

А. Н. Климов, С. А. Буйко, В. А. Ерошенко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В настоящее время использование спутниковой навигации нашло широкое применение в различных отраслях науки и техники. Выход ее из строя нарушит работу множества устройств и систем. Поэтому разработка автономной системы навигации и топопривязки, которая ликвидирует зависимость от спутниковой системы глобального позиционирования, является актуальной задачей. Альтернативой спутниковой системе навигации является астронавигационная система, основанная на астрономических методах определения координат и навигационных параметров объектов. Различные астронавигационные системы применяются в мореходстве и воздушной авиации. Они обладают высокой степенью автономности и могут быть использованы в качестве резервной системы навигации и топопривязки в отсутствие GPS/ГЛОНАСС.

Топопривязка по звездам. Способ Сомнера

Среди различных методов астрономической навигации способ Сомнера является наиболее универсальным для осуществления топопривязки, так как позволяет одновременно определять долготу и широту наблюдателя в результате измерения зенитных расстояний пар звезд с известными координатами [1, 2].

Рассмотрим наблюдателя, который находится на поверхности Земли в точке O и наблюдает звезду M_1 на зенитном расстоянии z_1 , как показано на рис. 1. Проведем через нее прямую из центра Земли T . Она пересечет поверхность Земли в точке B_1 . Эта точка является географическим местом звезды M_1 , поскольку если бы наблюдатель находился в ней, то видел бы звезду M_1 в зените. Для любого другого наблюдателя, находящегося на Земле на окружности с центром в точке B_1 и радиусом OB_1 ($\sphericalcap OB_1 = z_1$), зенитное расстояние звезды M_1 будет тем же самым, что и для наблюдателя в точке O . Таким образом, если наблюдателю известны координаты звезды и момент времени наблюдения, то он находится где-то на окружности OB_1 , откуда звезда M_1 видна на зенитном расстоянии z_1 . Произведя измерение зенитного расстояния z_2 другой звезды M_2 и проделав аналогичные построения, получим другую окружность с центром в точке B_2 радиусом OB_2 ($\sphericalcap OB_2 = z_2$). Точки

пересечения этих окружностей показывают возможное положение наблюдателя на поверхности Земли. Чтобы исключить ложную точку из рассмотрения, достаточно наблюдать третью звезду.

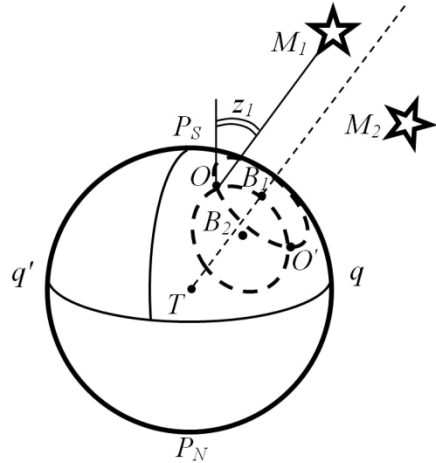


Рис. 1. Определение местоположения наблюдателя по двум кругам равных высот

Расчет долготы и широты местоположения наблюдателя в соответствии со способом Сомнера

На рис. 2 изображена вторая экваториальная система координат (СК), в которой отмечены две звезды: M_1 с координатами α_1, δ_1 и M_2 с координатами α_2, δ_2 . Координата α называется прямым восхождением, а координата δ – склонением звезды. Введем два вектора единичной длины V_{M_1} и V_{M_2} в направлении звезды M_1 и M_2 , соответственно. Пусть наблюдение звезды M_1 было совершено в момент GST_1 по гринвичскому звездному времени, а наблюдение звезды M_2 – в момент GST_2 . За время $\Delta t = GST_2 - GST_1$ Земля повернется на некоторый угол, следовательно, точка весеннего равноденствия Υ сместится. Таким образом, векторы V_{M_1} и V_{M_2} заданы в различных СК. Чтобы привязать их к одной СК с общим началом, необходимо выполнить обратный поворот, при этом значение α_2 уменьшится на величину Δt .

Свяжем с экваториальной системой координат декартову систему координат так, чтобы ось OX была направлена на точку весеннего равноденствия в мо-

мент времени GST_1 , а ось OZ – на северный полюс мира p . Тогда, в соответствии с рис. 2, декартовы координаты векторов V_{M_1} и V_{M_2} будут связаны с экваториальными координатами α и δ звезд M_1 и M_2 посредством (1)

$$\begin{aligned} V_X^{M_1} &= \cos \delta_1 \cos \alpha_1; & V_X^{M_2} &= \cos \delta_2 \cos (\alpha_2 - \Delta t); \\ V_Y^{M_1} &= \cos \delta_1 \sin \alpha_1; & V_Y^{M_2} &= \cos \delta_2 \sin (\alpha_2 - \Delta t); \\ V_Z^{M_1} &= \sin \delta_1; & V_Z^{M_2} &= \sin \delta_2. \end{aligned} \quad (1)$$

