УДК 528.2: 629.195

Г.И.ХУДЯКОВ, *д-р техн. наук, профессор, khudgi@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
Г.В.МАКАРОВ, *д-р техн. наук, профессор, g.v.makarov@mail.ru*
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, Санкт-Петербург

G.I.KHUDIAKOV, *Dr. in eng. sc., professor, khudgi@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg
G.V.MAKAROV, *Dr. in eng. sc., professor, g.v.makarov@mail.ru*
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЪЕМКАХ С ПОМОЩЬЮ GPS-ПРИЁМНИКОВ

Для локальных геодезических съемок, осуществляемых с помощью приемников сетевых среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем, предлагается использовать аффинные преобразования плоских координат, хорошо известные в аналитической геометрии на плоскости. Приводится алгоритм решения задачи такого преобразования координат. Описывается апробация реализации этого алгоритма, используемого для электронно-картографического обеспечения интеллектуальных транспортных систем, в реальных условиях эксплуатации

Ключевые слова: аффинные преобразования, спутниковые радионавигационные системы, плоские прямоугольные координаты, поперечная проекция Меркатора, преобразование координат, координаты Гаусса – Крюгера, GPS-приемник, интеллектуальные транспортные системы.

USE OF AFFINNE COORDINATE CONVERSION AT THE LOCAL GEODETIC SURVEYS WITH APPLYING OF GPS-RECEIVERS

For the local geodetic surveys carried out with the help of the receivers of satellite radionavigation systems, it is offered to use the affinne conversion of flat coordinates, is well known in analytical geometry in the plane. The algorithm of the solution of a problem of such coordinate conversion is given. The testing of the implementation of this algorithm used for electronic-cartographical support of intelligent transportation systems, in real service conditions of intelligent transportation systems is described.

Key words: affinne conversions, satellite radionavigation systems, flat rectangular coordinates, universal transverse Mercator, coordinate conversion, Gauss – Kruger's coordinates, GPS-receiver, intelligent transportation systems.

Введение. В геодезии широкое применение нашли сетевые среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы: американская GPS («Navstar»), российская ГЛОНАСС, перспективны европейская «Galileo» и, возможно, китайская COMPASS [2, 9, 10]. Наибольшее распространение получили GPS-приемники, в программном обеспечении которых используются плоские прямоугольные координаты в поперечной проекции Меркатора UTM [2]. В то же время российская крупномасштабная картография основана на системе координат и высот СК-42, использующей плоские прямоугольные ко-

ординаты Гаусса – Крюгера на референц-эллипсоиде Красовского [3, 8]. Поэтому по-прежнему актуальной является разработка способов пересчета координат точек местности из одной системы картографических координат в другую [5, 7, 12].

Предложен способ пересчета, использующий обычное для аналитической геометрии на плоскости аффинное преобразование, и описана его апробация в реальных условиях работы на местности.

Традиционное решение задачи. При построении алгоритма пересчета прямоугольных координат точек местности из одной системы декартовых координат в другую обычно исходят из традиционной для геодезии постановки задачи преобразования координат. Например, в работе [7] выражения для координат UTM и прямоугольной локальной системы координат записываются в виде

$$\begin{Vmatrix} x \\ y \end{Vmatrix}_{\text{лок}} = \begin{Vmatrix} x_0 \\ y_0 \end{Vmatrix}_{\text{лок}} + m \begin{Vmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} x' - x'_0 \\ y' - y'_0 \end{Vmatrix}_{\text{UTM}}. \quad (1)$$

В формуле (1) локальные координаты точки даны без штрихов, а координаты UTM – со штрихами.

Для построения конкретного вида преобразования координат (1) необходимо найти значения шести неизвестных параметров: x_0, y_0, x'_0, y'_0 – координаты точки, относительно которой координатные оси развернуты на угол γ; m – главный масштаб.

Если количество пунктов n, в которых значения координат известны для обеих систем координат, много больше трех, то для нахождения численных значений параметров преобразования (1) можно воспользоваться методом наименьших квадратов.

