

Компенсация систематической составляющей погрешности автоматизированного астрономического универсала, обусловленной сбоями синхронизации данных

© Н. В. Кузьмина, С. М. Тарасов, В. В. Цодокова

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Статья посвящена алгоритмической компенсации систематических составляющих погрешностей определения астрономических долгот и азимутов автоматизированным астрономическим универсалом. Рассматриваемое устройство представляет собой оптико-электронный прибор, основными составными частями которого являются: объектив, телевизионная камера, приемник сигналов спутниковых навигационных систем, приводы вертикального и горизонтального наведения, система горизонтирования, блок обработки и управления. Посредством приемника сигналов спутниковых навигационных систем производится определение значений всемирного координированного времени UTC, а также формирование сигналов синхронизации. По сигналам синхронизации телевизионной камерой осуществляется регистрация кадров с изображениями звезд, при этом с каждым сигналом передается значение времени UTC. В результате сбоев в работе аппаратуры (телевизионной, спутниковой) или нарушения логики работы программного обеспечения может возникнуть ошибочная временная привязка зарегистрированного кадра, которая, в первую очередь, повлияет на точность вычисления Гринвичского звездного времени и в итоге приведет к появлению систематических составляющих погрешностей определения астрономических долгот и азимутов, не позволяющих обеспечить требуемые точностные характеристики автоматизированного астрономического универсала.

В работе аналитически оценивается влияние погрешностей синхронизации данных на точность определения астрономических долгот и азимутов и предлагается алгоритм обнаружения и компенсации указанных погрешностей. Погрешность определения азимута выявляется по разности результатов астрономических наблюдений, произведенных вблизи плоскости меридиана при двух диаметрально противоположных направлениях визирной оси прибора (к северу и к югу от зенита), а долготы – по разности значений уклонения отвесной линии в плоскости первого вертикала, одно из которых получено в результате астрономических наблюдений в околозенитной области, а второе снято со специальных карт или рассчитано, например, гравиметрическим методом.

Кроме того, в работе формулируются требования, выполнение которых необходимо для успешной реализации предложенной алгоритмической компенсации, а также определяется диапазон широт, в котором эти требования могут быть выполнены.

Ключевые слова: астрономический азимут, астрономические координаты, автоматизированный астрономический универсал, погрешность, синхронизация данных.

Контакты для связи: Цодокова Вероника Владимировна (tsodokova.vv@gmail.com).

Для цитирования: Кузьмина Н. В., Тарасов С. М., Цодокова В. В. Компенсация систематической составляющей погрешности автоматизированного астрономического универсала, обусловленной сбоями синхронизации данных // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 71. С. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.71.3-8>

Compensation of Automated Astronomical Theodolite Systematic Errors Due to Data Synchronization Failures

N. V. Kuzmina, S. M. Tarasov, V. V. Tsodokova

Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The paper considers the algorithmic compensation of the automated astronomical theodolite's systematic errors in the astronomical longitudes as well as azimuths determination. The automated astronomical theodolite includes: an objective, a TV camera, a GNSS receiver, vertical and horizontal drives, a processing and control unit, a leveling system. The universal coordinated time (UTC) determination and synchronization signals generation are produced by the GNSS receiver. The TV camera records the frames with stars images in response to synchronization signals, and the UTC values are transmitted with each signal. In case of TV camera, satellite equipment or the software failures the frame may erroneously be referenced to the UTC and the Greenwich sidereal time of the frame registration may be calculated with error. As a result, the appearing systematic components of errors in astronomical longitudes and azimuths determination will not allow to provide the required accuracy characteristics of the automated astronomical theodolite.

The effect of data synchronization errors on the accuracy of astronomical longitudes and azimuths determination is estimated and an algorithm for detecting and compensating these errors is proposed. It is suggested to detect and compensate for the error in determining the azimuth by the difference of astronomical observations obtained in two diametrically opposite directions of the sight axis (northwards and southwards of the zenith), and the errors in determining the longitude — using the reference value of the vertical deflection component in the prime vertical plane, taken from special maps or calculated, for example, by the gravimetric method.

