

Определение азимутов с применением относительного метода космической геодезии без использования исходной геодезической основы

Determination of Azimuths with Relative Space Geodesy Method without Usage of Initial Geodetic Datum

Чернов / Chernov I.

Иван Владимирович

(4ern86@bk.ru)

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» (ВКА им. А. Ф. Можайского)

МО РФ,

адъюнкт.

г. Санкт-Петербург

Алексеев / Alekseev V.

Виктор Фёдорович

(vfalex_vti@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

профессор кафедры Высшей геодезии.

г. Санкт-Петербург

Яковлев / Yakovlev A.

Алексей Иванович

(prokofjev_alexandr@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

доцент кафедры Высшей геодезии.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: азимут – azimuth; автономное ориентирование – autonomous orientation; высокоточное ориентирование – precision orientation; оперативное ориентирование – operative orientation; относительный метод – relative method; метод ориентирования – orientation method; космические навигационные системы – space navigation systems.

В связи с возможностями по высокоточному определению приращений координат и равным влиянием в один и тот же момент времени различных источников ошибок на результаты измерений для любого приемника в локальном районе (10–30 км) проведены исследования возможности оперативного автономного ориентирования с применением относительного метода космической геодезии. В результате исследований доказано, что относительный метод космической геодезии позволяет определять азимуты с высокой точностью и оперативностью.

In connection with possibilities of high-precision determination of increments of coordinates and equal influence in the same moment of time of different sources of errors on the measurement results for any receiver in the local area (10–30 km), studies of possibility of an autonomous operational orientation using a relative method of the space geodesy are made. The studies demonstrate that the relative space geodesy method allows to determine azimuths with high accuracy and efficiency.

Дирекционные углы и азимуты направлений определяются в интересах гражданских и военных потребителей. Для каждой сложной технической системы, нуждающейся в определении дирекционных углов и азимутов направлений, выдвигаются индивидуальные требования к точности и оперативности ориентирования, диктуемые правилами эксплуатации. Помимо указанных требований выдвигаются ряд специфических, индивидуальных требований, обусловленных особенностями условий применения технической системы, наиболее важным требованием является «автономность».

Под «автономностью» будет пониматься такое свойство метода определения исходных астрономо-геодезических данных (ИАГД), которое позволяет получать их независимо от метеорологических условий, без исходной геодезической основы, в любое время суток.

Требование автономности метода ориентирования возникает при инженерно-геодезических изысканиях в ходе строительства и геодезического сопровождения объектов, расположенных в районах со значительной разреженностью геодезической сети или в суровых климатических условиях (прокладка трубопроводов, линий связи и электропередач).

На сегодняшний день принципиально описано в «Технических указаниях по развитию специальных геодезических сетей относительным методом космической геодезии – М.: РИО, 2002. – 46 с.» (без полу-

чения оценки точности) получение азимута относительным методом космической геодезии. Предлагаемые в научно-технической литературе определения азимута с применением относительного метода космической геодезии с использованием исходной геодезической основы позволяют производить ориентирование с СКО до 0,5" [1].

Точность абсолютного метода позиционирования при выключенном режиме селективного доступа SA обеспечивает определение координат со средней квадратической ошибкой (СКО) 15 м [2]. Повысить точность определения координат можно, применяя дифференциальный или относительный метод.

Точность дифференциального и относительного метода значительно выше, чем в соответствующих вариантах абсолютного метода, и может достигать сантиметрового и даже более высокого уровня. Однако относительный и дифференциальный методы для реализации требуют наличие геодезической основы.

Сущность метода состоит в вычислении азимута из решения обратной геодезической задачи по координатам пунктов, полученных относительным методом космической геодезии.

Чтобы вычислить геодезические азимуты, по координатам пункта B, L, H' , определенных относительным методом спутниковой геодезии, с измеренными разностями координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ вычисляются координаты B, L пунктов, закрепляющих определяемые направления. Из полученных таким образом координат пунктов вычисляются геодезические азимуты направлений и расстояния (длины геодезических линий на эллипсоиде) из решения обратной геодезической задачи.

Далее обосновывается методика использования относительного метода космической геодезии для определения высокоточного геодезического азимута без использования исходной геодезической основы. Исходя из того что в локальном районе (10–30 км) влияние различных источников ошибок на результаты измерений одинаково для любого приемника, получим:

$$\begin{cases} X_M = X_{Mi}' + \partial X_i, \\ Y_M = Y_{Mi}' + \partial Y_i, \\ Z_M = Z_{Mi}' + \partial Z_i; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_N = X_{Ni}' + \partial X_i, \\ Y_N = Y_{Ni}' + \partial Y_i, \\ Z_N = Z_{Ni}' + \partial Z_i; \end{cases} \quad (2)$$

где $\partial X_i, \partial Y_i, \partial Z_i$ – поправки для локального района в момент времени t_i ; $X_{Mi}', Y_{Mi}', Z_{Mi}', X_{Ni}', Y_{Ni}', Z_{Ni}'$ – координаты точек M и N , закрепляющих ориентируемое направление, в момент времени t_i , полученные абсолютным методом; $X_M, Y_M, Z_M, X_N, Y_N, Z_N$ – координаты точек M и N в общеземной системе координат WGS-84 или ПЗ-90. В момент времени t_i будет получен вектор

$M'N'$, искажённый ошибками $\partial X_i, \partial Y_i, \partial Z_i$.

