

Методика определения астрономического азимута с использованием высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003

© А. И. Яковлев, Р. И. Алтунин, К. К. Жбанов, А. В. Прокофьев

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Для получения высокоточного астрономического азимута могут быть предложены следующие способы: определение азимута по часовому углу светил, из наблюдений прохождения звезд в вертикали местного предмета, из наблюдения звезд в меридиане. Данные астрономические методы являются исторически первыми и на сегодняшний день наиболее точными и ресурсоемкими. При их использовании для выполнения работ требуется несколько суток измерений и до трех человек квалифицированных специалистов. Эти способы были предназначены и описаны для работы с определенной (уже устаревшей) оптико-механической аппаратурой. На сегодняшний день приборы данного типа полностью израсходовали свой ресурс, сроки их эксплуатации закончились, а потребность в получении астрономического азимута остается актуальной и по сей день. Таким образом, возникает необходимость в исследовании современных образцов топогеодезической техники для определения высокоточного астрономического азимута.

Целью работы является создание методики определения высокоточного астрономического азимута с помощью перспективных современных оптико-электронных образцов техники.

Определение астрономического азимута осуществлялось по часовому углу Полярной звезды. В проведении исследовательской работы использовался комплект высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003. Программа определения азимута выполнялась в течение трех вечеров в прямом и обратном направлениях на бетонных столбах с принудительным центрированием 18-ю приемами.

После проведения эксперимента значения результатов оценки точности определения азимута не превысили 1", а расхождение между прямыми и обратными азимутами — 2.5". Это означает, что тахеометр Leica TC 2003 пригоден для высокоточного определения азимута.

Ключевые слова: астрономический азимут, электронный тахеометр, Leica TC 2003, часовой угол Полярной, программа наблюдений, астрономический универсал.

Контакты для связи: Алтунин Руслан Игоревич (altuninruslan@yandex.ru).

Для цитирования: Яковлев А. И., Алтунин Р. И., Жбанов К. К., Прокофьев А. В. Методика определения астрономического азимута с использованием высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003 // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 72. С. 42–45.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.72.42-45>

Method for Determining the Astronomical Azimuth Using a High-Precision Electronic Total Station Leica TC 2003

A. I. Yakovlev, R. I. Altunin, K. K. Zhbanov, A. V. Prokofiev

A. F. Mozhaisky Military-Space Academy, Saint Petersburg, Russia

Abstract

To obtain high-precision astronomical azimuth, the following methods can be proposed: determining the azimuth by the hour angle of celestial bodies, from the observations of stars passing through the vertical of a local object, and from the observation of stars in the meridian. These astronomical methods are historically the first ones and are still currently the most accurate and resource-intensive. Their use requires several days of measurements and up to three qualified specialists. These methods were designed and described for the use with specific (now outdated) optical-mechanical equipment. Today, such instruments have completely exhausted their resources, their operational lifespan has expired, but the need for obtaining astronomical azimuth remains relevant to this day. Thus, there is a necessity to explore modern samples of topographic and geodetic equipment for determining high-precision astronomical azimuth.

The aim of the work is to develop a methodology for determining high-precision astronomical azimuth using the advanced modern optoelectronic equipment.

The astronomical azimuth was determined using the hour angle of the Polar Star. A set of high-precision electronic total station Leica TC 2003 was used in this research. The azimuth determination program was carried out over three evenings in the forward and reverse directions on concrete pillars with forced centering in 18 steps.

After the experiment, the result values of assessing the accuracy of azimuth determination have not exceeded 1", and the discrepancy between forward and reverse azimuths was 2.5". This means that the Leica TC 2003 total station is suitable for high-precision azimuth determination.

Keywords: astronomical azimuth, total station, Leica TC 2003, Polar hour angle, observation program, astronomical station wagon.

Contacts: Altunin Ruslan Igorevich (altuninruslan@yandex.ru).

