

УДК 528.02.528.63

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРИБОРНОЙ ТОЧНОСТИ И СМЕЩЕНИЙ ФАЗОВЫХ ЦЕНТРОВ АНТЕНН ZEPHYR GEODETIC И R8 MODEL 2/ SPS880 INTERNAL В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ НА МЕТРИЧЕСКИХ ЭТАЛОНАХ

С.К. ТОВБАС*(Полоцкий государственный университет)*

Смещение фазового центра антенны является одним из источников ошибок высокоточного позиционирования с использованием глобальных навигационных спутниковых систем. Фирма Trimble утверждает, что технология, примененная при создании антенны Zephyr Geodetic, позволяет понизить величину смещения фазового центра до значения в 2 – 3 раза меньше, чем предельная приборная точность приемника. При этих условиях смещение фазового центра можно рассматривать как случайную составляющую предельной приборной точности. В статье приведены результаты реализации вариантов методик определения смещений фазовых центров антенн в полевых условиях на метрических эталонах при вводе в эксплуатацию. Даны рекомендации по метрологии оборудования силами пользователя в ходе эксплуатации.

Введение. Антенный элемент – это часть GPS-антенны, которая принимает энергию, передаваемую спутниками. В точных GPS-измерениях этот элемент обычно выглядит как плоская полоска металла. Обычно такие антенны имеют приблизительно квадратную форму. Когда система GPS-приемник/антенна отслеживает спутники, выполняя кодовые и фазовые измерения, реальные точки в пространстве, между которыми производится эти измерения – это фазовые центры антенны спутника и антенны GPS-приемника.

Номинально фазовый центр антенны GPS-приемника расположен в центре «квадрата» излучателя, совпадающего с механическим центром антенны. Однако на практике рабочий электрический центр антенны смещается на некоторое расстояние в пространстве (по трем измерениям). Это смещение – функция от текущего азимута и возвышения отслеживаемых спутников, способа питания антенны (электрического соединения антенны со всеми остальными элементами схемы). Поскольку в один и тот же момент отслеживаются несколько спутников, причем каждый из них имеет собственные азимут и возвышение, каждое измерение производится из слегка отличающихся точек в пространстве вблизи механического центра антенны. Поскольку требуется производить измерение всего одной точки в один момент времени, антенны производят измерения от группы электрических фазовых центров, находящихся в слегка отличающихся местах. Пространство, в котором электрические фазовые центры могут колебаться напоминает эллипсоид, при больших различиях в типах антенн эти эллипсоиды также будут сильно различаться.

Идеальная антенна для геодезических измерений производит все измерения из точно определенного, физически описанного механического центра, не зависящего от угла возвышения и азимута наблюдаемого спутника либо любого другого фактора. О таких антеннах можно сказать, что они имеют в высшей степени стабильный фазовый центр.

Основная часть. На практике электрические фазовые центры всех GPS-антенн сдвигаются – даже у антенн типа «Choke ring», которые используются для высокоточных геодезических и научных измерений. Более того, две антенны одного и того же типа, расположенные на концах одной базовой линии, могут быть выпущены со слегка отличными допусками и будучи развернуты в разных направлениях, создают различные относительные колебания фазового центра в горизонтальной плоскости. Все антенны, включая антенны типа «Choke ring», имеют значительные колебания фазового центра в вертикальной плоскости, находящиеся в прямой зависимости от угла возвышения наблюдаемого спутника. Однако для высокоточных антенн эти колебания имеют одинаковый характер, даже для различных антенн одного типа.

Обыкновенные антенны обычно имеют одноточечную схему подачи питания, при которой антенна соединяется со всей остальной схемой в одной точке, и которая, в свою очередь, делает антенну асимметричной, что ведет к разбросу колебаний фазового центра. В отличие от обычных антенн, Trimble Zephyr и Zephyr Geodetic используют передовую n -точечную схему подачи питания, где n – положительное целое число больше двух, и точки подачи питания расположены симметрично на излучателе. Это значительное усовершенствование по сравнению с одноточечной схемой. Основное преимущество этой разработки в практически безупречной симметрии, достигаемой с помощью объединения сфазированной системы множества точно расположенных точек подачи питания антенны и передового высокоточного производства. В антеннах такого типа колебание фазового центра в горизонтальной плоскости ограничивается значением менее чем в 1 мм, в зависимости от направления, из которого принимается сигнал, или разворота антенны [1].

