

С. М. ТАРАСОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АСТРОУНИВЕРСАЛА В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА НАЗЕМНОГО ОРИЕНТИРА

Анализируется влияние случайных и систематических составляющих инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала на точность определения астрономического азимута наземного ориентира. Полученные результаты могут быть использованы при разработке математической модели погрешности, а также при формировании требований к взаимной ориентации приборных осей при проектировании астроуниверсала.

Ключевые слова: астрономический азимут, астрономический теодолит, инструментальная погрешность, моделирование.

Введение

При определении или контроле ориентации объектов в географической системе координат в большинстве случаев используются гироскопические средства определения астрономического азимута (гироскопы, гиротеодолиты) [1–5]. Для снижения в них систематических составляющих погрешности определения азимута необходимо периодически проводить их эталонирование [6, 7]. На сегодняшний день с этой целью успешно применяется астрономический стационарный комплекс определения азимута, который обеспечивает высокоточное и оперативное определение астрономического азимута базового направления по наблюдениям звезд [8–10], однако его возможности ограничены условиями эксплуатации – в специально оборудованном помещении на массивном развязанном фундаменте.

Эталонирование гироскопической техники в полевых условиях осуществляется с использованием базовых направлений, задаваемых наземными ориентирами (автоколлимационными отражателями или предметно-световыми визирными целями) [2]. Астрономический азимут базовых направлений определяется с помощью классических инструментов – астрономического теодолита ДКМ-3А производства компании «Wild» (Швейцария) и астрономического универсала АУ-01 (ЦНИИГАиК, Россия) [2, 3, 11]. Процесс определения азимута в указанных приборах не автоматизирован, требует длительных сеансов наблюдений, а также высокой квалификации исполнителей.

Для астрономо-геодезических работ используются также образцы высокоточных электронных тахеометров, модернизированных для наблюдения за звездами [12–14].

Кроме того, для определения астрономического азимута базового направления в полевых условиях используется метод спутниковой геодезии, который, однако, требует дополнительной высокоточной геодезической информации (значения составляющих отклонения отвесной линии). Точность определения азимута с помощью этого метода зависит от длины базиса между пунктами, в которых проводятся наблюдения [15–17].

Тарасов Сергей Михайлович. Аспирант, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Статья по докладу на 13-й Мультиконференции по проблемам управления, 2020 г.

На замену ДКМ-3А и АУ-01 разрабатывается автоматизированный астроуниверсал (ААУ), предназначенный для высокоточного и оперативного определения азимута в полевых условиях.

ААУ строится по схеме классического астрономического теодолита и состоит из трех основных частей (рис. 1):

- визирного устройства (ВУ), состоящего из объектива и ТВ-камеры;
- вертикального привода (ВП), обеспечивающего поворот визирной оси в вертикальной плоскости;
- азимутального привода (АП), обеспечивающего поворот визирной оси в горизонтальной плоскости.

Помимо этого, в состав ААУ входят устанавливаемый на вращающейся части АП двухосный датчик горизонта (ДГ) и система горизонтирования.

Определение азимута наземного ориентира с использованием ААУ заключается в определении азимута визирной оси $A_{\text{ВО}}$ по наблюдениям звезд вблизи плоскости меридиана с последующим ее поворотом на наземный ориентир, при этом по показаниям датчика угла АП рассчитывается горизонтальный угол поворота визирной оси γ . Таким образом, астрономический азимут наземного ориентира определяется по формуле

$$A_{\text{НО}} = A_{\text{ВО}} + \gamma. \quad (1)$$

Высокоточное определение астрономического азимута наземного ориентира может быть обеспечено только при условии строгого взаимного расположения осей вращения АП и ВП, осей чувствительности ДГ и визирной оси ВУ. При наличии погрешностей во взаимной ориентации указанных осей, обусловленных технологическими погрешностями изготовления и сборки ААУ, возникает погрешность определения горизонтального угла γ . В связи с этим необходимо проанализировать, какое влияние оказывают на точность определения азимута инструментальные погрешности ААУ, вызванные технологическими погрешностями изготовления и сборки.

Алгоритм определения азимута наземного ориентира

Алгоритм определения астрономического азимута наземного ориентира условно можно разделить на три основные операции:

- а) определение астрономического азимута визирной оси в момент наблюдения звезд вблизи меридиана на фиксированной высоте h_0 ;
- б) определение горизонтального угла γ при переходе от наблюдения за звездами к наблюдению за наземным ориентиром;
- в) перекладка визирной оси, заключающаяся в ее последовательных поворотах сначала вокруг оси вращения АП, а затем вокруг оси вращения ВП так, чтобы визирная ось была направлена в ту же область пространства, что и до поворотов.

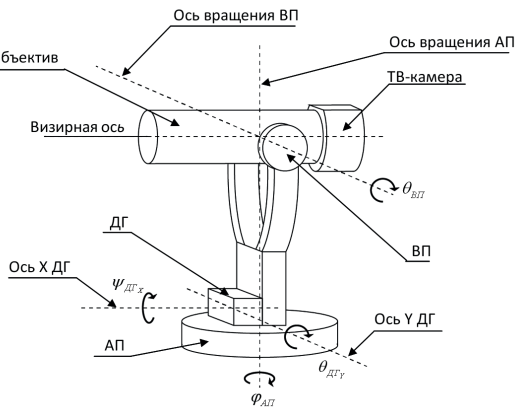


Рис. 1. Конструкция ААУ и его основные оси

Перекладка визирной оси производится с целью уменьшения систематических составляющих погрешности, вызванных смещениями нулей ДГ, а также технологическими погрешностями изготовления и сборки ААУ.

