

Куштин Владимир Иванович,
Kushtin Vladimir Ivanovich,
заведующий кафедрой Высшей геодезии и фотограмметрии
head of the department of the Highest geodesy and fotogrammetriya,

Батчаева Зульфира Хасанбиевна
Batchaeva Zulfira Hasanbievna
аспирант кафедры Высшей геодезии и фотограмметрии
graduate student of chair of the Highest geodesy and fotogrammetriya
Ростовский государственный строительный университет
Rostov state construction university
E-Mail: RGSY-geodezia@yandex.ru

Учет влияния нейтральной атмосферы на результаты измерения расстояния с помощью электро-магнитных волн (ЭМВ)

Accounting for the effects of no atmosphere on the results of measuring distance using
electro-magitnyh of waves (EMW)

Аннотация: Результаты спутниковых измерений подвержены влиянию случайных и систематических ошибок. В последнее время идет активная работа по развитию методов определения местоположения высокой точности. Тропосферная задержка является одним из серьезных факторов в ошибке определения местоположения.

The Abstract: The results of satellite measurements are influenced by random and systematic errors. Recently, we are actively working on the development of methods for determining the location accuracy. Tropospheric delay is a major factor in the error finding location.

Ключевые слова: ГИС, СРНС, тропосферная задержка, нейтральная атмосфера, определение местоположения.

Keywords: GIS, SRNS, tropospheric delay, neutral atmosphere, finding location.

В современных условиях в связи с бурным ростом возможностей технических средств, а также математических и программных способов добывания, сбора, обработки, хранения и передачи информации повышается эффективность информационного воздействия на функционирование систем управления. Происходит процесс перехода общества к качественно новому состоянию, основанному на использовании информации как материальной силы важной составной частью которых являются геоинформационные системы (ГИС).

При использовании спутниковых систем измеряют расстояние от пунктов на земной поверхности или вблизи нее до созвездия спутников. Исследование показало, что измерения подвержены влиянию разнообразных факторов. Точный учёт этих факторов не всегда возможен, в результате чего при измерениях псевдодальностей и фаз появляются систематические и случайные ошибки. Действие этих ошибок передается на вычисленные координаты пунктов. Действие дополнительных факторов, как, например, геометрии взаимного расположения наблюдателя и созвездия спутников, ошибки эфемерид спутников и координат опорной станции, может проявляться в процессе вычислений.

Современное состояние обработки спутниковых радионавигационных систем (СРНС) наблюдений в геодезии позволяет добиваться точности позиционирования на уровне 1-2 мм для плановых координат и 5-10 мм по высоте, при продолжительности сеанса в одни сутки. Меньшая точность по высоте имеет две причины.

Во-первых, существует теоретический предел, связанный с распределением спутников на небесной сфере, поскольку наблюдения производятся до некоторой минимальной угловой высоты. Во-вторых, наиболее существенным фактором, влияющим на результаты дальномерных измерений, является изменение скорости ЭМВ в тропосфере и ионосфере.

Ионосфера состоит из частиц, ионизируемых солнечным ветром (прямой солнечной радиацией) и освобождённых при ионизации электронов. Электрическое поле ионов влияет на скорости распространения электромагнитных волн на всех частотах, вызывая в искривленном пути сигнала временные запаздывания прибывающих модуляций несущей волны, опережение фаз несущей частоты. Геометрическое искривление пути сигнала вызывает малую задержку, которой можно пренебречь уже для угловой высоты спутников более 5°.

Показатель преломления воздуха для ЭМВ, используемых в СРНС, определяется по формуле

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (1.1)$$

где ε и μ – электрическая и магнитная проницаемость воздуха.

