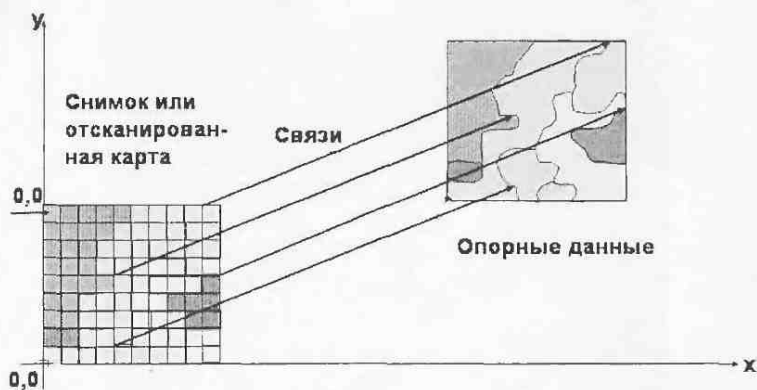


Рис. 4.3. Выбор опорных точек и установка связей

Исходные и эталонные координаты контрольных точек могут быть:

- известны априорно и существовать в виде файла или вводиться с клавиатуры;
- выбраны с помощью мыши на двух соответственных изображениях, выведенных на экран;
- выбраны по изображению на экране как исходные и считаны с бумажной карты или заданы в виде файла как эталонные.

В двух последних случаях необходима точная идентификация контрольных точек на двух источниках. Чем точнее измерены контрольные точки, тем точнее результат трансформирования, поскольку эти точки определяют точность координат всех других точек изображения. Основные правила отбора контрольных точек заключаются в следующем:

- их число должно быть достаточным для выбранного способа трансформирования;
- точки должны располагаться равномерно по всему полю изображения, чем равномернее распределение точек, тем надежнее результаты трансформирования;
- не следует использовать точки на изменчивых объектах местности, такие как берега озер или других водоемов, границы растительности и т. п.

Наборы точек на крупномасштабных изображениях могут включать перекрестки дорог, взлетно-посадочные полосы аэродрома, коммунальные магистрали, вышки или строения. Для мелкомасштабных изображений можно использовать более крупные объекты, такие как городские территории или геологические образования. Для отсканированных карт в наборы точек включают узлы координатной сетки.

Опорные точки не должны располагаться на одной прямой (требование неколлинеарности). При этом не имеет значения, к каким системам координат привязаны карты (или снимки) при цифровании. Величина разности координат после преобразования дает оценку его точности, а их пространственное распределение может указывать на недостатки моделей или свидетельствовать о том, что карта или снимок имеют неодинаковые искажения. Для учета таких ситуаций определяют число опорных точек, больше трех, и находят коэффициенты (a_r, b_r) , решая систему линейных уравнений, составленных для каждой точки, методом наименьших квадратов, минимизируя при этом величину среднеквадратических отклонений координат точек.

Часто встречается ситуация, когда на карте есть только немаркированная километровая сетка. Для привязки такой карты необходимы координаты одной или двух точек, отстоящих от линий сетки не меньше, чем на 2 мм, чтобы возможная небольшая ошибка

положения не повлияла на положение точки в квадрате сетки. Можно получить координаты точки с местности, а можно с маркированной бумажной или цифровой карты более мелкого масштаба, так как большая точность здесь не нужна (в этом случае лучше проверить по нескольким точкам).

При отсутствии градусной или километровой сетки для осуществления привязки необходимы координаты надежных опорных точек местности (точность локализации на карте отличается у разных типов объектов), расположенных близко к краям карты. Минимальное число точек — четыре (чем ближе к углам и чем больше разброс — тем лучше).