Операции а) и б) производятся до и после перекладки визирной оси, в результате чего определяются ее азимуты $A_{\text{ВО}}^I$ и $A_{\text{ВО}}^{II}$, а также горизонтальные углы γ^I и γ^{II} . Здесь индекс «I» соответствует положению визирной оси до перекладки, а «II» – после перекладки.

Горизонтальный угол γ вычисляется по изменению показаний датчика угла АП $\Delta\varphi_{\text{АП}}$ при переходе от наблюдения за звездами к наблюдению за наземным ориентиром.

Итоговое значение астрономического азимута наземного ориентира с учетом перекладки определяется как

$$A_{\text{НО}} = \frac{A_{\text{НО}}^I + A_{\text{НО}}^{II}}{2}, \quad (2)$$

где $A_{\text{НО}}^I, A_{\text{НО}}^{II}$ – значения азимута наземного ориентира до и после перекладки визирной оси, рассчитанные по формуле (1).

При определении астрономического азимута визирной оси выполняются следующие основные действия:

- 1) регистрируются изображения звезд в плоскости ФПУ, в результате чего формируются массивы координат энергетических центров изображений звезд $\{x_1, y_1 \dots x_{N_{\text{ФПУ}}}, y_{N_{\text{ФПУ}}}\}$, где $N_{\text{ФПУ}}$ – количество изображений звезд, обнаруженных в плоскости ФПУ;
- 2) рассчитываются начальные экваториальные координаты α_0, δ_0 , соответствующие экваториальным координатам центра выделенной области астрономического каталога, при наблюдении за звездами к северу от зенита по формулам [11]

$$\alpha_0 = \theta_{\text{GST}} + \lambda_Z + 180^\circ; \delta_0 = 90^\circ - \varphi_Z + h_0, \quad (3)$$

а при наблюдении за звездами к югу от зенита по формулам

$$\alpha_0 = \theta_{\text{GST}} + \lambda_Z; \delta_0 = h_0 + \varphi_Z - 90^\circ, \quad (4)$$

где φ_Z, λ_Z – астрономические координаты места (исходные данные), которые предварительно определены ААУ по наблюдению за звездами в околоразенитной области аналогично тому, как это происходит при использовании автоматизированного зенитного телескопа [18, 19],

θ_{GST} – гринвичское истинное звездное время [20, 21];

- 3) обнаруженные звезды идентифицируются по координатам энергетических центров их изображений в плоскости ФПУ и данным звездного каталога, в результате чего формируется массив «звездных пар», в котором координаты изображений звезд в плоскости ФПУ $\{x_1, y_1 \dots x_{N_{\text{ЗП}}}, y_{N_{\text{ЗП}}}\}$ сопоставлены с их экваториальными координатами из звездного каталога $\{\alpha_1, \delta_1 \dots \alpha_{N_{\text{ЗП}}}, \delta_{N_{\text{ЗП}}}\}$ и рассчитанными стандартными координатами $\{\xi_1, \eta_1 \dots \xi_{N_{\text{ЗП}}}, \eta_{N_{\text{ЗП}}}\}$, где $N_{\text{ЗП}}$ – количество идентифицированных звезд [22]. Следует отметить, что значения экваториальных координат звезд из звездного каталога рассчитаны с учетом влияния различных факторов, таких как собственное движение звезд, астрономическая рефракция, параллакс, абберация, изменение положения оси мира в пространстве (прецессия и нутация) [20];

- 4) по данным из массива «звездных пар» определяются параметры преобразования координат в плоскости ФПУ в стандартные координаты (далее – параметры преобразования) [23, 24];
- 5) производится коррекция координат энергетических центров изображений звезд с учетом их склонений $\{\delta_1 \dots \delta_{N_{\text{зп}}}\}$ за смещение во время экспозиции, вызванное суточным вращением Земли, и заново определяются параметры преобразования;
- 6) с использованием параметров преобразования определяются стандартные координаты точки на небесной сфере, соответствующей центру ФПУ, и далее ее экваториальные координаты $\alpha_{\text{ВО}}, \delta_{\text{ВО}}$ [18];
- 7) определяются видимый азимут $A_{\text{ВО}}$ и высота визирной оси $h_{\text{ВО}}$ с использованием следующих соотношений [21]:

$$A_{\text{ВО}} = \arctg\left(\frac{\sin(s - \alpha_{\text{ВО}})}{\sin(\varphi_Z) \cos(s - \alpha_{\text{ВО}}) - \cos(\varphi_Z) \text{tg}(\delta_{\text{ВО}})}\right);$$

$$h_{\text{ВО}} = \arccos\left(\frac{\cos(\delta_{\text{ВО}}) \sin(s - \alpha_{\text{ВО}})}{\sin(A_{\text{ВО}})}\right),$$
(5)

где $s = \theta_{GST} + 1,00274T - 0,00274\lambda_Z$ – местное звездное время, соответствующее моменту регистрации изображений звезд [25]; T – местное время, ч.

