

УДК 681.78.01

## Устройство для определения астрономических координат объекта

© 2019 г. Ю. И. Чудаков\*, В. И. Цветков\*\*, С. А. Азаров\*

\*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской области

\*\*Научно-производственный центр автоматического приборостроения, Москва

E-mail: contact@nioep.ru

Поступила в редакцию 01.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-08-29-35

---

**В статье рассматривается способ определения астрономических координат объекта с помощью нахождения направления меридиана в точке наблюдения. Предложен вариант оптико-электронного устройства, позволяющего реализовать необходимые для этого угловые измерения. Произведена оценка точности работы алгоритма, с помощью которого находят направление меридиана.**

**Ключевые слова:** астрономические координаты, направление меридиана, угловые измерения.

**Коды OCIS:** 350.0350, 350.1260.

---

Существует много устройств и способов для определения астрономических координат объектов. Углоизмерительные приборы широко применяются для измерения координат объектов, расположенных на земной поверхности, с привязкой к геодезической сети [1], [2] в навигационных системах различного назначения, в том числе, космических аппаратов [3], [4] для инженерно-геодезических работ при строительстве инженерных сооружений и монтаже оборудования [5].

Основными недостатками известных приборов являются невозможность работы с неизлучающими объектами, неосвещёнными марками и знаками, установленными на объектах, невозможность работы одновременно с несколькими объектами, а также недостаточная точность из-за большого числа операций, которые необходимо произвести для определения направления на светило.

В ряде случаев, например, для измерения координат объекта, расположенного на земной поверхности, а также в навигационных системах различного назначения, существует необходимость точного определения астрономических координат объекта и, в частности, направления меридиана в точке наблюдения. Базой, которой можно воспользоваться для измерения координат объектов, расположенных на земной поверхности, для точного определения их местоположения обычно служит материальная система (система отсчёта).

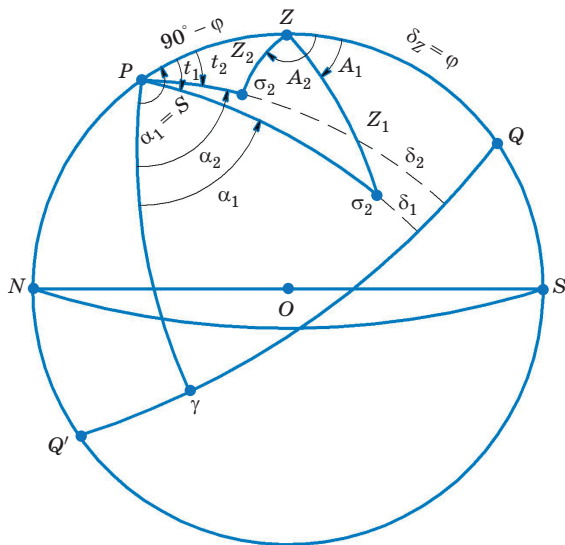
С материальной системой тел или телом, выбранным в качестве системы отсчёта, жёстко связывают какую-либо систему координат в том смысле, что точки, неподвижные в данной системе отсчёта, будут иметь постоянные значения пространственных координат.

Система координат представляет математическое построение, указывающее способ сопоставления точки в определённый момент времени (точки-мгновения) четвёрке чисел (четырёхмерным координатам). С инерциальной системой отсчёта удобно связывать прямоугольные декартовы координаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и время  $t$ , определяемое в соответствии с теорией относительности.

С высокой степенью точности, как установлено экспериментально, инерциальной системой отсчёта является гелиоцентрическая система отсчёта, начало которой жёстко связано с центром Солнца, а координатные оси направлены на три удалённые звезды [6].

Все способы астрономических определений широты, времени и направления меридиана строятся на двух основных принципах измерения: измерении зенитных расстояний светил (зенитальные способы) и измерении азимутов светил (горизонтальные направления на светила, азимутальные способы) [7].