Запишем координаты вектора MN и $M'N'$:

$$\begin{aligned} MN & \{X_M - X_N, Y_M - Y_N, Z_M - Z_N\}, \\ M'N' & \{X_M' - X_N', Y_M' - Y_N', Z_M' - Z_N'\}. \end{aligned}$$

Тогда, используя (1) и (2), получим координаты $M'N'$:

$$\begin{aligned} M'N' & \{(X_M - \partial X_i) - (X_N - \partial X_i), (Y_M - \partial Y_i) - \\ & - (Y_N - \partial Y_i), (Z_M - \partial Z_i) - (Z_N - \partial Z_i)\} \end{aligned}$$

После очевидных преобразований:

$$M'N' \{X_M - X_N, Y_M - Y_N, Z_M - Z_N\}$$

Одним из достаточных условий коллинеарности векторов является равенство нулю их векторного произведения. Так как соответствующие координаты векторов $M'N'$ и MN равны, то приведённое выше условие коллинеарности векторов выполняется. Вектор $M'N'$ будет коллинеарен и сонаправлен вектору MN .

Точность определения координат абсолютным методом космической геодезии, как отмечалось выше, составляет 15 м, а точность определения приращения координат находится в миллиметровом диапазоне. Следовательно, за промежуток времени $\Delta t = t_0 + t_i$ получим множество сонаправленных векторов, которые будут иметь СКО координат до 15 м.

На рис. 1 mn – проекция ориентируемого направления MN (нормальное сечение) на поверхность относимости, $m'p'$ – линия параллельная истинному геодезическому меридиану mp . Пусть поверхность относимости является сферической. Допустим, имеются погрешности ΔB и ΔL геодезических координат для направления MN . Погрешности ΔB и ΔL геодезических координат приведут к тому, что за проекцию направления MN на поверхности относимости вместо mn будет принята $m'n'$.

Через p на рис. 1 обозначено положение полюса. Геодезический азимут в смещённом положении точки m будет равен $A + \Delta A$, где ΔA – ошибка азимута, вызванная погрешностями геодезических координат. Она, согласно уравнению Лапласа, в случае, когда зенитное расстояние направления равно 90 градусов, будет равна $\Delta A = \Delta L \sin B$. Угол γ при m' есть сближение меридианов на эллипсоиде, которое в сферическом приближении равно $\gamma = \Delta L \sin B$, то есть совпадает с ΔA . Это означает что угол $p'm'n'$ равен A [3].

В общем случае, когда зенитное расстояние направления MN не будет равно 90 градусов дуги, будет иметься зависимость ошибки ориентировки $(\delta A)mn$ от погрешности ΔB и ΔL геодезических координат [4]:

$$\delta A = (\Delta B \sin A - \Delta L \cos A \cos B) \operatorname{ctg} z \quad (3)$$

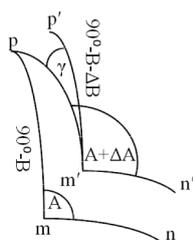


Рис. 1. Смещение проекции ориентируемого направления

Из (3) видно что δA зависит от азимута и от угла наклона ориентируемого направления. При величинах ошибок ΔL , ΔB не превышающих 15 м на широте г. Москвы, значение выражения в скобках не превысит 0,7 секунды дуги. Результаты расчёта величины δA при условиях, описанных выше, для углов наклона ориентируемого направления равных 2, 5, 6, 7, 10, 20 градусов дуги приведены на рис. 2.

Из рис. 2 и формулы (3) видно, что в этом случае даже при погрешностях, в линейной мере достигающих 15 м, разница (δA) между любыми азимутами, из множества полученных векторов, не превысит 0,1 угловой секунды при углах наклона ориентируемого направления менее 5 градусов. При ориентировке направления близкой к $\pi/3 + \pi$ величина $\delta A \approx 0$.

