

Комаровский Ю. А.
Yu. A. Komarovskiy

УХУДШЕНИЕ ТОЧНОСТИ GPS-ПРИЁМНИКА ВБЛИЗИ ВЫСОКИХ ОБЪЕКТОВ

GPS RECEIVER'S ACCURACY DEGRADATION NEAR TALL OBJECTS



Комаровский Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (Россия, Владивосток). E-mail: komarovskiy@msun.ru.

Mr. Yuriy A. Komarovskiy – PhD in Engineering, Senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture of the Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi (Russia, Vladivostok). E-mail: komarovskiy@msun.ru.

Аннотация. Рассмотрены результаты эксперимента, в котором антенна GPS-приёмника была установлена возле высокого здания. Здание закрывало спутники, находящиеся в южной полусфере. Со стороны антенны вертикальный угол, измеряемый от горизонтальной плоскости до направления на верхнюю кромку здания (угол тени), составлял 80 градусов. При таких условиях размах варьирования координат достиг 200 м, а средняя квадратическая погрешность увеличилась в 10 раз.

Summary. We conducted an experiment where the antenna of a GPS receiver was placed near a tall building that blocked signals of the GPS satellites in the direction of the sky's southern hemisphere. From the base of the antenna (at the ground level), the angle of view of the building (top to bottom) was equal to 80 degrees. The obtained results showed that under the above conditions the coordinate observation errors reached 200 meters and the mean squared error rose 10-fold.

Ключевые слова: GPS-приёмник, затенение сигналов спутников системы GPS, случайная погрешность.

Key words: GPS-receiver, GPS satellites' signal shadowing, random error.

УДК 621.396.932.1:629.783

Несмотря на почти 30-летнюю эксплуатацию спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS, до сих пор изучение её недостатков не нашло адекватного освещения в научной литературе. К числу недостатков СРНС Навстар GPS относится существенная потеря точности определения координат даже при незначительном затенении сигналов спутников расположенными рядом предметами. Как показали результаты экспериментальных наблюдений, проведённых автором в течение месяца, погрешности определения места приёмником GPS-128 возрастают до 43 м с вероятностью 0,95 при сравнительно малом затенении [2]. В отсутствие препятствий сигналам спутников точность приёмника GPS-128 не хуже 5 м с вероятностью 0,95. В практике применения приёмников СРНС Навстар GPS для определения координат носителя и его элементов вектора абсолютного перемещения нередко возникают ситуации, когда антенна приёмника оказывается рядом с высоким сооружением, создающим тень сигналам спутников. Такие явления наступают при движении наземных видов транспорта по пересечённой местности и в городе по улицам с высокой застройкой. Многократно фиксировались случаи, когда прекращалось автоматическое сопровождение автомобилей, оборудованных спутниковыми системами мониторинга и современными спутниковыми противоугонными системами, при въезде в город или при парковках возле высоких зданий. Подобные явления наблюдаются на судах, на которых антенна при-

ёмника СРНС Навстар GPS крепится на рейлингах верхних мостиков. Тогда судовые конструкции неизбежно затеняют сигналы спутников. Это приводит не только к заметному и внезапному ухудшению точности определения текущих координат и параметров его движения, но и к кратковременным прекращением нормальной работы приёмника. Отмечаются случаи существенного снижения качества работы авиационных приёмников СРНС Навстар GPS на вертолётах, совершающих полёты в горных ущельях. Данная статья предназначена для объяснения таких явлений, а также для оценки ухудшения точности координат.

Плоскости орбит спутников СРНС Навстар GPS имеют наклонение к плоскости экватора, равное 55° . В силу этого траектории спутников на небесной сфере с позиции наблюдателя, находящегося в широте Владивостока, выглядят так, как это показано на рис. 1, а. Относительно наблюдателя в промежуточной северной широте траектории располагаются таким образом, что к северу образуется область, в которую никогда не заходят спутники [3]. Эта область будет смещаться к зениту по мере перемещения GPS-приёмника к северу.