Использование аффинного преобразования. При использовании аффинного преобразования решение задачи преобразования плоских декартовых координат (x', y') в координаты (x, y) записывается в виде [4]

$$x = a_1x' + b_1y' + c_1;\ y = a_2x' + b_2y' + c_2. \quad (2)$$

В уравнении (2), как и в уравнении (1), шесть неизвестных параметров: a_1, b_1, c_1, a_2, b_2 и c_2. Поэтому для определения их численных значений необходимо и достаточно иметь на данной местности три точки, не лежащие на одной прямой, в которых достаточно точно известны координаты $\{(x_i, y_i);\ i = 1, 2, 3\}$ в выбранной локальной системе координат, а также определены значения координат $\{(x'_i, y'_i);\ i = 1, 2, 3\}$ – за счет усреднения показаний GPS-приемника в течение нескольких десятков минут. Поскольку координаты (x', y') из GPS-приемника обычно получают округленными с точностью до 1 м, то выборку из результатов его показаний лучше выводить в значениях геодезической широты B и геодезической долготы L, которые затем следует усреднить, а результат усреднения перевести в координаты (x', y').

Таким способом можно получить шесть линейных уравнений для шести параметров $\{a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2\}$:

$$\left.\begin{aligned} x_i &= a_1x'_i + b_1y'_1 + c_1; \\ y_i &= a_2x'_i + b_2y'_1 + c_2, \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3$.

Решая систему из шести линейных уравнений (3) относительно совокупности параметров $\{a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2\}$, получим их оценки $\{\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{c}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_2, \hat{c}_2\}$. В дальнейшем – в реальных условиях эксплуатации GPS-приемника преобразование координат (2) производятся с помощью формул

$$x = \hat{a}_1x' + \hat{b}_1y' + \hat{c}_1;\ y = \hat{a}_2x' + \hat{b}_2y' + \hat{c}_2. \quad (4)$$

В геодезии преобразование (4) означает не только обычное масштабирование μ_x и μ_y по осям Ox' и Oy', соответствующее перенесение начала координат и поворот системы декартовых координат на угол γ, но и изменение угла между осями Ox' и Oy'. Аналогичным образом получается обратное преобразование: $(x, y) \rightarrow (x', y')$.

На основании представленного метода преобразования плоских прямоугольных координат одним из авторов (с соавторами) в 2001 г. был получен российский патент [6] на способ высокоточного отображения координат наземного транспортного средства в радиосистемах диспетчерского управления автодорожным движением, а также был разработан соответствующий

этому способу комплекс программных средств «Диспетчер» [1]. Подробности реализации представленного способа можно найти на сайте www.escort_its в разделе ЭСКОРТ-ПЛАНШЕТ.

Апробация способа аффинного преобразования координат. В начале 2004 г. программное обеспечение ЭСКОРТ-ПЛАНШЕТ было апробировано на соревнованиях по спортивному ориентированию, проведенных в Санкт-Петербурге в лесопарке Сосновка. Предварительно с помощью GPS-приемника GARMIN Plus III были определены координаты ряда характерных точек на простейшей карте-схеме лесопарка в системе координат WGS 84: точек пересечения просек, канавок, дорожек и т.п. По пяти тройкам этих точек были оценены значения $\{\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{c}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_2, \hat{c}_2\}$. Эти тройки точек выбирались так, чтобы образуемые ими треугольники равномерно покрывали всю территорию лесопарка. По оставшемуся десятку точек была проверена точность преобразования $\{x = \hat{a}_1 x' + \hat{b}_1 y' + \hat{c}_1;$ $y = \hat{a}_2 x' + \hat{b}_2 y' + \hat{c}_2\}$, которая оказалась равной около 3 м (радиальное среднеквадратическое значение). Такое построение преобразования координат позволяло компенсировать нелинейные искажения, присущие простейшим картам-схемам.

Ход соревнований был показан по Санкт-Петербургскому телевидению. Отчет о проведенных соревнованиях был помещен на сайте ГИС-ассоциации [11].

