

УДК 53.008

А.Е. Олейник¹, Е.М. Занимонский²¹Национальный научный центр "Институт метрологии", Харьков, Украина²Радиоастрономический институт НАНУ, Харьков, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ

При определении координат геодезического пункта в локальной геодезической системе координат с использованием Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возникает неопределенность измерений, связанная с выбором условий проведения измерений (базовой станции, времени проведения и длительности измерительных сессий). Для исключения (уменьшения) влияния этой неопределенности предлагается использовать подход, который реализуется при межлабораторных испытаниях, когда по предоставленным каждой лабораторией результатам измерения рассчитывается опорное значение с неопределенностью, а также степени эквивалентности.

Ключевые слова: ГНСС, координаты, геодезический пункт, базовая станция, неопределенность измерения.

Введение

Постановка проблемы и анализ последних достижений и публикаций. Определение координат геодезического пункта с использованием технологий на основе Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) осуществляется путем расчета расстояния и вектора направления до геодезического пункта от базовой станции, координаты которой известны с высокой точностью. Нельзя однозначно сказать какую именно базовую станцию использовать в расчетах (или не одну), в какое время проводить измерения, как выбрать количество сессий и их длительность. Несмотря на то, что существуют общие рекомендации, в каждом конкретном случае принимается свое решение. Например, рекомендуется использовать ближайшую базовую станцию (в пределах одинаковых ионосферных условий) [1] – но как поступать, если вблизи нет станций, если несколько станций находятся примерно на одном расстоянии, если вектор между станциями находится в таком положении относительно линий геомагнитного поля, при котором возрастает влияние ионосферных эффектов высших порядков и как следствие возрастает неопределенность результата измерения. Более длительные измерительные сессии, измерения в разное время суток, в разное время года дают более точное значение, но ресурсные ограничения (время проведения работы, трудо-

затраты) приводят к конечной длине сессий и ограниченному их количеству.

Таким образом, при определении координат геодезического пункта помимо неопределенности, связанной с разбросом измеряемых значений (которая рассчитывается автоматически программными продуктами обработки данных ГНСС-приемников), возникает методическая неопределенность.

Целью данной работы является исследование возможности применения подхода, который используется при оценке результатов межлабораторных испытаний, для исключения (уменьшения) указанной методической неопределенности. Этот подход изложен в "РМУ 13-065-2008. Методика расчета неопределенности межлабораторных испытаний" [2].

Основной материал

В соответствии с методикой [2] лаборатория – это совокупность таких факторов как оператор, оборудование и место выполнения измерений. В нашем случае лаборатория – это совокупность ГНСС-приемника, специализированного программного продукта для обработки данных, базовой станции и набора измерительных сессий. Под результатом лаборатории будем понимать координаты пункта (x, y, h) с указанием стандартной ($u(x), u(y), u(h)$) или расширенной ($U(x), U(y), U(h)$) неопределенности, полученные в определенных условиях. Тогда

результат измерения (результат межлабораторного испытания) будет выражаться в виде полученного опорного значения и его неопределенности.

Для определения качества измерений в каждой лаборатории рассчитывается степень эквивалентности лаборатории – степень, до которой значение, предоставленное лабораторией-участником, соответствует опорному значению.

Данные по каждой из координат пункта обрабатываются независимо друг от друга. Алгоритм обработки рассмотрим на примере координаты x .

Опорное значение - это оценка измеряемой величины, полученная на основе измерений, проведенных лабораториями, принимающими участие в испытаниях. Опорное значение рассчитывается как среднее арифметическое значение (1) или как взвешенное среднее значение (2) результатов лабораторий-участниц испытаний.

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i ; \quad (1)$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{u^2(x_i)}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{u^2(x_i)}} , \quad (2)$$

где N – число лабораторий-участниц.

Оценка стандартной неопределенности $u(x)$ производится по формуле (3) для опорного значения, полученного как среднее арифметическое, и по формуле (4) для опорного значения, полученного как взвешенное среднее (предполагается, что входные величины не коррелированы).

$$u^2(x) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N u^2(x_i) ; \quad (3)$$

$$u^2(x) = 1 / \sum_{i=1}^N \frac{1}{u^2(x_i)} . \quad (4)$$

Если есть подозрение, что один или более результатов лабораторий являются выбросами, то для их идентификации используется медианная оценка:

- 1) определяется медиана x_{med} ряда результатов, полученных от лабораторий-участниц;
- 2) рассчитывается медиана абсолютного отклонения $MAD = \text{median} \{ |x_i - x_{med}| \}$;
- 3) производится нормирование $[3]$
 $MAD_e = 1,4826 \cdot MAD$;
- 4) выбросами считаются такие x_i , для которых $|x_i - x_{med}| > 2,5 \cdot MAD_e$.