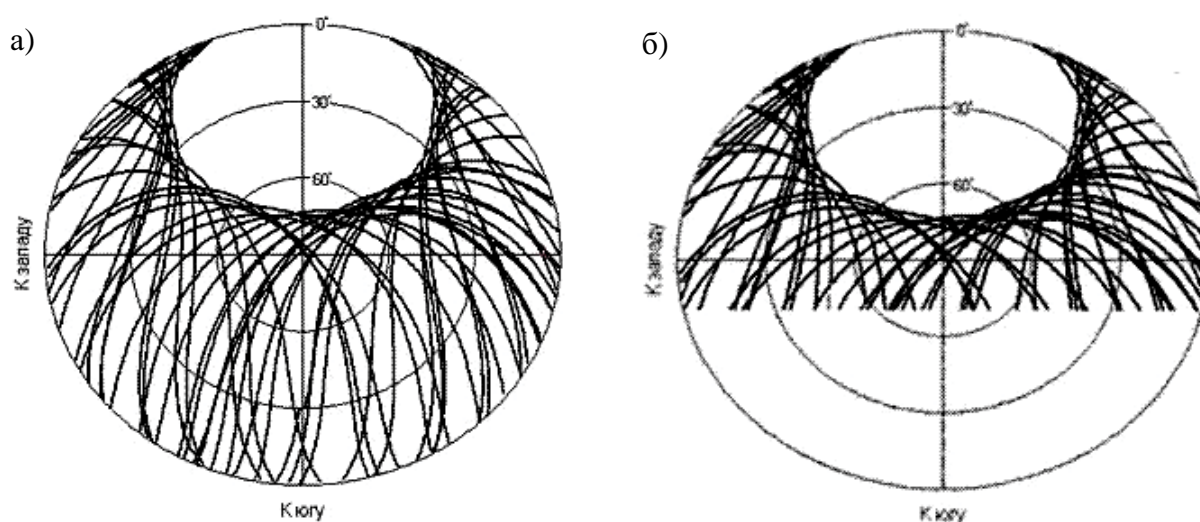


Рис. 1. Траектории спутников Навстар GPS для наблюдателя во Владивостоке:
 а – траектории без затенения сигналов спутников; б – траектории спутников при экранировании их сигналов с юга высоким сооружением

Если на пути сигналов спутников возникает высокое протяжённое препятствие, относительно которого антенна располагается к северу, то такие спутники не воспринимаются GPS-приёмником. Они становятся невидимыми приёмником. Траектории тех спутников, сигналы которых достигают приёмника, показаны на рис. 1, б. Из рисунка следует, что блокирование сигналов спутников с юга вызовет асимметрию в распределении определяемых широт GPS-приёмником. Так как траектории спутников (рис. 1, б) располагаются симметрично относительно меридиана наблюдателя, то определяемые долготы должны также распределяться симметрично.

Чтобы подтвердить эти предположения, а также оценить точность и характер распределения координат, был предпринят эксперимент. Он проводился в течение двух суток 22 и 23 октября 2010 г. во Владивостоке с судовым GPS-приёмником GP-37, изготовленным японской компанией Furuno. Антенна приёмника была установлена так, как это изображено на рис. 2.

