Метод коррекции относительных координатных определений

Relative coordinates correction method

Андриевская / Andrievskaya V.
Виктория Юрьевна
(vika75_07@mail.ru)
кандидат физико-математических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Прокофьев / Prokofjev A.
Александр Валерьевич
(prokofjev_alexander@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательского отдела.
г. Санкт-Петербург

Сергеев / Sergeev D.
Дмитрий Викторович
(sergeevdmitriyV@yandex.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательской лаборатории – старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Колесников / Kolesnikov D.
Денис Дмитриевич
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
преподаватель кафедры высшей геодезии.
г. Санкт-Петербург

Чернов / Chernov V.
Вячеслав Николаевич
(Chernoff111255@yandex.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: метод – method; спутник – satellite; навигационная система – navigation system; координаты – coordinates; точность – accuracy; оперативность – operational efficiency.

В статье приведен анализ существующих методов определения координат, а также анализ состояния локальных сетей референцных станций в Российской Федерации и за рубежом. По результатам исследований предложен метод коррекции относительных координатных определений, который позволит оперативно развить исходную геодезическую основу с необходимой плотностью пунктов и точностью их определения.

The articles describes an analysis of the existing methods of positioning as well as an analysis of local network status for the reference station grid in the Russian Federation and abroad. The research data-based method of relative coordinate determination compensation is suggested. This method will allow quickly developing the initial geodetic base with the required density of points and positioning accuracy.

Для решения задач по определению пространственного положения специальных объектов в настоящее время широко применяется приемная аппаратура, работающая по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS. Актуальной задачей при использовании такой аппаратуры является оперативное создание с ее помощью единого координатного пространства. Такую задачу предлагается решить путем развертывания мобильной сети спутниковых референцных (базовых) станций и применения метода коррекции относительных координатных определений.

Данная сеть представляет собой совокупность полученных по определенным правилам мобильных базовых пунктов, на которых установлены геодезические приемники, принимающие сигналы от ГНСС ГЛОНАСС и GPS. Сегмент базовых станций обеспечивает сбор данных спутниковых измерений и их передачу в вычислительный центр на серверы системы по закрытым каналам связи или закрытым локальным информационным сетям. На сервере результаты наблю-

3 2018.indd 119 26.09.2018 10:05:11

дений совместно уравниваются строгими методами математической обработки, и таким образом формируется единое координатное пространство в пределах обеспечиваемой территории. Далее с использованием контрольно-корректирующей станции (ККС) формируется корректирующая информация (КИ) (данные, содержащие дифференциальные поправки к измеряемым навигационным параметрам, и другие сообщения, используемые в аппаратуре потребителя для повышения точности и надежности навигационных определений) к измерениям, которая передается потребителям с использованием технических средств связи, а также регистрируется в виде файлов на внутреннюю память сервера [3, 4]. То есть для определения координат любого пункта в пределах данной территории будет достаточно выполнить наблюдения спутниковыми приемниками (имеющими геодезическую или навигационную точность) и получить с использованием технических средств связи корректирующую информацию к измерениям в реальном времени (в режиме RTK) или в режиме постобработки наблюдений.

При геодезическом обеспечении специальных объектов с использованием ГНСС применяются абсолютный, дифференциальный и относительный методы определения координат.

Точность дифференциального и относительного метода значительно выше, чем в абсолютном методе, и может достигать сантиметрового и даже более высокого уровня [6]. Однако следует обратить внимание на два момента. Во-первых, поскольку в этих методах координаты неизвестных пунктов находятся относительно опорного пункта, то погрешности координат этого пункта полностью войдут в координаты определяемых точек, то есть вся развиваемая сеть оказывается смещенной. Во-вторых, поскольку координаты определяемых пунктов используются для вычисления компонент базовых линий, то это также будет сказываться на точности определения приращений координат между опорным и определяемым пунктом [1].

Анализ состояния локальных сетей референцных станций в Российской Федерации и за рубежом показал, что для выполнения специальных задач по геодезическому обеспечению специальных объектов возможно, использовать локальные дифференциальные подсистемы [2], однако данные сети не связаны между собой и единой системой координат, для режима реального времени все они работают в местной системе координат своего региона [1]. Сети референцных станций разные по точности и назначению не приведены к единому масштабу, т.е. не имеют целостности единого координатного пространства.