Из геометрии небесной сферы (рис. 1) следует, что широта  $\varphi$ , направление меридиана  $NS$  и мест-



**Рис. 1.** Геометрия небесной сферы.  $A_1$  — азимут,  $\alpha_1$  — прямое восхождение первого светила,  $\alpha_2$  — прямое восхождение второго светила,  $\alpha_z$  — прямое восхождение зенита,  $\delta_1$  — склонение первого светила,  $\delta_2$  — склонение второго светила,  $\delta_z$  — склонение зенита,  $\sigma_1$  — светило,  $\sigma_2$  — светило,  $\varphi$  — широта точки наблюдения,  $\gamma$  — точка весеннего равноденствия,  $QQ'$  — небесный экватор,  $NS$  — направление меридиана,  $P$  — полюс мира,  $Z$  — зенит в точке наблюдения первого светила,  $A_2$  — азимут второго светила,  $s$  — местное звёздное время.

ное звёздное время  $s$  в некоторый момент  $T$  в каком-либо пункте земной поверхности могут быть определены, если для этого момента определено положение зенита  $z$  на небесной сфере [7].

Склонение зенита численно равно широте места  $\delta_z = \varphi$ , его прямое восхождение равно местному звёздному времени  $\alpha_z = s$ , а большой круг, проходящий через полюс и зенит, определит небесный меридиан и полуденную линию  $NS$ .

Вследствие суточного вращения Земли положение зенита точки наблюдения непрерывно меняется относительно «неподвижных» звёзд.

В каждый данный момент положение зенита на небесной сфере может быть определено или зенитными расстояниями минимум двух светил с известными экваториальными координатами  $\sigma_1(\alpha_1, \delta_1)$  и  $\sigma_2(\alpha_2, \delta_2)$  или как пересечение по крайней мере двух вертикалов, проходящих через эти светила, т.е. азимутами светил  $A_1$  и  $A_2$ . Из содержания рис. 1 также следует, что для наиболее точного определения положения зенита по измеренным зенитным расстояниям или азимутами двух светил необходимо, чтобы разность их азимутов была бы близка к  $90^\circ$ , т.е. светила должны находиться в двух взаимно перпендикулярных вертикалах.

Долгота пункта относительно начального меридиана численно равна разности одноименных местных времён, определённых одновременно (или приведённых к одному и тому же моменту)

как в пункте наблюдения, так и в пункте, расположенном на начальном меридиане,

$$\lambda = s - S.$$

То есть задача определения долготы пункта состоит из:

- определения местного времени  $s$ , рассчитанного по измерениям зенитных расстояний светил или их азимутов времени в некоторый момент  $T$ ;
- определения времени начального меридиана  $S$  в тот же самый момент  $T$ , например, из приёма радиосигналов точного времени.

Задача определения азимута  $a$  направления на земной предмет сводится к определению азимута светила  $A$  и измерению горизонтального угла  $Q$  между светилом и местным предметом. В этом случае азимут направления на земной предмет определяется формулой

$$a = A + Q.$$

В азимутальных способах основным уравнением, связывающим измеряемую величину  $A$  с определёнными значениями широты  $\varphi$  и времени  $s$ , является

$$\operatorname{ctg} A_N = \sin \varphi \operatorname{ctg} t - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t, \quad (1)$$

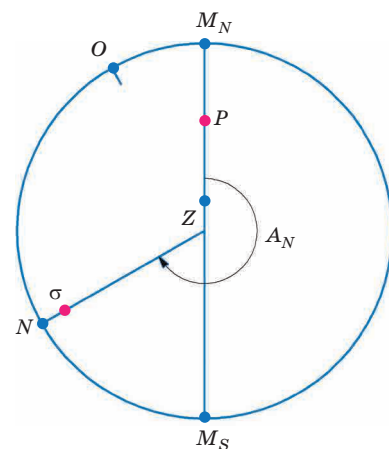
где  $t = s - \alpha = T + u - \alpha$  [7].

Практически с помощью угломерного прибора измеряются не азимуты светил  $A$ , а горизонтальные направления на светила  $N$  (рис. 2), так как точное направление меридиана в точке наблюдения, как правило, неизвестно.

Азимут светила, отсчитываемый от точки Севера, находится из следующего выражения

$$A_N = N - M_N, \quad (2)$$

где  $M_N$  — точка Севера, отсчёт горизонтального круга.



**Рис. 2.** Схема измерения угломерным прибором.  $M_N M_S$  — направление меридиана,  $N$  — направление на светило,  $Z$  — зенит,  $P$  — полюс мира,  $A_N$  — азимутальный угол светила,  $O$  — отсчёт прибора,  $\sigma$  — светило.

В связи с этим, при определении азимута по направлению на светило, измеренному в горизонтальной плоскости, в уравнении (1) с учётом равенства (2) будет три неизвестных  $M_N$ ,  $\varphi$  и  $u$ .