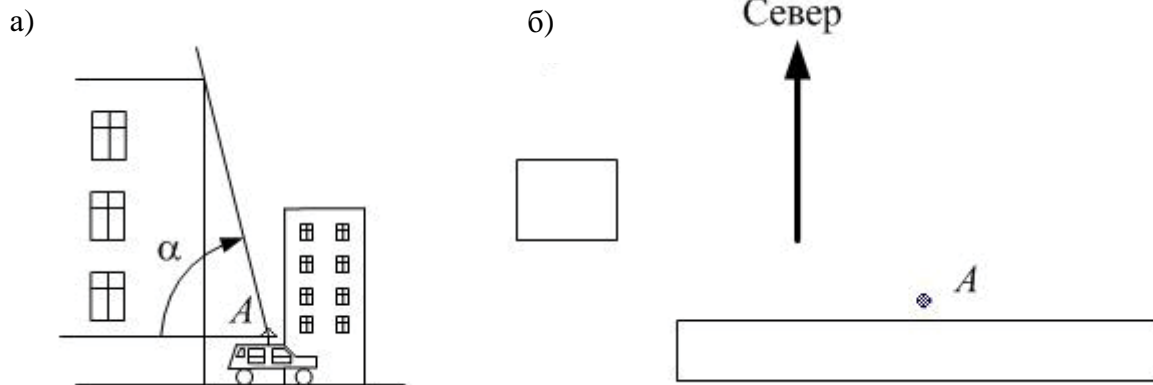


Рис. 2. Схема проведения эксперимента:
а – угол тени; б – расположение антенны в плане

Место проведения экспериментальных наблюдений было выбрано так, чтобы создающее с юга тень сигналам спутников здание было строго ориентировано своим большим размером вдоль параллели, а угол тени α составлял 80° . К сожалению, полной чистоты эксперимента достигнуть не удалось из-за здания, стоящего поодаль к западу. Информация от приёмника GP-37 ежесекундно автоматически записывалась в формате NMEA-0183 на жёсткий диск ноутбука в течение всех двух суток эксперимента. Приёмник был настроен на получение дифференциальных поправок контрольно-корректирующей станции мыса Поворотный.

Предварительная обработка накопленного статистического материала сводилась к выборке из всех записей только предложения \$GPGGA. Всего было зарегистрировано 173062 предложений \$GPGGA. Из них по каждой секунде наблюдений выделялись время по шкале UTC, динамические части координат в системе WGS-84, признак режима работы приёмника и число спутников, сигналы которых принимались в данный момент времени. Было обнаружено, что в месте проведения эксперимента дифференциальные поправки не принимались. Этот факт подтверждает предположение о неэффективности использования сигналов станций DGPS вблизи высоких сооружений [7].

Главным фактором, влияющим на точность работы приёмника любой СРНС, является число спутников, сигналы которых принимаются в данный момент времени. Чем их меньше, тем выше погрешности определения координат. Более того, если количество видимых спутников становится равным трём и менее, то приёмник СРНС прекращает определять координаты и элементы вектора абсолютного движения носителя. В результате обработки полученных данных оказалось, что на долю трёх и менее одновременно наблюдаемых спутников приходилось 8,6 % от всех зарегистрированных предложений \$GPGGA. При таком количестве спутников определение координат приёмником не происходило. Предложения \$GPGGA, соответствующие таким ситуациям, к обработке не принимались.

На рис. 3, а можно видеть гистограмму распределения числа одновременно радиовидимых спутников при угле тени 80° . Чаще всего в таких условиях одновременно наблюдалось пять спутников. Во время экспериментальных наблюдений созвездие действующих спутников СРНС Навстар GPS насчитывало 31 ИСЗ. Для сравнения на рис. 3, б представлена гистограмма, полученная по результатам наблюдений 1 декабря 2010 г., когда не было препятствий, создающих тень сигналам спутников. Видно, что максимум одновременно видимых ИСЗ приходится на 10. Минимум 1 декабря приходился на 8 спутников. В эксперименте 22-23 октября более 8 ИСЗ не наблюдалось ни разу. Следовательно, сооружения, блокирующие с юга сигналы спутников СРНС Навстар GPS при угле тени в 80° , могут вызывать не только значительные потери точности, но и прекращение нормальной работы приёмников.