Для коррекции сложных искажений применяют трансформирование более высоких порядков, для которого требуется больше контрольных точек. Например, три точки определяют плоскость, поэтому для трансформирования 1-го порядка требуется, по меньшей мере, три контрольных точки, аналогично, для трансформирования 2-го порядка — шесть точек, 3-го порядка — 10 контрольных точек, т. е. столько, сколько коэффициентов имеет уравнение полинома для пересчета одной координаты. Таким образом, минимальное число точек, необходимое для выполнения трансформирования и удовлетворяющее соотношению (4.3), достаточно, если данные таковы, что ошибка трансформирования получается равной 0. Но практически, для получения удовлетворительного приближения число контрольных точек должно быть, по крайней мере, в два раза больше минимально необходимого, а при решении системы уравнений (4.2) для нахождения коэффициентов следует применять известный метод наименьших квадратов.

До трансформирования необходимо установить соответствие между разрешением изображений, масштабом и проекцией исходной карты.

Иногда можно вычислить географическое положение недостающих опорных точек вручную (или составив несложную программу).

Пример. Допустим, что речь идет о листе карты России масштаба 1:2 500 000 в равнопромежуточной конической проекции, оцифрованном с помощью дигитайзера или сканера (начало и расположение осей прямоугольной сетки координат определяются процессором системы управления используемого дигитайзера и сканера). Тогда

определить координаты (φ, λ) оцифрованной точки карты по координатам (x, y) можно геометрически. Для этого установим связь между парами координат прямоугольной системы и постоянными для данного листа карты параметрами проекции: углом, определяемым долготами крайнего и среднего меридианов, значениями крайних широт и длин отрезков меридианов.

Введем ряд обозначений: пусть A — произвольная точка на карте, измеренные координаты (x, y) которой нужно перевести в (φ, λ) , и $MA = \rho$, а δ — разность между долготой меридиана точки A и долготой среднего меридиана — $\delta = \alpha_{\text{пр}}(\lambda - \lambda_0)$; далее

$$MB = \rho_s = \frac{y_b - y_0}{\sin \alpha}, \quad MC = \rho_0 = \frac{y_c - y_0}{\sin \alpha}$$

выражаются через известные параметры проекции и листа карты — ρ_0 , ρ_s и α — полярный угол, образованный долготами крайнего и среднего меридианов листа карты, т. е. $\alpha = \alpha_{\text{пр}}(\lambda_1 - \lambda_0)$, где $\alpha_{\text{пр}}$ — постоянная проекции (рис. 4.4).

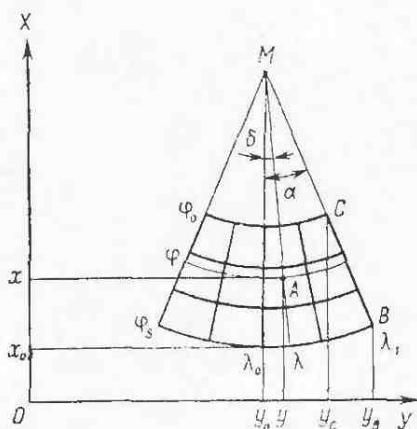


Рис. 4.4. Определение географических координат точки на карте по измеренным в системе координат устройства цифрования

Составим для точки A систему уравнений связи координат:

$$\begin{aligned} x &= \rho_s - \rho \cos \delta + x_0, \\ y &= \rho \sin \delta + y_0, \end{aligned} \quad (4.4)$$

откуда

$$\sin \delta = \frac{y - y_0}{\rho}, \quad \cos \delta = \frac{\rho_s - x + x_0}{\rho}. \quad (4.5)$$

Используя известное тождество

$$\left(\frac{y - y_0}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\rho_s - x + x_0}{\rho} \right)^2 = 1,$$

найдем

$$\rho = \sqrt{(y - y_0)^2 + (\rho_s - x + x_0)^2}. \quad (4.6)$$

Определив из уравнения (4.5) δ при найденном ρ , получим значение географической координаты λ :

$$\lambda = \lambda_0 + \arcsin \frac{y - y_0}{\rho}. \quad (4.7)$$

Для нахождения координаты φ составим пропорцию

$$\frac{\rho_s - \rho_0}{\varphi_0 - \varphi_s} = \frac{\rho_s - \rho}{\varphi - \varphi_0}, \quad (4.8)$$

откуда

$$\varphi = \varphi_s + \frac{\rho - \rho_s}{\rho_s - \rho_0} (\varphi_0 - \varphi_s). \quad (4.9)$$

Точность определения координат при таком переходе может быть оценена следующим образом: пусть средняя точность определения координат на дигитайзере соответствует $\pm 0,2$ мм, тогда для карты масштаба 1:2 500 000 получим линейную точность 0,5 км, которая в градусной мере соответствует $16''$, что приемлемо для мелкомасштабных карт.

