



Преобразования координат при проектировании протяженных объектов

В статье дается анализ систем координат, применяемых в при проектировании протяженных объектов. Описаны проблемы протяженных объектов. Описаны способы преобразования пространственных координат. Отмечены особенности каждого способа преобразования.

Ключевые слова: протяженные объекты, проектирование, геодезические системы координат, преобразования координат



Coordinate transformation in the design of extended objects

The article describes the system of coordinates used in the design of extended objects. This article describes the problem of mapping of extended objects. This article describes how to convert coordinates. This article describes the features of the method of transformation of coordinates.

Keywords: extended objects, design, geodetic coordinate system, coordinate transformation

Введение

Современная геоинформатика решает прикладные задачи на основе интеграции наук о Земле и методов информатики [1]. Это свойство приносит большой эффект при геодезических работах [2], которые требуют интеграции геодезических измерений, геоинформационного моделирования [3] и применения спутниковых навигационных систем. С одной стороны геодезическое обеспечение проектирования и изысканий в своей основе опирается на проверенные временем и практикой методы [4-6]. В то же время развитие геоинформатике привело к внедрению новых методов – методов моделирования. При сборе пространственной информации говорят уже не о сборе данных, а о сборе геоданных [7]. Это обусловлено интеграцией измерений в геоданные и тем, что геоданные являются системным информационным ресурсом. В целом имеет место инновационный подход к применению ранее независимых технологий, что

привносит инновационную составляющую в классические методы геоинформатики [8].

Протяженные объекты в строительстве

Территория России отличается большой протяженностью наиболее широко в ней используют поперечно-цилиндрические проекции Гаусса. Это обусловило применение плоской прямоугольной системы координат Гаусса-Крюгера. В проекции Гаусса-Крюгера издается большая часть топографических карт в России. В данной проекции без искажений изображается один, осевой меридиан. Территория вне осевого меридиана искажается конформно, то есть с сохранением форм бесконечно-малых участков. По мере удаления от осевого меридиана искажения масштаба нарастают. Поэтому в данной проекции изображают территорию, расположенную вдоль осевого меридиана, шириною по долготе 6° . Территории, простирающиеся в направлении параллелей, делят на координатные зоны и изо-

бражают по частям. При этом каждая зона имеет свою систему координат, что усложняет решение задач на стыках между зонами.

Для железнодорожной магистрали проекция удобна только в том случае, если магистраль расположена в одной зоне, то есть имеет направление, близкое к направлению меридиана [9]. Осевой меридиан и экватор изображаются прямыми линиями. Ось x направлена по осевому меридиану в сторону северного полюса P , ось y – по экватору на восток. Меридианы и параллели изображаются семейством кривых $L=\text{const}$ и $B=\text{const}$. Для работы только с положительными значениями ординат y , к ним прибавляют одинаковое число (обычно 500 км).

Существующие в России железные и автомобильные дороги, линии ЛЭП, трубопроводы различного назначения могут проходить через несколько координатных зон, которые имеют значительные искажения на краях зон, что создаёт значительные проблемы при расчетах на границах зон [10]. Это исключает использование мелкомасштабных карт для анализа объектов большой протяженности (ОБП).

Один из подходов состоит в том, чтобы использовать глобальные системы координат ПЗ-90 и WGS-84 и спутниковые навигационные системы для построения цифровых моделей [11] и последующего перехода к местным координатам.

Другой подход состоит в том, чтобы создать базу данных содержащую разномасштабную классифицированную информацию [9], позволяющую работать в местных системах координат в крупных масштабах и привязывать результаты обработки к классификационной системе топографических карт в последующем. Проекция и система координат ориентированы на применение самых современных – спутниковых технологий построения опорных геодезических сетей и информационных технологий математической обработки измерений. Цифровые модели имеют преимущества перед картографическими проекциями. Они свободны от искажений, присутствующих в картографических проекциях. Они могут вычисляться в геоцентрических координатах и непрерывно преобразовываться в системы местных координат вдоль всего протяженного объекта, если в этом возникнет такая необходимость. Этим исключается зависимость от зон, которая имеет место для картографических проекций.