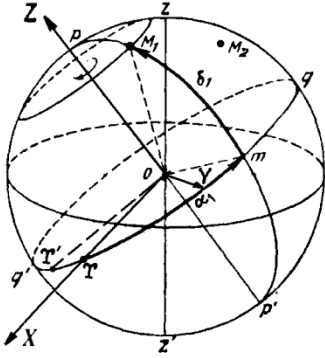


Рис. 2. Вторая экваториальная система координат

Пусть наблюдатель находится на поверхности Земли в некоторой точке O , как показано на рис. 3, и наблюдает звезды M_1 и M_2 на зенитных расстояниях z_1 и z_2 . Линией OO' отмечен круг равных высот для звезды M_1 . Линией SN отмечена плоскость местного горизонта. Обозначим через U_1 угол места звезды M_1 , а через U_2 – угол места звезды M_2 . Зенитное расстояние z связано с углом места звезды U соотношением (2)

$$z = U - \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

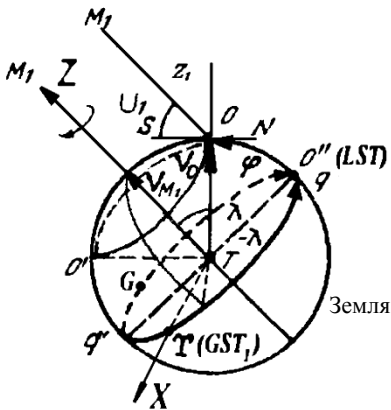


Рис. 3. Пояснение к выводу географических координат наблюдателя, находящегося на поверхности Земли

Пусть проекция точки O на экваториальную плоскость qq' дает точку O'' . Тогда широта φ наблюдателя будет равна длине дуги OO'' . Долгота наблюдателя λ отсчитывается от точки G пересечения нулевого мери-

диана с плоскостью экватора qq' по ходу вращения Земли. При этом λ связана с местным звездным временем LST и звездным временем на Гринвиче GST через (3)

$$GST + \lambda = LST. \quad (3)$$

Введем единичный вектор V_0 в направлении наблюдателя. Как видно из рис. 3, его декартовы координаты связаны с широтой φ и долготой λ наблюдателя через (4)

$$\begin{aligned} V_{OX} &= \cos \varphi \cos (GST_1 - \lambda); \\ V_{OY} &= \cos \varphi \sin (GST_1 - \lambda); \\ V_{OZ} &= \sin \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Найдем координаты наблюдателя φ и λ как функции от координат звезд M_1, M_2 и времени. Для этого выразим вектор V_0 через векторы V_{M_1} и V_{M_2} .

Введем базисные векторы $e_1 = V_{M_1}, e_2 = V_{M_2}$ и $e_3 = [V_{M_1} V_{M_2}]$. Тогда разложение вектора V_0 по базису $e_1 e_2 e_3$ будет равно

$$V_0 = aV_{M_1} + bV_{M_2} + c[V_{M_1} V_{M_2}]. \quad (5)$$

Найдем компоненты разложения a, b, c вектора V_0 . Из рис. 3 видно, что скалярное произведение векторов V_0 и V_{M_1}, V_0 и V_{M_2} соответственно равно

$$(V_0 V_{M_1}) = \sin U_1, \quad (V_0 V_{M_2}) = \sin U_2. \quad (6)$$

Выражения (6) определяют радиусы кругов равных высот для звезд M_1 и M_2 . Из (6) с учетом (5) имеем

$$\begin{aligned} \sin U_1 &= (V_0 V_{M_1}) = a + b(V_{M_1} V_{M_2}), \\ \sin U_2 &= (V_0 V_{M_2}) = b + a(V_{M_1} V_{M_2}), \end{aligned} \quad (7)$$

откуда компоненты a и b равны

$$\begin{aligned} a &= \frac{(\sin U_1 - (V_{M_1} V_{M_2}) \sin U_2)}{1 - (V_{M_1} V_{M_2})^2}, \\ b &= \frac{(\sin U_2 - (V_{M_1} V_{M_2}) \sin U_1)}{1 - (V_{M_1} V_{M_2})^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Компоненту c находим из (5). После возведения (5) в квадрат имеем

$$c = \pm \sqrt{1 - (a^2 + b^2 + 2ab(V_{M_1} V_{M_2}))}. \quad (9)$$

Следует отметить, что выражение под корнем в (9) будет положительным только в том случае, если круги равных высот для звезд M_1 и M_2 пересекаются. Таким образом, разложение (5) с компонентами $a, b, \pm c$ однозначно определяет каждую из двух возможных точек положения наблюдателя на земной поверхности при наблюдении двух звезд M_1 и M_2 .