Заключение. Полученные в процессе разработки электронно-картографического обеспечения интеллектуальных транспортных систем результаты [9] – при соответствующей доработке – могут быть использованы при локальных топографических съемках в режиме реального времени. Основным достоинством предложенного в статье метода является использование в качестве картографической основы любых карт-схем или крок заданного района. Достоинство использования аффинных преобразований координат в интеллектуальных транспортных системах заключается в отсутствии необходимости применения высокоточной картографической основы, что было подтверждено при патентовании изобретения [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев А.С.* Комплекс программных средств для диспетчерского управления объектами и построения электронных карт (Диспетчер): Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611414 по заявке № 2001611299 от 24 сентября 2001 г. / А.С.Васильев, А.В.Кочухай, Г.И.Худяков // Роспатент. 23 октября 2001 г.

2. *Конин В.В.* Системы спутниковой радионавигации / В.В.Конин, В.П.Харченко. Киев: Холтех, 2010. 520 с.

3. *Куштин И.Ф.* Инженерная геодезия: Учебник / И.Ф.Куштин, В.И.Куштин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. 416 с.

4. *Мусхелишвили Н.И.* Курс аналитической геометрии. М.: Изд-во МГУ, 1967. 655 с.

5. *Оньков И.В.* Определение параметров преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса по одноименным точкам // Геопрофи. 2010. № 6. С.56-59.

6. Патент 2207632 Россия, МКИ G 08 G 1/13. Способ отображения местоположения транспортного средства на электронной карте местности в радиосистемах диспетчерского управления движением наземного транспорта / А.С.Васильев, В.В.Корниенко, А.В.Кочухай, А.В.Могутов, Г.И.Худяков. Опубл. 27.06.2003. Бюл. № 18. Приоритет 9.06.2001.

7. *Серапинас Б.Б.* Основы спутникового позиционирования. М.: Изд-во МГУ, 2012. 256 с.

8. *Федотов Г.А.* Инженерная геодезия: Учебник. М.: Высш. шк., 2004. 463 с.

9. *Худяков Г.И.* Транспортные информационно-управляющие радиоэлектронные системы: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СЗТУ, 2006. 184 с.

10. *Яценков В.С.* Основы спутниковой навигации. Системы GPS-Navstar и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия-Телеком, 2003. 272 с.

11. GPS-навигация в соревнованиях по ориентированию // www.gisa.ru/16202.htm.

12. *Salkosuo S.* Coordinate conversion made easy // IBM developer works. 28 Aug. 2007.

REFERENCES

1. *Vasil'ev A.S., Kochukhay A.V., Khudyakov G.I.* A set of software tools for dispatching control and build electronic charts (Dispatcher). The certificate of official registration of computer programs N 2001611414, N 2001611299 application from September 24, 2001 // Rospatent, October 23, 2001.

2. *Konin V.V., Kharchenko V.P.* Satellite radionavigation systems. Kiev: Kholtech, 2010. 520 p.

3. *Kushtin I.F., Kushtin V.I.* Engineering surveying: Tutorial. Rostov-na-Donu: Phoenix, 2002. 416 p.

4. *Muskhelishvili N.I.* The course of analytical geometry. Moscow: Pub. house MSU, 1967. 655 p.

5. *On'kov I.V.* Determination of parameters of flat rectangular coordinates conversion in Gaussian projection on the same points //Geoprofy. 2010. N 6. P.56-59.

6. RF Patent 2207632. IPC G 08 G 1/13. The method to display the location of the vehicle on the electronic map in radiosystems dispatching to traffic / A.S.Vasil'ev, V.V.Korniyenko, A.V.Kochukhay, A.V.Mogutov, G.I.Khudiakov. Publ. 27.06.2003. Bull. N 18. Priority 9.06.2001.

7. *Serapinas B.B.* Satellite-based positioning. Moscow: Pub. house MSU, 2012. 256 p.

8. *Fedotov G.A.* Engineering surveying: Tutorial. Moscow: High school, 2004. 463 p.

9. *Khudiakov G.I.* Intelligent transportation systems: Tutorial. Saint Petersburg: Pub. house NWPI, 2006. 184 p.

10. *Jatsenkov V.S.* Fundamentals of Satellite Navigation. GPS-Navstar and GLONASS systems. Moscow: Hotline-Telecomm, 2003. 272 p.

11. GPS-navigation orienteering tournament // www.gisa.ru/16202.htm.

12. *Salkosuo S.* Coordinate conversion made easy // IBM developer works. 28 Aug. 2007.