С целью подтверждения или опровержения информации о субмиллиметровой стабильности их фазовых центров, нами были выполнены экспериментальные исследования, используя антенны двух станций Trimble R7 и одной Trimble R8. Исследования проводились двумя независимыми методами. Каждый из

них позволяет определить величины смещений фазовых центров каждой из антенн в плане и суммарные смещения для любой пары антенн по высоте. Следует отметить, что исходя из особенностей геодезических определений относительными спутниковыми методами, без каких-либо приближенных эталонов абсолютных высот [2], возможны определения точных поправок только в превышение для пары антенн.

Каждый из примененных нами методов должен обеспечить независимость измерений и максимально возможную объективность результатов.

Измерения произведены на эталонном полигоне, состоящем из трех закрепленных пунктов, расположенных в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника. Один из катетов треугольника имеет направление юг – север, второй запад – восток. Длины двух катетов 10.000 м, гипотенузы 14,142 м. Такие длины линий выбраны для того, чтобы прочие влияния, кроме смещений фазовых центров антенн и приборной точности оборудования, свести к пренебрежимо малым. Кроме того, полигон может быть устроен на любой площадке с открытым горизонтом. Схема полигона приведена на рисунке.

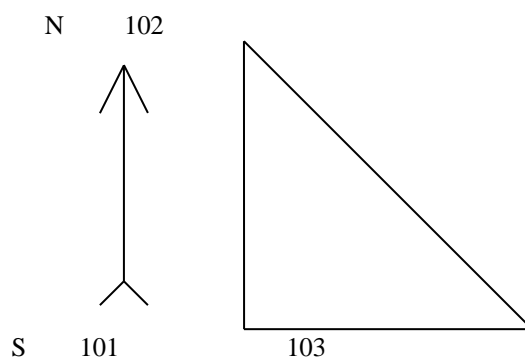


Схема эталонного полигона

Центры пунктов полигона заложены в грунт, а их марки на уровне грунта. Эталонные превышения определены нивелиром Dini-03 дважды, с расхождением значений одного и того же превышения не более 0,1 мм. Эталонные стороны определены компарированной рулеткой, десятью приемами, со средней квадратической погрешностью 0,5 мм. При установке антенны над центром пункта использовался оптический отвес, выверенный до точности центрирования 0,5 мм. Высота над центром пункта для антенны Zephyr Geodetic приемника R7 (далее антенны 1 и 2) определялась из 8 приемов измерений, для антенны R8 Model 2/SPS880 Internal приемника R8 (далее антенна 3) – из 3 приемов.

Первый метод. Метод исследования смещений фазовых центров основывается на методе тестирования антенн Trimble Zephyr Geodetic вращением исследуемой антенны вокруг вертикальной оси [2].

Контрольная антенна устанавливалась на пункте 101, а исследуемая на 102. Начальная ориентировка обеих антенн на север. Исследуемая антенна поворачивалась на 45 градусов через каждый час измерений, так как часовой временной промежуток на линиях длиной 10 – 15 метров дает корректную оценку предельной приборной точности оборудования.

Разности длин линий, полученные для диаметрально противоположных положений антенны, дадут удвоенное значение смещения фазовых центров в плане по направлениям на север, северо-восток, восток и юго-восток для исследуемой антенны, отягощенные случайными погрешностями.

$$\begin{aligned} D_0 &= D_{A1} + \delta_D + V_1, \\ D_0 &= D_{A2} - \delta_D + V_2, \\ D_{A2} - \delta_D + V_2 &= D_{A1} + \delta_D + V_1, \\ (V_2 - V_1) &= 2\delta_D + (D_{A1} - D_{A2}), \end{aligned} \quad (1)$$

где D_0 – длина линии между геометрическими центрами антенн; D_{A1}, D_{A2} – измеренные длины линий при ориентировке исследуемой антенны соответственно 0 и 180, 45 и 225, 90 и 270, 135 и 315 градусов; δ_D – поправка за смещение фазового центра в направлении данного диаметра исследуемой антенны; V_1, V_2 – поправки за случайные погрешности измерений.