На основании формулы $v = \frac{c}{n}$, (где c - реальная скорость света в вакууме) для фазовой и групповой скоростей примут вид:

$$v_{\phi} = \frac{c}{n_{\phi}}, \quad \text{и} \quad v_{gp} = \frac{c}{n_{gp}}, \quad (1.2)$$

Имеются фазовая и групповая скорости и соответствующие им фазовый и групповой коэффициенты преломления. При лазерной интерференции используют фазовый, при светодальномерных измерениях – групповой коэффициент преломления. В радиодиапазоне из-за отсутствия дисперсии (зависимости от длин волны) групповая и фазовая скорости и, следовательно, коэффициенты преломления совпадают[2].

В оптическом диапазоне индекс преломления воздуха при абсолютной температуре T , давлении P и влажности e определяют по формуле Баррелла - Сирса: для фазового индекса преломления [1]

$$N_{\phi} = (N_0)_{\phi} \frac{T_0}{P_0} \cdot \frac{P}{T} - \left(17,045 - \frac{0,1857}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}; \quad (1.3)$$

для группового индекса преломления

$$N_{gp} = (N_0)_{gp} \frac{T_0}{P_0} \cdot \frac{P}{T} - \left(17,045 - \frac{0,5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}. \quad (1.4)$$

Влияние среды на распространение электромагнитных волн (ЭМВ)

Многолучевостью, или многопутностью, микроволнового спутникового сигнала называют многократное отражение его от окружающих приемную антенну объектов.

Многолучевость свойственна тем, что к приемнику приходит не только прямой сигнал от НИСЗ, но и переотраженный от окружающих предметов, деревьев, людей, животных, водных поверхностей, подстилающей поверхности, строений и т.п. Но источников многолучевости значительно больше. Данное явление имеет место в ионосфере и далее в тропосфере. В результате возникает диффузная многолучевость. Дискретная многолучевость переотражение сигнала от действительных предметов. Картина многолучевости непостоянна и меняется со временем.

Различают многолучевость кодового и фазового сигналов. Кодовая многолучевость может достигать 150 метров. Фазовая многолучевость не превышает четверти цикла, т.е. 5-6 см. Ошибки в псевдодальность возникаю из-за интерференции сигнала.

Влияние тропосферы на спутниковые координатные определения. На высоте около 50 км сигналы входят в электрически нейтральную газовую атмосферу, которая состоит из тропосферы, тропопаузы и нижней части стратосферы. Влияние этого слоя на прохождение сигнала СРНС называют «влиянием тропосферы», однако здесь корректнее было бы говорить о влиянии «нейтральной атмосферы». Тем не менее, в дальнейшем оба этих термина будут использоваться как равнозначные с точки зрения их воздействия на электромагнитные сигналы СРНС [4].

Расположенные в слое тропосферы атомы и молекулы электрически являются нейтральными, то есть не рассеивают радиосигналы на частотах до 30 ГГц, поэтому показатель преломления здесь не зависит от частоты и $n_f = n_g$. Но в нейтральной атмосфере на показатель преломления начинают значительно влиять изменения плотности воздуха с высотой.

Плотность воздуха в высоких слоях атмосферы очень мала. На высоте 60 км, плотность составляет 0,316 г/м³. К высоте 100 км она уменьшается по сравнению с поверхностными значениями в 106 раз, а к 200 км - в 1010 раз.

Так как плотность газа зависит от его физических характеристик, можно записать показатель преломления как функцию от физических параметров атмосферы. Эссеном и Фрумом, на основании обработки многолетних метеорологических наблюдений, было предложено представлять показатель преломления воздуха для коротких радиоволн в виде ряда [3]:

$$(n - 1) \cdot 10^6 = N = k_1 \frac{P_c}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (1.5)$$

где P_c и e - соответственно полное сухое давление воздуха и парциальное давление паров воды, (в миллибарах); T - абсолютная температура воздуха (о Кельвинах); k_1 и k_2 - коэффициенты, отвечающие за учёт ультрафиолетового электронного перехода соответственно для сухого и влажного воздуха; k_3 - коэффициент, возникающий из-за постоянных дипольных инфракрасных вращательных переходов паров воды.

Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3 определялись многими исследователями (см. таб. 1).

Таблица 1

| Значения коэффициентов k_1, k_2 и k_3 из разных публикаций | | | | | |
|--|---------------------------|-----------------|------------|--------------|--------------|
| источник | Smith and Weintraub, 1953 | Boudouris, 1963 | IUGG, 1963 | Thayer, 1974 | Rueger, 2002 |
| k_1 | 77,610 | 77,590 | 77,624 | 77,600 | 77,6880 |
| k_2 | 72,000 | 72,000 | 64,700 | 64,790 | 71,2952 |
| k_3 | 375000 | 375000 | 371897 | 377600 | 375463 |

Коэффициенты Смита и Вейнтрауба, а также Тайера, были определены для наблюдений оптического диапазона и не должны использоваться при микроволновых наблюдениях. Для получения максимально достоверного учёта влияния тропосферы на результаты измерения в настоящее время требуется провести уточнение коэффициентов модели атмосферы, зависящих от длины волны.

Влияние тропосферы в зенитном направлении (зенитная тропосферная задержка, ЗТЗ), при абсолютном методе позиционирования, составляет около 2,5 м. На начальной стадии разработки СРНС, эта ошибка считалась незначительной и поэтому не учитывалась, но когда требования отдельных пользователей к точности стали повышаться, возник интерес к моделям, достоверно прогнозирующим влияние нейтральной атмосферы.

При дифференциальном методе наблюдений учёта влияния тропосферы дело обстоит сложнее. Принято считать, что введение дифференциальной поправки в геометрические дальности от мобильной станций до спутников, вычисленной на опорной станции, избавляет эти наблюдения от влияния нейтральной атмосферы. Такое убеждение вполне допустимо при идентичности характеристик атмосферы над обеими станциями наблюдений. Однако такие случаи редки в реальной практике измерений, и поэтому влияние тропосферы исключается лишь частично. Возникает вопрос о границах применения выражений для вычисления поправки за влияние тропосферы, основанных на стандартной модели атмосферы, и погрешностях, возникающих в результате применения этих выражений.

При построении геодезической сети спутниковыми методами расположение станций перестало зависеть от видимости между пунктами. Теперь выбор места установки приёмника определяется удобством подъездов, открытостью радиогоризонта и наличием потенциальных источников помех и искажения сигналов (высоковольтные ЛЭП, антенны мощных радиоизлучателей, поверхности перетражения и т.д.). Таким образом, длина базовых векторов теперь ограничена только выбором типа спутникового приёмника и продолжительностью запланированного сеанса наблюдений.

Другой момент, требующий внимание - наличие возле поверхности слоев с различными характеристиками. Логично предположить, что кроме горизонтальных вариаций приземного слоя тропосферы, на величину ЗТЗ будет влиять и вертикальное распределение слоев. Если станции имеют одинаковую высоту над геоидом, они находятся в одном слое тропосферы, однако, если разность высот между станциями значительна, они вполне могут попасть в разные слои. Таким образом, можно утверждать: чем большее расстояние между станциями, тем более внимательно необходимо относиться к проблеме учёта ЗТЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков В.Д., Голубев А.Н. Измерение расстояний свето- и радиодальномерами. В кн.: Справочник геодезиста, кн. 2-я./ Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука, - М.: Недра, 1985.
2. Куштин В.И. Учет влияния атмосферы на результаты измерения длин радионэлектронными системами. Москва, 2003.
3. Куштин В.И., Куштин И.Ф. Учет замедления скорости электромагнитных волн в атмосфере при определении координат точек спутниковыми методами. Известия РГСУ. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 1998.
4. Фролова Е.К. Методика учёта влияния тропосферы на точность спутниковых координатных определений. Дисс. На соискание ученой степени канд. техн. Наука. Новосибирск, 2007г.