- 8) рассчитываются поправки в астрономический азимут за наклон относительно плоскости горизонта ΔA_n в поперечном направлении (вокруг визирной оси) и за смещения x_p, y_p мгновенного полюса относительно среднего $\Delta A_{\text{СП}}$. Поправка ΔA_n за наклон относительно плоскости горизонта рассчитывается по формуле

$$\Delta A_n = -\psi_{\text{ДГ}_y} \cdot \text{tg}(h_{\text{ВО}}),$$
(6)

поправка $\Delta A_{\text{СП}}$ за смещения мгновенного полюса относительно среднего – по формуле [1]

$$\Delta A_{\text{СП}} = -(x_p \sin \lambda_Z + y_p \cos \lambda_Z) \sec \varphi_Z;$$
(7)

- 9) рассчитывается итоговое значение азимута визирной оси при наблюдении звезд по формуле

$$A_{\text{ВО}}^{\text{К}} = A_{\text{ВО}} + \Delta A_n + \Delta A_{\text{СП}}.$$
(8)

Составляющие инструментальной погрешности ААУ

На рис. 2 показана взаимная ориентация приборных осей ААУ и их положение в горизонтальной системе координат *ONWZ*. В «идеальном» случае (рис. 2, *a*), при отсутствии технологических погрешностей изготовления, оси чувствительности ДГ (векторы *OX* и *OY*) лежат в плоскости горизонта *NOW*. Вектор *OA* соответствует оси вращения АП, а вектор *O'V* – оси вращения ВП. Вектор *O'S* соответствует положению визирной оси *BV* при наблюдении наземного ориентира в горизонтальной плоскости, при этом вектор *O'S* сонаправлен с вектором *OX*, а вектор *O'V* – с вектором *OY*. Вектор *O'S'* соответствует положению визирной оси при наблюдении за звездами на высоте $h_{\text{ВО}}$, при этом пространственная ориентация визирной оси

в горизонтальной системе координат $ONWZ$ (астрономический азимут визирной оси A_{BO} , высота визирной оси h_{BO}) определяется по астрономическим наблюдениям.

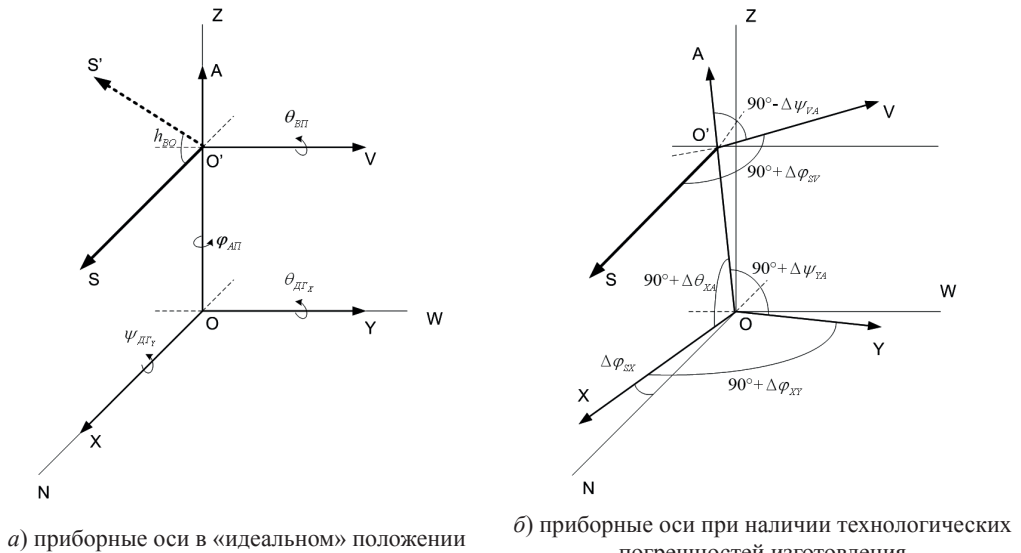


Рис. 2. Приборные оси ААУ в горизонтальной системе координат

Датчики угла АП и ВП показывают поворот визирной оси $O'S$ относительно их нулевых положений ($\varphi_{АП}$ и $\theta_{ВП}$ соответственно). Наклон ААУ относительно плоскости горизонта контролируется ДГ в продольном и поперечном направлениях ($\theta_{ДГ_x}$ и $\psi_{ДГ_y}$ соответственно).

На рис. 2, б показано расположение приборных осей ААУ при наличии инструментальных погрешностей, обусловленных технологическими погрешностями изготовления и сборки, где $\Delta\varphi_{SX}$ – горизонтальный угол между проекцией визирной оси в горизонтальной плоскости и осью X ДГ; $\Delta\varphi_{XY}$ – горизонтальный угол, характеризующий неперпендикулярность осей ДГ; $\Delta\theta_{XA}$ – вертикальный угол, характеризующий неперпендикулярность оси X ДГ и оси вращения АП; $\Delta\psi_{YA}$ – вертикальный угол, характеризующий неперпендикулярность оси Y ДГ и оси вращения АП; $\Delta\varphi_{SY}$ – горизонтальный угол, характеризующий неперпендикулярность визирной оси и оси вращения ВП; $\Delta\psi_{VA}$ – вертикальный угол, характеризующий неперпендикулярность осей вращения АП и ВП.

