ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 53608— 2009

Глобальная навигационная спутниковая система

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ЗЕМЛЕУСТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Разрешение неоднозначности фазовых измерений псевдодальности

Основные положения

Издание официальное

БЗ 12—2009/982

Москва
Стандартинформ
2010

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН 29-м Научно-исследовательским институтом Министерства обороны Российской Федерации

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 363 «Радионавигация»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 933-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случаях пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомления и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

© Стандартинформ, 2010

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Обозначения и сокращения 1
3 Общие положения 1
4 Алгоритм разрешения неоднозначности 2
4.1 Предварительная обработка фазовых измерений 2
4.2 Определение первых разностей фаз 2
4.3 Определение вторых разностей фаз 3
4.4 Учет корреляции вторых разностей фаз 4
4.5 Получение целочисленных параметров вторых разностей фаз 5

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Глобальная навигационная спутниковая система

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ЗЕМЛЕУСТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Разрешение неоднозначности фазовых измерений псевдодальности

Основные положения

Global navigation satellite system. Methods and technologies of geodetic and cadastral works execution. Ambiguity resolution for phase pseudo-ranges. Basic principles

Дата введения — 2011—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ с использованием аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы.

Настоящий стандарт устанавливает методы определения целочисленных параметров измеренных фазовых псевдодальностей до космических аппаратов спутниковых систем типа GPS, выполняемую при высокоточных определениях относительных координат пунктов с использованием наблюдений космических аппаратов этих систем, при выполнении геодезических и землеустроительных работ.

2 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применяют следующие сокращения:
ГЛОНАСС — глобальная навигационная спутниковая система Российской Федерации;
КА — космический аппарат;
МНК — метод наименьших квадратов;
ПД — псевдодальность;
СКП — среднее квадратическое отклонение;
GPS — глобальная навигационная спутниковая система Соединенных Штатов Америки.

3 Общие положения

3.1 Величина фазовой псевдодальности выражается в виде целого числа длин волн и дробной части длины волны. Дробная часть фазы может быть получена с высокой точностью, характеризуемой СКП на уровне первых единиц миллиметров. Прямое измерение целочисленной части фазы не представляется возможным, вследствие чего возникает неоднозначность фазовых измерений, требующая разрешения.

3.2 Разрешение неоднозначности фазовых измерений псевдодальности представляет собой процесс нахождения целого числа циклов (волн), укладывающихся в расстоянии между навигационным спутником и приемником при обработке фазовых измерений.

3.3 Для решения этой задачи с точностью, требуемой для выполнения геодезических и землеустроительных работ, применяют специальные методы математической обработки фазовых измерений, использующие при обработке не сами измерения, а их разности: первые, вторые и третьи. Это позволя-

Издание официальное

ет существенно уменьшить число определяемых параметров без ущерба для точности координатных определений. Основными методами разрешения неоднозначности фазовых измерений псевдодальности являются методы, базирующиеся на использовании вторых разностей фаз. Вторые разности вычисляются с использованием первых разностей фаз.

3.4 Решения, получаемые по вторым разностям фаз, как правило, позволяют при нормальных условиях наблюдений вычислить значения целочисленных параметров комбинаций измеренных фаз и на этой основе определять относительные координаты определяемых пунктов с точностью порядка первых единиц миллиметров.

3.5 Исходными данными, необходимыми для разрешения неоднозначности фазовых измерений, являются:

- фазовые измерения на двух несущих частотах для всех наблюдаемых навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS на интервале непрерывного слежения за фазой;
- абсолютные геоцентрические координаты исходного пункта;
- предварительные координаты определяемого пункта.

4 Алгоритм разрешения неоднозначности

4.1 Предварительная обработка фазовых измерений

В измеренные значения фаз несущих вводятся поправки за влияние тропосферы, ионосферы и вращения Земли вокруг своей оси.

Поправки за влияние тропосферы вычисляются одним из существующих методов (например, методы Саастомойнена и Хопфилда). При длине измеряемого базиса не более 5 км введение поправок за тропосферу может быть пропущено.

