

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ
АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА
С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ТАХЕОМЕТРА**

М.А. Ханзаян, А.В. Мазуркевич

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
hma@vniiftri.ru,
avm@vniiftri.ru*

Аннотация. В настоящей статье рассмотрен метод измерений астрономического азимута с помощью электронного тахеометра, который по своему назначению не предназначен для выполнения астрономических работ. Разработана методика измерений астрономического азимута с помощью высокоточного электронного тахеометра. Произведены исследования для установления влияния составляющих погрешностей при измерениях астрономического азимута, формирующие общий бюджет погрешности разработанной методики, которая опробована на эталонном стационарном комплексе средств метрологического обеспечения средств измерений азимута (КСМО СИА).

Ключевые слова: методика, разработка, астрономический азимут, электронный тахеометр.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MEASURING THE
ASTRONOMICAL AZIMUTH USING AN ELECTRONIC
TOTAL STATION**

M.A. Khanzadyan, A.V. Mazurkevich

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
hma@vniiftri.ru,
avm@vniiftri.ru*

Annotation. In this article, the method of measuring the astronomical azimuth using an electronic total station, which is not intended for performing astronomical work, is considered. A method of measuring the astronomical azimuth using a high-precision electronic total station has been developed. Studies have been carried out to establish the influence of the components of errors in measurements of astronomical azimuth, forming the total budget of the error of the developed methodology, which has been tested on the reference stationary complex of metrological support of azimuth measuring instruments (CMS AMI).

Key words: procedure, development, astronomical azimuth, electronic total station.

На сегодняшний день, несмотря на сохраняющуюся потребность в астрономических измерениях азимута, парк ранее созданных средств (специализированных теодолитов и угломеров) устаревает. При этом, с учётом развития техники, появляется возможность проведения измерений по новым методикам измерений. Таким образом, на сегодняшний день актуальной является задача разработки специализированной методики астрономических измерений для

современных высокоточных тахеометров. В связи с этим была разработана и опробована методика измерений астрономических азимутов с помощью электронного тахеометра на стационарном комплексе средств метрологического обеспечения средств измерений азимута (КСМО СИА) [1].

КСМО СИА был разработан специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2020 г. для обеспечения единства измерений определения азимутов исходных направлений, хранения этих направлений, а также для передачи единицы астрономического азимута от исходных направлений средствам измерений азимутов (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид здания астропавильона: а — внешний вид астрономической лаборатории; б — общий вид зала хранения азимутальных направлений здания астропавильона

КСМО СИА состоит из двух частей:

- 1) лабораторный комплекс, состоящий из автоматической системы астрономического азимутального ориентирования (АСААО) и оптического хранилища азимутальных направлений (ОХАН) (рис. 2);
- 2) азимутальный полигон, состоящий из трёх фундаментальных астрономо-геодезических пунктов, размещённых на расстоянии 300–400 м друг от друга (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид АСААО

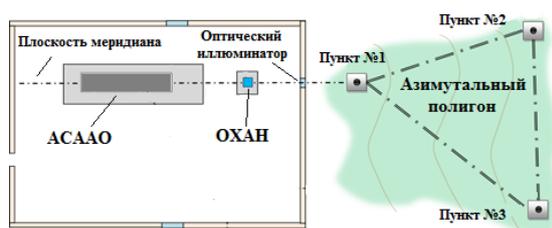


Рис. 3. Общий вид азимутального полигона

Принцип работы АСААО заключается в определении азимута нормали к грани ОХАН из многократных наблюдений множества звёзд, кульминирующих вблизи меридиана, на матрице фотоприёмного устройства камеры телевизионной, а также идентификации положения звёзд по астрономическим каталогам FK6, Hipparcos, PRMXL с привязкой результата к шкале времени UTC (SU) с помощью Государственного первичного эталона единицы времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 [2] (рис. 4).