В случае высокоточного ориентирования и превышения угла наклона ориентируемого направления величины 5 градусов дуги (ориентирование в горной местности), необходимо учитывать величину δA . При использовании предлагаемого метода ориентирования учёт величины δA невозможен, так как не использу-

ется геодезическая основа, необходимая для расчёта величин ΔB и ΔL геодезических координат. Однако появляется возможность компенсировать величину δA выбором направления близкого к $\pi/3 + \pi$. В данном случае ориентируемое направление (близкое к $\pi/3 + \pi$) будет практически полностью избавленное от влияния систематических ошибок ориентирования, зависящих от азимута направления. В дальнейшем от этого направления методом измерения углов «во всех комбинациях» или «круговых приёмов» геодезический азимут может передаваться на любое направление с начального пункта ориентируемого направления.

Изложенный подход даст возможность контроля стабильности ориентируемых направлений, с помощью контрольного угла, образованного направлением близким к $\pi/3 + \pi$ и направлением, требуемым для ориентирования. Это позволит контролировать стабильность направлений, азимуты которых определяются.

Таким образом, из-за погрешностей геодезических координат, полученных одновременно абсолютным методом, происходит параллельное смещение проекции направления на поверхность относимости, для которого определяется азимут. Это даёт основание утверждать, что относительный метод космической геодезии позволяет определять геодезические азимуты направлений без использования исходной геодезической основы с прецизионной точностью.

Относительный метод космической геодезии предполагает одновременные наблюдения на определяемых и исходных пунктах и совместную пост обработку результатов этих наблюдений. Для реализации этого метода достаточно установить аппаратуру потребителя космических навигационных систем (АП КНС) на пунктах, закрепляющих ориентируемое направление,

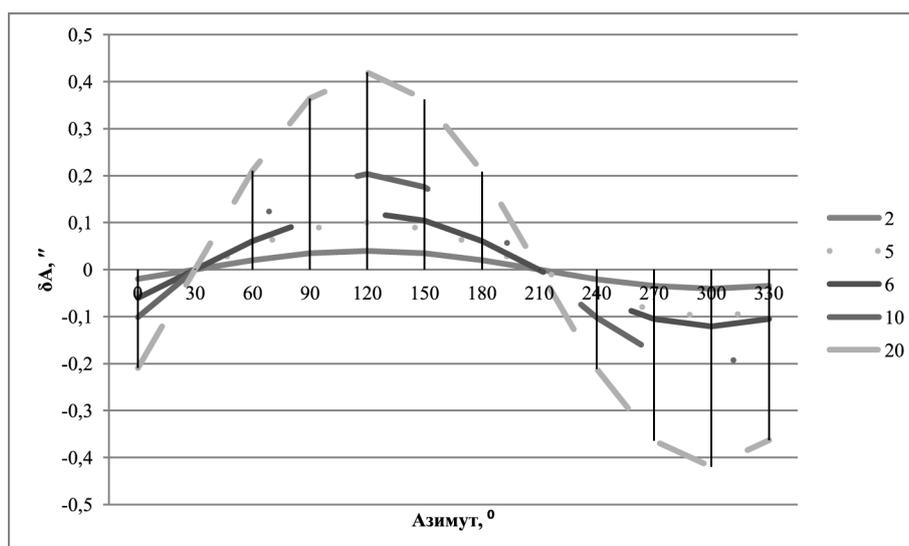


Рис. 2. Результаты расчёта величины δA для углов наклона ориентируемого направления равных 2, 5, 6, 7, 10, 20 градусов дуги

и произвести одновременные наблюдения. Азимут, полученный данным способом, будет являться геодезическим.

Пусть по результатам обработки спутниковых измерений получены координаты пунктов в геодезической системе координат. Для определения геодезического азимута перейдём из пространственной геоцентрической системы координат (СК) к топоцентрической горизонтной СК Y', X', Z' по формуле [3]:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$A^T = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L \cos B \sin L \\ \cos B & 0 \cos B \sin B \end{bmatrix}; \quad (5)$$

B, L – геодезические широта и долгота пункта.

Тогда геодезический азимут направления MN можно найти из уравнения [1]:

$$A = \arctg \left(\frac{\Delta Y'}{\Delta X'} \right) \quad (6)$$

где $\Delta X', \Delta Y'$ – приращения в топоцентрической горизонтной СК.

Пренебрегая методическими погрешностями перевычисления координат, СКО определения геодезического азимута вычислим из формулы [1]:

$$m_{AMN} = \frac{\rho'' m_p}{D}, \quad (7)$$

где ρ'' – постоянная ($\rho'' = 206-265''$); m_p – СКО измерения приращений координат между точками; D – расстояние между точками установки антенн АП КНС, приведенное на плоскость горизонта $D = (X'^2 + Y'^2)^{1/2}$.

Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов ориентирных направлений m_{AMN} АП КНС при точности определения приращений координат $m_p = 5\text{мм} + 1\text{мм на } 1\text{ км}$ линии представлены на рис. 3.

Определение геодезических азимутов с использованием АП КНС возможно на достаточно открытой местности при обеспечении взаимной видимости между точками установки антенн.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что приёмники навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, как на основном, так и на контрольном направлениях должны быть удалены друг от друга на расстояние примерно от 1200 м и более для точности ориентирования с СКО 1 угловая секунда и лучше.