For citation: Yakovlev A. I., Altunin R. I., Zhbanov K. K., Prokofiev A. V. Method for determining the astronomical azimuth using a high-precision electronic total station Leica TC 2003 // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 72. P. 42–45. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.72.42-45>

Введение

Существует целый ряд областей применения высокоточного азимута: метрологическое обеспечение разработки и серийного выпуска угломерных астрономо-геодезических приборов; периодический контроль астрономических приборов, применяемых в топографо-геодезическом производстве; независимый контроль точности геодезических сетей; ориентирование высокоточных радиотехнических систем; контроль высокоточных гироскопических средств автономной навигации и автономного ориентирования; исследование точности определения азимута с целью совершенствования приборов и методов измерений; комплексная проверка готовности системы «прибор – наблюдатель» к работе на объектах и множество других ([Павловский, 1992](#)).

Успешное выполнение любых задач с применением азимута будет зависеть от точности его определения. Наряду с требованиями к точности определения азимута немаловажным остается его сохранность и стабильность. Основными элементами, которые определяют стабильность азимута, являются центры — астрономические столбы, к которым предъявляются особые требования.

Астрономические столбы должны представлять собой железобетонное сооружение. Форма, габариты, глубина заложения, размеры якоря, высота над поверхностью земли диктуются условиями минимизации влияния боковой, вертикальной и турбулентной рефракции, а также условиями обеспечения достаточной устойчивости сооружения. Хранителями направления азимута могут быть вмонтированные в верх столбов пунктов марки с принудительным центрированием в виде специальных механических переходников для различных астрономических приборов ([Уралов, 1980](#)).

Для получения астрономического азимута с точностью 1" могут быть предложены следующие способы: определение азимута по часовому углу светил, из наблюдений прохождения звезд в вертикали местного предмета, из наблюдения звезд в меридиане ([Руководство..., 1980](#)). Данные астрономические методы являются исторически первыми и на сегодняшний день наиболее точными и ресурсоемкими. При их использовании для выполнения работ требуется несколько суток измере-

ний и до трех человек квалифицированных специалистов. Эти способы были предназначены и описаны для работы с определенной (уже устаревшей) оптико-механической аппаратурой. На сегодняшний день приборы данного типа полностью израсходовали свой ресурс, сроки их эксплуатации закончились, а потребность в получении астрономического азимута остается актуальной и по сей день. Таким образом, возникает необходимость в исследовании современных образцов топогеодезической техники для определения высокоточного астрономического азимута.

Исследование определения астрономического азимута осуществлялось по часовому углу Полярной звезды. В измерениях использовался высокоточный электронный тахеометр Leica TC 2003, основные тактико-технические характеристики которого приведены ниже:

- предназначен для высокоточных измерений длин (приращений координат), горизонтальных и вертикальных плоских углов, в том числе применяемых при определении координат пунктов при геодезических построениях, а также для их передачи нижестоящим по поверочным схемам эталонам и рабочим средствам измерений при проведении калибровки, поверки, аттестации испытательного оборудования и испытаниях средств измерений;

- угловое поле зрения зрительной трубы не менее 1°30';

- увеличение зрительной трубы не менее 30 крат;

- наименьшее расстояние визирования не более 1.7 м;

- диапазон компенсации компенсатора — ±3.75';

- доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности измерений углов (при доверительной вероятности 0.997) — 1" ([All-pribors.ru](#)).

В комплектацию прибора входит съемный окуляр, позволяющий выполнять астрономические наблюдения. Для возможности визирования на небесное светило в ночное время суток присутствует возможность регулировки яркости подсветки сетки нитей. И несмотря на то, что тахеометр предназначен для высокоточных наземных измерений углов, его использование предлагается в определениях астрономического азимута по часовому углу Полярной звезды.

Описание определения астрономического азимута с использованием высокоточного электронного тахеометра Leica TC 2003

Подготовка к измерениям проходит в несколько этапов.