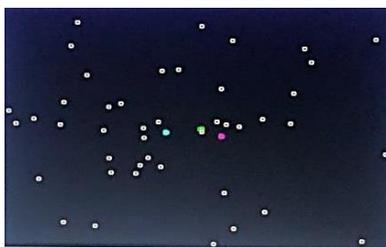


Рис. 4. Количество видимых звёзд на АСААО

Оптический хранитель азимутальных направлений — это четырёхгранная зеркальная призма с паспорттированными значениями углов между гранями, установленная на одной оптической оси с астровизиром, предназначенная для хранения исходных направлений и передачи азимутов этих направлений гироскопическим, астрономическим и навигационным средствам измерений азимута (рис. 5).

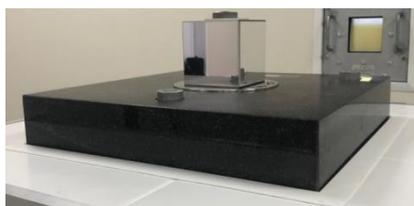


Рис. 5. Внешний вид ОХАН

КСМО СИА обладает следующими метрологическими характеристиками:

- неисключённая систематическая погрешность (НСП): не более 0,5";
- среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений астрономического азимута на призму ОХАН: не более 0,5".

Методика измерений

В соответствии с метрологическими характеристиками КСМО СИА был разработан следующий состав средств основных и вспомогательных средств измерений астрономического азимута. В разработанной методике в качестве основного средства измерений астрономического азимута используется электронный тахеометр Leica TS 60 I и вспомогательное оборудование в составе: ГНСС-приёмник Leica GS16, предназначенный для обеспечения синхронизации времени при проведении астрономических измерений; диагональная насадка на окуляр, предназначенная для угловых измерений на высоких зенитных расстояниях; автоколлимационная насадка, предназначенная для наведения на зеркальную грань оптической призмы ОХАН (рис. 6) [3].



Рис. 6. Состав используемого оборудования:

а — электронный тахеометр Leica TS 60 I; б — ГНСС-приёмник Leica GS16;
в — диагональная насадка на окуляр GFZ3; г — автоколлимационная насадка

Электронный тахеометр устанавливается на астрономический пункт, расположенный рядом с астропавильоном в створе, обеспечивающем автоколлимационную привязку на зеркальную грань оптической призмы ОХАН (рис. 8).

Электронный тахеометр синхронизируется с ГНСС-приёмником для привязки шкалы времени к шкале времени UTC (SU).

На окуляр тахеометра устанавливается автоколлимационная насадка, выполняются измерения к нормали внешней зеркальной грани ОХАН.

Далее автоколлимационная насадка меняется на диагональную, производятся измерения углового положения Полярной звезды (далее — Полярная).

Затем во встроенной программе тахеометра задаются параметры измерений полным приёмом, по способу «Круговых приёмов» метод измерений (Полярная — ОХАН — Полярная — ОХАН) и количество измеренных приёмов (не менее 25).

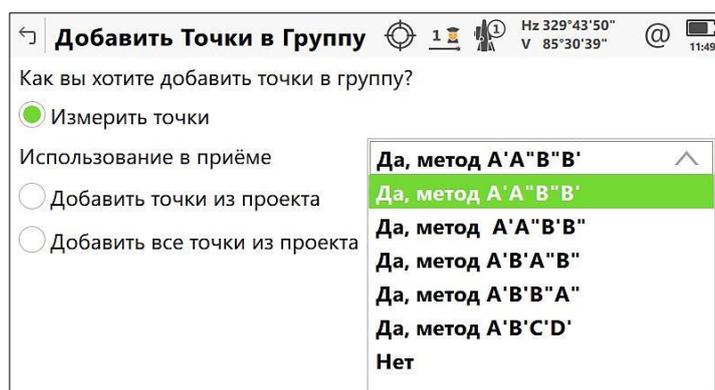


Рис. 7. Окно программы «Способ круговых приёмов» в электронном тахеометре

Разработанная методика позволяет использовать электронный тахеометр для измерений астрономического азимута, а также обладает существенным преимуществом по сравнению с классическим способом измерения астрономического азимута при помощи астрономического теодолита за счёт автоматизации действий измерений.