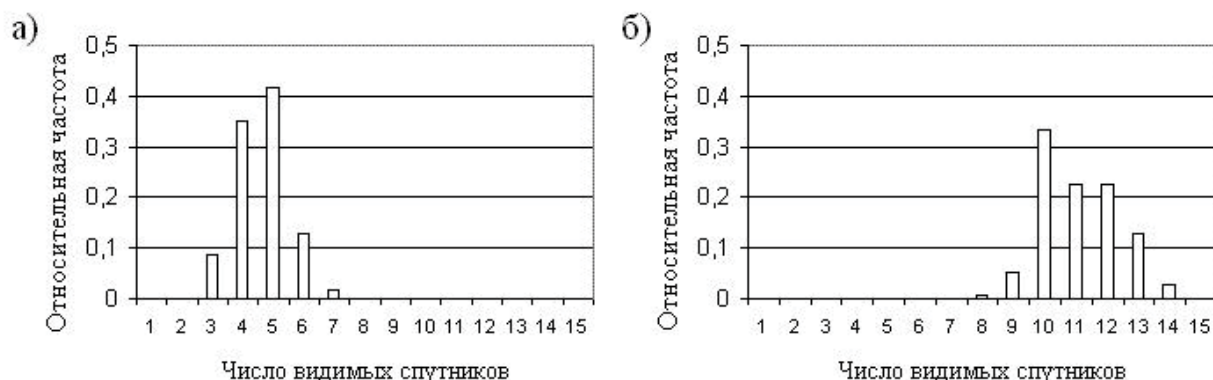


Рис. 3. Гистограммы распределения числа одновременно наблюдаемых спутников: а – в эксперименте 22-23 октября 2010 г.; б – в эксперименте 1 декабря 2010 года при отсутствии экранирующих объектов

Представление о точности полученных координат создают гистограммы распределений эмпирических плотностей вероятностей широт и долгот (рис. 4).

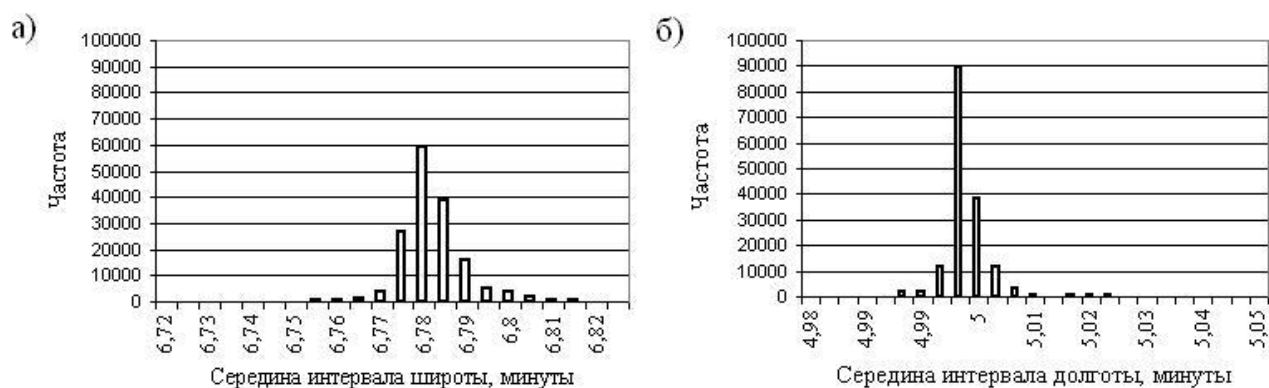


Рис. 4. Гистограммы распределения координат при угле тени 80°: а – гистограмма распределения широты; б – гистограмма распределения долготы

Ширина интервала гистограммы широты выбрана 0,005 мин, что соответствует 9,258 м. На рис. 4, а видно почти симметричное распределение с признаком скошенности в сторону больших значений широты, то есть к северу. Левое крыло гистограммы затянато гораздо больше относительно моды, но значение частот левого крыла малы по сравнению с частотами правого крыла.

Ширина интервала гистограммы долготы принималась равной 0,003 мин, что соответствует 4,069 м. На рис. 4, б видно превалирование частоты моды распределения долготы над частотами остальных интервалов. Гистограмма носит признаки положительной асимметрии с большим значением эксцесса. Сравнение гистограмм позволяет сделать вывод о большем рассеивании координат вдоль меридиана, чем по параллели.

Дальнейшая обработка полученного экспериментального материала сводилась к вычислению точечных оценок математических ожиданий, средних квадратических отклонений (СКО), размахов варьирования, асимметрий и эксцессов. Для расчётов применялся метод моментов.