In addition, the conditions are formulated for successful implementation of the algorithmic compensation proposed, and the range of latitudes is determined in which these conditions can be met.

Keywords: astronomic azimuth, astronomic coordinates, automated astronomical theodolite, error, data synchronization.

Contacts: Veronika V. Tsodokova (tsodokova.vv@gmail.com).

For citation: Kuzmina N. V., Tarasov S. M., Tsodokova V. V. Compensation of automated astronomical theodolite systematic errors due to data synchronization failures // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 71. P. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.3-8>

Введение

Автоматизированный астрономический универсал (ААУ) представляет собой оптико-электронный прибор (рис. 1), предназначенный для высокоточного и оперативного определения в полевых условиях (Тарасов, 2021):

— астрономических координат (широты и долготы) места и составляющих уклонения отвесной линии по наблюдению звезд в околосенитной области;

— астрономических азимутов наземных ориентиров, заданных предметно-световыми визирными целями или автоколимационными отражателями и расположенных вблизи плоскости горизонта, по наблюдению звезд вблизи меридиана и круга равных высот $h = 40^\circ$;

— горизонтальных углов между направлениями.

В верхней части ААУ располагается оптико-электронный блок, состоящий из объектива и телевизионной аппаратуры. Конструкция прибора обеспечивает повороты оптико-электронного блока

в вертикальной и горизонтальной плоскостях посредством приводов вертикального и горизонтального наведения (ПВН, ПГН), состоящих из моментных двигателей, датчиков угла на основе синусно-косинусно вращающихся трансформаторов, а также аналого-цифровых преобразователей.

В нижней части ААУ располагается приемник сигналов спутниковых навигационных систем, система горизонтирования, состоящая из шаговых двигателей и прецизионных датчиков наклона, а также блок обработки и управления, в котором реализуется управление режимами работы ААУ, хранение звездного каталога, сбор и обработка данных астрономических наблюдений (регистрация серии, состоящей из $N_k = 100$ кадров, с привязкой к шкале всемирного времени и расчет итоговых значений астрономических координат и азимутов).

Определение значений всемирного координированного времени (UTC), а также формирование сигналов синхронизации (далее сигналов PPS) производятся посредством приемника сигналов



Рис. 1. Автоматизированный астрономический универсал а) при определении астрономических координат; б) при определении азимута визирной оси

спутниковых навигационных систем. По сигналам PPS оптико-электронным блоком с частотой 1 Гц производится регистрация кадров с изображениями звезд, при этом с каждым сигналом PPS в блок обработки и управления передаются значения времени UTC.

Однако, в результате сбоев в работе аппаратуры (телевизионной, спутниковой) или нарушения логики работы программного обеспечения ААУ, может возникнуть сбой синхронизации (ошибка во временной привязке регистрируемых кадров к шкале времени UTC), что приведет к появлению систематической составляющей погрешности определения времени регистрации всех кадров в серии наблюдений $\Delta T = 1$ с. Случайная составляющая этой погрешности в настоящей работе не учитывается, так как в ААУ она пренебрежимо мала (5 мкс) (Гайворонский и др., 2017).

Погрешность определения времени регистрации кадров, в первую очередь, повлияет на точность вычисления Гринвичского звездного времени и в итоге приведет к появлению систематических составляющих погрешностей определения астрономических долгот и азимутов (Гайворонский и др., 2017; Брумберг и др., 2004), не позволяющих обеспечить требуемые точностные характеристики ААУ.

В работе представлен алгоритм обнаружения и компенсации погрешностей ААУ при определении астрономических координат и азимутов, обусловленных сбоями синхронизации данных со шкалой всемирного времени UTC, основанный на использовании:

— результатов определений азимута в диаметрально противоположных направлениях визирной оси ААУ, разность которых контролируется по показаниям датчика угла, установленного в ПГН ААУ;

— опорных значений составляющей уклонения отвесной линии (УОЛ) в плоскости первого вертикала в заданной системе координат, снятых с карт УОЛ или рассчитанных другим методом (Косарев, 2017).