4.1.4. Оценка ошибок трансформирования

Прежде чем выполнять трансформирование всего геоизображения, необходимо оценить, хорошо ли подходят коэффициенты полиномиальных уравнений, найденные по опорным точкам с использованием уравнений (4.2), для моделирования искажений изображения. Коэффициенты должны быть таковы, чтобы при трансформировании эталонных контрольных точек имело место минимально допустимое отклонение координат трансформированных и исходных (оригинальных) точек, т. е. ошибка трансформирования была минимально возможной. Однако, как правило,

всегда имеются погрешности в определении точек, либо нелинейные искажения изображения не позволяют определить коэффициенты. Каждая из точек влияет на качество полиномиальной интерполяции.

Величина отклонения координат, вычисляемая как расстояние между этими точками, называется *среднеквадратической ошибкой* (RMS).

Вычисление среднеквадратической ошибки. В большинстве случаев при трансформировании не требуют ни полного совпадения всех исходных и трансформированных контрольных точек, ни высокой степени полиномов. Оправданный и широко распространенный способ — установление параметра допуска среднеквадратической ошибки, определяемой как

$$D_k = \sqrt{(u_k - x_k)^2 + (v_k - y_k)^2} \quad (4.10)$$

для каждой эталонной точки.

Среднеквадратическая ошибка выражается в единицах координат исходного геоизображения — в единицах карты или в пикселах. Считается, что допустимый размер D_k эквивалентен величине радиуса окрестности каждой контрольной точки, в пределах которой ее трансформированные координаты рассматриваются как корректные. Например, если допустимое значение D_k равно 2, то трансформированный пиксел, отстоящий от исходного положения на 2 пиксела, все еще будет рассматриваться как точно локализуемый (рис. 4.5) (теоретически для растровых геоизображений среднеквадратическая ошибка должна быть меньше половины разрешения исходного изображения).

Для уменьшения величины ошибки обычно рекомендуется исключать контрольную точку с наибольшим отклонением. Но не всегда это правильно: не следует удалять такую точку, если положение ее уверенно определено или ее удаление нарушает условие равномерности распределения контрольных точек по всему геоизображению. Приемлемое значение D_k определяется пользователем в зависимости от разных факторов: принятых стандартов точности, целей использования геоизображений и их типов, точности контрольных точек и точности используемых вспомогательных данных. Рассчитать допустимую среднеквадратичную ошибку можно тремя разными способами, основываясь на:

- масштабе и картографической точности базовой карты;
- заданной вероятности ошибки;
- заданных требованиях к точности карты, создаваемой по сканированному изображению или снимку.

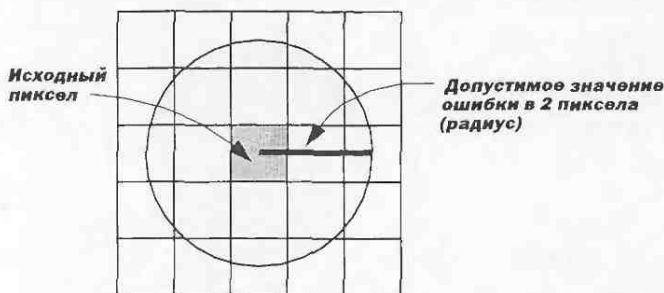


Рис. 4.5. Область допустимых значений среднеквадратической ошибки

После каждого очередного расчета коэффициентов полиномов трансформирования, опираясь на оценку полученных D_k , выполняют одну из следующих операций:

- исключают контрольную точку с наибольшим значением D_k (учитывая замечание, сделанное выше) и вычисляют новые коэффициенты полиномов по оставшимся точкам; при этом может быть достигнута приемлемая точность, иначе операцию повторяют;
- устанавливают новые параметры допуска ошибки;
- увеличивают порядок трансформирования, выполняя более сложное геометрическое преобразование изображения;
- оставляют только те точки, относительно которых имеется наибольшая уверенность, даже если их число минимально допустимое.