Если считать определяемую GPS-приёмником широту φ непрерывной случайной величиной, то её математическое ожидание M_φ определится начальным моментом первого порядка [1]:

$$M_{\varphi} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi f(\varphi) d\varphi, \quad (1)$$

где $f(\varphi)$ – плотность вероятности распределения широты.

Чтобы получить точечную оценку математического ожидания широты, были подсчитаны частоты n_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$), с которыми i -е значение широты φ_i встречалось в выборке, полученной в ходе наблюдений 22-23 октября 2010 г. С учётом известных n_i точечная оценка математического ожидания широты φ_{cp} вычислялась с помощью следующих формул:

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \varphi_i n_i, \quad N = \sum_{i=1}^k n_i. \quad (2)$$

Дисперсия случайной величины D_{φ} является центральным моментом второго порядка

$$D_{\varphi} = \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi - M_{\varphi})^2 f(\varphi) d\varphi. \quad (3)$$

На практике в качестве меры точности применялась точечная оценка среднего квадратического отклонения s_{φ} , которая представляет собой корень квадратный из точечной оценки дисперсии S_{φ} :

$$S_{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (\varphi_i - \varphi_{cp})^2 n_i. \quad (4)$$

Важной характеристикой распределения случайной величины является асимметрия A_{φ} . Асимметрия есть не что иное, как центральный момент третьего порядка, отнесённый к кубу корня квадратного из дисперсии:

$$A_{\varphi} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\varphi - M_{\varphi})^3 f(\varphi) d\varphi}{(\sqrt{D_{\varphi}})^3}. \quad (5)$$

В процессе обработки полученных данных оценка асимметрии a_{φ} вычислялась по формуле

$$a_{\varphi} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (\varphi_i - \varphi_{cp})^3 n_i \right) / (\sqrt{S_{\varphi}})^3. \quad (6)$$

Наряду с асимметрией, при обработке полученного статистического материала вычислялся эксцесс распределения широты. Эксцесс необходим для грубой проверки близости распределения случайной величины к распределению Гаусса. Эксцесс E_{φ} является отношением центрального момента четвёртого порядка к квадрату дисперсии, уменьшенным на 3.

$$A_{\varphi} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\varphi - M_{\varphi})^4 f(\varphi) d\varphi}{D_{\varphi}^2} - 3. \quad (7)$$

Чем ближе величина эксцесса к 0, тем выше вероятность того, что исследуемая случайная величина распределена по закону Гаусса. В данном исследовании оценка эксцесса e_φ вычислялась по следующей формуле:

$$e_\varphi = \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (\varphi_i - \varphi_{cp})^4 n_i \right) / S_\varphi^2 \right] - 3. \quad (8)$$

Помимо дисперсии, для оценки рассеивания случайной величины φ в статистических исследованиях используется размах варьирования $\Delta\varphi$, как разность по абсолютной величине между максимальным зарегистрированным значением широты и минимальным.

Перечисленные статистические характеристики случайной величины определяемой приёмником GP-37 долготы вычислялись по формулам (1) – (8).

Величины СКО и размахов варьирования широт и долгот принято выражать в метрах. Чтобы перейти от угловой меры к линейной, необходимо величины СКО и размахи варьирования умножить на длины одной минуты меридиана l_m и параллели l_p в средней широте. Для этого воспользуемся простыми формулами вычисления l_m и l_p , полученными автором [4].

$$l_m = K_{11} - K_{22} \cos 2\varphi_{cp} + K_{33} \cos 4\varphi_{cp}, l_p = [C_1 - C_2 \cos 2\varphi_{cp} + C_3 \cos 4\varphi_{cp}] \cos \varphi_{cp}. \quad (9)$$

Коэффициенты формул (9), рассчитанные для референц-эллипсоида WGS-84, помещены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты для вычисления l_m и l_p по формулам (9)

K_{11}	K_{22}	K_{33}	C_1	C_2	C_3
1852,21549	9,33025	0,01936	1858,4416	3,12065	0,00389

Результаты обработки данных, полученных в ходе экспериментальных наблюдений 22-23 октября 2010 г., помещены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики распределений координат GP-37 при угле тени 80° с юга