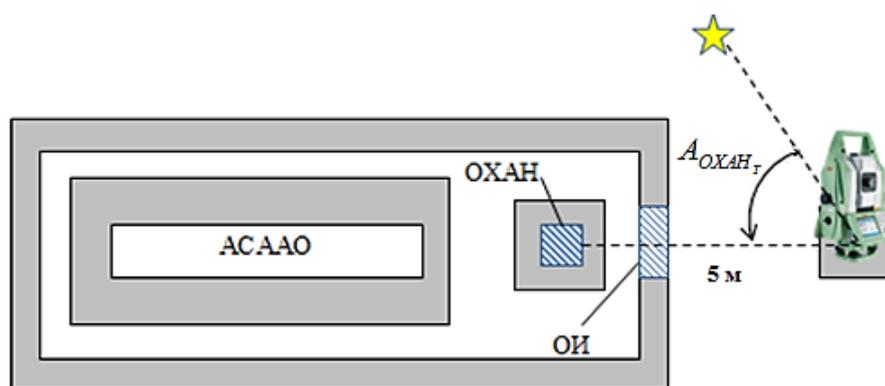


Рис. 8. Схема измерений астрономического азимута на ОХАН:
ОИ — оптический иллюминатор

Результаты измерений

Впервые была проведена работа по оценке погрешности измерений астрономического азимута не только расчётным методом, но и с помощью существующего во ФГУП «ВНИИФТРИ» эталонного комплекса КСМО СИА.

Полученные измерения значений астрономического азимута направления на внешнюю грань ОХАН сравнивались со значением азимута, полученного с помощью АСААО из состава КСМО СИА.

Пример результатов измерений приведён в таблице.

Таблица

Результаты измерений

| № | Дата | Азимут ОХАН с помощью КСМО СИА $A_{\text{ОХАН}_{\text{АСААО}}}$ | Азимут ОХАН с помощью электронного тахеометра $A_{\text{ОХАН}_T}$ | СКО $\sigma_{A_{\text{ОХАН}_{\text{АСААО}}}}$ | СКО $\sigma_{A_{\text{ОХАН}_T}}$ | Разница $A_{\text{ОХАН}_T} - A_{\text{ОХАН}_{\text{АСААО}}}$ |
|---|----------|---|---|---|----------------------------------|--|
| 1 | 10.12.20 | 359°40'15,64" | 359°40'16,11" | 0,28" | 0,39" | 0,47" |
| 2 | 25.01.21 | 359°40'15,57" | 359°40'16,23" | 0,25" | 0,44" | 0,66" |
| 3 | 17.02.21 | 359°40'15,77" | 359°40'16,84" | 0,22" | 0,47" | 1,07" |
| 4 | 11.03.21 | 359°40'15,44" | 359°40'16,64" | 0,21" | 0,47" | 1,20" |
| 5 | 29.03.21 | 359°40'15,55" | 359°40'16,04" | 0,23" | 0,35" | 0,49" |

Полученный результат астрономического азимута с помощью электронного тахеометра отличается не более чем на 1,5" от азимута, полученного с помощью установки АСААО, это ясно видно из получившихся результатов, из которых следует, что разработанная методика возможна для использования. Однако для того, чтобы окончательно убедиться в работоспособности разработанной методики, необходимо продолжить исследование для получения более достоверных данных на длительном промежутке времени.

По полученным одновременным измерениям можно установить чувствительность разработанной методики к изменению положения зеркальной грани призмы ОХАН с течением времени, построив график зависимости результатов измерений (рис. 9). На графике отчётливо можно увидеть максимальные перемещения зеркальной грани призмы ОХАН. Погрешность разработанной методики выше, чем у эталонного комплекса КСМО СИА, соответственно максимальные пики на графике имеют более ярко выраженную форму. Исходя из анализа графических данных, можно сделать вывод о хорошей чувствительности методики к внешним воздействующим факторам, влияющим на изменение планового положения с течением времени зеркальной грани призмы ОХАН.