Выбросы исключаются, и опорное значение со стандартной неопределенностью рассчитывается по оставшимся исходным данным с использованием среднего арифметического или среднего взвешенного значений.

Степень эквивалентности выражается разностью между значением, предоставленным лабораторией, и опорным значением измеряемой величины:

$$d_i = x_i - x . \quad (5)$$

Если результат этой лаборатории используется при расчете опорного значения, то он коррелирован с опорным значением, поэтому стандартная неопределенность для невзвешенного случая будет рассчитываться по формуле:

$$u(d_i) = \sqrt{\left(1 - \frac{2}{N}\right) u^2(x_i) + u^2(x)} , \quad (6)$$

(где \bar{N} – объем выборки, по которой рассчитывалось опорное значение), а для взвешенного случая:

$$u(d_i) = \sqrt{u^2(x_i) - u^2(x)} . \quad (7)$$

Для лабораторий, результаты которых не использовались при расчете опорного значения, стандартная неопределенность рассчитывается по формуле:

$$u(d_i) = \sqrt{u^2(x_i) + u^2(x)} . \quad (8)$$

Рассмотрим применение этого подхода на примере определения координат геодезического пункта BOGO (локальная сеть ASG-EUPOS) [4]. Проводится 8 измерений координат геодезического пункта [1], в каждом из которых координаты пункта определяются относительно одной из базовых станций (табл. 1). При этом используется один и тот же ГНСС-приемник (Javad), одинаковое программное обеспечение (Pinnacle), интервалы наблюдения совпадают. Результат определения координат пункта относительно одной базовой станции рассматривается как результат одной лаборатории (соответственно обозначим лабораторию по наименованию базовой станции). Исходные данные представлены в табл. 1.

Обработка этих данных для получения результирующего значения координат (в терминах методики [2] – "опорного значения") проводится в соответствии с алгоритмом обработки данных при межлабораторных испытаниях.

Для расчета опорного значения в данном случае берем взвешенное среднее (формула (2)), т.к. неопределенность представленных значений плоских координат и высоты существенно отличается для разных лабораторий ($N = 8$):

$$\bar{x} = 78,449 \text{ м}; \quad \bar{y} = 91,498 \text{ м}; \quad \bar{h} = 149,653 \text{ м}.$$

Соответственно по формуле (4) неопределенность полученных значений:

$$u(\bar{x}) = 7,8 \text{ мм}; \quad u(\bar{y}) = 6,7 \text{ мм}; \quad u(\bar{h}) = 15,4 \text{ мм}.$$

Расширенная неопределенность с уровнем доверия 95% (коэффициент охвата $k = 2$):

$$U(\bar{x}) = 16 \text{ мм}; \quad U(\bar{y}) = 13 \text{ мм}; \quad U(\bar{h}) = 31 \text{ мм}.$$

Исходные данные и результаты расчета координат пункта BOGO представлены на рис. 1. Пунктиром показаны действительные значения координат пункта, известные в данном случае из [4, 5] по результатам многолетних наблюдений. Заштрихованная область соответствует опорному значению плюс/минус расширенная неопределенность. Видно, что для высоты действительное значение лежит вне пределов 95% доверительного интервала. Для улучшения оценки необходимо провести исключение выбросов.

Таблица 1

Значения координат пункта и стандартная неопределенность их измерения

Обозначение базовой станции (лаборатории)	Расстояние от пункта до базовой станции, км	Координаты пункта в локальной системе, м			Стандартная неопределенность измерений, мм		
		x	y	h	u(x)	u(y)	u(h)
MIMA	48	78,441	91,502	149,642	13,9	11,6	27,3
SOCH	61	78,453	91,498	149,638	15	13,7	31,2
LODZ	134	78,451	91,501	149,651	23,4	19,7	45,4
LAMA	159	78,462	91,510	149,673	25,2	22,2	49,8
BYDG	216	78,459	91,492	149,649	29,8	25,8	57,9
BOR1	271	78,469	91,485	149,625	40,4	26,2	61,5
WROC	314	78,455	91,476	149,740	35,7	30,2	69,8
USDL	356	78,399	91,485	149,732	38,1	30,1	75,2