Координаты наблюдателя из (4) с учетом (5) будут равны

$$\varphi_{1,2} = a \sin \left(aV_Z^{M_1} + bV_Z^{M_2} \pm c \left(V_X^{M_1} V_Y^{M_2} - V_Y^{M_1} V_X^{M_2} \right) \right), \quad (10)$$

$$\lambda_{1,2} = GST_1 -$$

$$- \operatorname{atan} \left(\frac{aV_X^{M_1} + bV_X^{M_2} \pm c \left(V_Y^{M_1} V_Z^{M_2} - V_Z^{M_1} V_Y^{M_2} \right)}{aV_Y^{M_1} + bV_Y^{M_2} \mp c \left(V_X^{M_1} V_Z^{M_2} - V_Z^{M_1} V_X^{M_2} \right)} \right), \quad (11)$$

где $V_X^{M_1}, V_Y^{M_1}, V_Z^{M_1}$ и $V_X^{M_2}, V_Y^{M_2}, V_Z^{M_2}$, а также a, b, c – функции от координат звезд M_1, M_2 и моментов времени их наблюдения.

Таким образом, для расчета координат местоположения наблюдателя на поверхности Земли необходимо знать экваториальные координаты звезд, для которых выполняется измерение угла места или зенитного расстояния, в соответствии со способом Сомнера, а также гринвичское звездное время в момент измерения. Предложенный метод не требует больших затрат при вычислениях и легко реализуется в качестве программы для ЭВМ в отличие от классического метода.

Топопривязка при помощи камеры и поворотного зеркала

Рассмотрим в качестве инструмента для топопривязки систему из камеры и поворотного зеркала, изображенную на рис. 4. Пусть камера и зеркало установлены на одной общей платформе, причем камера жестко связана с платформой, а зеркало способно совершать вращательные движения относительно платформы при помощи опорно-поворотного устройства (ОПУ) по двум взаимно перпендикулярным осям – горизонтальной и вертикальной. Установка осей ОПУ в плоскости горизонта и вертикальной плоскости производится при помощи регулировки наклона платформы относительно поверхности Земли. Контроль наклона осуществляется при помощи датчика горизонта, установленного на платформе. Измерение углов поворота зеркала по той или другой оси осуществляется угломерными датчиками, установленными на осях вращения ОПУ. Отсчеты каждого угла ведутся относительно некоторого нулевого значения, задаваемого индивидуально для каждого датчика. Вращение ОПУ осуществляется шаговыми двигателями и управляется ЭВМ, куда также поступает изображение с камеры. Для исследования различных характеристик предложенной системы воспользуемся имитационным моделированием.

Опишем вращение зеркала ОПУ при помощи математических конструкций. Рассмотрим две системы координат K и K' , изображенные на рис. 5. Система K связана с поверхностью Земли, причем плоскость XU совпадает с плоскостью местного горизонта, ось OX направлена на восток, а ось OY – на север. Опреде-

ленная таким образом система K называется горизонтальной системой координат. Координаты любой точки в ней задаются при помощи двух углов: азимута A и угла места U . Угол U отсчитывается в пределах от 0 до $+90^\circ$ от плоскости горизонта к зениту, т. е. от плоскости XU к оси OZ против часовой стрелки. Угол A отсчитывается в пределах от 0 до 360° от точки севера к востоку в сторону суточного вращения небесной сферы, т. е. от положительного направления оси OY по часовой стрелке. Связь горизонтальных координат с декартовыми координатами дает формула (12)

$$\begin{aligned} x &= \cos U \sin A, \\ y &= \cos U \cos A, \\ z &= \sin U. \end{aligned} \quad (12)$$



Рис. 4. Система топопривязки

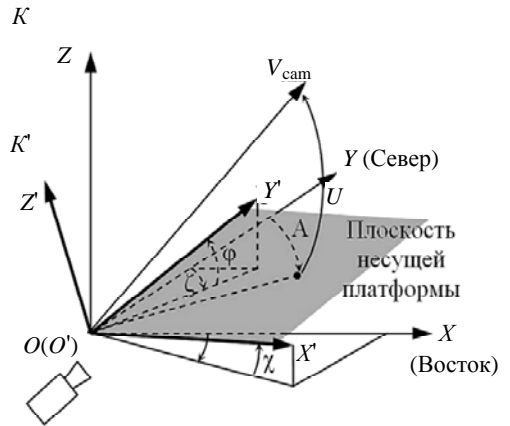


Рис. 5. Выбор систем координат для описания модели

Система K' связана с несущей платформой, на которой установлены камера и ОПУ. Причем плоскость $X'Y'$ совпадает с плоскостью платформы, ось OY' направлена вдоль платформы по направлению взгляда камеры. Ориентация платформы относительно направления на север задается углом ξ между осями OY и OY' . Отклонение платформы от горизонтальной плоскости задается двумя углами: χ – угол между осью OX' и ее проекцией на плоскость XU , φ – угол между осью OY' и ее проекцией на плоскость XU .

Примем, что ОПУ расположено на платформе таким образом, что вертикальная ось вращения зеркала совпадает с OZ' , а горизонтальная ось вращения OX'' лежит в плоскости $X'Z'$ и отклонена от оси OX' на угол δ , как показано на рис. 6. Угол δ задает неперпендикулярность осей ОПУ. Пусть некоторый начальный момент времени зеркало ОПУ ориентировано так, вектор нормали к поверхности зеркала V_{norm} совпадает с OY' . Введем углы: $A_{rot.}$ – угол поворота зеркала относительно вертикальной оси, $U_{rot.}$ – угол поворота зеркала относительно горизонтальной оси. За положительное направление изменения угла $A_{rot.}$ примем вращение по часовой стрелке, а $U_{rot.}$ – против часовой стрелки.

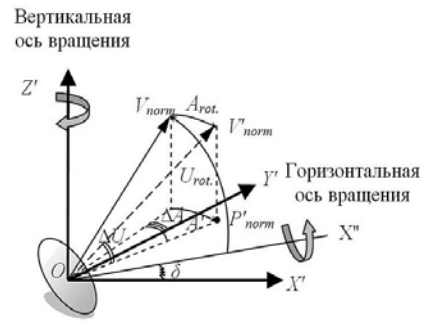


Рис. 6. Пояснение к выводу зависимости между углами поворота ОПУ и горизонтальными координатами вектора нормали к поверхности зеркала ОПУ

В соответствии с [3] матрица поворота произвольного вектора V относительно заданной оси с координатами x, y, z против часовой стрелки имеет вид

$$M_{VCCW} = \begin{pmatrix} x^2(1-\cos\theta) + \cos\theta & yx(1-\cos\theta) - z\sin\theta & zx(1-\cos\theta) + y\sin\theta \\ xy(1-\cos\theta) + z\sin\theta & y^2(1-\cos\theta) + \cos\theta & zy(1-\cos\theta) - x\sin\theta \\ xz(1-\cos\theta) - y\sin\theta & yz(1-\cos\theta) + x\sin\theta & z^2(1-\cos\theta) + \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Тогда операция поворота зеркала относительно осей OZ' и OX'' математически будет описываться выражением (14)

$$V_{norm} = M_{OZ'}^{-1}(A_{rot.})M_{OX''}(U_{rot.})V_{OY'}, \quad (14)$$

где V_{norm} – вектор нормали к поверхности зеркала, заданный в системе K , $M_{OZ'}^{-1}$ – матрица поворота относительно оси OZ' , заданной в системе K , на угол $A_{rot.}$ по часовой стрелке, $M_{OX''}$ – матрица поворота относительно оси OX'' , заданной в системе K , на угол $U_{rot.}$ против часовой стрелки, $V_{OY'}$ – направляющий вектор оси OY' , заданной в системе K .

Так как отсчеты углов поворота ОПУ ведутся относительно некоторого нулевого значения, задаваемого индивидуально для каждого датчика, то (14) необходимо дополнить двумя параметрами $A_{0\ shift}$ и $U_{0\ shift}$, которые будут задавать смещение нуля угломерных датчиков относительно абсолютного значения. Тогда преобразование (14) примет вид

$$V_n = M_{OZ'}^{-1}(A_{rot.} + A_{0\ shift})M_{OX''}(U_{rot.} + U_{0\ shift})V_{OY'}. \quad (15)$$

Выражения (15) и (12) позволяют вычислять горизонтальные координаты A и U вектора нормали V_{norm} зеркала ОПУ при его повороте на углы $A_{rot.}$ и $U_{rot.}$ относительно осей вращения с учетом их неперпендикулярности δ , с учетом негоризонтальности платформы φ и χ , а также с учетом ориентации платформы в пространстве относительно направления на север ξ .

Получим теперь выражения, позволяющие вычислять углы поворота $A_{rot.}$ и $U_{rot.}$ зеркала ОПУ по горизонтальным координатам A и U вектора V_{norm} . Как видно из рис. 6, поворот зеркала ОПУ относительно оси OX'' на угол $U_{rot.}$ будет приводить к изменению азимута вектора нормали V_{norm} в системе K' на угол ΔA . При этом угол $U_{rot.}$ связан с δ , а также с углом ΔU между вектором V'_{norm} и его проекцией P'_{norm} на плоскость $X'Y'$ через (16)

$$\sin \Delta U = \sin U_{rot.} \cos \delta. \quad (16)$$

Угол $A_{rot.}$ равен разности углов A' – угол между OY' и P'_{norm} и ΔA . Зависимость ΔA от ΔU и δ дает формула (17)

$$\sin \Delta A = \tan \Delta U \tan \delta. \quad (17)$$

Угол между двумя векторами может быть получен из скалярного произведения этих векторов, а вектор-проекция P произвольного вектора V на плоскость, заданную нормальным вектором N , может быть найден из (18)

$$P = V - (VN)N. \quad (18)$$

Таким образом, выражения (16)–(18) и (12) позволяют найти углы $A_{rot.}$ и $U_{rot.}$, на которые было повернуто зеркало ОПУ, по координатам A и U его вектора нормали V_{norm} .