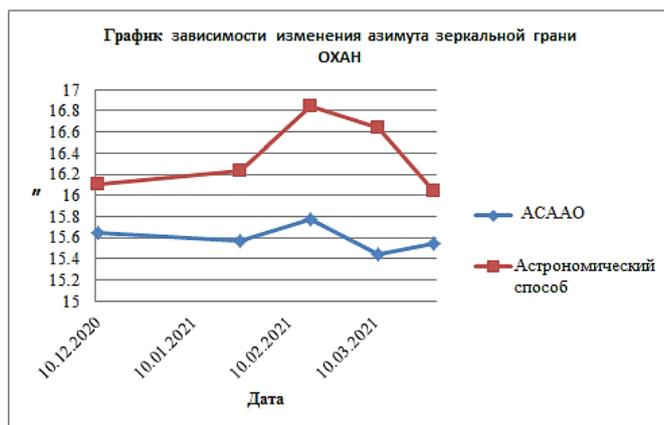


Рис. 9. График зависимости изменения азимута зеркальной грани призмы ОХАН

Для разработанного и опробованного метода выполнен анализ, а также расчёт случайной и систематической погрешностей, которые оказывают суммарное влияние на результат измерений астрономического азимута. Погрешность метода представлена в виде границы допускаемой абсолютной погрешности измерений астрономического азимута (при доверительной вероятности 0,95) [4, 5].

Границы допускаемой абсолютной погрешности измерений астрономического азимута (при доверительной вероятности 0,95) определяются соотношением:

$$\Delta = KS_{\Sigma}, \quad (1)$$

где K — коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП.

Суммарное среднее квадратическое отклонение S_{Σ} измерений астрономического азимута вычисляется по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_x^2}, \quad (2)$$

где S_{Θ} — среднее квадратическое отклонение НСП измерений астрономического азимута

$$S_{\Theta} = \frac{\Theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где Θ — граница НСП измерений астрономического азимута

$$\Theta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\Theta_{\text{ОХАН}}^2 + \Theta_3^2 + \Theta_{\Phi}^2 + \Theta_{\text{Н}}^2 + \Theta_{\text{С}}^2}, \quad (4)$$

где $\Theta_{\text{ОХАН}}$ — погрешность визирования на призму ОХАН; Θ_3 — погрешность визирования на Полярную звезду; Θ_{Φ} — погрешность за качку фокусирующего устройства; $\Theta_{\text{Н}}$ — погрешность, вызванная в результате смены насадок (автоколлимационная на диагональную); $\Theta_{\text{С}}$ — погрешность, вызванная продольным смещением луча, проходящего через оптический иллюминатор, взятая из паспортного значения на оптический иллюминатор; k — коэффициент, определяемый выбранной доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Погрешность визирования на призму ОХАН и Полярную звезду определяется по формуле:

$$\Theta_{\text{ОХАН/з}} = \frac{20''}{\Gamma^x}, \quad (5)$$

где Γ^x — увеличение зрительной трубы электронного тахеометра; $20''$ — коэффициент, порог чувствительности человеческого глаза.

Погрешность за качку фокусирующего устройства получают по формуле:

$$\Theta_{\Phi} = \frac{(a_2 - a_1)}{2S} \rho, \quad (6)$$

где a_1, a_2 — отсчёты по шкале коллиматора АК-0,25 относительно вертикальной нити сетки нитей; S — расстояние от тахеометра до шкалы, равное расстоянию до призмы ОХАН (рис. 8).

Погрешность, вызванная в результате смены насадок, вычисляется по формуле:

$$\Theta_{\text{H}} = \gamma_2 - \gamma_1, \quad (7)$$

где γ_1, γ_2 — значения углов в секундах, характеризующих отступления от параллельности осей сетки нитей, выходящих из окуляра электронного тахеометра за счёт смены окулярной насадки на диагональную

$$\gamma_1 = \alpha k_1; \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \alpha k_2, \quad (9)$$

где α — цена деления шкалы коллиматора АК-0,25 в секундах; k_1, k_2 — число делений, соответствующих смещению изображения перекрестия от центра шкалы, соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического результата $S_{\bar{x}}$ случайной составляющей погрешности измерений астрономического азимута вычисляется по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

где S — среднее квадратическое отклонение измерения угла равное $0,5''$ (из метрологических характеристик тахеометра Leica TS 60 I); n — количество приёмов измерений угла астрономического азимута.