Поправки за влияние ионосферы могут вычисляться с использованием двухчастотных синхронных измерений кодовых и фазовых псевдодальностей. Поправки за влияние ионосферы для фазовых ПД численно равны поправкам, полученным для кодовых ПД, но знаки их противоположны (поправки к кодовым ПД отрицательны, а поправки к фазовым ПД положительны). В случае измерений кодовых ПД формулы для вычисления этих поправок соответственно на первой и второй частотах имеют вид:

$$\Delta d_1^{ion} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(d_1 - d_2), \quad (1)$$

$$\Delta d_2^{ion} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}(d_1 - d_2), \quad (2)$$

где f_1, f_2 — значения первой и второй несущих частот;
d_1, d_2 — значения измеренных кодовых ПД соответственно на первой и второй частотах.

Поправка на вращение Земли вокруг своей оси за время распространения сигнала от КА до пункта наблюдения (в метрах) вычисляется по формуле:

$$\Delta d^{вр} = -\frac{\omega a_e}{\tilde{n}} \rho \sin A \cos B \sin Z, \quad (3)$$

где ω — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси;
a_e — большая полуось общеземного эллипсоида;
ρ — расстояние до КА (в метрах);
c — скорость света, равная 299792498 м/с;
B — широта пункта наблюдения;
A, Z — соответственно азимут и зенитное расстояние КА.

4.2 Определение первых разностей фаз

Исходным соотношением служит формула:

$$D_1(j,i) = m_2^j(i) - m_1^j(i), \quad (4)$$

где j — номер спутника;
i — номер момента времени измерения t_i;
1, 2 — номера исходного и определяемого пунктов;
$D_1(j, i)$ — величина ПРФ;
$m_1^j(i)$, $m_2^j(i)$ — измеренные значения фаз.

С использованием ряда допущений, практически не влияющих на точность решения, величину $S(j, i)$ представляют в виде

$$D_1(j, i) = f[\delta t^j_{2i} + \delta t^j_{1i} - \tau^j_{2i} + \tau^j_{1i}] + N^j_{12} + \varepsilon^j_i, \quad (5)$$

$$N^j_{12} = N^j_2 - N^j_1, \quad (6)$$

где f — несущая частота;

δt_{ni} и τ^j_{ni} — поправка к шкале времени и интервал времени прохождения сигналов от j-го спутника до n-го пункта в момент t_i (n = 1,2);

N^j_{12} — целочисленный параметр ПРФ при i = 1;

ε^j_i — случайная погрешность измерения первой разности фаз.

Формула (5) нелинейна относительно поправки δt_i в том смысле, что параметр $\tau^j(i)$ должен быть получен на истинный момент приема сигнала ($t_i + \delta t_i$).

Для существенного сокращения числа искомых параметров и повышения точности относительных определений поправки к временным шкалам пунктов представляют в виде:

$$\delta_1 t_i = \delta_1 t_1 + \alpha_1 \Delta t_i, \quad (7)$$

где $\delta_1 t_1$ — поправка к временной шкале М-го пункта в момент первого измерения;

α_1 — коэффициент линейного ухода временной шкалы М-го пункта;

М — номер пункта (М = 1,2);

Δt_i — промежуток времени между текущим и начальным моментом измерений.

4.3 Определение вторых разностей фаз

Исходным соотношением служит формула

$$D_2(j, k, i) = D_1(k, i) - D_1(j, i), \quad (8)$$

где $D(j, k, i)$ — вторая разность фаз на момент t_i.