Кроме указанных выше технологических погрешностей изготовления и сборки погрешность определения азимута наземного ориентира также содержит другие ее составляющие, которые могут быть выражены средними квадратическими отклонениями (СКО) показаний ДГ $\sigma_{ДГ_x}, \sigma_{ДГ_y}$, СКО показаний датчика угла ВП $\sigma_{ВП}$ и СКО показаний датчика угла АП $\sigma_{АП}$.

Необходимо исследовать влияние каждой из описанных выше составляющих погрешности на точность определения астрономического азимута наземного ориентира.

Повороты визирной оси в горизонтальной системе координат

С целью исследования влияния составляющих инструментальной погрешности на точность определения астрономического азимута наземного ориентира необхо-

димом математически описать движение визирной оси в горизонтальной системе координат $ONWZ$ при поворотах вокруг осей вращения АП и ВП.

Поворот в горизонтальной системе координат $ONWZ$ вокруг оси вращения АП на угол $\varphi_{АП}$ описывается следующей матрицей [26]:

$$C_{\mu A}(\varphi_{АП}) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{АП}) + B_A x_A^2 & B_A x_A y_A - \sin(\varphi_{АП}) z_A & B_A x_A z_A + \sin(\varphi_{АП}) y_A \\ B_A y_A x_A + \sin(\varphi_{АП}) z_A & \cos(\varphi_{АП}) + B_A y_A^2 & B_A y_A z_A - \sin(\varphi_{АП}) x_A \\ B_A z_A x_A - \sin(\varphi_{АП}) y_A & B_A z_A y_A + \sin(\varphi_{АП}) x_A & \cos(\varphi_{АП}) + B_A z_A^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $B_A = 1 - \cos(\varphi_{АП})$; x_A, y_A, z_A – декартовы координаты вектора OA (оси вращения АП) в системе координат $ONWZ$.

Координаты x_A, y_A, z_A рассчитываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = C_{\Delta\theta_{xA}}^* \cdot C_{\theta_{дг_x}}^* \cdot C_{\Delta\psi_{yA}}^* \cdot C_{\psi_{дг_y}}^* \cdot \begin{bmatrix} x_{A0} \\ y_{A0} \\ z_{A0} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $x_{A0} = 0, y_{A0} = 0, z_{A0} = 1$ – координаты вектора OA в «идеальном» положении; $C_{\theta_{дг_x}}^*, C_{\psi_{дг_y}}^*$ – матрицы поворота на углы наклона всей конструкции ААУ относительно плоскости горизонта $\theta_{дг_x}, \psi_{дг_y}$:

$$C_{\theta_{дг_x}}^* = C_{\theta_{дг_x}} \cdot C_{\Delta\varphi_{SX}}, \quad C_{\psi_{дг_y}}^* = C_{\psi_{дг_y}} \cdot C_{\Delta\varphi_{XY}}, \quad (11)$$

где

$$C_{\Delta\varphi_{SX}} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\varphi_{SX}) & -\sin(\Delta\varphi_{SX}) & 0 \\ \sin(\Delta\varphi_{SX}) & \cos(\Delta\varphi_{SX}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_{\Delta\varphi_{XY}} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\varphi_{XY}) & -\sin(\Delta\varphi_{XY}) & 0 \\ \sin(\Delta\varphi_{XY}) & \cos(\Delta\varphi_{XY}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$C_{\theta_{дг_x}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{дг_x}) & 0 & -\sin(\theta_{дг_x}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_{дг_x}) & 0 & \cos(\theta_{дг_x}) \end{bmatrix}, \quad C_{\psi_{дг_y}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_{дг_y}) & -\sin(\psi_{дг_y}) \\ 0 & \sin(\psi_{дг_y}) & \cos(\psi_{дг_y}) \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$C_{\Delta\theta_{xA}}^*, C_{\Delta\psi_{yA}}^*$ – матрицы поворота на углы отклонения приборных осей ААУ от их идеальных значений, соответствующие технологическим погрешностям $\Delta\theta_{xA}, \Delta\psi_{yA}$:

$$C_{\Delta\theta_{xA}}^* = C_{\Delta\theta_{xA}} \cdot C_{\Delta\varphi_{SX}}, \quad C_{\Delta\psi_{yA}}^* = C_{\Delta\psi_{yA}} \cdot C_{\Delta\varphi_{XY}}, \quad (14)$$

где

$$C_{\Delta\theta_{xA}} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_{xA}) & 0 & -\sin(\Delta\theta_{xA}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_{xA}) & 0 & \cos(\Delta\theta_{xA}) \end{bmatrix}, \quad C_{\Delta\psi_{yA}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta\psi_{yA}) & -\sin(\Delta\psi_{yA}) \\ 0 & \sin(\Delta\psi_{yA}) & \cos(\Delta\psi_{yA}) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Аналогичной матрицей $C_{\mu V}(\theta_{ВП})$ описывается поворот вокруг оси вращения ВП на угол $\theta_{ВП}$ для вектора OV , который в идеальном положении имеет координаты $x_{V0} = 0$,