Для получения сетевых поправок используются готовые решения с применением зарубежной спутниковой геодезической аппаратуры и специального программного обеспечения, что делает невозможным их использование в интересах обороны страны.

Анализ российских и зарубежных локальных сетей референцных станций показал, что при определении координат точек местности в основном используется дифференциальный метод на основе коррекции координат или коррекции навигационного параметра.

$$\Delta X = X_{КСэ} - \hat{X}_{КС}, \quad (1)$$

$$X_{П} = \hat{X}_{П} + \Delta X, \quad (2)$$

где

$\hat{X}_{КС}, \hat{X}_{П}$ – векторы оценок координат ККС и потребителя по сигналам спутниковых навигационных систем;

$X_{КСэ}$ – вектор эталонных координат ККС;

ΔX – вектор поправок;

$X_{П}$ – вектор уточненных координат потребителя.

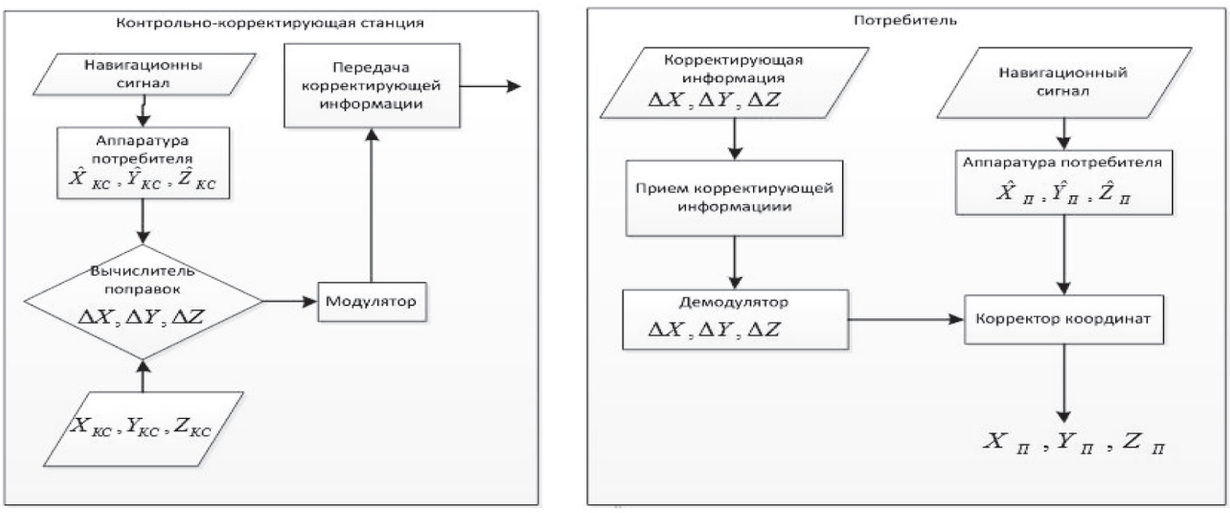

Рис. 1. Структурная схема метода коррекции координат

3 2018.indd 120 26.09.2018 10:05:12

При использовании метода коррекции координат [6] (рис. 1) уточненное положение потребителя получается из суммы вектора оценки координат потребителя по сигналам спутниковых радионавигационных систем и вектора поправок, которые представляют собой разность вектора эталонных координат контрольно корректирующей станции и вектора оценки координат ККС по сигналам спутниковых радионавигационных систем.

Достоинство метода заключается в том, что исправленные координаты потребителя доступны сразу в полевом приемнике. Недостатки данного метода перекрывают его достоинства [1]:

– использование данного метода ограничено по дальности действия (5–10 км);

– потребитель вынужден сообщать свое рабочее созвездие спутников;

– ограниченное число подключаемых приемников.