Таблица 2

Абсолютные отклонения от медианы

Обозначение базовой станции (лаборатории)	Расстояние от пункта до базовой станции, км	Координаты пункта и модуль отклонения от медианы соответствующей координаты, м					
		x	$ x - x_{med} $	y	$ y - y_{med} $	h	$ h - h_{med} $
MIMA	48	78,441	0,014	91,502	0,007	149,642	0,007
SOCH	61	78,453	0,001	91,498	0,003	149,638	0,012
LODZ	134	78,451	0,003	91,501	0,006	149,651	0,001
LAMA	159	78,462	0,008	91,510	0,015	149,673	0,023
BYDG	216	78,459	0,005	91,492	0,003	149,649	0,001
BOR1	271	78,469	0,014	91,485	0,010	149,625	0,025
WROC	314	78,455	0,001	91,476	0,019	149,740	0,090
USDL	356	78,399	0,055	91,485	0,010	149,732	0,082

Для проверки исходных данных на наличие выбросов определяем медиану исходных данных по каждой координате:

$$x_{med} = 78,454 \text{ м}; y_{med} = 91,495 \text{ м}; h_{med} = 149,650 \text{ м}.$$

и вычисляем абсолютные отклонения от медианы (табл. 2). Рассчитываем медиану абсолютного отклонения MAD:

$$MAD_x = \text{median}\{|x_i - x_{med}|\} = 0,006 \text{ м};$$

$$MAD_y = \text{median}\{|y_i - y_{med}|\} = 0,008 \text{ м};$$

$$MAD_h = \text{median}\{|h_i - h_{med}|\} = 0,018 \text{ м}.$$

Соответственно,

$$2,5 \cdot S(MAD_x) = 0,024 \text{ м};$$

$$2,5 \cdot S(MAD_y) = 0,031 \text{ м};$$

$$2,5 \cdot S(MAD_h) = 0,065 \text{ м}.$$

Значение является выбросом, если его абсолютное отклонение от медианы превышает $2,5S(MAD)$. Такие значения отмечены в табл. 2 серым цветом. Если исключить обнаруженные выбросы (координаты пункта, полученные с использованием базовых станций WROC и USDL), то получим следующие оценки опорного значения расположения пункта ($\bar{N} = 6$):

$$\bar{x} = 78,451 \text{ м}; \bar{y} = 91,500 \text{ м}; \bar{h} = 149,645 \text{ м}$$

с неопределенностью

$$u(\bar{x}) = 8 \text{ мм}; u(\bar{y}) = 7 \text{ мм}; u(\bar{h}) = 16 \text{ мм}.$$

Расширенная неопределенность ($k = 2$):

$$U(\bar{x}) = 16 \text{ мм}; U(\bar{y}) = 14 \text{ мм}; U(\bar{h}) = 32 \text{ мм}.$$

Исходные данные и результаты определения опорных значений координат пункта после исключения выбросов представлены на рис. 2. Видно, что исключение выбросов приблизило оценки координат к действительным значениям. А для высотной составляющей, в отличие от оценки, полученной без исключения выбросов, полученный 95% доверительный интервал теперь включает действительное значение (для плоскостных координат действительные значения входили в 95% доверительный интервал даже без исключения выбросов).

Рассчитанные по формуле (5) степени эквивалентности $d_i^x, d_i^y, d_i^z, i = 1..8$ представлены в табл. 3. Поскольку результаты лабораторий MIMA, SOCH, LODZ, LAMA, BYDG, BOR1 использовались при расчете опорных значений, стандартные неопределенности их степеней эквивалентности рассчитывались по формуле (7). Оценка стандартной неопределенности степеней эквивалентности WROC и USDL, данные которых не использовались при расчете опорных значений, проводилась с использованием формулы (8).

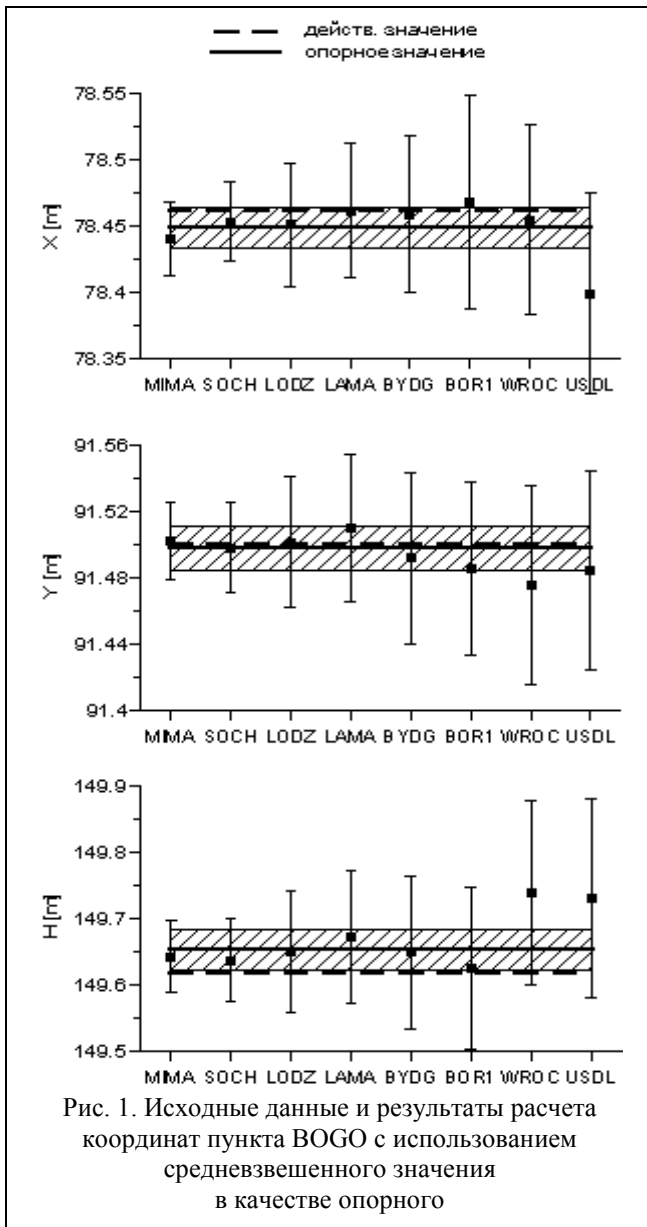


Рис. 1. Исходные данные и результаты расчета координат пункта BOGO с использованием средневзвешенного значения в качестве опорного

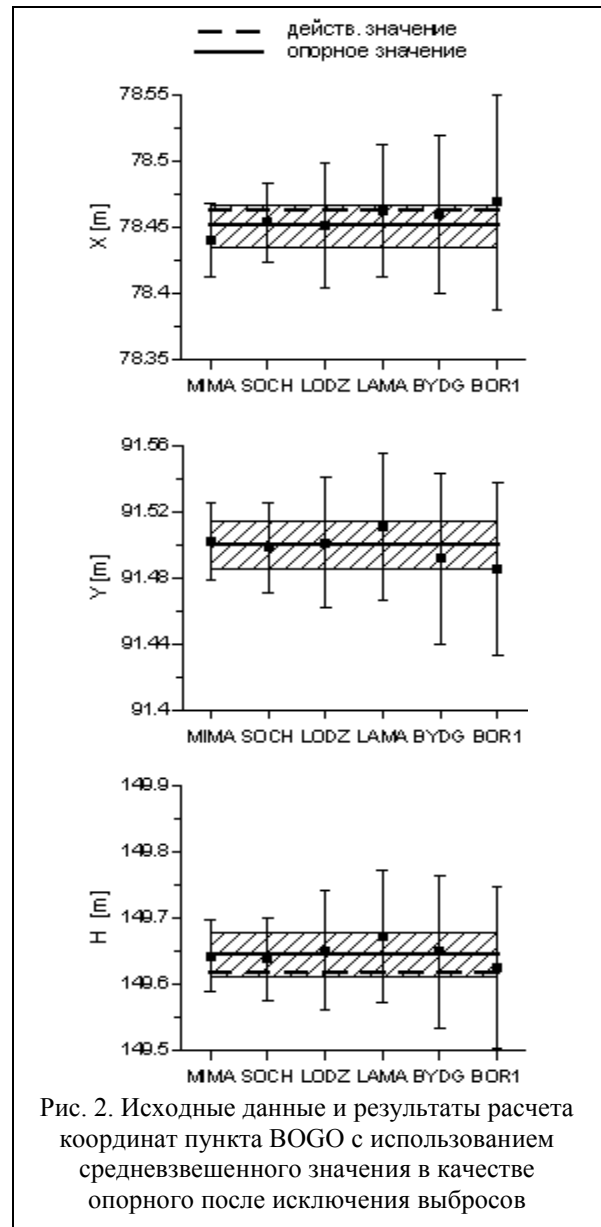


Рис. 2. Исходные данные и результаты расчета координат пункта BOGO с использованием средневзвешенного значения в качестве опорного после исключения выбросов