Запишем алгоритм процесса топопривязки по звездам. С учетом основных конструктивных особенностей предложенной системы для топопривязки необходимо выполнить следующую последовательность действий.

Выставить камеру и зеркало ОПУ на одну ось. Для этого в соответствии с (19) находим азимут A'_{norm} и угол места U'_{norm} вектора нормали V'_{norm} к поверхности зеркала ОПУ в системе K' . При этом считаем, что ось камеры и ось зеркала совмещены с точностью по азимуту $\delta A_{match\ err}$, по углу места $\delta U_{match\ err}$

$$\begin{aligned} A'_{norm} &= (A'_{cam} + \pi) \pm \delta A_{match\ err}; \\ U'_{norm} &= (-U'_{cam}) \pm \delta U_{match\ err}, \end{aligned} \quad (19)$$

где A'_{cam} и U'_{cam} – азимут и угол места направляющего вектора, характеризующего ориентацию камеры в системе координат K' , A'_{norm} и U'_{norm} – азимут и угол места вектора нормали к поверхности зеркала ОПУ в системе K' , $\delta A_{match\ err}$ и $\delta U_{match\ err}$ – ошибка автоколлимации соответственно по азимуту и углу места.

Выставить ноль угломерных датчиков ОПУ после горизонтирования платформы. Для этого при помощи (15) и (12) сначала находим координаты вектора нормали V'_{norm} в системе K , связанной с Землей. Затем согласно (16)–(18) и (12) находим углы A_{rot} и U_{rot} , на которые было повернуто зеркало ОПУ относительно своих осей вращения. Далее по (20) находим смещение нуля угломерного датчика азимута $A_0\ shift$ и датчика угла места $U_0\ shift$ ОПУ. При этом считаем, что азимут A_{cam} и угол места U_{cam} камеры в системе K равны нулю. То есть камера расположена горизонтально и смотрит на север

$$\begin{aligned} A_0\ shift &= A_{rot} - \pi, \\ U_0\ shift &= U_{rot}. \end{aligned} \quad (20)$$

где A_{rot} и U_{rot} – углы поворота зеркала ОПУ относительно вертикальной и горизонтальной осей вращения, $A_0\ shift$, $U_0\ shift$ – смещение нуля угломерного датчика азимута и угла места ОПУ относительно абсолютного значения.

Таким образом, по показаниям угломерных датчиков ОПУ координаты направляющего вектора камеры $V_{cam\ sensor}$ в системе K после установки нуля будут равны: $A_{cam\ sensor} = 0$ рад. и $U_{cam\ sensor} = 0$ рад.

Навести ОПУ на N звезд и измерить их углы места по датчику угла места ОПУ. Для этого при помощи (12) и (15) по заданным углам A'_{cam} и U'_{cam} находим действительные координаты вектора V_{cam} . Введем вектор $V_{ref\ cam}$, характеризующий в системе K направление взгляда камеры на i -ю звезду в результате отражения вектора $V_{in\ cam} = V_{cam}$ от зеркала ОПУ. Считая, что в поле зрения камеры попадает нужная звезда с горизонтальными координатами A_{star} и U_{star} , зададим азимут $A_{ref\ cam}$ и угол места $U_{ref\ cam}$ вектора $V_{ref\ cam}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{ref\ cam} &= A_{star} \pm \delta A_{cross\ shift} \pm \delta A_{cross\ err}, \\ U_{ref\ cam} &= U_{star} \pm \delta U_{cross\ shift} \pm \delta U_{cross\ err}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $A_{ref\ cam}$ и $U_{ref\ cam}$ – соответственно азимут и угол места вектора $V_{ref\ cam}$, A_{star} и U_{star} – азимут и угол места наблюдаемой i -й звезды в системе K (координаты центра креста камеры), $A_{cross\ shift}$ и $U_{cross\ shift}$ – угловое смещение изображения звезды на камере относительно центра креста камеры соответственно по азимуту и углу места, $A_{cross\ err}$ и $U_{cross\ err}$ – ошибки, учитывающие неточность определения пересечения изображения звезды на камере с крестом камеры соответственно по азимуту и углу места.

Так как угол места звезды измеряется в момент пересечения ее изображения на камере с горизонтальной линией креста камеры, то в (21) в данном случае следует принять $\delta U_{cross\ shift} = 0$.