На основе выгоднейших условий наблюдений, вытекающих из дифференциального анализа уравнения (1), создаются способы астрономических определений координат и азимута направления. При этом исключается или наиболее полно максимально ослабляется влияние систематических и случайных погрешностей наблюдений светил. В северном полушарии выгоднейшим условиям наблюдения наилучшим образом удовлетворяет Полярная звезда.

В работе [7] показано, что при обосновании способов геодезической астрономии должно соблюдаться правило: наибольшей точности определений достигают не посредством большого числа наблюдений, а посредством малого числа наблюдений, точных во всех их элементах.

Подводя итог сказанному, при выборе способа определения астрономических координат и направления меридиана можно утверждать, что предъявленным выше требованиям будет соответствовать в качестве системы отсчёта гелиоцентрическая система. Объект наблюдения в северном полушарии — Полярная звезда. Способ астрономических определений — азимутальный, поскольку позволяет работать с одним объектом наблюдения. За центр прямоугольных декартовых координат в гелиоцентрической системе отсчёта можно принять полюс мира, который находится в точке пересечения оси вращения Земли с небесной сферой. Полюс мира, также как и зенит, находится в плоскости меридиана, проходящего через точку наблюдения.

Наблюдения за Полярной звездой ведут в вечернее и ночное время. В это время звезда подходит к кульминации и уходит из неё, находясь в поле зрения объектива наблюдательного устройства.

В прямоугольной системе координат в плоскости, перпендикулярной направлению на звезду, траектория перемещения изображения Полярной звезды вследствие обращения Земли вокруг своей оси представляет собой окружность с центром в полюсе мира и её можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{cases} Y = r \cos \omega t \\ X = r \sin \omega t \end{cases} \quad (3)$$

где  $t$  — время суток,  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси,  $r$  — радиус траектории в расчётном положении, определяемый как произведение тангенса азимутального угла светила на величину фокусного расстояния объектива или окружности на фотоприёмнике, по которой перемещается изображение Полярной звезды

при условии изготовления оптических элементов устройства без ошибок.

Такой плоскостью является плоскость фотоприёмника объектива наблюдательного устройства. На эту плоскость свет от Полярной звезды попадает от отражательной грани призмы, расположенной под углом  $\varphi$  к горизонтальной плоскости в точке наблюдения, равным широте точки наблюдения. На практике не всегда можно иметь координаты точки наблюдения ( $\varphi$  и  $\lambda$ ) в начале измерений. Ниже мы покажем, как можно ослабить требования к изготовлению оптических элементов устройства, взяв за основу измерение азимута (направления на Полярную звезду), и с помощью вычислений определить направление меридиана в горизонтальной плоскости в точке наблюдения.

В процессе измерений синхронно с сигналами точного времени считывают координаты центра изображения светила на матрице приёмного устройства. Способы определения центра изображения известны. Далее в каждом такте измерений производят следующие вычисления.

Определяют координаты середины хорды, соединяющей первую точку на траектории светила со второй, затем первую с третьей и т.д. по формулам

$$X_{cn} = (X_n + X_1)/2, Y_{cn} = (Y_n + Y_1)/2, \quad (4)$$

где  $n$  — номер точки на траектории,  $c$  — середина хорды, соединяющей первую и последующие точки.

Определяют  $\operatorname{tg} \chi_1$ , где  $\chi_1$  — угол в градусах между прямой, проходящей через точки 1–2, 1–3 и т.д., и горизонтальной осью матрицы приёмного устройства, как отношение приращения координат  $X$  и  $Y$  относительно координат первой точки наблюдения

$$\operatorname{tg} \chi_1 = (Y_n - Y_1)/(X_n - X_1). \quad (5)$$

Определяют  $\operatorname{tg} \chi_2$ , где  $\chi_2$  — угол в градусах между прямой, проходящей через середину хорды, соединяющей две точки на траектории перемещения светила, и центр этой траектории и той же осью матрицы приёмного устройства. При этом углы  $\chi_1$  и  $\chi_2$  связаны соотношением

$$\operatorname{tg} \chi_1 \operatorname{tg} \chi_2 = -1, \quad (6)$$

что соответствует окружности.