Влияние погрешностей синхронизации на точность определения астрономических долгот и азимутов

Астрономические координаты места установки ААУ (широта φ и долгота λ) определяются по наблюдениям в околоризитной области звезд с известными экваториальными координатами, при этом используется эквивалентность астрономических координат места наблюдения и видимых экваториальных координат (прямого восхождения α и склонения δ) точки зенита (Гайворонский и др., 2014, Гайворонский и др., 2017; Тарасов, 2021; Пешехонов и др., 2017; Gaivoronskii et al., 2016;

Abele M. et al., 2012; Halicioglu et al., 2012; Hirt, Bürki, 2002; Tian et al., 2014):

$$\varphi = \delta_z, \lambda = \alpha_z - \theta,$$

где θ — Гринвичское звездное время.

Погрешность определения астрономической долготы $\Delta\lambda$, обусловленная сбоем синхронизации данных, описывается формулой

$$\Delta\lambda = -\Delta\theta_\lambda = -\omega\Delta T_\lambda,$$

где $\Delta\theta_\lambda$ — погрешность расчета θ при определении долготы; $\omega \approx 15''/c$ — угловая скорость вращения Земли; ΔT_λ — погрешность ΔT при определении долготы.

Астрономический азимут A визирной оси ААУ определяется по наблюдению звезд вблизи плоскости меридиана и круга равных высот $h = 40^\circ$ (Тарасов, 2021) в соответствии с выражением (Блажко, 1979; Schödlbauer, 2000; Šugar et al., 2012)

$$A = \arctg\left(\frac{\sin(S - \alpha)}{\sin\varphi \cos(S - \alpha) - \cos\varphi \sin\delta}\right), \quad (1)$$

где $S = \theta + \lambda$ — местное звездное время; α, δ — экваториальные координаты точки, соответствующей пересечению визирной осью ААУ небесной сферы.

Погрешность определения азимута ΔA , обусловленная сбоем синхронизации и погрешностью $\Delta\lambda$, может быть выражена в следующем виде (Блажко, 1979; Terzić, 1988):

$$\Delta A = \frac{\cos q \cos \delta}{\cos h} (\Delta\theta_A + \Delta\lambda) = \frac{\cos q \cos \delta}{\cos h} \omega (\Delta T_A - \Delta T_\lambda), \quad (2)$$

где h — высота визирной оси; $\Delta\theta_A$ — погрешность вычисления θ при определении азимута; ΔT_A — погрешность ΔT при определении азимута; q — параллактический угол (Блажко, 1979).

Следует отметить, что астрономические наблюдения в околоризитной области и в плоскости меридиана выполняются последовательно: в первую очередь определяются координаты φ и λ , с использованием которых затем определяется азимут A . Однако, серии астрономических наблюдений могут быть выполнены раздельно (например, в разные даты), поэтому будем считать, что сбой синхронизации может произойти как в каждой из серий астрономических наблюдений ($\Delta T_\lambda = \Delta T_A$), так и только в одной из них ($\Delta T_\lambda \neq \Delta T_A$).

В таблице представлены значения погрешностей $\Delta\lambda$, ΔA_0 (погрешность ΔA при наблюдении звезд к северу от зенита) и ΔA_{180} (погрешность ΔA при наблюдении звезд к югу от зенита) в зависимости от значений ΔT_λ и ΔT_A на широте $\varphi = 60^\circ$.

Отметим, что погрешность определения астрономической долготы $\Delta\lambda$, обусловленная сбоем синхронизации данных, составляет $15''$ независимо

Таблица
Погрешности определения астрономических долгот и азимутов ($\varphi = 60^\circ, h = 40^\circ$)

$\Delta T_\lambda, \text{с}$	$\Delta T_A, \text{с}$	$\Delta \lambda, \text{угл. с}$	$\Delta A_0, \text{угл. с}$	$\Delta A_{180}, \text{угл. с}$
1	0	-15	-6.7	-19.3
0	1	0	6.7	19.3
1	1	-15	0	0