Помимо значений D_k для каждой контрольной точки для оценки качества трансформирования применяют и другие показатели, такие как общая среднеквадратическая ошибка трансформирования:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_k^2}, \quad (4.11)$$

учитывающая вклад каждой контрольной точки в общую ошибку.

При всех способах оценки ошибок трансформирования выполняют на основе заданных параметров их допуски.

В целом следует использовать уравнения как можно более низкого порядка из числа дающих удовлетворительный результат, поскольку влияние плохих контрольных точек резко возрастает с увеличением порядка уравнений. Также необходимо убедиться, что имеется достаточное число контрольных точек для выбранного порядка.

Установить допустимую среднеквадратическую ошибку сложнее, если приложение результатов трансформирования не очевидно. Можно прибегнуть к методу оценки приемлемой ошибки на местности, используемому для оценки точности локализации объектов на карте заданного масштаба (см. раздел 3.4).

4.2. Дискретная географическая привязка данных

Среди множества методов косвенной (дискретной) географической привязки наиболее распространены следующие:

- почтовый адрес;
- системы почтовых индексов;
- системы учета государственных земель;
- иерархические системы сеток;
- системы переписи.

Процесс привязки адреса к географическому положению называют адресным геокодированием. Точность почтового адреса как показателя географической привязки данных неодинакова: она выше для адресов квартир в городах и ниже для сельских местностей и абонентских почтовых адресов, которые означают, что объект находится в пределах обслуживания данного почтового отделения. Наиболее общий подход к использованию почтовых адресов в ГИС — побуквенное сопоставление их с адресами в списке улиц в БД, хранящимися в заданном стандарте написания. Такая процедура предусмотрена, например, в пакете ArcView и носит название "addmath". Трудности сопоставления связаны с различиями в написании и пунктуации. Ошибка сопоставления в 10 % считается приемлемой; в противном случае приходится осуществлять поиск

адреса, используя таблицы диапазонов адресов. При несовпадении номера дома с базовым осуществляется интерполяция его положения в указанном диапазоне (обычно это номера домов квартала с учетом стороны улицы).

В результате геокодирования создается графическое представление о локализации объектов — слой точек, соответствующих описанному в адресе местоположению. Совмещение этого слоя со слоем улиц позволяет использовать базы данных, не содержащие позиционную составляющую, при выполнении пространственного анализа в ГИС.

Системы почтовых индексов введены во многих странах и часто обеспечивают приемлемую точность привязки. Однако список адресов, относящихся к одному почтовому индексу, предназначен для работы почтальона, а не для карты, адреса рассматриваются как точки вдоль улицы, а не земельные участки, и в городах один индекс из 5–6 цифр может соответствовать нескольким кварталам. Тем не менее созданы специальные файлы, содержащие координаты границ территорий почтовых индексов.

Подобные системы дискретной привязки достаточно широко используются в ГИС, несмотря на наличие у них таких существенных недостатков, как невысокая точность и плохая стандартизация.

Системы учета государственных земель, иерархических сеток и переписи населения используются, например, в США. Они характеризуются минимальным стандартизированным учетным участком, положение которого на территории страны можно легко определить по специальному номеру или индексу. В системе учета земель (PLSS) по обе стороны главного меридиана территории США выделяются участки размером 6х6 миль, которые обозначаются номером и названием выбранного города в пределах участка. В системе GEOLOC GRID территория США покрывается сетью с 5-ю уровнями иерархии ячеек, каждой из которых приписывается уникальный буквенно-цифровой индекс. На верхнем уровне сеть состоит из 2-х рядов и 3-х столбцов, образуя участки размером 25° долготы и 13° широты. Система позволяет проиндексировать любой земельный участок площадью 100 акров в пределах континентальной части США. В известной системе переписи TIGER информация о населении и экономические показатели привязываются к переписным участкам,

координаты границ которых содержатся в свободно распространяемых файлах.