$y_{V0} = 1, z_{V0} = 0$. Кроме указанных выше углов $\theta_{ДГ_x}, \psi_{ДГ_y}, \Delta\theta_{\chi_A}, \Delta\psi_{\chi_A}$, ориентация оси вращения ВП также зависит от поворота вокруг оси вращения АП, описываемого матрицей $C_{\mu_A}(\varphi_{АП})$, а также углов $\Delta\varphi_{SV}, \Delta\psi_{VA}$, которые выражаются следующими матрицами:

$$C_{\Delta\varphi_{SV}} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\varphi_{SV}) & -\sin(\Delta\varphi_{SV}) & 0 \\ \sin(\Delta\varphi_{SV}) & \cos(\Delta\varphi_{SV}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_{\Delta\psi_{VA}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta\psi_{VA}) & -\sin(\Delta\psi_{VA}) \\ 0 & \sin(\Delta\psi_{VA}) & \cos(\Delta\psi_{VA}) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Тогда координаты x_V, y_V, z_V рассчитываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x_V \\ y_V \\ z_V \end{bmatrix} = C_{\mu_A}(\varphi_{АП}) \cdot C_{\Delta\varphi_{SV}} \cdot C_{\Delta\psi_{VA}} \cdot C_{\Delta\theta_{\chi_A}}^* \cdot C_{\theta_{ДГ_x}}^* \cdot C_{\Delta\psi_{VA}}^* \cdot C_{\psi_{ДГ_y}}^* \cdot \begin{bmatrix} x_{V0} \\ y_{V0} \\ z_{V0} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Таким образом, поворот визирной оси вокруг оси вращения АП описывается выражением

$$\begin{bmatrix} x_{BO}^{\Pi} \\ y_{BO}^{\Pi} \\ z_{BO}^{\Pi} \end{bmatrix} = C_{\mu_A}(\varphi_{АП}) \cdot \begin{bmatrix} x_{BO} \\ y_{BO} \\ z_{BO} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

а поворот визирной оси вокруг оси вращения ВП – выражением

$$\begin{bmatrix} x_{BO}^{\Pi} \\ y_{BO}^{\Pi} \\ z_{BO}^{\Pi} \end{bmatrix} = C_{\mu_V}(\theta_{ВП}) \cdot \begin{bmatrix} x_{BO} \\ y_{BO} \\ z_{BO} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где x_{BO}, y_{BO}, z_{BO} – декартовы координаты визирной оси в горизонтальной системе координат в исходном положении (до поворота); $x_{BO}^{\Pi}, y_{BO}^{\Pi}, z_{BO}^{\Pi}$ – декартовы координаты визирной оси в горизонтальной системе координат после поворота.

Описание моделирования

Систематические составляющие инструментальной погрешности $\Delta\varphi_{SV}, \Delta\psi_{VA}, \Delta\theta_{\chi_A}, \Delta\psi_{VA}, \Delta\varphi_{SV}, \Delta\psi_{VA}$ задавались в диапазоне углов от $60''$ до $360''$. Случайные составляющие погрешности имитировались в виде процессов с нормальным законом распределения, нулевыми средними значениями и СКО $\sigma_{ДГ_x} = 0,2'', \sigma_{ДГ_y} = 0,2'', \sigma_{ВП} = 60''$ и $\sigma_{АП} = 0,2''$. Астрономические наблюдения имитировались для высоты визирования звезд $h_0 = 40^\circ$, которая является оптимальной. На большей высоте увеличивается погрешность определения астрономического азимута визирной оси, а на меньшей – усиливается влияние боковой рефракции [11].

Моделирование проводилось по следующему алгоритму:

- 1) в горизонтальной системе координат формировались векторы, соответствующие приборным осям в идеальном состоянии (без инструментальных погрешностей), так, как показано на рис. 2, а.

- 2) задавались инструментальные погрешности $\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\theta_{XA}$, $\Delta\psi_{YA}$, $\Delta\varphi_{SY}$, $\Delta\psi_{VA}$ и формировались векторы, соответствующие осям вращения АП и ВП, с использованием выражений (9)–(17), при этом углы наклона относительно плоскости горизонта $\theta_{ДГ_x}$, $\psi_{ДГ_y}$ задавались в виде случайных процессов с нулевыми средними значениями и СКО $\sigma_{ДГ_x}$, $\sigma_{ДГ_y}$;
- 3) с использованием выражения (19) визирная ось прибора $O'S$ переводилась в положение для наблюдения звезд вблизи меридиана, для этого осуществлялся поворот вектора $O'S$ вокруг оси вращения ВП на угол $\theta_{ВП} = h_0 + \Delta\theta$, где $\Delta\theta$ – погрешность определения угла поворота ВП, моделируемая в виде случайного процесса с нулевым средним и СКО $\sigma_{ВП}$. После поворота визирной оси вокруг оси ВП рассчитывались азимут и высота визирной оси по формулам

$$A_{BO} = \arcsin\left(\frac{y_{BO}^{\Pi}}{\sqrt{(x_{BO}^{\Pi})^2 + (y_{BO}^{\Pi})^2}}\right); h_{BO} = \arcsin\left(\frac{z_{BO}^{\Pi}}{\sqrt{(x_{BO}^{\Pi})^2 + (y_{BO}^{\Pi})^2 + (z_{BO}^{\Pi})^2}}\right); \quad (20)$$

- 4) записывались показания датчика угла АП $\varphi_{АП}$ и азимут визирной оси при наблюдении за звездами A_{BO}^I , при этом имитировалась погрешность датчика угла АП, моделируемая в виде случайного процесса с нулевым средним и СКО $\sigma_{АП}$;
- 5) задавались истинные горизонтальные координаты (азимут $A_{HO} \in [0; 90]^\circ$ и высота $h_{HO} = 0^\circ$) наземного ориентира и имитировалось наведение на наземный ориентир, т.е. осуществлялись повороты вокруг осей АП и ВП так, чтобы азимут и высота визирной оси, рассчитываемые по формулам (20), соответствовали A_{HO} и h_{HO} . Повороты вокруг осей АП и ВП осуществлялись с использованием выражений (18) и (19);
- 6) после наведения на наземный ориентир рассчитывались показания датчика угла АП, по разности которых при переходе от наблюдения за звездами к наблюдению за наземным ориентиром определялся горизонтальный угол поворота γ^I . В момент наблюдения за наземным ориентиром имитировалась погрешность датчика угла АП $\sigma_{АП}$;
- 7) с использованием выражения (1) рассчитывался азимут наземного ориентира A_{HO}^I ;
- 8) имитировалась полная перекладка визирной оси, для этого приборные оси ААУ последовательно поворачивались сначала вокруг оси вращения АП с использованием матрицы поворота $C_{\mu A}(180^\circ)$, а затем вокруг оси вращения ВП с использованием матрицы $C_{\mu V}(180^\circ)$;
- 9) визирная ось вновь поворачивалась в плоскость меридиана, повторялись действия, описанные в пунктах 3–7, и определялись азимут визирной оси при наблюдении за звездами A_{BO}^{II} , горизонтальный угол γ^{II} и азимут наземного ориентира A_{HO}^{II} после перекладки;
- 10) с использованием выражения (2) рассчитывался азимут наземного ориентира $A_{HO}^{расч.}$, далее оценивалась погрешность определения азимута по формуле

$$\Delta A_{HO} = A_{HO} - A_{HO}^{расч.} \quad (21)$$

В результате выполнения моделирования формировался массив погрешностей ΔA_{HO} из $N_K = 1000$ элементов и оценивались его среднее значение $\Delta A_{HO}^{сист}$, которое

соответствует систематической составляющей погрешности определения азимута наземного ориентира, и СКО $\sigma_{A_{НО}}$, характеризующее случайную составляющую погрешности.

Результаты моделирования

Моделирование выполнено в программной среде Matlab.

В табл. 1 представлены результаты моделирования суммарного влияния технологических погрешностей изготовления и сборки $\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\theta_{XA}$, $\Delta\psi_{YA}$, $\Delta\varphi_{SY}$, $\Delta\psi_{YA}$ на систематическую составляющую погрешности определения азимута наземного ориентира, при этом максимальные значения погрешности $\Delta A_{НО}^{сист}$ были получены для случая, когда наземный ориентир был удален от плоскости меридиана на угол $A_{НО} = 90^\circ$. Случайные составляющие инструментальной погрешности при этом не задавались.

Т а б л и ц а 1

Систематические составляющие инструментальной погрешности и их влияние

$\Delta\varphi_{SX}$, ..."	$\Delta\varphi_{XY}$, ..."	$\Delta\theta_{XA}$, ..."	$\Delta\psi_{YA}$, ..."	$\Delta\varphi_{SY}$, ..."	$\Delta\psi_{YA}$, ..."	$\Delta A_{НО}^{сист}$, ..."
60	60	60	60	60	60	0,02
120	120	120	120	120	120	0,07
180	180	180	180	180	180	0,16
240	240	240	240	240	240	0,28
300	300	300	300	300	300	0,44
360	360	360 </td <td>360</td> <td>360</td> <td>360</td> <td>0,64</td>	360	360	360	0,64

На рис. 3 показана зависимость погрешности определения азимута наземного ориентира от его удаленности от плоскости меридиана.

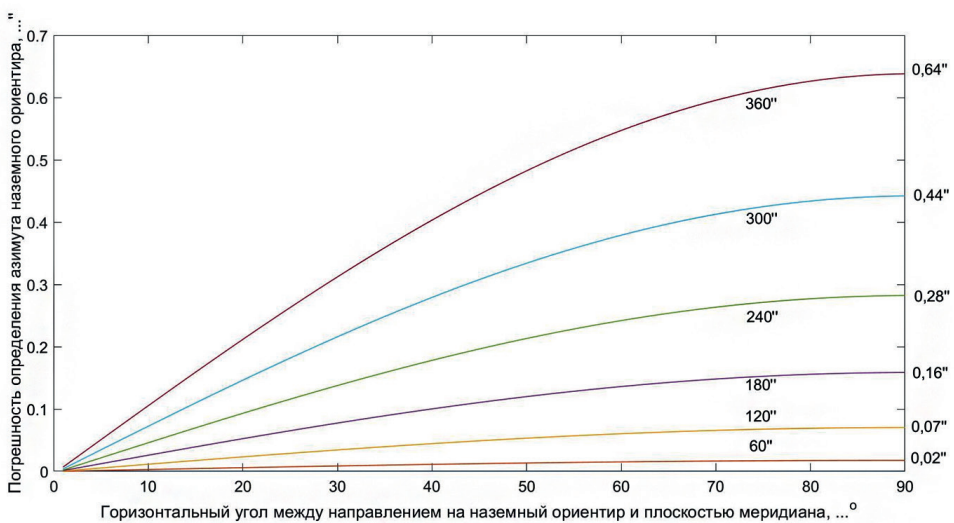


Рис. 3. Зависимость погрешности определения азимута наземного ориентира от его удаленности от плоскости меридиана

На рис. 4 представлены результаты оценки влияния отдельных составляющих инструментальной погрешности и их комбинаций на точность определения азимута наземного ориентира в процентном соотношении от итогового значения $\Delta A_{\text{но}}^{\text{сист}}$ в зависимости от удаленности наземного ориентира от плоскости меридиана.

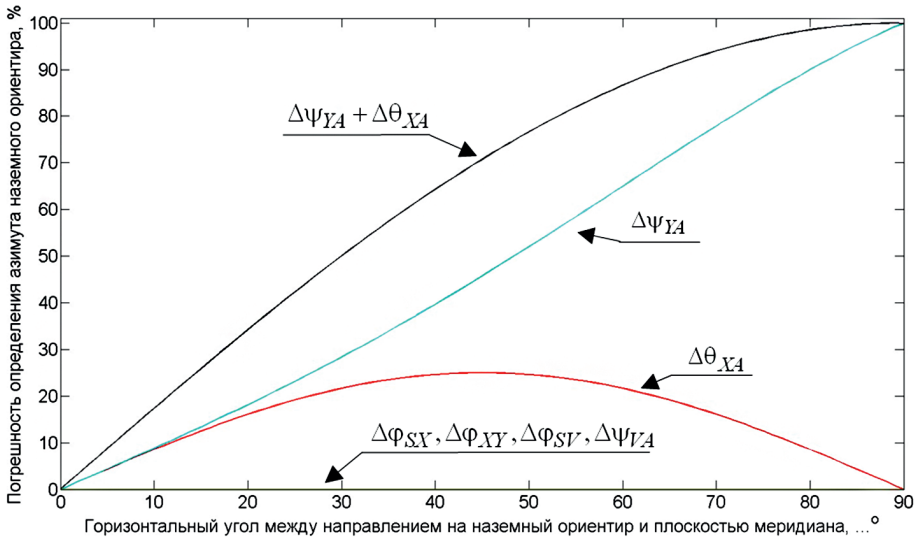


Рис. 4. Влияние отдельных составляющих инструментальной погрешности и их комбинаций (в % от итоговой погрешности)

В табл. 2 представлены результаты моделирования влияния случайных составляющих инструментальной погрешности $\sigma_{\text{ДГ}_x}$, $\sigma_{\text{ДГ}_y}$, $\sigma_{\text{ВП}}$ и $\sigma_{\text{АП}}$.

Т а б л и ц а 2

Случайные составляющие инструментальной погрешности и их влияние

$\sigma_{\text{ДГ}_x}, \dots$	$\sigma_{\text{ДГ}_y}, \dots$	$\sigma_{\text{АП}}, \dots$	$\sigma_{\text{ВП}}, \dots$	$\sigma_{A_{\text{но}}}, \dots$
0	0	0	60	0
0,2	0	0	0	0
0	0,2	0	0	0,12
0,2	0,2	0	60	0,12
0	0	0,2	0	0,20
0,2	0,2	0,2	60	0,23

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- 1) систематическая составляющая погрешности $\Delta A_{\text{но}}^{\text{сист}}$ зависит от удаленности наземного ориентира от плоскости меридиана и достигает предельных значений при удалении от плоскости меридиана на угол 90° (рис. 3), при этом астрономические наблюдения производятся как к северу от зенита, так и к югу, когда азимут $A_{\text{во}} = 180^\circ$;
- 2) основной вклад в систематическую составляющую погрешности $\Delta A_{\text{но}}^{\text{сист}}$ вносят составляющие инструментальной погрешности $\Delta\theta_{\text{XA}}$, $\Delta\psi_{\text{YA}}$, характеризующие

- неперпендикулярность осей ДГ и оси вращения АП. Влияние составляющих инструментальной погрешности $\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\varphi_{SY}$, $\Delta\psi_{IA}$ пренебрежимо мало (рис. 4);
- 3) погрешность ДГ по оси X не оказывает существенного влияния на погрешность определения азимута наземного ориентира $\sigma_{A_{\text{но}}}$, а влияние погрешности ДГ по оси Y может быть выражено как $\sigma_{\text{ДГ}_Y} \cdot \text{tg}(h_{\text{ВО}}) \cdot \sqrt{2}/2$;
 - 4) погрешность датчика угла ВП $\sigma_{\text{ВП}}$ не влияет на точность определения азимута наземного ориентира $\sigma_{A_{\text{но}}}$, а погрешность датчика угла АП $\sigma_{\text{АП}}$ целиком входит в погрешность $\sigma_{A_{\text{но}}}$;
 - 5) итоговое значение случайной составляющей погрешности $\sigma_{A_{\text{но}}}$, обусловленное влиянием погрешностей датчика угла АП и ДГ, может быть выражено как

$$\sigma_{A_{\text{но}}} = \sqrt{\sigma_{\text{АП}}^2 + \frac{\sigma_{\text{ДГ}_Y}^2 \cdot \text{tg}(h_{\text{ВО}})^2}{2}}. \quad (22)$$

Заключение

В работе приведены результаты моделирования влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала на точность определения азимута наземного ориентира. Результаты показали, что основной вклад в формирование случайной составляющей погрешности определения азимута наземного ориентира вносят погрешности датчика горизонта и датчика угла азимутального привода, а в формирование систематической составляющей погрешности определения азимута наземного ориентира – вертикальные углы, характеризующие неперпендикулярность осей датчика горизонта и оси вращения азимутального привода. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать при разработке математической модели погрешности астроуниверсала, а также для формирования требований к взаимной ориентации приборных осей комплекса при его проектировании.