Однако при этом возникает проблема, обусловленная необходимостью сопоставимости старых и новых координат. Она требует сопоставимости новой проектной документации со старыми картами, хранящимися в архивах и фондах железных дорог. Это осуществляется использованием единой системы классификации, опирающаяся как на старую номенклатуру карт, и включающую систему классификации цифровых карт и цифровых моделей [9].

В соответствии с Постановлением Правительства РФ «О единых государственных системах координат» [12] до 1 января 2017 года предстоит переход на новую систему координат взамен старой, установленной в 2000 от 28 июля 2000 г. постановление №568. Это требует повышенного внимания к получению координат, преобразованию координат и использованию координат. Это весьма актуально и для мониторинга крупных и протяженных объектов. В настоящее время существует тенденция не просто использования систем координат, а создания координатной среды [13]. Это приобретает особенную актуальность при мониторинге, особенно при геотехническом мониторинге [14].

Одной из самых главных составляющих частей инженерно-геодезических изысканий является создание опорных геодезических сетей, включая геодезические сети специального назначения [15]. Специфика построения геодезических сетей в городах обусловлена многопрофильной деятельностью различных организаций, у которых возникает необходимость в получении геодезической информации и которые предъявляют различные требования к местам расположения пунктов сети, а также к точности координатных определений.

Отмеченный подход привел к тому, что на территориях многих городов стали создаваться различными ведомственными организациями независимые геодезические сети, которые в целом ряде случаев базировались на различных, слабо согласованных друг с другом координатных системах, а также на различных исходных данных. В городских и сельских поселениях, а также в районах промышленных производственных комплексов и предприятий геодезические сети развиваются в ранее принятых системах координат и высот с обеспечением связи с государственной системой координат СК 95 и Балтийской системой высот 1977 года, поэтому преобразования координат пунктов из одной координатной системы в другую – это самая массовая геодезическая задача в спутниковой геодезии.

Геодезические системы координат можно разделить на три типа:

- общеземные (WGS-84, ПЗ-90, ITRS);
- государственные (СК-42, СК-95, СК-63);
- местные системы координат.

Положение пунктов в этих системах может задаваться следующими координатами:

- пространственными прямоугольными координатами X, Y, Z ;
- геодезическими (эллипсоидальными) координатами B, L, H ;
- плоскими прямоугольными координатами x и y , вычисляемыми, в основном, в проекции Гаусса-Крюгера.

При решении специальных задач могут применяться и другие проекции эллипсоида на плоскость. При анализе протяженных объектов

различают способы преобразований пространственных прямоугольных координат и способы преобразований геодезических координат.

Способы преобразований пространственных прямоугольных координат. Способ Гельмерта. Для преобразования координат пункта из одной системы отсчета в другую чаще всего применяют формулы преобразования Гельмерта (Friedrich Robert Helmert) по семи параметрам.

Данный способ является итерационным. Он принадлежит к способам преобразования с использованием 7 параметров, так как использует три параметра взаимного линейного ориентирования, три параметра углового взаимного ориентирования и масштабный множитель, учитывающий разницу в расстояниях на поверхностях эллипсоидов.

Окончательная точность зависит в большей степени от точности линейных элементов взаимного ориентирования референц-эллипсоидов. В последние годы геодезические службы ряда стран выполнили дополнительные наблюдения с целью определения с высокой точностью величин 7 параметров. Эти величины для ряда наиболее распространенных геодезических систем стали публиковаться в открытых зарубежных источниках. Здесь надо помнить, что линейные элементы взаимного ориентирования, необходимые для расчётов модифицированным способом Гельмерта, не годятся для способа Молоденского. Отсутствие точных параметров сдерживало широкое применение способа Гельмерта. Поэтому в своё время были разработаны альтернативные высокоточные способы преобразования координат, которые не учитывали линейные и угловые элементы взаимного ориентирования или учитывали их опосредованно.