С учетом полученных первых разностей фаз вторые разности фаз определяют по формуле

$$D_2(j, k, i) = f(\delta t^k_{2i} - \delta t^k_{2i}) - fc^{-1}\left[\rho^k_{2i} + \overline{\rho}^k_{2i}(\delta t^k_{2i} - \rho^k_{2i} c^{-1})\right] + fc^{-1}\left[\rho^k_{1i} + \overline{\rho}^k_{1i}(\delta t^k_{1i} - \rho^k_{1i} c^{-1})\right] - \quad (9)$$

$$f(\delta t^j_{2i} - \delta t^j_{1i}) + fc^{-1}\left[\rho^j_{2i} + \overline{\rho}^j_{2i}(\delta t^j_{2i} - \rho^j_{2i} c^{-1})\right] + fc^{-1}\left[\rho^j_{1i} + \overline{\rho}^j_{1i}(\delta t^j_{1i} - \rho^j_{1i} c^{-1})\right] + N^{kj}_{12} + \varepsilon^{kj}_i$$

$$N^{kj}_{12} = N^k_{12} - N^j_{12}, \quad (10)$$

где N^{kj}_{12} — целочисленный параметр ВРФ;

ρ^j_{ni} и ρ^k_{ni} — мгновенные дальности j-го и k-го спутников от n-го пункта в момент t_i;

$\overline{\rho}^j_{ni}$ и $\overline{\rho}^k_{ni}$ — скорость изменения дальности j-го и k-го спутников от n-го пункта в момент t_i;

f — частота несущей;

c — скорость света;

ε^{kj}_i — случайная погрешность вторых разностей фаз в момент t_i.

Линеаризация позволяет получить уравнение погрешностей ВРФ, в котором неизвестными являются следующие параметры:

- поправки к предварительным координатам двух пунктов (шесть параметров);
- временные параметры двух пунктов (четыре неизвестных);
- целочисленные параметры, число которых на единицу меньше числа наблюденных спутников.

Систему уравнений погрешностей ВРФ на моменты $t_1, \ldots, t_N$ описывают матрицей коэффициентов и вектором свободных членов.

Матрица коэффициентов представляют в виде

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_N \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где N — число моментов измерений ВРФ;

$A_1, \ldots, A_N$ — блоки идентичной структуры, зависящие от момента измерений и числа наблюдаемых спутников.

Например, для четырех спутников каждый из блоков $A_1, \ldots, A_N$ определяется по формуле

$$A_j = \begin{pmatrix} a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} & d_{2j} & e_{2j} & f_{2j} & g_{2j} & h_{2j} & \rho_{2j} & q_{2j} & 1 & 0 & 0 \\ a_{3j} & b_{3j} & c_{3j} & d_{3j} & e_{3j} & f_{3j} & g_{3j} & h_{3j} & \rho_{3j} & q_{3j} & 0 & 1 & 0 \\ a_{4j} & b_{4j} & c_{4j} & d_{4j} & e_{4j} & f_{4j} & g_{4j} & h_{4j} & \rho_{4j} & q_{4j} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \; j = 1, \ldots, N, \tag{12}$$

где a_{ki} и c_{ki} — коэффициенты при поправках к начальным моментам измерений первого и второго пунктов;

b_{ki} и d_{ki} — коэффициенты при скоростях ухода шкал времени первого и второго пунктов;

e_{ki}, f_{ki}, g_{ki} и h_{ki}, ρ_{ki}, q_{ki} — коэффициенты при поправках к предварительным координатам первого и второго пунктов.

Коэффициенты a_{ki} и c_{ki} вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} a_{ki} &= \frac{\partial(D_2)}{\partial(\delta t_{11})} = fc^{-1}(\overline{\rho}^k_{1i} - \overline{\rho}^j_{1i}), \\ c_{ki} &= \frac{\partial(D_2)}{\partial(\delta t_{21})} = fc^{-1}(\overline{\rho}^k_{2i} - \overline{\rho}^j_{2i}). \end{aligned} \tag{13}$$

Коэффициенты b_{ki} и d_{ki} вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} b_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(\alpha_1)} = fc^{-1}(t_i - t_1)(\overline{\rho}^k_{1i} - \overline{\rho}^j_{1i}), \\ d_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(\alpha_2)} = -fc^{-1}(t_i - t_1)(\overline{\rho}^k_{2i} - \overline{\rho}^j_{2i}). \end{aligned} \tag{14}$$