Далее по (22) находим вектор нормали V_{norm} к зеркалу ОПУ, соответствующий такой его ориентации, при которой камера смотрит через отражение в зеркале на заданную звезду на небе

$$\bar{V}_{norm} = -\frac{\bar{V}_{in\ cam} - \bar{V}_{ref\ cam}}{\sqrt{2(1 - (\bar{V}_{in\ cam} \bar{V}_{ref\ cam})^2)}}, \quad (22)$$

где V_{norm} – вектор нормали к поверхности зеркала, $V_{in\ cam}$ – направляющий вектор камеры, падающий на зеркало, $V_{ref\ cam}$ – направляющий вектор камеры, отраженный от зеркала.

Затем согласно (16)–(18) и (12) находим углы A_{rot} и U_{rot} , на которые было повернуто зеркало ОПУ относительно своих осей вращения, и по (23) получаем показание угломерных датчиков ОПУ

$$\begin{aligned} A_{sensor} &= A_{rot} - A_0\ shift \pm \delta A_{sensor\ err}, \\ U_{sensor} &= U_{rot} - U_0\ shift \pm \delta U_{sensor\ err}, \end{aligned} \quad (23)$$

где A_{sensor} и U_{sensor} – показание угломерных датчиков ОПУ, A_{rot} и U_{rot} – углы поворота зеркала ОПУ относительно вертикальной и горизонтальной осей вращения, $A_0\ shift$, $U_0\ shift$ – смещение нуля угломерного датчика азимута и угла места ОПУ относительно абсолютного значения, $A_{sensor\ err}$ и $U_{sensor\ err}$ – аппаратная ошибка угломерных датчиков ОПУ.

Из A_{sensor} , U_{sensor} по (12) находим $V_{norm\ sensor}$ и согласно (24) по данным $V_{norm\ sensor}$ и $V_{cam\ sensor}$ находим $V_{ref\ cam\ sensor}$, характеризующий направление взгляда камеры на i -ю звезду согласно показаниям угломерных датчиков ОПУ. Угол места звезды $U_{star\ meas\ sensor}$, измеренный по датчику угла места ОПУ, получается из $V_{ref\ cam\ sensor}$ по (12)

$$V_{ref} = V_{in} - 2(V_{in} V_{norm}) V_{norm}, \quad (24)$$

где V_{in} – направляющий вектор луча, падающего на зеркало, V_{ref} – направляющий вектор луча, отраженного от зеркала, V_{norm} – вектор нормали к зеркалу.

Вычислить географические координаты φ и λ собственного местоположения. Согласно полученным данным $U_{star\ meas\ sensor}$ для всех сочетаний $k = C_n^m$ из $n = N$ отмеченных звезд по $m = 2$ вычисляем расчетное значение $\varphi_{i\ calc}$ и $\lambda_{i\ calc}$, где $i = 0..k$ по (1)–(11).

Далее находим средние значения координат φ_{mean} , λ_{mean} и стандартные отклонения σ_φ , σ_λ .

Произвести корректировку датчика азимута ОПУ по опорной звезде. Для этого наводим ОПУ на произвольную звезду и измеряем ее азимут по датчику азимута ОПУ. Расчет $A_{star\ meas\ sensor}$ выполняется аналогично расчету $U_{star\ meas\ sensor}$. Необходимо отметить, что азимут звезды измеряется в момент пересечения ее изображения на камере с вертикальной линией креста камеры. Следовательно, в (21) в данном случае $\delta U_{cross\ err}$ и $\delta A_{cross\ shift}$ должны быть равны нулю. Далее, согласно (25) и (26), вычисляем истинное значение азимута опорной звезды $A_{star\ calc}$ и поправку датчика азимута δA_{sensor}

$$tg A_{star\ calc} = \frac{\cos \delta_{star} \sin(GST - \alpha_{star} + \lambda_{mean})}{\sin \varphi_{mean} \cos \delta_{star} \cos(GST - \alpha_{star} + \lambda_{mean}) - \cos \varphi_{mean} \sin \delta_{star}}, \quad (25)$$

где $A_{star\ calc}$ – азимут опорной звезды, φ_{mean} и λ_{mean} – расчетное значение широты и долготы места наблюдения, α_{star} и δ_{star} – прямое восхождение и склонение,

$$\delta A = A_{star\ calc} - A_{star\ meas}. \quad (26)$$

Вводим данную поправку в смещение нуля $A_0\ shift$ для датчика азимута ОПУ в соответствии с (25)

$$A_0\ shift = A_0\ shift - \delta A_{sensor}. \quad (27)$$

Обновить значение координат направляющего вектора камеры $V_{cam\ sensor}$ и автоколлимации ОПУ. Новое значение азимута $A_{cam\ sensor}$ направляющего вектора камеры $V_{cam\ sensor}$ получаем из (28), а значение автоколлимации ОПУ – из (29). При этом считаем, что вся система стабильна. То есть за время работы системы камера не меняет своего положения относительно платформы, а платформа не меняет своего положения относительно плоскости горизонта.

$$A_{cam\ sensor} = \delta A_{sensor}, \quad (28)$$

где $A_{cam\ sensor}$ – азимут направляющего вектора камеры $V_{cam\ sensor}$ в системе координат K , δA_{sensor} – поправка датчика азимута ОПУ,

$$A_{ac} = A_{cam\ sensor} + \pi, \quad U_{ac} = -U_{cam\ sensor}, \quad (29)$$

где A_{ac} и U_{ac} – координаты автоколлимации ОПУ, $A_{cam\ sensor}$ и $U_{cam\ sensor}$ – азимут и угол места направляющего вектора камеры $V_{cam\ sensor}$ в системе координат K .

Численное моделирование. Оценка ошибки топопривязки

Оценим ошибку топопривязки. Для этого на основании созданной имитационной модели выполним численное моделирование. Зададим входные параметры модели. Примем, что наблюдатель находится на Земле в точке с координатами $\varphi_{loc.} = 54^\circ 50' 11''$, $\lambda_{loc.} = 43^\circ 18' 39''$, при этом платформа с камерой ориентирована в пространстве таким образом, что угол ξ относительно направления на север равен $\xi = 46^\circ 50' 34''$. Примем также, что платформа оборудована двухкоординатным инклинометром с ошибкой не более $18''$ по обоим осям во всем диапазоне измерения. В качестве примера подобного датчика можно привести инклинометры производства фирмы «Seika» [4]. По результатам анализа характеристик реально существующих ОПУ было установлено, что перпендикулярность осей может достигать порядка $30''$. Примем, что ошибка угломерных датчиков ОПУ по азимуту и углу места постоянна во всем диапазоне измерения и составляет порядка $10''$. Примем также, что точность, которую обеспечивают приводы ОПУ, определяется только аппаратной ошибкой угломерных датчиков. Пусть для наблюдения звезд используется камера с матрицей порядка 1 дюйма, разрешением 760×572 пиксела и объектив с фокусным расстоянием порядка 1 м. Камера на платформе ориентирована так, что координаты направляющего вектора V'_{cam} , характеризующего направление взгляда камеры в системе K' , равны: $A'_{cam} = -5''$, $U'_{cam} = 8''$. Угловое разрешение на пиксел для такой системы будет порядка $1''$. Согласно проведенным исследованиям аналогичные системы используются при зондировании космических аппаратов. Примем, что точность автоколлимации составляет порядка $20''$ по азимуту и углу места, а точность определения пересечения изображения звезды на камере с электронным крестом камеры составляет $3\ \text{pxl}$. Все значения входных параметров модели представлены в сводной табл. 1.

Для расчета координат местоположения наблюдателя были выбраны следующие звезды: Вега, Альтаир, Денеб. В качестве опорной звезды для привязки датчика азимута ОПУ была выбрана звезда Рас Альхаг. Данные по ним представлены в табл. 2. Координаты используемых звезд были получены из программы *RedShift 5* [5], которая согласно описанию учитывает эффект рефракции при расчете. Гринвичское звездное время было

получено из универсального калькулятора звездного времени [6], который учитывает влияние короткопериодической и долгопериодической нутации при расчете.

Таблица 1

Значения входных параметров модели

Параметр	Значение	Описание
χ	18"	Характеризуют отклонение плоскости платформы от горизонтальной плоскости
φ	18"	
ξ	46°50'34"	Характеризует ориентацию платформы относительно направления на север
δ	30"	Характеризует неперпендикулярность осей вращения ОПУ
A'_{cam}	-5"	Характеризуют ориентацию камеры в системе координат, связанной с платформой
U'_{cam}	8"	
$\delta A_{match\ err}$	20"	Характеризуют ошибку совмещения оси камеры и оси зеркала ОПУ
$\delta U_{match\ err}$	20"	
$A_{cross\ err}$	3 pxl	Характеризуют ошибку определения пересечения изображения звезды на камере с крестом камеры
$U_{cross\ err}$	3 pxl	
$A_{sensor\ err}$	10"	Характеризуют приборную ошибку угломерных датчиков ОПУ
$U_{sensor\ err}$	10"	
θ_{pxl}	1"	Угловое разрешение на пиксел
φ_{loc}	54°50'11"	Географические координаты местоположения наблюдателя на Земле
λ_{loc}	43°18'39"	

По результатам моделирования было рассчитано среднее значение координат местоположения наблюдателя, отклонение расчетного значения координат от истинного. Также была выполнена оценка ошибки привязки угломерных датчиков ОПУ и рассчитано значение автоколлимации. Результаты моделирования представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 2

