

А. В. СОКОЛОВ, С. В. ГАЙВОРОНСКИЙ, Н. В. КУЗЬМИНА, С. М. ТАРАСОВ, В. В. ЦОДОКОВА

## ВЫСОКОТОЧНЫЕ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

*Разработка автоматизированных астрономо-геодезических оптико-электронных комплексов началась еще в конце 1980-х гг. и благодаря прогрессу в оптоэлектронной технике, освоению новых технологий, основанных на применении ПЗС-, а затем и КМОП-матриц, успешно продолжается и в настоящее время. В статье освещен вопрос совершенствования технологии создания астрономо-геодезических комплексов, рассмотрены принципы их структуры и действия, приведены состав и основные технические характеристики.*

**Ключевые слова:** автоматизированный астрономо-геодезический комплекс, оптико-электронный прибор, астрономический азимут, астрономические координаты.

### Введение

Астрономо-геодезические приборы обеспечивают определение географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений путем астрономических наблюдений. Это позволяет решать задачи, связанные с ориентацией геодезических сетей, уточнением математической модели формы Земли и параметров общеземного и референц-эллипсоида, выполнением редукционных преобразований в процессе обработки геодезических измерений, а также с организацией инженерно-геодезических работ при строительстве крупных наземных сооружений, тоннелей и пр.

В настоящее время в практике отечественной геодезической астрономии для высокоточного определения астрономических азимутов и координат применяются астрономические теодолиты ДКМЗ-А (Kern & Co., Швейцария) и АУ-01 (ЦНИИГАиК, Россия, с середины 80-х гг. XX в.). Они используются в комплексах, в состав которых также входят астрономические часы, служащие шкалой измерения времени при регистрации моментов наблюдений светил, хронографы – приборы для фиксации результатов наблюдений и аппаратура для приема сигналов радиостанций служб времени, имеющая каналы связи с часами и хронографом [1, 2].

---

**Соколов** Александр Вячеславович. Доктор технических наук, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член общественного объединения «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0002-6423-1591.

**Гайворонский** Станислав Викторович. Кандидат технических наук, заместитель начальника НТЦ «Навигация» по диверсификации, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

**Кузьмина** Наталья Валерьевна. Кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

**Тарасов** Сергей Михайлович. Научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

**Цодокова** Вероника Владимировна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

В ходе высокоточных астрономических наблюдений с помощью астрономических теодолитов необходимо учитывать влияние различных составляющих инструментальной погрешности: коллимационной погрешности, наклона горизонтальной оси, бокового гнутия трубы, погрешности формы цапф и пр. [1]. Для этого перед наблюдениями приборы тщательно исследуют. Кроме того, оценивание показаний хронометра или часов на слух в моменты визирования светил характеризуется значительной систематической погрешностью, связанной с человеческим фактором, а также большими случайными погрешностями процесса наблюдений. В связи с этим возрастают требования к квалификации исполнителей и продолжительность наблюдений.

Для уменьшения влияния указанных факторов и повышения производительности работ необходимо использовать полуавтоматические и автоматические методы наблюдений светил с привлечением специальных приборов, прежде всего фотоприемных устройств (ФПУ) на основе ПЗС-, КМОП-матриц, которые позволяют автоматизировать процесс регистрации светил, наблюдать слабые объекты, а также обеспечивают цифровое представление результатов и обработку данных на компьютере в реальном времени. Автоматически может осуществляться и привязка наблюдений к шкале точного времени при помощи приемника сигналов спутниковых навигационных систем, определяющего всемирное координированное время UTC с высокой точностью и формирующего сигналы синхронизации, соответствующие секундной метке времени UTC.

В университетах Ганновера и Цюриха созданы цифровые зенитные камеры, в автоматическом режиме оперативно вырабатывающие астрономические координаты и составляющие уклонения отвесной линии (УОЛ) с погрешностями не более 0,3" менее чем за час наблюдений [4, 5]. Работы по созданию аналогичных приборов ведутся и в других странах – Австрии [6], Турции [7], Китае [8], Латвии [9]. Отечественный астроизмеритель такого типа разработан ФГУП «ВНИИФТРИ» [10]. Кроме того, для астрономических наблюдений применяются модифицированные тахеометры и теодолиты [11–15], однако следует отметить, что это единичные уникальные изделия.