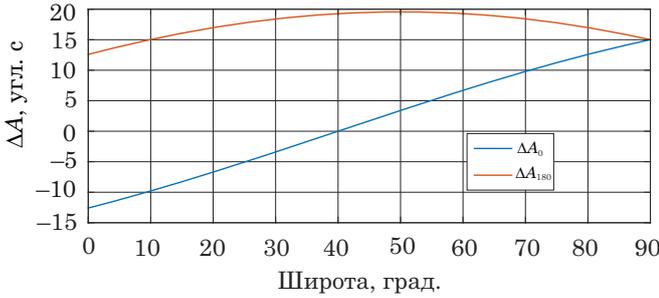


Рис. 2. Зависимость погрешности определения астрономического азимута, обусловленной сбоями синхронизации данных, от широты места наблюдения

от широты места наблюдения, а погрешность определения астрономического азимута ΔA имеет широтную зависимость (рис. 2) и может достигать значений близких к $20''$ (при наблюдениях к югу от зенита).

Обнаружение и компенсация погрешностей синхронизации данных

Как видно из таблицы, при $\Delta T_\lambda = 1 \text{ с}$, $\Delta T_A = 0$ или $\Delta T_A = 1 \text{ с}$, $\Delta T_\lambda = 0$ значения погрешностей определения азимутов ΔA_0 и ΔA_{180} будут существенно различны. Использование этой информации положено в основу принципа обнаружения погрешностей определения астрономических азимутов, обусловленных сбоями синхронизации, который заключается в сопоставлении разности азимутов визирной оси ААУ до (A_0) и после (A_{180}) поворота ПГН на 180° :

$$\Delta A^{\text{изм.}} = A_{180} - A_0$$

с опорным значением $\Delta A^{\text{опор.}}$ (рис. 3), которое вычисляется по показаниям датчика угла ПГН до (β_0) и после (β_{180}) поворота:

$$\Delta A^{\text{опор.}} = A_{180}^{\text{ист.}} - A_0^{\text{ист.}} = \beta_{180} - \beta_0,$$

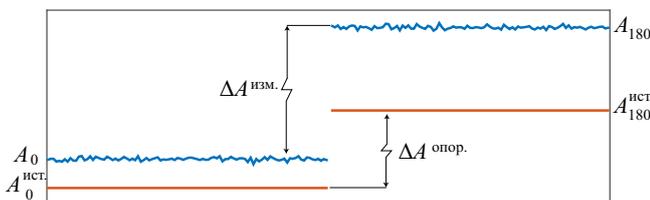


Рис. 3. К описанию принципа определения погрешностей синхронизации

где $A_0^{\text{ист.}}, A_{180}^{\text{ист.}}$ — истинные значения азимутов визирной оси ААУ до и после поворота.

Значение $\Delta A^{\text{изм.}}$ существенно отличается от $\Delta A^{\text{опор.}}$ при наличии погрешностей $\Delta T_\lambda = 1 \text{ с}$ ($\Delta T_A = 0$) или $\Delta T_A = 1 \text{ с}$, $\Delta T_\lambda = 0$ (предполагается, что погрешность ΔT_A одинакова при наблюдениях к северу и к югу от зенита).

Измеренные азимуты визирной оси A_0 и A_{180} могут быть представлены в виде следующих выражений:

$$A_0 = A_0^{\text{ист.}} + \frac{\cos q_0 \cos \delta_0}{\cos h_0} \omega (\Delta T_A - \Delta T_\lambda),$$

$$A_{180} = A_{180}^{\text{ист.}} + \frac{\cos q_{180} \cos \delta_{180}}{\cos h_{180}} \omega (\Delta T_A - \Delta T_\lambda),$$

где q_0, δ_0, h_0 — параллактический угол, склонение и высота визирной оси, рассчитываемые по наблюдениям звезд до поворота; $q_{180}, \delta_{180}, h_{180}$ — параллактический угол, склонение и высота визирной оси, рассчитываемые по наблюдениям звезд после поворота.