Интерес к созданию глобальных баз данных сводится к усилиям по созданию систем геокодирования, которые позволяют изучать пространственные явления с различной степенью детальности в сопоставимом виде для различных регионов Земли. Известно, что подходящие проекции могут быть подобраны только с некоторой долей подобия для равных площадей или подобных отклонений в пределах некоторых ограниченных областей. В схеме глобального кодирования — глобальной иерархической триангуляции — для выражения свойств земной поверхности в терминах конечных пространственных элементов (или единицах площади) можно выделить четыре свойства:

- 1) схема должна быть иерархической, так чтобы каждый элемент являлся подразделением элементов более высокого уровня;

- 2) элементы любого уровня разрешения должны быть приблизительно того же размера, где бы они ни были расположены на глобусе;

- 3) элементы любого уровня должны быть приблизительно одинаковой формы, где бы они ни были расположены;

- 4) схема должна сохранять топологические отношения корректно, особенно смежность.

Одна из простых схем, в которой использованы эти положения, предложена Даттоном, который представил глобус в иерархическом виде путем подразделения восьмигранника на треугольные области; шесть вершин восьмигранника расположены на поверхности Земли в точках северного и южного полюса и в точках с координатами 0° , 90° , -90° и 180° долготы. Октаэдр является одним из пяти регулярных многогранников, вершины которого лежат на сфере. В схеме Даттона треугольные грани подразделяются рекурсивно на четыре подтреугольника. Для треугольников с горизонтальной базой используется следующая нумерация подтреугольников: 0 для центрального, 1 для верхнего, 2 и 3 для нижних левого и правого (рис. 4.6 а). Такая система называется QTM (рис. 4.6 б). Каждый раз, когда треугольники разделяются, им присваивается код, состоящий из родительского кода, добавленного цифрами 0, 1, 2 и 3 соответственно. Естественно, что с каждым подразделением треугольники становятся все меньше и меньше. Даттон показал, что на 21-м уровне сторона треугольника

становится равной 1 м, снижаясь до 17 см на 24-м уровне. Важным свойством QTM кодов является тот факт, что длина кода может быть использована, чтобы обозначить индивидуальный уровень позиционной точности, поскольку индивидуальный код указывает на код меньшего треугольника, который надежно включается в него.

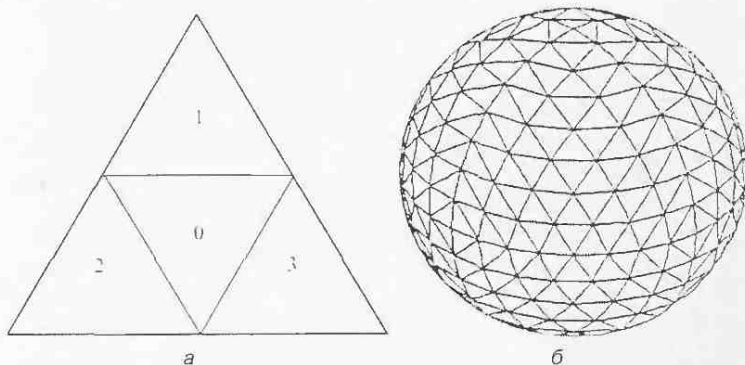


Рис. 4.6. Схема глобальной иерархической триангуляции:
а — схема Даттона; б — модель QTM

4.3. Операции с данными в векторном формате

Выше рассматривались технические вопросы ввода и визуализации пространственных данных. Рассмотрим алгоритмические методы формализации этих процессов, наиболее часто используемые в ГИС. Алгоритмы, предназначенные для выполнения технологических процедур (а не только математических вычислений), в большинстве своем основаны на эвристике и используют разные стратегии, направленные на кардинальное сокращение и упрощение поиска решений. Они часто помогают в трудно формализуемых случаях. Основная их задача заключается в построении объекта из набора координат и создании цифрового представления атрибутов и связей.

4.3.1. Представление пространственных объектов и взаимосвязей

Пространственные объекты — точки, линии и полигоны — кодируются с помощью пар координат: