

О ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ГНСС

Г.А. Шануров (МИИГАиК)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в отделе инженерных изысканий 20-го ЦПИ МО РФ. С 1975 г. работает в МИИГАиК, в настоящее время — профессор кафедры высшей геодезии. Профессор геодезического факультета Мадридского политехнического университета, член Международной ассоциации геодезии (IAG).

Данная статья имеет практическую направленность, а теоретические основы предлагаемого метода изложены автором и его соавторами в [1]. Выполнение геодезических работ возможно, если геодезические приемники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в совокупности с их программным обеспечением подвергнуты метрологической аттестации. Фирмы - производители не могут продавать геодезическое оборудование, в том числе приемники ГНСС, без сертификата о прохождении метрологической аттестации. Организации, выполняющие геодезические, топографические, кадастровые и иные работы в области геодезии, не имеют права пользоваться несертифицированной аппаратурой и не могут сдать (продать) результаты работ (окончательную продукцию) заказчику, не предъявив документы о метрологической аттестации (сертификации) использованных в работе приборов. Следовательно, метрологическое обеспечение является одним из ключевых моментов при осуществлении геодезической деятельности. Это понимают все специалисты. Созданы и вновь создаются метрологичес-

кие полигоны. Для полноты и логичности приведем еще несколько известных фактов, а затем рассмотрим суть разработок.

С помощью приемников ГНСС выполняется значительный объем геодезических измерений, который, по данным авторитетных специалистов, в среднем, на больших объектах составляет около 70% от общего объема геодезических работ. Причиной являются многочисленные и известные профессионалам достоинства метода спутниковых измерений, основа которых заключается в том, что получают именно разности координат, а затем сразу координаты пунктов и объектов. Но это является и проблемой спутникового метода, применительно к метрологическому обеспечению. Невозможно задать эталонные (образцовые) значения координат пункта и/или разностей координат пунктов. Эти величины являются условными, поскольку связаны с условно принятой системой координат. Разумеется, автор не является первооткрывателем данного обстоятельства. Одним из первых возможных подходов к решению данной проблемы изложил Л.С. Юношев [2]. Для создания

и поддержания геодезической сети метрологического полигона он предложил регулярно повторять измерения в сети с использованием комплекта наиболее совершенной в настоящее время спутниковой аппаратуры. Возможно, что такой подход и будет принят официально.

Метрологическую аттестацию геодезической аппаратуры, в том числе геодезических приемников ГНСС, осуществляют на основе результатов измерений, выполненных этой аппаратурой на пунктах образцовой (стандартной) геодезической сети метрологического полигона. В идеале такая сеть представляет собой набор стандартных базисов. Наиболее точные светодальномеры позволяют измерять линии в несколько километров, с ошибкой, лежащей в пределах одной десятой миллиметра. Такая ошибка на порядок меньше той, с которой определяют длины сторон, используя геодезическую спутниковую аппаратуру. Поэтому метрологический полигон с полным основанием можно считать образцовым (стандартным) для геодезических приемников ГНСС. Необходимо определить с заданной точностью и отметки

(высоты) пунктов этой сети в соответствующей системе высот. При корректном подходе — это сложная, но решаемая задача, выходящая за рамки данной статьи. Здесь и далее будем считать, что мы рассматриваем плановую сеть, что в равнинных районах недалеко от действительности.

Возникает три взаимосвязанных вопроса. Какова рациональная геометрия геодезической сети метрологического полигона? По каким параметрам оценивать результаты работы геодезической спутниковой аппаратуры? Каковы научная и практическая основы методики метрологической аттестации геодезической спутниковой аппаратуры и ее программного обеспечения? Попытаемся дать ответ на часть этих вопросов, предложив читателям задуматься, а профессионалам — принять участие в дискуссии.

В соответствии с существующей процедурой метрологической аттестации, результаты спутниковых определений сравнивают с длинами базисов, входящих в геодезическую сеть метрологического полигона. Это правильно, поскольку длины баз инвариантны относительно системы координат. Такой подход позволяет оценить ошибку, с которой результаты спутниковых измерений воспроизводят масштаб геодезической сети метрологического полигона. Однако, в дополнение к этому, существует необходимость оценить ошибки, с которыми комплект геодезической аппаратуры ГНСС воспроизводит ориентировку и, вообще, конфигурацию образцовой геодезической сети метрологического полигона. Другими словами, метрологическую аттестацию комплекта спутниковых приемников в совокупности с их программным обеспечением целесообразно проводить, оценив возможность этого ком-

плекса воспроизвести (повторить) геометрическую структуру геодезической сети метрологического полигона.

Существует практически целесообразная геометрическая структура геодезической сети метрологического полигона. В центре сети должен быть расположен надежно закрепленный пункт с номером 1, на котором имеется приспособление для принудительного центрирования. Организация, которой принадлежит метрологический полигон, устанавливает на этом пункте постоянно действующий базовый (референцный) спутниковый приемник (антенну базового приемника). Таким образом, пункт 1 включают в национальную опорную геодезическую сеть. На период метрологической аттестации на пункте 1 устанавливают базовый геодезический приемник ГНСС (его антенну) из аттестуемого комплекта. Остальные пункты сети располагают на территории полигона, в том числе на границе полигона и даже за ее пределами, получив на это официальное разрешение.

В подавляющем большинстве случаев, выполняя геодезические работы на локальных участках, например, создавая или совершенствуя геодезическую сеть на территории города и его окрестностей, такую сеть рассматривают как преимущественно плановую. Вопросы с высотами пунктов решают отдельно. Поэтому, как это сказано в начале статьи, сконцентрируем внимание именно на практической стороне проблемы. Будем обсуждать (оценивать) в качестве метрологической характеристики комплекта геодезической аппаратуры ГНСС ее способность в совокупности с программным обеспечением воспроизводить элементы именно двухмерного (плоского, планового) трансформирова-

ния. Это вполне рационально для локального метрологического полигона размером в несколько десятков километров.

Двухмерное трансформирование (преобразование) вектора базы, соединяющей два пункта геодезической сети из второй системы координат «В» в первую «П», основано на формуле:

$$\begin{pmatrix} 1 & W_n \\ -W_n & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \mathbf{B} + \vec{V}, \quad (1)$$

где Δx и Δy — разности образцовых и, полученных в эпоху сертификации, плановых координат пунктов сети;

W_n — угол вращения вокруг вертикальной для данного метрологического полигона оси координат;

δx и δy — параллельные сдвиги осей координат;

\mathbf{V} — вектор остаточных поправок, получаемый после уравнивания результатов измерений по способу наименьших квадратов.

В этом случае используется локальная декартова система координат. Начало этой системы совпадает с центральным пунктом 1, ось \mathbf{H} направлена в зенит этого пункта, ось \mathbf{x} — на север, ось \mathbf{y} — на восток. В эту формулу можно было бы включить масштабный коэффициент $(1 + m)$, где m — малая величина порядка 10^{-6} – 10^{-7} , вызванная различием масштабов сети, созданной высокоточным светодальномером (образцовой сети) и тестируемым комплектом приемников ГНСС. Величину m можно определить до трансформирования по формуле (1). В формуле (1) неизвестными являются параметры трансформирования W_n , δx , δy . Система параметрических уравнений для каждой двухмерной базы

геодезической сети D имеет вид:

$$A \begin{pmatrix} w_n \\ \delta x \\ \delta y \end{pmatrix} - (D^B - D^n) = V, \quad (2)$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} y & 1 & 0 \\ -x & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

w_n — угол, выраженный в радианах;

V — вектор остаточных поправок, получаемый после трансформирования и уравнивания.

Матрица коэффициентов системы нормальных уравнений N имеет вид:

$$N = \begin{pmatrix} [D^2] & [y] & -[x] \\ \dots & k & 0 \\ \dots & \dots & k \end{pmatrix}; \quad (3)$$

где k — число сторон в геодезической сети метрологического полигона. Квадратные скобки здесь и далее, как принято со времен Гаусса, означают суммирование.