При использовании метода коррекции навигационных параметров [6] (рис. 2) уточненное положение потребителя получается из суммы псевдодальности измеренной потребителем и поправки к псевдодальности, которая представляет собой разность эталонной псевдодальности для ККС и псевдодальности, измеренной на ККС.

$$\Delta r_i = r_{\text{КСэ}i} - \tilde{r}_{\text{КС}i}, \tag{3}$$

$$r_{\text{П}i} = \tilde{r}_{\text{П}i} + \Delta r_i, \tag{4}$$

$$\left[r_{\text{П}i}, ..., r_{\text{П}4}\right] \to X_{\text{П}}, \tag{5}$$

где $\tilde{r}_{\text{КС}i}, \tilde{r}_{\text{П}i}$ – псевдодальности, измеренные на ККС и потребителем;

$r_{\text{КСэ}i}$ – эталонные псевдодальности для ККС;

Δr_i – поправки к псевдодальностям;

$r_{\text{П}i}$ – уточненные псевдодальности для потребителя.

Достоинства метода заключаются в следующем:

– получать и использовать дифференциальные поправки может любое число приемников;

– исправленное положение может быть известно потребителю в реальном времени;

– не нужно знать какое созвездие спутников используется любым из пользователей, т.к. поправки передаются для всех спутников.

Недостаток данного метода: ограничение дальности действия при кодовых измерениях (300–500 км) [6].

Целью относительного позиционирования является определение координат неизвестной точки по отношению к известной точке, которая в большинстве применений является стационарной [1]. Другими словами, относительное позиционирование нацелено на определение вектора между двумя точками, которые часто называют вектором базовой линии или просто базовой линией. Пусть A – опорная (известная) точка, B – неизвестная точка, а D_{AB} – вектор базовой линии. Вводя соответствующие векторы положения R_A, R_B, можно составить соотношение $R_B = R_A + D_{AB}$.

А компоненты вектора базовой линии есть

$$D_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Координаты опорной точки задаются в системе WGS-84, для этого обычно используют решение по кодовым дальностям.

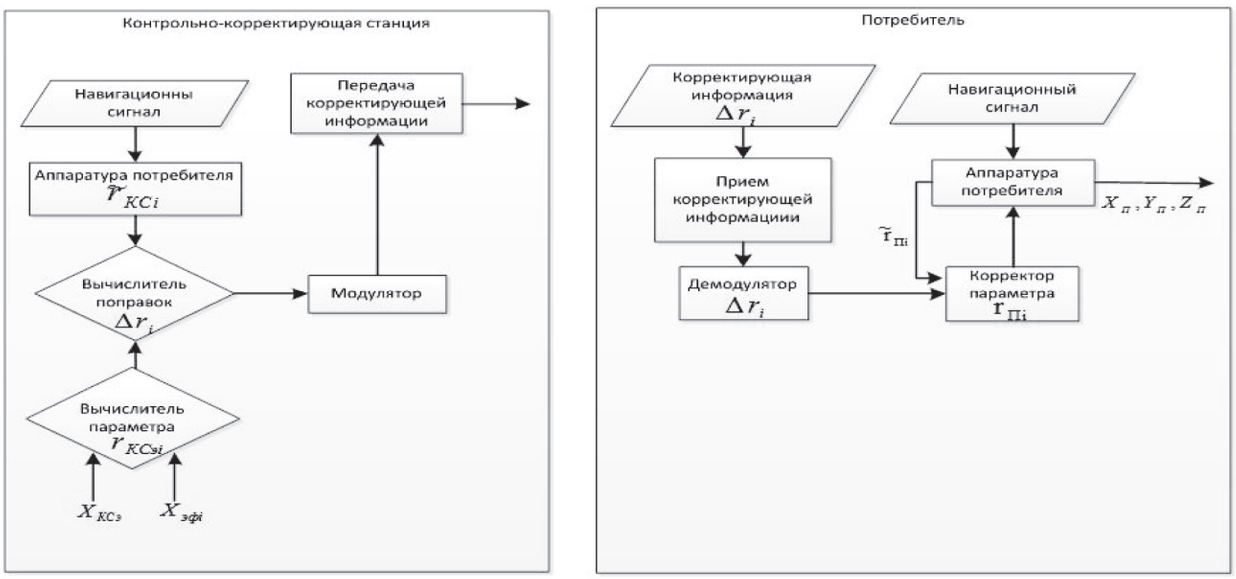

Рис. 2. Структурная схема метода коррекции навигационного параметра

3 2018.indd 121 26.09.2018 10:05:13

Относительное позиционирование может выполняться по кодовым или фазовым дальностям. Предполагая, что такие одновременные наблюдения имеются на двух пунктах *A* и *B* на спутники *i* и *j*, можно образовать линейные комбинации, которые приводят к одинарным, двойным и тройным разностям.

Основным недостатком данного метода является то, что относительное позиционирование требует выполнения одновременных наблюдений и на опорной, и на неизвестной точке [1].

Рассмотренные методы являются перспективными и позволят повысить оперативность определения координат пунктов при геодезическом обеспечении специальных объектов. Однако для оперативного получения геодезических данных в усложненных условиях требуется новый метод, который будет удовлетворять требованиям к точности, надежности и оперативности.

Учитывая достоинства и недостатки рассмотренных методов при решении задач геодезического обеспечения, перспективным методом оперативного определения координат, который будет способен удовлетворять требованиям к геодезическим данным, может стать метод коррекции относительных координатных определений. В данном методе предполагается объединение относительного метода космической геодезии и метода коррекции навигационного параметра (рис. 3).

Метод коррекции относительных координатных определений включает в себя следующие основные этапы:

– рекогносцировка района выполнения специальных работ;

– привязка ККС и базового приемника к исходным пунктам;

– вычисление поправок к навигационным параметрам каждого спутника;

– передача поправок потребителям по закрытым каналам связи;

– вычисление в реальном режиме времени координат, по уточненным навигационным параметрам, определяемых пунктов относительным методом космической геодезии.

На рис. 3: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – приращения координат базовой станции, $\Delta\rho_{i,j,k,m}$ – поправки к псевдодальностям ко всем видимым спутникам.

В кинематическом позиционировании приемник на известной точке *A* в начале базовой линии остается фиксированным. Второй приемник перемещается, а его положения должны определяться в произвольные эпохи. Движение мобильного приемника отражается в неявной форме в уравнениях для одинарных, двойных и тройных разностей через геометрическую дальность, которая представляет собой истинное расстояние между спутником и приемником (формула 7). Подлежащие определению координаты пункта скрыты в геометрической дальности (ρ) [7]. Возьмем мобильную станцию *B* и спутник *i*, геометрическое расстояние в статическом режиме дается как

$$\rho_B^i(t) = \sqrt{\left(X^i(t) - X_B\right)^2 + \left(Y^i(t) - Y_B\right)^2 + (Z^i(t) - Z_B)^2}\ , \quad (7)$$

в кинематическом режиме:

$$\rho_B^i(t) = \sqrt{\left(X^i(t) - X_B(t))\right)^2 + \left(Y^i(t) - Y_B(t)\right)^2 + (Z^i(t) - Z_B(t))^2}\ , \quad (8)$$