Настоящая статья посвящена разработанным и серийно изготавливаемым АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» астрономо-геодезическим оптико-электронным комплексам.

Рассмотрены всеширотная автоматическая астролябия и комплекс определения составляющих УОЛ в морских условиях, с разработки которых в рамках научно-исследовательских работ конца 1980-х гг. и начало формироваться в ЦНИИ «Электроприбор» направление по созданию автоматизированных астрономо-геодезических оптико-электронных комплексов. Эти приборы имели в основе растровые телевизионные системы с фотоприемным устройством невысокой чувствительности и не обеспечивали наблюдения необходимого для высокоточных расчетов количества звезд.

Далее описаны создаваемые в ЦНИИ «Электроприбор» с 2007 г. комплексы стационарного размещения: оптико-электронный астровизир и автоматизированный астрономический комплекс определения азимута опорного геодезического направления (ОГН). При их разработке уже были использованы технологии ПЗС и КМОП, позволившие достичь высокой точности, требуемой для эталонирования гиротеодолитов и гирокомпасов.

В завершение освещаются системы, работающие в полевых условиях: автоматизированный комплекс для высокоточного и оперативного определения составляю-

ших УОЛ и астрономический прибор для высокоточного и оперативного определения астрономических координат, азимутов наземных ориентиров и горизонтальных углов между заданными направлениями.

Описаны принципы действия всех комплексов, их состав и приведены основные технические характеристики.

### Всеширотная автоматизированная астролыбия

В ходе решения задачи по созданию комплекса для определения составляющих УОЛ на малоподвижных основаниях и в труднодоступных районах, таких как Арктика, в конце 1980-х гг. был разработан экспериментальный образец всеширотной автоматизированной астролыбии (рис. 1, 2) [16, 17]. Принцип ее действия основывался на применении астрономо-геодезического метода, заключающегося в сравнении астрономических и геодезических координат одной и той же точки земной поверхности. Геодезические координаты вырабатываются по данным глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а астрономические – по звездам.

При использовании такого астрономического инструмента фиксируются высоты звезд, находящихся на заданном альмукантарате. Зенитное расстояние альмукантарата определяется эталонной призмой. Пучок света от звезды поступает в прибор и эталонной призмой оптически разделяется на два, таким образом, в фокальной плоскости объектива наблюдаются прямое и обратное изображения звезды.