Решая систему из двух уравнений

$$\begin{cases} (Y_{c_1} - Y_p) = \operatorname{tg} \chi_2 (X_{c_1} - X_p) \\ (Y_{c_n} - Y_p) = \operatorname{tg} \chi_n (X_{c_n} - X_p) \end{cases} \quad (7)$$

находят координаты  $X_p, Y_p$  центра траектории или положение проекции на плоскости фотоприёмника точки  $P$  (полюса мира).

Далее усредняют координаты центра траектории  $X_p$  и  $Y_p$ , по которой движется светило, например, методом наименьших квадратов.

Решая систему из двух уравнений, приведённых в линейный вид, с двумя неизвестными, определяют местное время  $u$  и широту  $\varphi$

$$\begin{cases} \operatorname{ctg} A_N = \sin \varphi \operatorname{ctg} t_1 - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_1 \operatorname{cosec} t_1 \\ \operatorname{ctg} A_N = \sin \varphi \operatorname{ctg} t_n - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_n \operatorname{cosec} t_n \end{cases}, \quad (8)$$

где  $A_N$  — азимутальный угол Полярной звезды в момент измерения, равный

$$A_N = \operatorname{arctg}(X_n/f) - \operatorname{arctg}(X_p/f), \quad (9)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива устройства,  $t_n = s - \alpha_n = T_n + u - \alpha_n$ ,  $n$  — номер точки на траектории. При этом  $T_n$  — момент времени измерений, синхронный с сигналами точного времени, а экваториальные координаты  $\alpha_n$  и  $\delta_n$  берут из звёздного каталога.

Для решения задачи определения направления меридиана в точке наблюдения нами предложено устройство для определения астрономических координат объекта. Устройство позволяет в реальном масштабе времени определять с высокой точностью угловые координаты подвижных и неподвижных объектов наблюдения и тем самым астрономические координаты в точке наблюдения в условиях ограниченного доступа к стационарной геодезической сети и нестабильных условиях наблюдения [8].

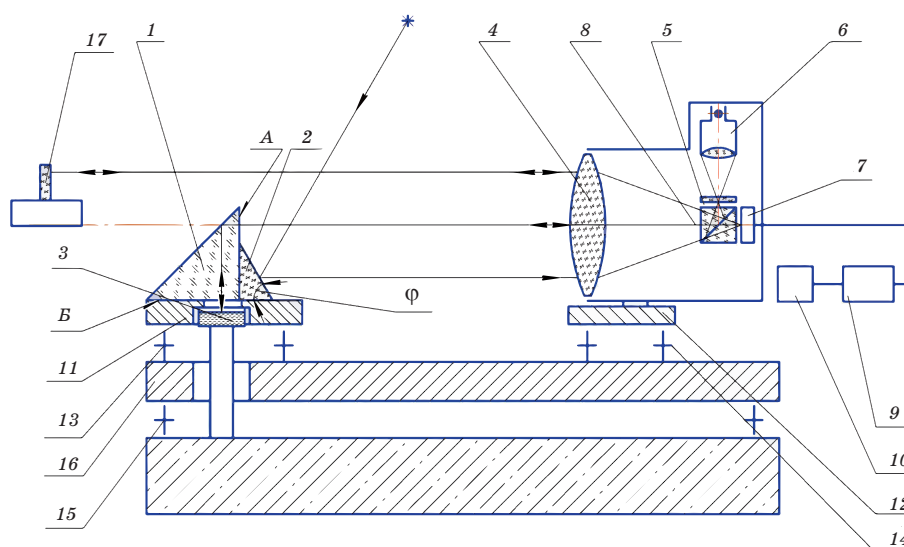
В устройстве на общем основании установлен оптический блок, автоколлимационный блок и отражательный горизонт. Оптический блок имеет три жёстко связанные между собой отражающие грани, две из которых наклонные, одна — вертикальная.

Автоколлимационный блок содержит объектив, тест-объект и отсчётный узел. Отражательный горизонт оптически сопряжён с первой отражательной наклонной гранью оптического блока и с объективом. С объективом в свою очередь сопряжена вторая отражательная наклонная грань, а третья грань установлена перпендикулярно оптической оси объектива.

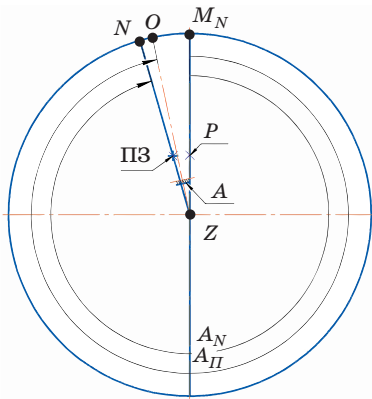
В этом устройстве оптический блок выполнен из двух жёстко связанных базовыми гранями призм. Одна из призм выполнена в виде призмы  $AP-90^\circ$  и имеет опорную грань, обращённую в сторону отражательного горизонта, и базовую грань, обращённую в сторону объектива. Во второй призме значение угла  $\theta$  между отражающей и базовой гранями находится в интервале  $[(\varphi - \eta)/2, \varphi/2]$ , где  $\varphi$  — широта точки наблюдения,  $\eta$  — угол поля зрения объектива.

При этом отношение размеров отражающих граней призм выбрано из условия обеспечения равенства интенсивностей отражённых сигналов. Базовые грани призм соединены так, что главные сечения обеих призм лежат в одной плоскости, перпендикулярной плоскости отражательного горизонта и проходящей через оптическую ось объектива призмы. Отсчётный узел выполнен в виде матричного приёмного устройства, соединённого с вычислительным блоком, связанным с датчиком точного времени.

На рис. 3 представлено устройство для определения астрономических координат объекта в сечении плоскостью, совпадающей с плоскостью главных сечений призм и проходящей через оптическую ось объектива.



**Рис. 3.** Устройство для определения астрономических координат. А — базовая грань призмы, В — опорная грань призмы,  $\varphi$  — угол между отражающей гранью призмы 2 и горизонтальной плоскостью, призма 1, призма 2, отражательный горизонт 3, объектив 4, марка 5, осветитель 6, матрица приёмного устройства 7, визирная ось устройства 8, вычислительное устройство 9, датчик точного времени 10, 11–16 — юстировочные приспособления, контрольный элемент 17 тестируемого прибора.



**Рис. 4.** Проекция небесной сферы на горизонтальную плоскость в точке наблюдения.  $Z$  — положение зенита на горизонтальной плоскости,  $ZN$  — горизонтальное направление на Полярную звезду,  $ZO$  — визирная ось устройства,  $PЗ$  — проекция Полярной звезды на горизонтальную плоскость,  $ZM_N$  — направление меридиана в точке наблюдения,  $P$  — проекция полюса мира на горизонтальную плоскость,  $A$  — базовая грань призмы в призмном блоке,  $A_N$  — азимутальный угол Полярной звезды,  $A_n$  — азимутальный угол визирной оси устройства.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. В точке наблюдения (точка  $Z$  на рис. 4) в горизонтальной плоскости, построенной с помощью объектива 4, призмы 1 ( $A$  — базовая грань призмы на рис. 4) и отражательного горизонта 3, определяют в горизонтальном круге положение визирной оси устройства. На рис. 4 это направление обозначено как « $O$ ». Визирная ось является одной из координатных осей устройства в прямоугольной системе координат.

Определение значения азимутального угла Полярной звезды ( $N$  — направление на светило на рис. 4) с помощью вычислительного блока 9 ведётся непрерывно, синхронно с датчиком точного времени 10. Измерение осуществляется относительно визирной оси устройства, проходящей через « $O$ » системы координат матрицы приёмного устройства 7.

Для того чтобы вычислить угловое отклонение визирной оси устройства от направления на север ( $M_N$  на рис. 4) с помощью вычислительного блока 9 определяют положение центра траектории, по которой перемещается изображение Полярной звезды в плоскости матрицы приёмного устройства (точка  $P$  на рис. 4). Для этого, за 2–3 часа времени наблюдения берут на траектории минимум 5 точек и производят вычисления координат центра траектории по формулам (8).

При подготовке к работе оптический блок, содержащий призму 1 с призмой 2, и объектив 4 с фокальным узлом с помощью юстировочных узлов 12 и 13 устанавливают друг относительно друга так, что автоколлимационное изображе-

ние марки 5 от базовой поверхности призмы 1 попадёт в центр матрицы приёмного устройства 7. Достигнутое взаимное расположение оптического блока и объектива 4 с фокальным узлом фиксируют с помощью зажимных элементов юстировочных узлов 12 и 13.

При проведении измерений основание 16 устанавливают в горизонтальной плоскости в направлении полюса (в данном случае севера) с точностью 0,5–1 угловых минут с азимутом, противоположным азимуту светила, в данном случае, Полярной звезды. Перемещая устройство в горизонтальной плоскости, добиваются попадания изображения Полярной звезды на матрицу в тот квадрант, который соответствует времени наблюдения светила (это известно из таблиц наблюдений). После этого, используя юстировочные узлы 15 и 16, устройство устанавливают так, что центр автоколлимационного изображения марки 5 от отражательного горизонта 3 попадает в центр координат матрицы приёмного устройства 7. Такое совпадение двух автоколлимационных изображений марки 5 свидетельствует о том, что визирная ось устройства расположена горизонтально и совпадает с одной из осей прямоугольной системы координат, в которой производятся измерения астрономических координат светила.

Параллельный световой пучок, излучаемый Полярной звездой, отражаясь от наклонной грани призмы 2, попадает в поле зрения объектива 4, который формирует изображение звезды на поверхности матрицы приёмного устройства 7.

С помощью вычислительного блока 9 определяют координаты центра изображения Полярной звезды, которые в совокупности с данными времени момента наблюдения, поступающими от датчика точного времени 10, используются для вычисления астрономического азимута Полярной звезды и направления меридиана.

После этого получают на матрице приёмного устройства 7 автоколлимационное изображение сигнала от контрольного элемента тестируемого навигационного прибора 17, как правило, это автоколлимационное изображение марки 5.

Если стоит задача корректировки навигационного прибора, то сравнивая координату  $X$  центра изображения автоколлимационного сигнала и полюса, определяют величину азимутальной поправки, которую вводят в навигационный прибор 17.

Предлагаемое устройство позволяет повысить точность определения астрономических координат объектов и одновременно наблюдать плоскость горизонта и расположение светила во время сеанса работы с тестируемым объектом. Это делает возможным оценку стабильности положения визирной оси устройства относительно меридиана и при необходимости осуществления корректировки,

уменьшив влияние нестационарных факторов, таких как изменение температуры, воздушных потоков, вибрации, на результаты измерения.

Предложенное конструктивное решение оптического блока позволяет также существенно уменьшить влияние ошибок изготовления призм, таких как погрешности угловых размеров, пирамидальность призм, непосредственно влияющих на результат измерения. Этого добиваются при сборке оптического блока, контролируя расположение главных сечений призм 1 и 2, и жёстко фиксируя их с помощью оптического контакта или склейки. Величину остаточной погрешности углов паспортизируют и учитывают в качестве поправок при проведении расчётов.

Совмещение вертикальной плоскости, проходящей через визирную ось устройства, с плоскостью меридиана позволяет избавиться от ошибок, подобных параллаксу, связанных с наблюдением объекта из разных точек, или пересчёту его положения в разных системах координат.

В конструкции устройства отсутствуют подвижные узлы и детали, используемые непосредственно в процессе измерений, поэтому отсутствуют погрешности измерений, связанные с характерными для них ошибками: зазорами в направляющих, неравномерностью хода, трением и т.д.

Способы уменьшения влияния случайных факторов, связанных с нестабильностью условий наблюдения (атмосферными искажениями, вибрацией и т.д.) известны и основаны на применении специальных устройств (астроиллюминаторов, светопроводов) [9], математических статистических методов обработки результатов наблюдений, повышении быстродействия электронных элементов и устройств.

В случае, если оптический блок собран с ошибками, то паспортизовав его, получим  $\varepsilon$  — ошибку изготовления призмы в горизонтальном сечении и  $\zeta$  — ошибку изготовления призмы в вертикальном сечении.

В этом случае соотношение (6) принимает вид

$$\operatorname{tg}\chi_1 \operatorname{tg}\chi_2 = -(\cos\varepsilon/\cos\zeta)^2, \quad (10)$$

где  $-1 \leq \operatorname{tg}\chi_1 \operatorname{tg}\chi_2 < 0$ , а  $\varepsilon$  — ошибка изготовления призмы в горизонтальном сечении,  $\zeta$  — ошибка изготовления призмы в вертикальном сечении.

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчёта координат центра траектории Полярной звезды при условии изготовления призмленного блока без ошибок, а также с ошибкой в одной из плоскостей, горизонтальной или вертикальной, равной величине угла поля зрения объектива  $\eta$ . Расчёты проведены из предположения, что центр изображения светила определён без ошибок, и форма дифракционного пятна рассеяния изображения звезды не изменяется во время движения по траектории.