Для обнаружения погрешностей определения астрономических азимутов вычисляется параметр $E_1 \approx (\Delta T_A - \Delta T_\lambda) \text{ с}$ с использованием следующего выражения:

$$E_1 = \frac{(\Delta A^{\text{изм.}} - \Delta A^{\text{опор.}}) \cos h_0 \cos h_{180}}{\omega (\cos q_{180} \cos \delta_{180} \cos h_0 - \cos q_0 \cos \delta_0 \cos h_{180})}. \quad (3)$$

Для северных широт, учитывая, что $h_0 \approx h_{180}$, а наблюдения проводятся вблизи плоскости меридиана, т. е. $\cos q_{180} \approx 1$, а $\cos q_0 \approx 1$ при $\varphi > h$ и $\cos q_0 \approx -1$ при $\varphi < h$, выражение (3) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{(\Delta A^{\text{изм.}} - \Delta A^{\text{опор.}}) \cos h}{\omega (\cos \delta_{180} - \cos \delta_0)} \text{ при } \varphi > h, \\ E_1 = \frac{(\Delta A^{\text{изм.}} - \Delta A^{\text{опор.}}) \cos h}{\omega (\cos \delta_{180} + \cos \delta_0)} \text{ при } \varphi < h. \end{cases} \quad (4)$$

Из таблицы видно, что если $\text{round}(E_1) = \pm 1 \text{ с}$, где $\text{round}(\dots)$ — функция округления до целого числа; астрономические азимуты визирной оси ААУ определены с погрешностями, обусловленными сбоями синхронизации данных.

Для компенсации указанных погрешностей достаточно обеспечить выполнения условия $\Delta T_A = \Delta T_\lambda$ (см. таблицу), то есть необходимо ввести поправку в значения местного звездного времени S_0 и S_{180} , соответствующие моментам определения азимутов A_0 и A_{180} .

$$S^*_0 = S_0 - \text{round}(E_1) \omega, \quad S^*_{180} = S_{180} - \text{round}(E_1) \omega,$$

и заново рассчитать астрономические азимуты A_0 и A_{180} по выражению (1) с использованием значений S^*_0, S^*_{180} .

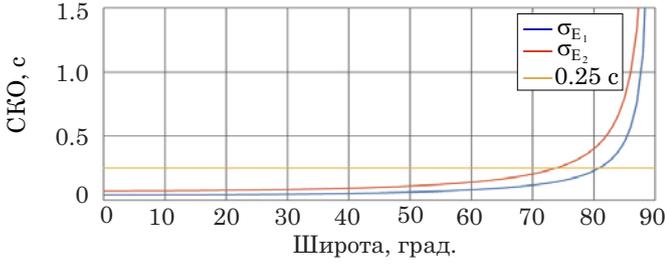


Рис. 4. Зависимости СКО погрешностей определения параметров E_1 и E_2 от широты места φ

Обнаружение погрешности определения астрономической долготы $\Delta\lambda$, обусловленной сбоями синхронизации данных, предлагается производить путем сравнения значений составляющей УОЛ в плоскости первого вертикала: определенно астрономо-геодезическим методом η и опорного $\eta^{\text{опор.}}$ в заданной системе координат, снятого с карт УОЛ или рассчитанного другим методом, например (Косарев, 2017).

В соответствии с основным выражением астрономо-геодезического метода (Пешехонов и др., 2017) составляющая УОЛ в плоскости первого вертикала η вычисляется следующим образом:

$$\eta = (\lambda - L)\cos \varphi, \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{E1} = \frac{\sqrt{2(\sigma_A^2 + \sigma_\beta^2)\cos^2(h) + \left(\sigma_h^2 \sin^2(h) + \sigma_\delta^2 \frac{\cos^2(h) \cdot (\sin^2 \delta_{180} + \sin^2 \delta_0)^2}{(\cos \delta_{180} - \cos \delta_0)^2}\right) (\Delta A^{\text{изм.}} - \Delta A^{\text{опор.}})^2}}{(\cos \delta_{180} - \cos \delta_0) \cdot \omega} \quad \text{при } \varphi > h, \\ \sigma_{E1} = \frac{\sqrt{2(\sigma_A^2 + \sigma_\beta^2)\cos^2(h) + \left(\sigma_h^2 \sin^2(h) + \sigma_\delta^2 \frac{\cos^2(h) \cdot (\sin^2 \delta_{180} + \sin^2 \delta_0)^2}{(\cos \delta_{180} + \cos \delta_0)^2}\right) (\Delta A^{\text{изм.}} - \Delta A^{\text{опор.}})^2}}{(\cos \delta_{180} + \cos \delta_0) \cdot \omega} \quad \text{при } \varphi < h. \end{array} \right. \quad (7)$$

где $\sigma_A, \sigma_h, \sigma_\beta, \sigma_\delta$ — СКО погрешностей определения параметров A, h, β, δ соответственно.

Дифференцируя (6) с учетом (5), получаем выражение для вычисления СКО погрешности определения параметра E_2 :

$$\sigma_{E2} = \omega^{-1} \sec \varphi \times \sqrt{(\sigma_\lambda^2 + \sigma_L^2) \cos^2(\varphi) + \sigma_{\eta^{\text{опор.}}}^2 + \sigma_\varphi^2 (\eta^{\text{опор.}})^2 \text{tg}^2(\varphi)}, \quad (8)$$

где $\sigma_\varphi, \sigma_\lambda, \sigma_L, \sigma_{\eta^{\text{опор.}}}$ — СКО погрешностей определения параметров φ, λ, L и $\eta^{\text{опор.}}$ соответственно.

Для обнаружения (с вероятностью $P = 0.95$) и компенсации погрешностей ААУ, обусловленных сбоями синхронизации данных, необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

$$\sigma_{E1} < 0.25 \text{ с}, \quad \sigma_{E2} < 0.25 \text{ с}.$$

где L — геодезическая долгота в заданной системе координат (например, WGS-84).

Для обнаружения погрешности определения астрономической долготы вычисляется параметр E_2 ($E_2 \approx \Delta T_\lambda = \Delta T_A$):

$$E_2 = (\eta - \eta^{\text{опор.}})\omega^{-1} \sec \varphi, \quad (6)$$

при этом, если $\text{round}(E_2) = \pm 1 \text{ с}$, астрономическая долгота места определена с погрешностью, обусловленной сбоями синхронизации данных.

Для компенсации указанной погрешности в значение астрономической долготы необходимо ввести соответствующую поправку, при этом итоговое значение $\lambda^{\text{итог}}$ рассчитывается в соответствии с выражением

$$\lambda^{\text{итог}} = \lambda + \text{round}(E_2) \cdot \omega.$$

Условия обнаружения погрешностей синхронизации данных

Определим условия, необходимые для обнаружения (с вероятностью $P = 0.95$) и компенсации погрешностей ААУ, обусловленных сбоями синхронизации данных.

В результате дифференцирования (4) получаем выражение для вычисления СКО погрешности определения параметра E_1 :

На рис. 4 показаны зависимости σ_{E1} и σ_{E2} от широты места φ при $\sigma_A = \sigma_h = \sigma_\beta = 0.5''$, $\sigma_\varphi = \sigma_\delta = 0.3''$, $\sigma_\lambda = 0.3'' \cdot \sec \varphi$, $\sigma_L = 0.06'' \cdot \sec \varphi$ и $\sigma_{\eta^{\text{опор.}}} = 1''$ (Косарев, 2017).

Как видно из графика, значение σ_{E1} превышает допустимый порог 0.25 с вблизи северного полюса ($\varphi > 81^\circ$), что обусловлено тем, что разность $\cos(\delta_{180}) - \cos(\delta_0)$, находящаяся в знаменателе (7), при приближении к полюсу стремится к 0.

СКО σ_{E2} увеличивается вместе с широтой φ и превышает допустимый порог 0.25 с при $\varphi > 75^\circ$.