В работе [1] получены формулы для весов неизвестных параметров трансформирования:

$$\begin{aligned} P_{w_n} &= kD^2m - \\ &- ([x]^2 + [y]^2)/k; \\ P_{\delta x} &= k - \\ &- k[y]^2/(k^2D^2m - [x]^2); \\ P_{\delta y} &= k - \\ &- k[x]^2/(k^2D^2m - [y]^2), \end{aligned} \quad (4)$$

где Dm — средняя геометрическая длина радиально расположенных сторон этой геодезической сети.

Анализируя формулы (4), можно понять, что веса неизвестных параметров трансформирования возрастают при следующих условиях. Число сторон сети k и средняя геометрическая длина сторон этой геодезической сети Dm должны быть возможно большими. И, в дополнение к этому, при проектировании структуры геодезической сети метрологического полигона должно выполняться следующее геометрическое условие:

$$[x] = [y] = 0. \quad (5)$$

Это условие выполняется, если базы (стороны) сети расположены симметрично относительно центрального пункта 1. Например, пункт 2 расположен на открытой местности, к северу от пункта 1. Расстояние от пункта 1 до пункта 2 составляет 10 км, и между ними имеется прямая видимость, позволяющая выполнять измерения высокоточным светодальномером. Тогда пункт 2' необходимо расположить к югу от центрального пункта 1, на том же расстоянии в 10 км и при тех же условиях видимости небосклона на пункте 2' и взаимной видимости между пунктами 1 и 2'. Пункт 3 может быть расположен к востоку от пункта 1, на том же расстоянии в 10 км, а пункт 3' — к западу. В таком случае геометрическая структура геодезической сети метрологического полигона имеет форму креста, симметричного относительно центра этого креста. Такого рода структуру уже давно используют для решения задач радиоастрономии, а синфазированный таким образом радиointерферометр называют крестом Миллса [3] (т. е. колебания, принятые каждой антенной, приходят на приемник-радиометр в одной и той же фазе). Не обязательно, чтобы базы 2,1,2' и 3,1,3' были равны по длине и перпендикулярны. Важно, чтобы каждая база была симметрична относительно центрального пункта 1. Геодезическая сеть метрологического полигона при наблюдении этих условий может содержать и большее количество баз, длиной от сотен метров до десятков километров, в зависимости от условий видимости. Притом требуется уделять особое внимание проектированию и рекогносцировке сети, закреплению и защите пунктов, особенно, расположенных на периферии геодезической сети, от вандалов.

Один специалист не способен создать систему метрологической сертификации геодезической спутниковой аппаратуры. В лучшем случае, он только может высказать предварительные соображения по этой обширной совокупности вопросов. Таким образом, автор данной статьи осмеливается пригласить профессионалов к дискуссии в рамках журнала «Геопрофи», от результатов которой зависит, будут ли приняты его предложения вообще и в какой мере. В любом случае, создать строгую официальную методику аттестации геодезической аппаратуры ГНСС в совокупности с ее программным обеспечением действительно необходимо.

▼ Список литературы

1. Шануров Г.А., Мельников С.Р., Лопес-Кьерво С., Месква Х., Роблес Х. Геометрия спутниковых наблюдений при создании метрологического полигона // Геодезия и картография. — 2001. — № 7. — С. 7–14.
2. Юношев Л.С. Метрологическое обеспечение космических навигационных систем // Ежегодный обзор ГИС-Ассоциации, 1998.
3. Ramsey J.L., Bracewell R.N. Radio astronomy. — Oxford, 1955. — p. 414.

RESUME

Any geodetic satellite receivers set and its programme support set is to be properly certificated at standard metrological polygon. The polygon geodetic network baselines are to be measured by means of precise ground-based laser range-finder with an error of about 0,1 millimeter. The accuracy of the satellite receivers set and its programme support set is to be evaluated by its possibility to reproduce the standard geodetic network. If the network design is simmetrical relative to the standard network central point, the weights of the two-dimentional transformation parameters become as large as possible increasing with the distances between the central geodetic standard network point and marginal points.