Коэффициенты e_{ki}, f_{ki}, g_{ki} вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} e_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(X_1)} = \frac{\Delta X_1^j}{\rho^j_{1i}} - \frac{\Delta X_1^k}{\rho^k_{1i}}, \\ f_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(Y_1)} = \frac{\Delta Y_1^j}{\rho^j_1} - \frac{\Delta Y_1^k}{\rho^k_1}, \\ g_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(Z_1)} = \frac{\Delta Z_1^j}{\rho^j_1} - \frac{\Delta Z_1^k}{\rho^k_1}. \end{aligned} \tag{15}$$

Коэффициенты h_{ki}, ρ_{ki}, q_{ki} вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} h_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(X_2)} = \frac{\Delta X_2^j}{\rho^j_{2i}} - \frac{\Delta X_2^k}{\rho^k_{2i}}, \\ \rho_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(Y_2)} = \frac{\Delta Y_2^j}{\rho^j_2} - \frac{\Delta Y_2^k}{\rho^k_2}, \\ g_{ki} &= \frac{\partial(D)}{\partial(Z_2)} = \frac{\Delta Z_2^j}{\rho^j_2} - \frac{\Delta Z_2^k}{\rho^k_2}. \end{aligned} \tag{16}$$

Коэффициенты при целочисленных параметрах ВРФ образуют единичную матрицу.

Вектор свободных членов системы уравнений погрешностей ВРФ определяется как вектор, элементы которого представляют собой разности ВРФ, вычисляемых по предварительным значениям определяемых параметров, и измеренных значений ВРФ на моменты $t_1, \ldots, t_N$.

Полученную систему уравнений поправок решают по МНК с учетом корреляции ВРФ.

4.4 Учет корреляции вторых разностей фаз

Корреляцию ВРФ учитывают путем использования в решении ковариационной матрицы ВРФ Q. Данная матрица имеет блочно-диагональную структуру. Диагональные блоки являются квадратными матрицами. Их число равно числу N моментов измерений. Размер блока выражается числом, на едини-

цу меньшим числа М наблюдаемых спутников. Например, при М = 4 каждый из указанных блоков имеет вид

$$Q_i = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 \\ 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 4 \end{pmatrix}, i = 1, \ldots, N. \quad (17)$$

4.5 Получение целочисленных параметров вторых разностей фаз

Определяемые параметры ВРФ получают из решения системы нормальных уравнений.

Матрицу системы нормальных уравнений формируют в соответствии с формулой

$$B = A^T P A, \quad (18)$$

где A^T — матрица, транспонированная по отношению к матрице А;

P — весовая матрица, обратная по отношению к ковариационной матрице *Q*.

Вектор свободных членов системы нормальных уравнений формируют по формуле:

$$C = A^T P L, \quad (19)$$

где L — вектор свободных членов уравнений погрешностей ВРФ.

Из решения системы нормальных уравнений получают:

- временные параметры;
- поправки к координатам исходного и определяемого пунктов;
- целочисленные параметры ВРФ.

Вследствие погрешностей измерений, плохих условий наблюдений навигационных спутников (многолучевость, искусственные и естественные препятствия наблюдений и т. д.) фактические значения целочисленных параметров, как правило, не являются целыми числами. Поэтому полученные значения этих параметров должны быть округлены до целого в ближайшую сторону. С этими новыми значениями необходимо перевычислить вектор свободных членов уравнений погрешностей и получить новое решение с учетом поправок к шкалам времени пунктов и скоростям их изменения, а также поправок к координатам пунктов.

УДК 629.783:[528.2+528.344+523.34.13]:006.354 ОКС 07.040 Э50 ОКСТУ 6801

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, геодезические и землеустроительные работы, неоднозначность, фазовая псевдодальность

Редактор *Е.С. Котлярова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 12.11.2010. Подписано в печать 14.12.2010. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 0,50. Тираж 89 экз. Зак. 1030.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru
Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ.
Отпечатано в филиале ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» — тип. «Московский печатник», 105062 Москва, Лялин пер., 6.