Для начала проводится внешний осмотр комплекта прибора, при котором устанавливается комплектность, исправность переключателей, работа подсветок, исправность разъемов и внешних соединительных кабелей, также отсутствие коррозии, механических повреждений и других дефектов, влияющих на эксплуатационные и метрологические характеристики.

При работе на оптико-механических астрономических универсалах немаловажным фактором, влияющим на качество измерений, является исправность накладного уровня, его юстировка. В отличие от оптико-механических астрономических универсалов, у электронного тахеометра Leica TC 2003 данного устройства нет. Проведение ежегодных метрологических проверок позволяет добиться точной настройки уровней прибора.

Для визирования на звезду требуется особенная настройка подсветки сетки нитей зрительной трубы и дисплея прибора, которая будет позволять наблюдать небесное светило и фиксировать отсчет значения горизонтального угла между светилом и местным предметом.

При рассмотрении вопроса о наиболее выгодных условиях наблюдений на основе дифференциальной формулы изменения азимута светила было установлено, что для определения азимута с максимальной точностью светила для наблюдений нужно выбирать в меридиане и с большими склонениями. Полярная звезда хорошо удовлетворяет этим условиям, склонение которой $\delta \approx 89^\circ$, а азимут для широт $\varphi < 70^\circ$ не превышает 2.5 (Павловский, 1992). Программа определения азимута выполнялась в течение трех вечеров в прямом и обратном направлении на бетонных столбах с принудительным центрированием 18-ю приемами. Общий вид эталонной сети показан на рисунке. Астрономические долготы для приведения обратного азимута к прямому были известны с ошибкой 0.03". Тахеометр перед наблюдениями устанавливался на бетонных столбах с принудительным центрированием, тщательно горизонтировался с помощью электронного уровня. Цена деления электронного уровня не превышает 0.5".

Каждый прием наблюдений выполнялся в следующей последовательности:

— при круге «Лево» («Право») тахеометр вращался по ходу часовой стрелки, зрительная труба наводилась на отражатель на втором столбе с принудительным центрированием. Вертикальной нитью тахеометра производилось три наведения на отражатель с отсчетами по электронному табло;

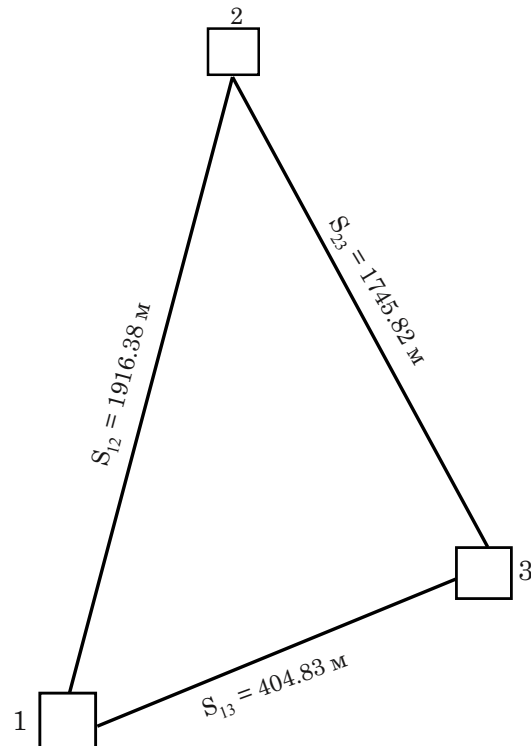


Рис. Общий вид эталонной сети

— алидада вращалась по ходу часовой стрелки, при круге «Лево» («Право») зрительная труба трижды наводилась на Полярную звезду с регистрацией моментов наведения. По одиночной вертикальной нити снимались отсчеты с табло электронного тахеометра и производился контроль электронного уровня;

— зрительная труба переводилась через зенит, и при круге «Право» («Лево») наблюдалась Полярная звезда в том же порядке, как и при круге «Лево» («Право»);

— наблюдался отражатель на втором столбе при круге «Право» («Лево»).