Для уменьшения случайной составляющей ошибки определения азимута возможно использование дополнительных контрольных направлений или схем ориентирования, подобных схемам ориентирования гиротеодолитными комплектами, подробно описанными в [5].

Исходя из вышеизложенного, предлагается следующая последовательность определения геодезического азимута без геодезической основы с использованием АП КНС:

- выбор, закладка пунктов опорных, ориентируемых и контрольных направлений (расстояния между

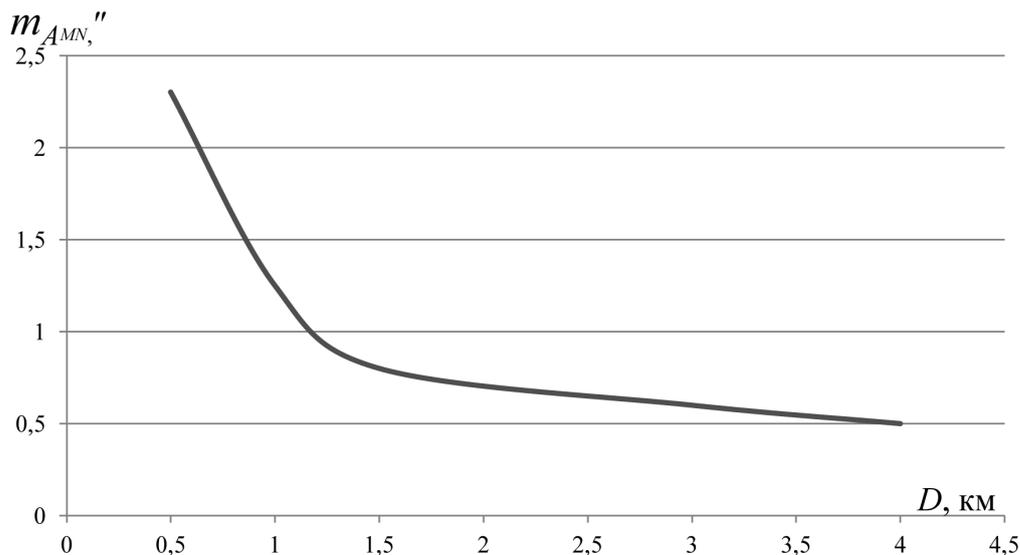


Рис. 3. Ожидаемые СКО определения геодезических азимутов m_{AMN} в зависимости от расстояния D между точками установки антенн АП КНС, приведенного на плоскость горизонта

пунктами не более 30 км и не менее предельного расстояния, рассчитанного по формуле (7));

- одновременные спутниковые наблюдения на пунктах закрепляющих ориентируемые направления;
- пересчёт из пространственной геоцентрической СК в топоцентрическую горизонтную СК координат пунктов, закрепляющих ориентируемое направление;
- вычисление геодезического азимута по формуле (6);
- для перехода к астрономическому азимуту необходимо ввести поправку за уклонение отвесной линии.

Таким образом, предлагаемый метод является автономным, оперативным и высокоточным методом ориентирования, что определяет его универсальность при определении азимута. Относительный метод без использования исходной геодезической основы может быть применён для оперативного создания полигонов эталонирования гиротеодолитов (гироскопиров), разбивке территорий, геодезическом обеспечении аэродромов, подготовке маршрутов, в том числе в сложных метеорологических, климатических условиях. Например, в арктических широтах использование гироскопического метода ориентирования невозможно, оперативное ориентирование с применением астрономического метода нереализуемо из-за неблагоприятных метеорологических условий, ориентирование с использованием геодезического метода невозможно из-за отсутствия геодезической основы в требуемом районе. При необходимости оперативного высокоточного ориентирования в условиях высоких широт описанный метод является наиболее подходящим. В условиях значительного роста внимания к освоению Арктики актуальность применения описанного метода определения азимута очевидна.

Литература

1. Яковлев, А. И. Определение эталонных направлений с использованием аппаратуры потребителей космических навигационных систем / А.И. Яковлев, А.А. Бойцов, А.В. Прокофьев // Вопросы оборонной техники. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. – 2012. – № 4 (256). – С. 73–79.
2. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 2 : монография / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.
3. Ларин, Д. А. К вопросу об уравнивании астрономо-геодезической сети / Д.А. Ларин // Геодезия и картография. – 1964. – № 8. – С. 3–12.
4. Пеллинен, Л. П. Высшая геодезия / Л.П. Пеллинен. – М.: «Недра», 1978. – 264 с.
5. Воронков, Н. Н. Гироскопическое ориентирование / Н.Н. Воронков, В.В. Кутырев, Н.М. Ашимов. – М.: «Недра», 1980. – 295 с.