После замены $(V_2 - V_1)/2 = V$, $\delta_D = \delta x \cdot \cos A + \delta y \cdot \sin A$ и $(D_{A1} - D_{A2})/2 = l$, получим четыре уравнения поправок вида:

$$V = \delta x \cdot \cos A + \delta y \cdot \sin A + l, \quad (2)$$

со значениями азимутов 0, 45, 90, и 135 градусов.

Систему решаем по методу наименьших квадратов параметрическим способом. Оценка точности $m = \sqrt{[V^2]/(n-2)}$, где n – количество уравнений.

Значения δx и δy позволяют вычислить элементы l и θ , линейный и угловой элементы внецентренности положения фазового центра в плане. Результаты измерений приведены в таблице 1, вычислений – в таблице 2.

Таблица 1
Таблица измерений смещений фазовых центров в плане (метод 1)

Базовая линия	Расстановка антенн	Азимут		Разность $(D_1 - D_2)/2$ (мм)
		D_1 (мм)	D_2 (мм)	
101 – 102		0	180	
	1 – 2	10004,5	10001,4	1,6
	1 – 3	10008,2	10006,5	0,8
101 – 102		45	225	
	1 – 2	10003,3	10002,0	0,6
	1 – 3	10004,7	10006,6	-1,0
101 – 102		90	270	
	1 – 2	10002,1	10001,6	0,2
	1 – 3	10005,5	10005,1	0,2
101 – 102		135	315	
	1 – 2	10002,8	10002,4	0,2
	1 – 3	10006,9	10005,9	0,5

Таблица 2
Таблица вычисления смещений фазовых центров в плане (метод 1)

Антенна	l	θ	m
2	1,0	202	0,7
3	0,2	30	1,0

Для определения предельной приборной точности в высотном отношении полученные превышения для пар приемников 1 – 2 и 1 – 3 сравниваем с эталонным. Результаты измерений приведены в таблице 3. Значения смещений для пар 1 – 2 и 1 – 3 составляют соответственно 1,7 и 2,2 мм.

Таблица 3
Таблица измерений смещений фазовых центров по высоте (метод 1)

Базовая линия	Расстановка антенн	Эталон, мм	Азимут				Среднее значение измеренного превышения, мм	
			Измеренное превышение, мм					
101 – 102	1 – 2	-15,5	-18,9	-16,3	-14,3	-15,8		
	1 – 3	-15,5	-19,9	-19,3	-16,0	-16,0		
			Азимут					
			Измеренное превышение, мм					
			180	225	270	315		
	1 – 2	-15,5	-18,3	-15,7	-14,7	-15,4		-16,2
	1 – 3	-15,5	-19,7	-16,9	-17,2	-16,7		-17,7

Второй метод. Применение второго метода преследовало две цели. Первая – определить изменение положения фазового центра во времени. Вторая – из значения предельной приборной точности по высоте выделить значение смещения фазового центра, хотя бы для одной пары антенн.

Процесс исследования одной антенны в плане и пары антенн по высоте состоит из трех циклов. Каждый цикл состоит из трех этапов, каждый этап – из двух приемов. Во всех циклах одна из антенн имеет статус исследуемой, другая контрольной. На всех этапах в первом приеме контрольная и исследуемая антенны ориентируются меткой на север, а во втором приеме контрольная антенна ориентируется меткой на север, исследуемая – меткой на юг. Длительность сбора измерительной информации в одном приеме – один час. Длительность одного этапа – два часа, одного цикла – шесть часов. В ходе первого цикла, на первом этапе контрольную антенну устанавливаем на пункте 101, исследуемую – на пункте 102, выполняем два приема. На втором этапе контрольную антенну устанавливаем на пункте 101, исследуемую – на пункте 103, выполняем два приема. На третьем этапе контрольную антенну устанавливаем на пункте 102, исследуемую на пункте – 103, выполняем два приема.

Но значения смещений, полученные в первом цикле, отнесены к различным промежуткам времени. Первый этап отнесен ко времени от 10 до 12 часов, второй – от 12 до 14, а третий – от 14 до 16. Чтобы отнести смещения по трем направлениям к одному и тому же временному промежутку, каждая антенна в паре с контрольной исследована в трех циклах. В таблице 4 приведена последовательность измерения линий по этапам и циклам. Расположение антенн на концах линий такое же, как в первом цикле.

Таблица 4

Последовательность измерения линий по этапам и циклам

Этапы	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3
Этап 1	101 – 102	101 – 103	102 – 103
Этап 2	101 – 103	102 – 103	101 – 102
Этап 3	102 – 103	101 – 102	101 – 103

По аналогии с первым методом, разности длин линий, измеренных в двух приемах по каждому из этапов, дадут удвоенное значение смещения фазовых центров в плане по направлениям на север, восток и юго-восток для исследуемой антенны. Это позволяет по каждому из этапов составить три уравнения поправок вида (2), со значениями азимутов 0, 90, и 135 градусов и обработать аналогично первому методу. Полуразности $(D_{A1} - D_{A2})/2$ приведены в таблице 5, результаты вычислений в таблице 6.

Таблица 5

Таблица измерений смещений фазовых центров в плане (метод 2)

Базовая линия	Расстановка антенн	Полуразности измерений (в мм) во временных промежутках		
		10:00 – 12:00	12:00 – 14:00	14:00 – 16:00
101 – 102	1-2	0,3	0,4	0,2
	2-1	-0,2	-0,5	0,1
	1-3	0,3	-0,8	-0,8
101 – 103	1-2	0,6	0,8	0,2
	2-1	-0,1	0,2	0,4
	1-3	-0,5	0,5	-0,3
102 – 103	1-2	-0,2	0,2	0,3
	2-1	0	0,2	0,2
	1-3	-0,4	0,2	-0,2

Таблица 6

Таблица вычисления смещений фазовых центров в плане (метод 2)

Антенна	Временной промежуток								
	10.00 – 12.00			12.00 – 14.00			14.00 – 16.00		
	l	θ	m	l	θ	m	l	θ	m
1	0,2	38	0,1	0,4	348	0,2	0,5	257	0
2	0,6	225	0,3	0,8	240	0	0,4	256	0,2
3	0,5	118	0,1	0,4	345	0,6	0,8	222	0,4

В таблице 7 приведены результаты измерений смещений фазовых центров по высоте по циклам (временным промежуткам) в приемах.

Таблица 7

Таблица измерений смещений фазовых центров по высоте (метод 2)

Базовая линия	Расстановка антенн	Эталон мм	Результаты измерений (в мм) во временных промежутках					
			10:00 – 12:00		12:00 – 14:00		14:00 – 16:00	
			l	θ	l	θ	l	θ
101 – 102	1 – 2	-15,5	-17,6	-15,9	-17,1	-18,8	-17,7	-17,0
	2 – 1	-15,5	-16,3	-17,0	-15,0	-15,5	-14,2	-13,7
	1 – 3	-15,5	-20,6	-17,5	-15,5	-17,1	-15,3	-15,7
101 – 103	1 – 2	-91,5	-89,0	-91,1	-88,2	-89,0	-90,1	-89,4
	2 – 1	-91,5	-92,1	-90,9	-88,4	-87,1	-90,7	-89,7
	1-3	-91,5	-91,9	-93,7	-93,0	-94,2	-94,3	-93,3
102 – 103	1 – 2	-76,0	-75,8	-77,6	-73,4	-72,8	-73,0	-74,4
	2 – 1	-76,0	-75,4	-73,6	-71,6	-72,4	-75,4	-74,4
	1 – 3	-76,0	-77,7	-76,4	-74,5	-76,0	-74,6	-74,7