Благодарность

Автор благодарен Н.В. Кузьминой и В.В. Цодоковой за полезные замечания при написании и обсуждении статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Руководство** по астрономическим определениям. М.: Недра, 1984. 381 с.
2. **Руководство** по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. Часть 3. Гирскопическое ориентирование. М.: РИО ВТС, 1982. 224 с.
3. **Глазунов А.С.** Современные тенденции в геодезической астрономии // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск: СГГА, 2008. С. 183–188.
4. **Bezdiček, V., Dandoš, R., Konečný, M., Kotrbánek, J., Král, T., Wlochová, A.**, Orientation measurement with gyrotheodolite, *Geodesy and cartography*, 2018, vol. 44, p. 100–105.
5. **Bezdiček, V., Dandoš, R., Wlochová, A.**, Accuracy of determination of azimuth with a gyrotheodolite by the follow-up measurement, *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13.
6. **Чернов И.В.** Методика определения приборной поправки гиротеодолита с заданной точностью // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. Вып. 671. С. 192–200.
7. **Чернов И.В.** Исследование достигаемых точностей ориентирования гиротеодолитными комплектами // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. №6. С. 12–16.

8. **Гайворонский С.В., Беркович С.Б., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Садеков Р.Н., Цодокова В.В.** Автоматическая система определения астрономического азимута // *Метрология*. 2015. №1. С. 11–20.
9. **Гайворонский С.В., Кузьмина Н.В., Цодокова В.В.** Результаты разработки высокоточной оптико-электронной системы определения астрономического азимута // *Материалы докладов XXVIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова*. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012.
10. **Gayvoronskii, S.V., Berkovich, S.B., Kotov, N.I., Makhaev, A.Yu., Sadekov, R.N., Tsodokova, V.V.** An automatic system for determining astronomical azimuth, *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 280–285.
11. **Гиенко Е.Г.** Астрометрия и геодезическая астрономия: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2011. 168 с.
12. **Hauk, M., Hirt, C., Ackermann, C.**, Experiences with the QDaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical, *Survey Review*, 2016, vol. 49, pp. 294–301.
13. **Baladimos, D.D., Korakitis, R., Lambrou, E., Pantazis, G.**, Fast and accurate determination of astronomical coordinates Φ , Λ and azimuth using a total station and GPS receiver, *Survey Review*, 2003, vol. 37, pp. 269–275.
14. **E. Lambrou, G. Pantazis.** Astronomical azimuth determination by the hour angle of Polaris using ordinary total stations // *Survey Review*, 2008, vol. 40, p. 164–172.
15. **Чернов И.В.** Модель интегрированной спутниково-гироскопической системы оперативного определения астрономического азимута // *Геодезия и картография*. 2017. Т. 78, №7. С. 2–8.
16. **Шолохов А.В., Котов Н.И., Беркович С.Б., Махаев А.Ю.** Оценка достижимой точности определения азимута на коротком базисе с использованием спутниковых и геодезических средств // *Геодезия и картография*. 2018. Т. 79. №6. С. 2–8.
17. **Chang, C.C., Tsai, W.Y.**, Evaluation of a GPS-based approach for rapid and precise determination of geodetic/astronomical azimuth, *Journal of surveying engineering*, 2016.
18. **Цодокова В.В., Гайворонский С.В., Тарасов С.М., Русин Е.В.** Определение астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // XVI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 269–276.
19. **Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли** / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
20. **Брумберг В.А., Глебова Н.И., Лукашова М.В., Малков А.А., Питьева Е.В., Румянцева Л.И., Свешников М.Л., Фурсенко М.А.** Труды ИПА РАН. Вып. 10. Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику». СПб.: ИПА РАН, 2004. 488 с.
21. **Ковалевский Ж.** Современная астрометрия. Фрязино: «Век 2», 2004. 480 с.
22. **Гайворонский С.В., Русин Е.В., Цодокова В.В.** Сравнительный анализ алгоритмов идентификации звезд на изображении // XVI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 284–290.
23. **Цодокова В.В., Моторин А.В.** Расчет характеристики точности в задаче оценивания параметров преобразования координат звезд // *Известия Тульского государственного университета*. 2016. С. 129–141.
24. **Цодокова В.В., Моторин А.В.** Анализ точности определения параметров преобразования координат звезд // XVIII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 416–424.
25. **Блажко С.Н.** Курс практической астрономии. М.: Наука, 1979. С. 393–408.
26. **Матвеев В.В., Распопов В.Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / под общ. ред. д.т.н. В.Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.

Tarasov, S.M. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

A Study on the Effect Produced by Instrumental Error of Automated Astronomical System on Landmark Azimuth Accuracy, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 2 (113), pp. 97–109.

Abstract. The paper analyzes how random and systematic components of instrumental error of an automated astronomical system affect the accuracy of the landmark astronomical azimuth. The obtained results can be applied to construct the error mathematical model and to define the mutual orientation of the body axes when designing the system.

Key words: astronomical azimuth, astronomical theodolite, instrumental error, simulation.

Материал поступил 13.01.2021