Таблица 3

Степени эквивалентности лабораторий-участниц

Обозначение базовой станции (лаборатории)	Расстояние от пункта до базовой станции, км	Степени эквивалентности результатов лабораторий и их стандартные неопределенности, м					
		d^x	$u(d^x)$	d^y	$u(d^y)$	d^h	$u(d^h)$
MIMA	48	-0,010	0,011	0,002	0,009	-0,002	0,022
SOCH	61	0,003	0,013	-0,002	0,012	-0,007	0,027
LODZ	134	0,001	0,022	0,001	0,018	0,006	0,042
LAMA	159	0,011	0,024	0,011	0,021	0,028	0,047
BYDG	216	0,009	0,029	-0,008	0,025	0,005	0,056
BOR1	271	0,018	0,040	-0,014	0,025	-0,020	0,059
WROC	314	0,004	0,037	-0,024	0,031	0,095	0,072
USDL	356	-0,051	0,039	-0,015	0,031	0,088	0,077

Выводы

В статье изложена методика вычисления координат пункта по данным ГНСС с использованием нескольких базовых станций, находящихся на различном расстоянии от пункта, координаты ко-

торого определяются. Такой подход позволяет получить более точный результат и с меньшей неопределенностью по сравнению с использованием одной базовой станции при фиксированном времени измерения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам из Института геодезии и картографии (Варшава, Польша), в особенности доктору Яну Цисаку, за предоставленные данные ГНСС-измерений и результаты их первичной обработки программным пакетом Pinnacle.

Список литературы

1. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Р. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
2. РМУ 13-065-2008. Методика розрахунку невизначеності міжлабораторних випробувань.

3. Seo S. A Review and Comparison of Methods for Detecting Outliers in Univariate Data Sets / S. Seo // *University of Pittsburgh*. – 2006.

4. Raport merytoryczny. Projekt R09 029 01. Zadanie 3. Przeprowadzenie badań nad metodami atestacji systemów pomiarowych GPS stosowanych w geodezji, kartografii oraz nawigacji. IGIK. Warszawa, 2009, S. 18.

5. Bruyninx C. Overview of the EUREF Permanent Network and the Network Coordination Activities / C. Bruyninx // *EUREF Publication*, Eds. J. Torres, H. Hornik, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München. – Germany, 2001. – No 9. – P. 24-30.

Поступила в редколлегию 1.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МІЖЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ПРИ ОБРОБЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ

А.Є. Олійник, Є.М. Занімонський

Під час визначення координат геодезичного пункту в локальній геодезичній системі координат з використанням Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) виникає невизначеність вимірювань, пов'язана з вибором умов проведення вимірювань (базової станції, часу проведення та тривалості вимірювальних сесій). Для виключення (зменшення) впливу цієї невизначеності пропонується використовувати підхід, що реалізується при міжлабораторних випробуваннях, коли за наданими кожною лабораторією результатами вимірювання розраховується опорне значення з невизначеністю, а також ступені еквівалентності.

Ключові слова: ГНСС, координати, геодезичний пункт, базова станція, невизначеність вимірювань.

THE USAGE OF THE METHODS OF THE UNCERTAINTY ESTIMATION OF THE INTERLABORATORY COMPARISONS WHILE ANALYSIS OF GNSS-OBSERVATIONS

A.E. Olijnyk, Y.M. Zanimonskiy

While calculating the coordinates of a geodetic station in a local geodetic coordinate system using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) measurement uncertainty associated with observation conditions (base station, time and duration of measurement series) arises. To avoid (reduce) the influence of this uncertainty the approach realized for interlaboratory comparisons, when the reference value and degrees of equivalence and their uncertainties are calculated from the measurement results obtained from laboratories, is suggested to use.

Keywords: GNSS, coordinates, geodetic station, base station, measurement uncertainty.