Статистическая характеристика	Широта	Долгота
1. Среднее, мин	6,784154	5,001279
2. Среднее квадратическое отклонение, мин	0,008455	0,003937
3. Среднее квадратическое отклонение, м	15,65	5,34
4. Минимальное значение, мин	6,72	4,977
5. Максимальное значение, мин	6,827	5,048
6. Размах варьирования, мин	0,107	0,071
7. Размах варьирования, м	198,12	96,31
8. Асимметрия	-0,1914	2,6961
9. Эксцесс	7,0459	20,2317
10. Объём выборки	161593	161593

Анализ полученных результатов уместно проводить, сравнивая содержимое табл. 2 с характеристиками точности GPS-приёмника GP-37 в экспериментальных наблюдениях в Усурийской астрофизической обсерватории (УАФО) ДВО РАН. Наблюдения в УАФО проводились автором летом и осенью 2005 г. при отсутствии предметов, блокирующих сигналы спутников. Характеристики точности приёмника GP-37 в наблюдениях в УАФО собраны в табл. 3 [5, 6].

Таблица 3

Характеристики точности приёмника GP-37 в экспериментах в УАФО

Статистическая характеристика	Лето 2005 г.		Осень 2005 г.	
	Широта	Долгота	Широта	Долгота
СКО, м	1,564	1,219	1,649	1,252
Размах варьирования, м	20,37	12,22	23,15	14,24
Асимметрия	-0,464	0,143	0,024	-0,287
Эксцесс	1,759	0,829	1,455	0,675

Сравнение СКО позволяет сделать вывод об увеличении случайной погрешности широты в 10 раз и долготы в 4,4 раза. СКО долготы при угле тени 80° могло быть и меньше, если бы не было здания, стоявшего к западу от места расположения антенны (см. рис. 2). При угле тени 80° размах варьирования вдоль меридиана увеличивается в 8,5 раза, а по параллели – в 6,7 раза. Как следует из табл. 3, при отсутствии препятствия сигналам спутников асимметрии распределения широты и долготы малы и знакопеременны. Неожиданно мала асимметрия распределения широты при угле тени 80° . От появления препятствия сигналам спутников значительно увеличилась только асимметрия долготы. Следует отметить увеличение эксцессов распределений. Эксцесс широты увеличился в 4 раза, а эксцесс долготы возрос с 0,829 до 20,2317 при появлении высокого препятствия. Этот факт прослеживается на гистограммах (см. рис. 4). Следовательно, при больших углах тени вид распределения получаемых координат нельзя принимать Гауссовским.

О том, как происходило рассеивание координат в эксперименте 22-23 октября 2010 г., можно судить по рис. 5. На нём точками нанесены обсервованные координаты антенны относительно средней широты и средней долготы. Координаты точек выбирались через 10 мин из всего полученного в течение двух суток массива наблюдений.