С целью выделения значений смещения фазовых центров по высоте для пары антенн 1 – 2, учитывая смены антенн на базовой линии 101 – 102 (расстановка 2 – 1) в одном временном промежутке, для каждого приема можно составить уравнения связи:

$$h_y = h_1 + \delta h + V_1, \quad (3)$$

$$h_y = h_2 + \delta h + V_2, \quad (4)$$

$$h_y = h_3 - \delta h + V_3, \quad (5)$$

$$h_y = h_4 - \delta h + V_4, \quad (6)$$

где h_y – эталонное превышение; δh – поправка за смещение фазового центра для пары антенн 1 – 2; h_1, h_2 – измеренные превышения в первом и втором приемах (расстановка 1 – 2); h_3, h_4 – измеренные превышения в первом и втором приемах (расстановка 2 – 1); V_1, V_2 – поправки за случайные погрешности измерений в первом и втором приемах (расстановка 1 – 2); V_3, V_4 – поправки за случайные погрешности измерений в первом и втором приемах (расстановка 2 – 1).

Приравняв уравнения 3 и 4 и уравнения 5 и 6 получим два условных уравнения поправок:

$$V_1 - V_2 + W_1 = 0; \quad W_1 = h_1 - h_2,$$

$$V_3 - V_4 + W_2 = 0; \quad W_2 = h_3 - h_4.$$

Суммируя уравнения 1 и 3, получим третье условное уравнение:

$$V_1 + V_3 + W_3 = 0; \quad W_3 = h_1 + h_3 - 2h_y.$$

Систему решаем по методу наименьших квадратов коррелятным способом. Оценка точности $m = \sqrt{[V^2]/n}$, где n – количество уравнений. Значение смещения фазового центра получим как $\delta h = h_1 + V_1 - h_y$.

Аналогичные вычисления производим для всех базовых линий во всех временных промежутках. Результаты вычислений приведены в таблице 8.

Таблица 8

Таблица вычисленных значений смещений фазовых центров по высоте (метод 2)

С пункта на пункт	С антенны на антенну	Временной промежуток					
		10.00-12.00		12.00-14.00		14.00-16.00	
		δh	m	δh	m	δh	m
101-102	1-2	0,0	1,6	-1,4	1,5	-1,7	0,4
101-103		0,7	1,3	-0,4	3,9	0,2	1,8
102-103		-1,1	1,1	-0,5	4,0	0,6	2,1

В таблицах 9 и 10 представлены значения расхождений эталонных и измеренных значений в плане и по высоте, вычислены средние квадратические погрешности (с.к.п.). Предельная приборная точность, вычисленная по всей совокупности расхождений эталонных и измеренных значений, составляет 2,1 мм в плане и по высоте.

Таблица 9

Средние квадратические погрешности измерений в плане

Базовая линия	Расстановка антенн	Разность эталона и измерения (мм)						Среднее значение, мм	СКП, мм
		Период 10.00 – 12.00		Период 12.00 – 14.00		Период 14.00 – 16.00			
101 – 102	1 – 2	-2,4	-1,8	-1,0	-0,2	-1,6	-1,2	-1,4	1,5
	2 – 1	0,6	0,1	-0,4	-1,4	-1,9	-1,7	-0,8	1,2
	1 – 3	-3,7	-3,1	0,8	-0,8	-4,3	-5,8	-2,8	3,5
101 – 103	1 – 2	-2,7	-1,5	-2,8	-1,3	-1,9	-1,5	-2,0	2,0
	2 – 1	-1,1	-1,3	-0,4	-3,6	-1,9	-1,0	-2,2	2,4
	1 – 3	-1,1	-2,1	-4,3	-3,3	-0,8	-1,4	-2,2	2,5
102 – 103	1 – 2	-2,3	-2,7	-1,2	-0,8	-1,8	-1,1	-1,6	1,7
	2 – 1	-2,3	-2,4	-2,8	-2,5	-1,5	-1,0	-2,1	2,1
	1 – 3	0	-0,8	1,3	1,7	1,8	1,3	0,9	1,3