Способ Раппа. Рапп в 1981 году предложил подход к решению задач преобразования координат разработал ряд вычислительных процедур. Суть способа Раппа состоит в учете начальных азимутов геодезических систем [16]. К настоящему времени разработаны несколько вычислительных алгоритмов, реализующих способ Раппа. Однако они отличаются сложностью и применяются в основном спутниковых приемниках ГНСС. Чаще всего вычисления способом Раппа применяются в наземной геодезии в ситуациях, когда на территории одного и того же государства одновременно используются две и более астрономо-геодезические системы. Тогда, как правило, параметры их взаимного расположения известны с высокой точностью, а поэтому достигается высокая точность при переходе от одной системы координат к другой.

Способ 10 параметров (Молоденский-Бадекас). В способе преобразования координат 10 параметрами точка вращения координат выбирается из соображения достижения максимальной точности преобразования. Способ был почти одновременно предложен учеными Мо-

лоденским и Бадекасом. Поэтому в зарубежной геодезической литературе способ 10 параметров параллельно называют способом Молоденского-Бадекаса (Molodensky – Badekas). По сравнению со способом Гельмерта число параметров в этом методе увеличивается на три [16]. В силу этих причин, точность вычисления преобразованных координат способом 10 параметров выше по сравнению со способом Гельмерта. Данный способ применяется главным образом для преобразования координат на территории одного государства, использующего у себя сразу несколько геодезических систем или переходящего к использованию новой. Точность преобразования координат способом 10 параметров достигает несколько сантиметров.

Способ 14 параметров. Этот способ [17] используется для вычисления координат в рамках одной и той же геодезической глобальной геоцентрической системы. Общепринятые геодезические системы WGS-84, ITRS периодически подвергаются новому уравниванию, в результате чего у них заново вычисляются все 7 параметров для преобразования координат способом Гельмерта при переходе от одной версии к последующей. Точность преобразования по способу 14 параметров достигает нескольких миллиметров.

Способ трёх параметров Молоденского. Использование способа трёх параметров Молоденского предполагает, что оси декартовых координат геодезических систем параллельны [18]. До создания спутниковых радионавигационных систем, когда технологии применения высокоточных способов преобразования координат не были развиты, такое предположение не вызвало критики. В последние годы интерес к этому способу утрачен. Однако им можно пользоваться для работ на ограниченной территории. В частности, его можно применять для перехода от координат в системе СК-42 к координатам в отечественной системе СК-95. Преобразование этим способом аналогично способу Гельмерта, а точность достигает ± 15 м.

Способы преобразований геодезических координат.

Способ Молоденского. Академик М.С. Молоденский разработал и опубликовал в 1960 году сравнительно простой и высокоточный способ преобразования координат. В его постановке задача формулируется следующим образом [18]. Заданы две геодезические системы ГС1 и ГС2, в основе которых лежат два референц-эллипсоида с параллельными осями, с большими полуосями a_1 и a_2 , малыми полуосями b_1 и b_2 , сжатиями α_1 и α_2 и эксцентриситетами e_1 и e_2 . С первым эллипсоидом связана декартова система координат X, Y, Z , начало которой совпадает с его центром, ось Z – с осью его вращения (т.е. с малой полуосью). В этой системе координаты центра второго эллипсоида отличаются на величины $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, называемые линейными элементами взаимного

ориентирования. Дана точка с геодезическими координатами относительно первого референц-эллипсоида B_1, L_1, H_1 . Необходимо найти координаты B_2, L_2, H_2 этой же точки относительно второго референц-эллипсоида. Способ Молоденского состоит в вычислении поправок $\Delta B, \Delta L, \Delta H$, которые следует алгебраически сложить с координатами B_1, L_1, H_1 , чтобы получить искомые координаты B_2, L_2, H_2 . То есть:

$$B_2 = B_1 + \Delta B, L_2 = L_1 + \Delta L, H_2 = H_1 + \Delta H,$$

Способ Молоденского обеспечивает высокую точность и представляет собой алгоритм прямого вычисления, хотя и требует повышенной разрядности. По простоте вычислительных процедур способ Молоденского превосходит способ Гельмерта, но уступает ему в точности. За рубежом практикуют переход от локальных геодезических систем к геодезической системе WGS 84. Иными словами, в терминах постановки задачи способа Молоденского локальная геодезическая система – это $ГС_1$, а $ГС_2$ традиционно представляет систему WGS 84.