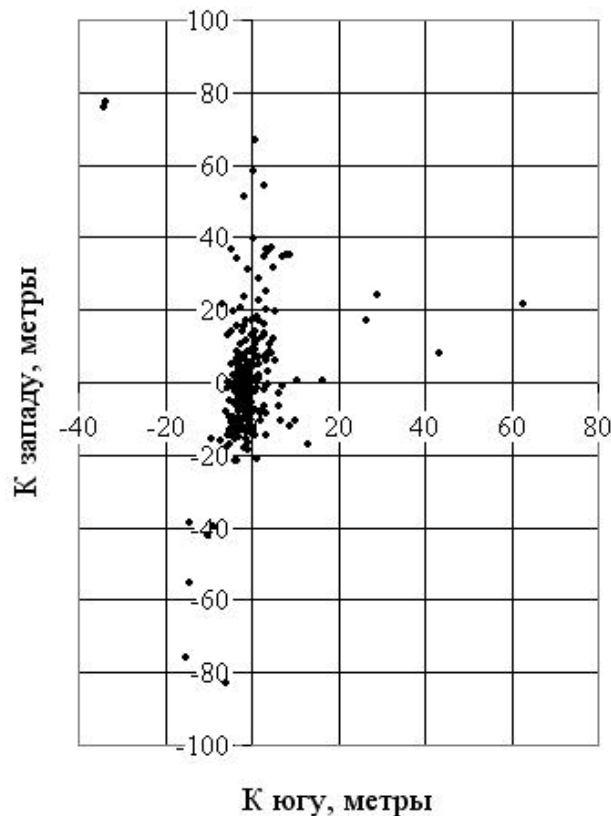


Рис. 5. Рассеивание координат при угле тени 80°

Перед началом экспериментальных наблюдений 22-23 октября 2010 г. автором независимым геодезическим способом были получены реальные координаты антенны с точностью $\pm 0,5$ м. Их динамические части составили $6,791'$ и $5,009'$ широты и долготы соответственно. Это позволило рассчитать отстояния в метрах среднего места антенны (см. первую строку табл. 2) от реального места. Смещения составили 12,68 м к югу и 10,47 м к западу. Следовательно, средние координаты антенны сместились в сторону объектов, блокирующих сигналы спутников. Несмотря на то, что отстоящее от антенны к западу здание имело значительно меньшие размеры, оно вызвало смещение, почти равное смещению к югу от более протяжённого строения.

Полученные результаты располагают сформулировать следующие выводы и предложения.

1. Перемещение с севера на юг GPS-приёмника в сторону высокого и протяжённого объекта, блокирующего сигналы спутника системы Навстар GPS, приводит к ухудшению точности определения координат. Рассеивание координат может достигать 200 м, а средняя квадратическая погрешность увеличивается в 10 раз.

2. Средние координаты смещаются в сторону препятствия сигналам спутников.

3. Когда высокий и протяжённый объект создаёт со стороны юга угол тени в 80° , то возникают ситуации кратковременного прекращения нормальной работы GPS-приёмника из-за нехватки спутников в зоне радиовидимости. В этом случае приёмник прекращает определять координаты. Такие ситуации можно преодолеть, если использовать мультисистемные приёмники СРНС. Но надо помнить о том, что при этом ухудшения точности избежать не удастся.

4. Экспериментальные наблюдения были выполнены в широте 43° . С увеличением широты продолжительность периодов прекращения нормальной работы GPS-приёмников будет увеличиваться при таком же угле тени.

5. Из результатов экспериментальных наблюдений следует, что приём дифференциальных поправок, транслируемых контрольно-корректирующими станциями в диапазоне от 283,5 до 325 кГц, в условиях высокой городской застройки затруднён.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 564 с.
2. Кац, В. А. Погрешности приёмника Garmin GPS-128 при частичном затенении сигналов спутников / В. А. Кац, Ю. А. Комаровский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 173-178.
3. Комаровский, Ю. А. Наблюдаемость спутников СРНС Навстар GPS / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Вып. 15. Серия: Судовождение. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2007. – С. 35-41.
4. Комаровский, Ю. А. Точные вычисления пройденных расстояний на земных эллипсоидах / Ю. А. Комаровский // Современные проблемы развития и методики преподавания естественных и точных наук: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 16-18 декабря 2009 г. – Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2009. – С. 154-161.
5. Комаровский, Ю. А. Влияние времени года на точность определения координат приёмником GP-37 / Ю. А. Комаровский // Судовождение – 2006: сб. науч. тр. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2006. – С. 56-71.
6. Комаровский, Ю. А. Точность определения координат приёмником СРНС Навстар GPS Furuno GP-37 / Ю. А. Комаровский // «Морская экология-2005» (MAREC-2005): труды Междунар. науч.-практ. конф., 5-7 октября 2005 г. Т. 2. – Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – С. 39-47.
7. Okuda S., Arai Y. The Position Accuracy of DGPS Affected by Propagation Characteristic on MF Beacon Wave. Proceedings of the 2011 International Meeting of the Institute of Navigation. January 24-26, 2011. San Diego, CA. - P. 718-724.