Коэффициент K определяется по формуле:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}}{S_{\bar{x}} + S_{\Theta}}, \quad (11)$$

где ε — доверительные границы случайной погрешности измерений астрономического азимута

$$\varepsilon = t S_{\bar{x}}, \quad (12)$$

где t — коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0,95.

Таким образом, по формулам (1)–(12) была вычислена погрешность разработанной методики, равная $1,5''$:

1. $\Delta = 1,7 \cdot 0,9 = 1,5''$.

2. $S_{\Sigma} = \sqrt{0,8^2 + 0,1^2} = 0,9''$.

3. $S_{\Theta} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,9''$.

4. $\Theta_{\Sigma} = \pm 1,1 \sqrt{0,7^2 + 0,7^2 + 0,5^2 + 0,8^2 + 0,2^2} = 1,5''$.

5. $\Theta_{\text{ОХАН/З}} = \frac{20''}{30^{\times}} = 0,7''$.

6. $\Theta_{\Phi} = \frac{0,02''}{2 \cdot 5000} \cdot 206265'' = 0,5''$.

7. $\Theta_{\text{H}} = 0,9 - 0,1 = 0,8''$.

8. $\gamma_1 = 0,01 \cdot 10 = 0,1''$.

9. $\gamma_2 = 0,01 \cdot 90 = 0,9''$.

10. $S_{\dot{x}} = \frac{0,5}{\sqrt{25}} = 0,1''$.

11. $K = \frac{0,2 + 1,5}{0,1 + 0,9} = 1,7$.

12. $\varepsilon = 2,2 \cdot 0,1 = 0,2''$.

Заключение

По результатам, представленным в таблице, погрешность измерений разработанной методики можно сравнить с погрешностью, полученной в результате вычислений по формуле (1), построив график (рис. 10). Из графика видно, что расчётное значение погрешности Δ и полученное значение погрешности по результатам измерений $A_{\text{ОХАН}_T} - A_{\text{ОХАН}_{\text{АСААО}}}$ не превышает расчётного значения. В связи с этим, можно предположить, что расчётные значения составляющих погрешностей, влияющих на итоговую погрешность результата измерений астрономического азимута, отвечают реальным значениям погрешности измерений.



Рис. 10. Сравнительный анализ погрешности результатов измерений азимута

Вывод

По результатам опробования методики и рассчитанной для неё погрешности можно сделать предположение о том, что разработанная методика измерений позволяет использовать современные средства измерений для производства работ по измерению астрономического азимута и отвечает современным и перспективным требованиям по уровню точности для существующих видов деятельности. Но у разработанной методики присутствует недостаток, связанный с заменой насадок, что добавляет дополнительную погрешность в результаты измерений, которую исключить на сегодняшний день невозможно ввиду конструктивных особенностей строения электронных тахеометров.

Список литературы

1. Махаев А.Ю., Беркович С.Б., Котов Н.И., Чернышев С.Е., Кузьмина Н.В. Проблемные вопросы метрологического обеспечения испытаний и эксплуатации автоматической системы определения астрономического азимута // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации». Поведники, 23–25 октября, 2012. — С. 92–95.
2. Махаев А.Ю., Беркович С.Б., Котов Н.И., Гайворонский С.В., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Автоматическая система определения астрономического азимута // Метрология. Ежеквартальное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника». — М.: Стандартиформ, 2015. — № 6. — С. 11–20.
3. ГКИНП-01-153-81. Руководство по астрономическим определениям. — М.: Недра, 1984. — С. 138–161.
4. ГОСТ 8.381-2009. Эталоны. Способы выражения точности. — Взамен ГОСТ 8.381-80; Введ. с 01.01.12. — М.: ФГУП «Стандартиформ», 2012.
5. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — М.: Стандартиформ, 2019

Статья поступила в редакцию: 09.09.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 01.10.2021 г.

Статья принята в работу: 04.10.2021 г.