**Таблица 1. Результаты расчёта координат центра траектории перемещения Полярной звезды\***

Момент измерений $T$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
$X_p$	–	–0,004	0,0004
$Y_p$	–	–0,002	0,000
Момент измерений $T$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
$X_p$	0,002	–0,0002	0,0005
$Y_p$	–0,002	0,0000	0,0008
Момент измерений $T$	$T_7$	$T_8$	$T_9$
$X_p$	–0,0002	–0,0003	0,0001
$Y_p$	0,0022	–0,0054	–0,0005

\* Оптический блок изготовлен без ошибок, величины углов призм находятся в допусках. Траектория движения Полярной звезды — окружность.  $\operatorname{tg}\chi_1 \operatorname{tg}\chi_2 = -1$ ,  $R = 10$  мм. Для расчёта координат центра на траектории выбраны следующие 10 точек:  $(8,6602, -5,0)_1$ ,  $(8,0, -6,0)_2$ ,  $(7,1414, -7,0)_3$ ,  $(6,0, -8,0)_4$ ,  $(4,3588, -9,0)_5$ ,  $(0, -10,0)_6$ ,  $(-4,3588, -9,0)_7$ ,  $(-6,0, -8,0)_8$ ,  $(-7,1414, -7,0)_9$ ,  $(-8,0, -6,0)_{10}$ .

**Таблица 2. Результаты расчёта координат центра траектории перемещения Полярной звезды\***

Момент измерений $T$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
$X_p$	–	–0,0611	0,003
$Y_p$	–	–0,0334	–0,0014
Момент измерений $T$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
$X_p$	–0,0013	0	0,00007
$Y_p$	–0,002	–0,001	0,0003
Момент измерений $T$	$T_7$	$T_8$	$T_9$
$X_p$	–0,0004	–0,0001	0,00001
$Y_p$	0,0033	0,0013	–0,0003

\* Траектория движения Полярной звезды — эллипс  $\operatorname{tg}\chi_1 \operatorname{tg}\chi_2 = -(\cos\eta)^2$ , как следствие неортогональности оси светового пучка к плоскости матрицы приёмного устройства. Большая полуось эллипса  $a = r/\cos\eta$ , малая полуось эллипса  $b = r$ ,  $b = 10$  мм,  $\eta = 1,5^\circ$ . Для расчёта координат центра на траектории выбраны следующие 10 точек:  $(8,6628, -5,0)_1$ ,  $(8,0024, -6,0)_2$ ,  $(7,1436, -7,0)_3$ ,  $(6,0018, 8,0)_4$ ,  $(4,3602, -9,0)_5$ ,  $(0, -10,0)_6$ ,  $(-4,3602, -9,0)_7$ ,  $(-6,0018, -8,0)_8$ ,  $(-7,1436, -7,0)_9$ ,  $(-8,0024, -6,0)_{10}$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что после трёх часов наблюдения за светилом расчёт направления меридиана может быть проведён с точностью порядка сотых долей угловой секунды.

С учётом вышесказанного оценка суммарной погрешности определения азимутальных координат объекта с использованием предлагаемого устройства может составить не более 0,2–0,3 угловых секунд.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Кузнецов П.Н., Васютинский И.Ю., Ямбаев Х.К.* Геодезическое инструментоведение: Учебник для вузов. М.: Недра, 1984. 364 с.
2. *Седов Л.А.*, А.с. № 1585681. Бюл. изобр. 1990. № 20.
3. *Колосов М.П.* Оптика адаптивных угломеров. Введение в проектирование: монография. М.: Логос, 2011. 256 с.
4. *Колосов М.П., Гебгарт А.Я.* Патент России № 2442109. 2010.
5. *Ямбаев Х. К.* Специальные геодезические приборы для инженерно-геодезических работ. М.: Недра, 1990. 267 с.
6. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1964. 848 с.
7. *Уралов С.С.* Курс геодезической астрономии. М.: Недра, 1980. 592 с.
8. *Азаров С.А., Цветков В.И., Чудаков Ю.И.* Патент России № 2654932. 2018.
9. *Чудаков Ю.И., Угрюмов А.В., Азаров С.А., Цветков В.И., Сергеев В.А.* Патент России на полезную модель № 137630. 2013.