Регистрация моментов наблюдений при определении азимута осуществлялась с использованием приложения на смартфоне по методу «глаз – клавиша». Приложение фирмы «ClockSync» обеспечивает ручную или автоматическую синхронизацию системного времени устройства через «NTP». Это время поясное (UTC+пояс), и программа даёт возможность фиксировать время с точностью одной секунды. А изменением азимута Полярной звезды при переходе к шкале ТТ, в которой вычисляются ее эфемериды, можно пренебречь (<https://4pda.to/forum/index.php?showtopic=171610>).

Для вычисления азимута Полярной использовалась формула:

$$\operatorname{tg} A_i = \frac{\operatorname{ctg} \delta \cdot \sec \varphi \cdot \sin t_i}{\operatorname{ctg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos t_i - 1}, \quad (1)$$

где: δ — склонение Полярной звезды, φ — астрономическая широта точки наблюдения, t_i — часовой

Таблица

Результаты определения астрономических азимутов, оценки точности азимута по каждому из направлений и значения расхождений между прямыми и обратными азимутами направлений

Направление	Значение азимута, ° ' "	m_α , "	Значение расхождения $\Delta\alpha$ между прямым и обратным азимутами, "
1 – 2	66 39 17.20	0.41	0.61
2 – 1	246 40 49.50	0.40	
2 – 3	235 10 44.15	0.30	0.21
3 – 2	55 08 32.80	0.48	
3 – 1	306 04 51.20	0.48	0.66
1 – 3	126 04 30.10	0.42	

угол Полярной звезды, i — номер приема ($i = 1, 2, \dots, n$), A_i — азимут направления на Полярную звезду. Азимут направления на местный предмет (отражатель) α_i вычисляется по формуле:

$$\alpha_i = A_i + Q_i, \quad (2)$$

где: Q — горизонтальный угол между Полярной звездой и местным предметом, исправленный поправкой за коллимацию, вычисленную по наблюдениям местного предмета.

Расхождения $\Delta\alpha$ между окончательными значениями прямого и обратного астрономического азимута направления вычислялись по формуле:

$$\Delta\alpha_{12} = (\alpha_{12} - \alpha_{21} \pm 180^\circ) - (\lambda_1 - \lambda_2)\sin\varphi, \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 — астрономические долготы пунктов наблюдений, и не превысили 1", при допуске 2.5". Расхождения $\Delta\alpha$ между окончательными значениями прямого и обратного астрономического азимута направления не превышают 1" при допуске 2.5". СКО определения азимута из 18 приемов вычислялась по формуле:

$$m_\alpha = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где: v — отклонение отдельного значения азимута от среднего.

Результаты определения астрономических азимутов и оценки точности по каждому из направлений приведены в таблице.

Заключение

Результаты оценки точности азимута по каждому из направлений не превышают 1", а расхождение между прямыми и обратными азимутами не превышают 2.5". Таким образом, результаты исследования показывают, что методика определения высокоточного астрономического азимута с помощью перспективных современных оптико-электронных образцов техники может быть применима, а тахеометр Leica TC 2003 пригоден для высокоточного определения азимута.

Способ определения астрономического азимута по часовому углу Полярной звезды обладает рядом существенных достоинств. Полярная звезда не заходит практически во всем северном полушарии. Ее легко можно наблюдать как ночью, так и днем с тахеометром Leica TC 2003. Способ достаточно прост в наблюдениях и вычислениях и поэтому не требует для исполнения специалистов высокой квалификации.

Литература

- Павловский В. С., Кудряшов Ю. П., Домасев В. А. Астрономия. Учебник. М.: Военное издательство, 1992. С. 125–128.
- Уралов С. С. Курс геодезической астрономии. М.: 1980. С. 73.
- Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. Часть 1. Геодезические работы. М.: РИО ВТС, 1980. С. 423.
- All-Pribors.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://all-pribors.ru> (дата обращения: 21.03.2024).
- 4PDA [Электронный ресурс]. URL: <https://4pda.to/forum/index.php?showtopic=171610> (дата обращения: 21.03.2024).