Следует отметить, что все параметры, входящие в (7, 8), за исключением $\sigma_{\eta^{\text{опор.}}}$, могут быть оценены в процессе работы ААУ по полученным данным астрономических наблюдений.

Заключение

Предложен и описан алгоритм обнаружения и компенсации погрешностей автоматизированного астрономического универсала, обусловленных сбоями синхронизации данных со шкалой всемирного времени UTC. Обнаружение и компенсацию погрешности определения азимута предложено осуществлять по разности результатов астрономических наблюдений, полученных в двух диаметрально противоположных направлениях визирной оси (к северу и к югу от зенита), а долготы — с использованием опорного значения составляющей уклонения отвесной линии в плоскости первого вертикала, снятого со специальных карт или рассчитанного гравиметрическим методом.

Предложенная алгоритмическая компенсация позволяет исключить систематические составляющие погрешностей определения астрономических долгот и азимутов, которые могут достигать значений 15" и 20" (соответственно), более чем в 20 раз превышающих допустимые погрешности прибора.

Сформулированы условия, необходимые для успешного обнаружения и компенсации погрешностей автоматизированного астрономического универсала, обусловленных сбоями синхронизации данных, с использованием предложенного алгоритма, а также определен диапазон широт, в котором эти условия могут быть выполнены.

Литература

- Блажко С. Н.* Курс практической астрономии. М.: Наука, 1979. С. 393–408.
- Брумберг В. А., Глебова Н. И., Лукашова М. В.* и др. Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику» // Труды ИПА РАН. 2004. Вып. 10. 488 с.
- Гайворонский С. В., Кузьмина Н. В., Цодокова В. В.* Исследование влияния синхронизации данных автоматизированного зенитного телескопа на точность определения астрономических координат // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 44. С. 33–38.
- Гайворонский С. В., Кузьмина Н. В., Цодокова В. В.* Автоматизированный зенитный телескоп для решения астрономо-геодезических задач // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции. Менделеево, 14–15 февраля, 2017. С. 197–205.
- Гайворонский С. В., Тарасов С. М., Русин Е. В., Цодокова В. В.* Определение астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // XVI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 2014. С. 269–276.
- Косарев Н. С., Канушин В. Ф., Кафтан В. И.* и др. О результатах сравнения определения уклонения отвесной линии на территории западной Сибири // Гирскопия и навигация. 2017. Т. 25, № 4 (99). С. 72–83.
- Пешехонов В. Г., Степанов О. А., Августов Л. И.* и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова; науч. ред. д.т.н. О. А. Степанов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
- Тарасов С. М.* Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира // Гирскопия и навигация. 2021. Т. 29, № 2 (113). С. 97–109.
- Abele M., Balodis J., Janpaule I., et al.* Digital zenith camera for vertical deflection determination // Geodesy and Cartography. 2012. no. 38. P. 123–129.
- Gaivoronskii S., Kuzmina N., Staroseltsev L., Tsodokova V.* Automated zenith telescope for obtaining the Earth's gravitational field parameters // Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, Saint Petersburg, 12–15 апреля, 2016 / Editor-in-Chief Academician of the Russian Academy of Sciences Vladimir G. Peshekhonov. 2016. P. 250–258.
- Halicoglu K., Deniz R., Ozener H.* Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey // Journal of Geodesy and Geoinformation. 2012. Vol. 1, Iss. 2. P. 115–120.
- Hirt C., Bürki B.* The digital zenith camera — a new high-precision and economic astrogeodetic observation system for real-time measurement of deflections of the vertical // Proceedings of the 3rd Meeting International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki. 2002. P. 161–166.
- Schödlbauer A.* Geodetic Astronomy. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2000 (in German).
- Šugar D., Brkić M., Špoljarić D.* Comparison of the reference mark azimuth determination methods // Annals of geophysics. 2012. Vol. 55, no. 6. Doi: 10.4401/ag-5405.
- Terzić P.* Geodetic astronomy II. Zagreb: University of Zagreb, 1988.
- Tian L., Guo J., Han Y., et al.* Digital zenith telescope prototype of China // Science China Press. 2014. P. 1978–1983.