Координаты звезд Рас Альхаг, Вега, Альтаир, Денеб

Звезда	Прямое восхождение α (часовой угол)	Склонение δ	Гринвичское звездное время наблюдения GST	Всемирное время UT	Азимут A	Угол места U
Рас Альхаг	17 ^h 34 ^m 28 ^s	+12°32'59"	18:53:03	11:10:00	254°29'18"	+25°48'36"
Вега	18 ^h 37 ^m 19 ^s	+38°47'22"	18:58:04	11:15:00	263°59'28"	+54°03'21"
Альтаир	19 ^h 51 ^m 20 ^s	+8°53'45"	19:03:05	11:20:00	228°26'13"	+37°47'44"
Денеб	20 ^h 41 ^m 48 ^s	+45°19'07"	19:08:06	11:25:00	241°16'26"	+74°10'22"

Таблица 3

Координаты местоположения наблюдателя

Параметр	Значение для широты	Значение для долготы
Среднее значение широты φ_{mean} и долготы λ_{mean} по результатам расчета	54°50'30"	43°19'29"
Стандартное отклонение от среднего значения для долготы σ_φ и широты σ_λ по результатам расчета	<1"	2"
Истинные координаты местоположения наблюдателя, долгота φ_{loc} и широта λ_{loc}	54°50'11"	43°18'39"
Отклонение среднего значения координат от истинного значения для широты $ \varphi_{mean} - \varphi_{loc} $ и долготы $ \lambda_{mean} - \lambda_{loc} $	19"	50"

Таблица 4

Ошибка привязки угломерных датчиков и значение автоколлимации ОПУ

Значение по азимуту	Значение по углу места
~30"	

226°49'52"	0°00'00"
37"	26"

Моделирование показало, что система с заданными параметрами обладает низкими точностными характеристиками. Точность привязки составила порядка 20" по широте и 50" по долготе или порядка 300 м по широте и 1500 м по долготе, что как минимум на порядок ниже точности спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. При этом точность привязки угломерных датчиков ОПУ составила порядка 30" по азимуту и углу места. Ошибка определения положения автоколлимации составила порядка 40" по азимуту и 30" по углу места.

Для уменьшения ошибки топопривязки в первую очередь необходимо оборудовать систему высокоточными угломерными датчиками с ошибкой не более 1". Для уменьшения систематической ошибки при измерениях угловых координат звезд необходимо увеличить точность изготовления ОПУ. Также при измерениях следует выбирать такие звезды азимуты, которых отличаются на величину около 90° [1].

Заключение

При выходе из строя спутниковой навигационной системы топопривязка может быть выполнена автономно по звездам при помощи способа Сомнера. Использование способа Сомнера позволит одновременно определять долготу и широту местоположения наблюдателя, что сократит время, затрачиваемое на измерения. Предложен метод расчета координат местоположения наблюдателя на поверхности Земли. Для выполнения расчета необходимо знать экваториальные координаты звезд, для которых выполняется измерение угла места или зенитного расстояния, в соответствии со способом Сомнера, а также гринвичское звездное время в момент измерения. Предложенный метод не требует больших затрат при вычислениях и легко реализуется в качестве программы для ЭВМ в отличие от классического метода. В качестве инструмента для топопривязки предложено использовать систему из камеры и поворотного зеркала. Разработана имитационная модель, которая по-

зволяет симитировать реальные элементарные явления, составляющие процесс топопривязки по звездам при помощи предложенной системы. Создана математическая модель вращающегося зеркала ОПУ. Разработан алгоритм процесса топопривязки и привязки угломерных датчиков ОПУ. На основании имитационной модели выполнена оценка ошибки топопривязки. Установлено, что система с заданными параметрами обладает низкими точностными характеристиками. Точность привязки составила порядка 20" по широте и 50" по долготе или порядка 300 м по широте и 1500 м по долготе, что как минимум на порядок ниже точности спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. При этом точность привязки угломерных датчиков ОПУ составила порядка 30" по азимуту и углу места. Ошибка определения положения автоколлимации составила порядка 40" по азимуту и 30" по углу места.

Для уменьшения ошибки топопривязки в первую очередь необходимо оборудовать систему высокоточными угломерными датчиками с ошибкой не более 1". Для уменьшения систематической ошибки при измерениях угловых координат звезд необходимо увеличить точность изготовления ОПУ. В дальнейшем необходимо проанализировать источники ошибок и внести соответствующие корректировки для уточнения модели. Экспериментально подтвердить результаты, полученные при помощи моделирования.

Литература

1. Конович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. Едиториал УРСС, 2009.
2. Блажно С. Н. Курс практической астрономии. М., 1951.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981.
4. <http://seika.de>
5. <http://redshift.de>
6. <http://astro.prao.ru>