Нужно отметить два ограничения для способа Молоденского. Первое ограничение не позволяет применять его в приполярных районах. Второе ограничение связано с тем, что не всегда известны геодезические высоты H_1 для местных геодезических систем, а без значения геодезической высоты невозможно рассчитать ΔB и ΔL .

Дифференциальные преобразования. Дифференциальные формулы преобразования координат используют семь параметров преобразования и относятся к точным аналитическим способам. Дифференциальные формулы осуществляют расчёт поправок в угловых секундах к геодезической широте (B_2), к геодезической долготе (L_2), а также поправки в метрах к геодезической высоте (H_2) при преобразовании координат геодезической системы 2 в координаты геодезической системы 1. Методическая точность приведенных формул составляет несколько миллиметров. Окончательная точность зависит от точности величин параметров преобразования и от разрядности вычислений. Данный способ преобразования относится пока к точным способам.

Специальный способ преобразования. Этот способ был разработан для перехода от $ГС$ Пулково-42 к отечественной $ГС$ ПЗ 90 [19]. Он является итерационным. На первом этапе вычислений в формулы, приведенные в [19] подставляются координаты в системе $ГС$ А, чтобы получить первые приближения B_B, L_B, H_B . На втором этапе в формулы подставляются полусуммы больших полуосей квадратов первых эксцентриситетов, соответствующих координат и главных радиусов кривизны. Итерации прекращаются по достижении заданной точности вычислений. Если сравнить формулы поправок с первыми дифференциальными формулами преобразования, то

можно сделать вывод о том, что специальный способ преобразования представляет собой усеченные дифференциальные формулы без учета углов разворота осей и масштабного множителя.

Приближенный способ Молоденского. В отечественной практике преобразования координат получили развитие приближенные формулы Молоденского, которые являются упрощенными формулами более строгого решения. Приближенный способ Молоденского проще по вычислительным процедурам. Формулы приближенного способа Молоденского приведены в [16]. Анализ формул говорит о том, что в расчетах поправок к широте и к долготе геодезическая высота участия уже не принимает. Поэтому, с одной стороны, эти формулы удобны тем, что для практических расчетов вполне можно ограничиться первыми двумя поправками. С другой стороны, отсутствие геодезической высоты в расчетах ΔB и ΔL говорит о закруглении точности.

Способ Слудского. Еще более простые формулы без заметной потери точности были получены Ф.А. Слудским и опубликованы в [19]. Вычислительные процедуры по формулам Слудского по сложности аналогичны приближенным формулам Молоденского.

Регрессионный способ разработан для применения на ограниченных территориях [20]. Он относится к способам вычисления поправок и не требует знаний о линейных и угловых элементах взаимного ориентирования референц-эллипсоидов. Конкретные уравнения, разработанные на основе регрессионного подхода, уже учитывают взаимное расположение центров и осей референц-эллипсоидов. Точность регрессионного способа зависит от площади охватываемой территории и количества станций, на которых производятся определение точных координат в двух геодезических системах. Чем меньше площадь и чем чаще расположены станции, тем точнее вычисляются коэффициенты регрессионных уравнений для вычисления поправок. Например, в некоторых странах Европы с помощью регрессионного способа можно преобразовывать координаты с дециметровой точностью. Для обширных территорий, таких как Южная Америка, достигается точность не хуже ± 2 метров.

В зарубежной литературе регрессионный способ называют полиномиальным преобразованием (polynomial transformation) или MRT (Multiple Regression Transformation). Этот способ имеет разновидность, в которой полиномы преобразования содержат комплексные числа. Регрессионный способ предполагает преобразование координат в обе стороны.

Стандартный способ Молоденского. Данный способ представляет собой модификацию изложенного выше способа академика М.С. Молоденского. Модифицированный способ Молоденского получил за рубежом самое широкое применение. Более того, геодезические службы

Министерства обороны США применяют этот способ в качестве официального для расчета поправок при переходе от местных геодезических систем к WGS 84. В зарубежной литературе стандартный способ Молоденского называют "Standard Molodensky Formulas". Формулы стандартного способа обеспечивают достаточно высокую точность преобразования координат, близкую к ± 2 метрам, и поэтому их можно применять при работе в зонах действия станций дифференциальных GPS даже при небольших удалениях от них. Формулы [21] справедливы для широт не более 89° . Предполагается, что элементы, входящие в формулы стандартного способа Молоденского, есть результат вычитания из координат центра эллипсоида WGS-84 координат центра местного референц-эллипсоида.