Таблица 10

Средние квадратические погрешности измерений по высоте

Базовая линия	Расстановка антенн	Разность эталона и измерения (мм)						Среднее значение, мм	СКП, мм
		Период 10.00 – 12.00		Период 12.00 – 14.00		Период 14.00 – 16.00			
101 – 102	1 – 2	2,1	0,4	1,6	3,3	2,2	1,5	1,9	2,4
	2 – 1	0,8	1,5	-0,5	0	-1,3	-1,8	-0,2	1,1
	1 – 3	5,1	2,0	0	1,6	-0,2	0,2	1,5	2,3
101 – 103	1 – 2	-2,5	-0,4	-3,3	-2,5	-1,4	-2,1	-2,0	2,2
	2 – 1	0,6	-0,6	-3,1	-4,4	-0,8	-1,8	-1,7	2,3
	1 – 3	0,4	2,2	1,5	2,7	2,8	1,8	1,9	2,0
102 – 103	1 – 2	-0,2	1,6	-2,6	-3,2	-3,0	-1,6	-1,5	2,2
	2 – 1	-0,6	-2,4	-4,4	-3,6	-0,6	-1,6	-2,2	2,6
	1 – 3	1,7	0,4	-1,5	0	-1,4	-1,3	-0,3	1,2

Заключение. В ходе проведенных исследований доказана субмиллиметровая точность взаимного положения фазового и геометрического центров антенн Zephyr Geodetic и R8 Model 2/SPS880 Internal. Однако по данным таблиц 2, 6, и 8 не удалось подтвердить положение об изменении положения фазового центра во времени. Более того, положение фазового центра в одном временном промежутке в течение суток не получены однозначно. Это противоречит логике физических основ появления исследуемых смещений. Причиной тому может быть остаточное влияние случайных погрешностей на вычисленное значение систематической ошибки. Тем более что систематическая ошибка по абсолютной величине меньше случайной.

Исходя из изложенного и на основании информации таблиц 9 и 10 смещение фазовых центров можно рассматривать как случайную составляющую предельной приборной точности антенн Zephyr Geodetic и R8 Model 2/SPS880 Internal. Погрешность за смещение фазового центра по высоте исследована для пары антенн 1 – 2 (антенны Zephyr Geodetic), но данные таблицы 10 позволяют сравнить величины смещений для пар 1 – 2 и 1 – 3. Можно заключить, что и приборная точность и, как следствие, положение фазового центра по высоте антенны R8 Model 2/SPS880 Internal изменяется в тех же пределах, что и Zephyr Geodetic, то есть до 1 миллиметра. В целом для антенн Zephyr Geodetic и R8 Model 2/SPS880 Internal после исследования, проведенного по второму методу при вводе в эксплуатацию, в процессе эксплуатации, достаточно исследовать предельную приборную точность по первому методу, на одной произвольно ориентированной базисной линии длиной 3 – 5 метров.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.navgeocom.ru/catalog/gps/tehnology/zephyr/index.htm.
2. Кафтан, В.И. Временной анализ геопространственных данных: Кинематические модели: дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Кафтан. – М., 2003.

Поступила 10.11.2010

INVESTIGATION OF MAXIMUM DEVICE ACCURACY AND DISPLACEMENT OF ANTENNA PHASE CENTER OF ZEPHYR GEODETIC AND R8 MODEL 2/SPS880 INTERNAL AT FIELD WORK USING METRIC ETALONS

S. TOVBAS

Displacement of antenna phase center (APC) is one of the sources of errors of high-precision positioning using global navigation satellite systems. Trimble states that technologies used for development of Zephyr Geodetic antenna let diminish displacement of APC by factor of 2-3 comparing with maximum device accuracy of receiver. Under mentioned conditions displacement of APC is considered as a random component of the maximum device accuracy. The paper shows results of realization of alternative methods of displacement determination at field work using metric etalons and during implementation. Recommendations for metrology of equipment during maintenance are provided.