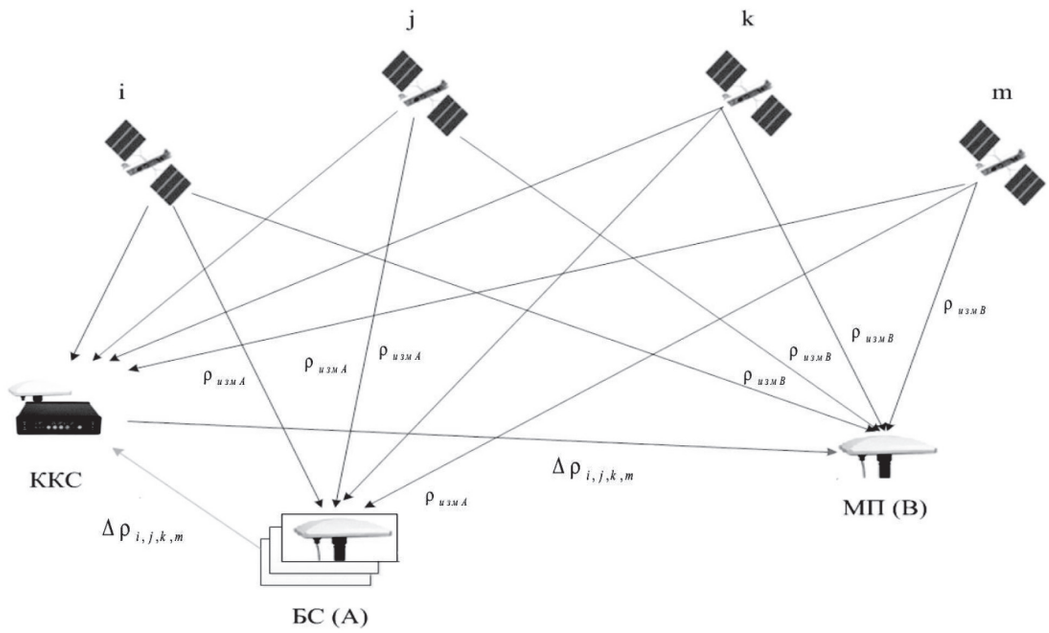

Рис. 3. Метод коррекции относительных координатных определений

3 2018.indd 122 26.09.2018 10:05:14

где появляется зависимость положения пункта *B* от времени (*t*). В этой математической модели в каждую эпоху неизвестны три координаты (X_B, Y_B, Z_B) (2).

При обработке измерений как в статическом режиме, так и в кинематическом режиме реального времени, возможно, использование корректирующей информации [4] в навигационный параметр (Δr) (формула 9), благодаря которой время выполнения наблюдений значительно сократится, ввиду того, что потребитель будет получать уточненные псевдодальности или уточненную разность фаз для вычисления своих координат и в дальнейшем реализации относительного позиционирования.

$$\rho_B^i(t) = \sqrt{\left(X^i(t) - X_B\right)^2 + \left(Y^i(t) - Y_B\right)^2 + (Z^i(t) - Z_B)^2} + \Delta r\,. \quad (9)$$

В основе этого приема лежит положение о том, что влияние различных источников ошибок на результаты измерений одинаково как для референцной станции, так и для мобильного приемника, то есть используются свойства коррелированных ошибок [1].

Корректирующая информация (КИ) от референцной станции к полевому приемнику могут передаваться при пост-обработке или в реальном масштабе времени. В первом случае после выполнения наблюдений файлы с результатами измерений переводятся на один компьютер, где и происходит их обработка специальным программным обеспечением. Во втором случае КИ от базовой станции передается полевому приемнику через радиомодем или другими способами беспроводной связи. Это дает возможность получать координаты мобильного приемника на участке работ через несколько секунд после очередного измерения.

Для вычисления координат определяемого пункта сначала необходимо вычислить координаты спутника для заданного момента времени. Для определения координат навигационного спутника осуществляется последовательность вычислений (описывается стандартный алгоритм позиционирования спутника, который дополнен блоком вычисления компонент вектора относительной скорости спутника) [5]. Далее решение навигационной задачи на определяемом пункте выполняется с использованием полученной от ККС корректирующей информации. После получения координат определяемого пункта абсолютным методом выполняется вычисление точных координат относительным методом [1, 5].

Таким образом, мобильная сеть референцных станций и реализованный в ней метод коррекции относительных координатных определений позволит оперативно развить исходную геодезическую основу с необходимой плотностью пунктов и точностью их определения при создании геопространственной информации.

Литература

1. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К.М. Антонович – М: ФГУП «Картгеоцентр» 2006. – 311 с.

2. ГОСТ Р 54459–2011. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы дифференциальной коррекции. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 13 с.

3. ГОСТ Р 53612–2009. Глобальная навигационная спутниковая система. Морские дифференциальные подсистемы. Формат передачи корректирующей информации. – М.: Стандартинформ, 2012. – 40 с.

4. ГОСТ Р 32449-20123. Глобальная навигационная спутниковая система. Станция контрольно-корректирующая локальная гражданского назначения. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. – 7 с.

5. Математические модели и алгоритмы обработки измерений спутниковой навигационной системы GPS. Стандартный режим. / Н.Б. Вавилова [и др.]. – М.: Механико-математический факультет МГУ, 2001 – 114 с.

6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

7. Parkinson, B. W. Global Positioning System / B.W. Parkinson, J.J.Jr. Spilker. – American Institute of Aeronautic and Astronomics, Inc. 1996 –1436 p.

3 2018.indd 123 26.09.2018 10:05:14