Формулы стандартного способа Молоденского составлены при предположении, что необходимо преобразовать координаты карты в координаты системы WGS-84.

Выводы

При проектировании протяженных объектов преобразование координат является обязательным. Например, при спутниковых определениях получают координаты в системе WGS-84, а каталоги координат, в основном, в СК-42, на небольших территориях применяют местные системы координат, поэтому задача преобразования координат является актуальной. Преобразование между разными системами координат осуществляют разными методами в зависимости от условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров А.А., Цветков В.Я. Геоинформатика как важнейшее направление развития информатики // Информационные технологии. 2013. № 11. С. 2-7.
2. Куприянов А.О. Геодезическое обеспечение при строительстве трассы туннелей // Международный научно-технический и производственный журнал «НАУКИ О ЗЕМЛЕ». 2013. №1(9). С. 32-38.
3. Цветков В.Я. Геоинформационное моделирование // Информационные технологии. 1999. № 3. С. 23-27.
4. СНиП 3.01.03.84. Геодезические работы в строительстве.
5. ГОСТ 21778-81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения.
6. Руководство по расчёту точности геодезических работ в промышленном строительстве. ГУГиК при СМ СССР. М., Недра, 1979.
7. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоданные как системный информационный ресурс // Вестник Российской Академии Наук. 2014. Т. 84. № 9. С. 826–829. DOI: 10.7868/S0869587314090278.
8. Цветков В.Я. Информатизация, инновационные процессы и геоинформационные технологии. // Геодезия и аэрофотосъемка. 2006. № 4. С. 112-118.
9. Омельченко А.С. Геоинформационная база данных транспортных объектов большой протяженности: дис.... канд. техн. наук: Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог. Москва, 2006. 137 с.
10. Цветков В.Я., Омельченко А.С. Особенности построения моделей объектов большой протяженности в геоинформатике. // Фундаментальные исследования. 2006. № 4. С. 39-40.
11. Зайцева О.В. Развитие цифрового моделирования // Славянский форум. 2015. № 3(9). С.105-112.
12. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат»
13. Савиных В.П. Система получения координатно-временной информации для решения задач мониторинга // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». 2012. № 03. С. 5-10.
14. Цветков В.Я. Геоинформационный геотехнический мониторинг // Международный научно-технический и производственный журнал «НАУКИ О ЗЕМЛЕ». 2012. № 4. С.54-58.
15. СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения»
16. Комаровский Ю.А. Использование различных референц-эллипсоидов в судовождении: Изд. 2-е, перераб. и доп. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2005. 341 с.
17. John Dawson and Jim International Terrestrial Reference Frame (ITRF) to GDA94 Coordinate Transformations Steed Minerals and Geohazards Division Geoscience Australia Version 01.03.2004
18. Непоклонов В.Б., Куприянов А.О., Максимова М.В., Ханзадян М.А. Преобразования прямоугольных геоцентрических в геодезические координаты с использованием итеративных и неитеративных методов. // Славянский форум. 2015. 2(8). С. 201-215.
19. Базлов Ю.А., Герасимов А.П., Ефимов Г.Н., Насретдинов К.К. Параметры связи систем координат//Геодезия и картография. 1996. № 8. С. 6-7.
20. Addendum to NIMA TR 8350.2: Implementation of the World Geodetic System 1984 (WGS 84) Reference Frame G1150.
21. Department of Defense World Geodetic System 1984. DMA TR8350.2. U.S. Geological Survey, October, 1993.

Информация об авторе

Куприянов Андрей Олегович
(Россия, Москва)

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной геодезии
Московский государственный университет геодезии и картографии
E-mail: miigaiknir@yandex.ru

Information about the author

Kupriyanov Andrey Olegovich
(Russia, Moscow)

PhD in Technical Sciences, Professor, Head of Department of Applied Geodesy
Moscow State University
of Geodesy and Cartography
E-mail: miigaiknir@yandex.ru