Рис. 1. Экспериментальный образец всеширотной автоматизированной астролыбии

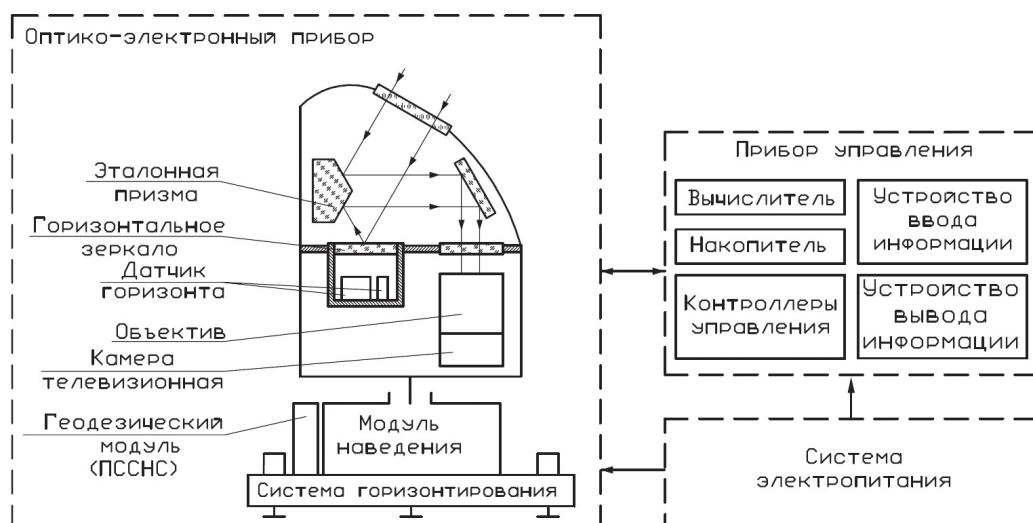


Рис. 2. Функциональная схема всеширотной автоматизированной астролыбии

В процессе наблюдения регистрируется последовательность кадров, содержащих два изображения пеленгуемой звезды, с одновременной фиксацией времени регистрации. В каждом кадре вычисляются координаты энергетических центров изображений, по которым рассчитывается вертикальный угол между изображениями. Далее, используя модифицированную формулу метода равных высот, вычисляют астрономические координаты точки размещения [16].

Исследования, проведенные с экспериментальным образцом астролябии, принципиально доказали возможность расчета составляющих УОЛ со среднеквадратической погрешностью (СКП), не превышающей 1".

Основные недостатки разработанного инструмента:

- необходима высокоточная аттестация углов эталонной призмы, так как ее погрешности напрямую входят в погрешности расчета составляющих УОЛ;
- масштабный коэффициент для пересчета линейного расстояния между изображениями звезд в плоскости ФПУ в угловое оценивается для всего сеанса наблюдений, следовательно, изменение фокусного расстояния объектива в это время (например, из-за перепадов температур) может привести к увеличению погрешностей расчета составляющих УОЛ;
- точность расчета координат звезд в видимом положении в значительной степени зависит от модели учета рефракции;
- расчет составляющих УОЛ выполняется только на малоподвижном основании.

Для определения УОЛ в любой точке Мирового океана в начале 1990-х гг. были выполнены исследования по созданию астрономо-геодезического комплекса [16, 17]. По своей структуре и характеристикам он близок к устройствам, позволяющим вычислять УОЛ инерциальными методами. Принципиальное отличие состоит в том, что вместо традиционного построения плоскости истинного горизонта и связанных с этим погрешностей аппаратура комплекса по данным ГНСС и наблюдениям околозенитных звезд вырабатывает геодезическую вертикаль – нормаль к поверхности земного эллипсоида.

Преимущества такого оптико-электронного инструмента перед астролябией основываются на необходимости измерения лишь малых углов в поле зрения вертикальной телекамеры и снижении влияния атмосферных рефракций в околозенитной области.

Однако использование исключительно околозенитных звезд потребовало повышения чувствительности фотоприемника. В то время в качестве такого устройства применялись только растровые телевизионные системы (электронно-лучевые трубки), которые вносили в измерения координат наблюдаемых объектов большие погрешности, обусловленные геометрическими искажениями.

### **Оптико-электронный астровизир**

Благодаря развитию оптоэлектронной техники, с появлением и освоением на предприятии технологий, основанных на применении ПЗС-приемников, в 2007 г. ЦНИИ «Электроприбор» начал разработку оптико-электронного астровизира для высокоточного определения астрономического азимута ОГН, расчета приборных поправок гиротеодолитов и гирокомпасов. В 2011 г. опытный образец изделия успешно прошел государственные испытания [18, 19].

Принцип действия астровизира основан на методе определения астрономического азимута по часовому углу Полярной звезды. Телевизионная камера регистрирует

последовательность кадров с изображением пеленгуемой звезды с одновременной фиксацией времени регистрации каждого кадра, измерением в нем горизонтального угла между направлением на звезду и ОГН и последующим расчетом азимута звезды в наблюдаемом положении и астрономического азимута ОГН.

Для повышения точности вычисления астрономического азимута в изделии реализованы следующие технические решения:

- для автоматизации процесса наблюдения применена фотоэлектрическая регистрация, которая предотвращает ошибки наблюдателя и повышает оперативность определений;
- погрешность из-за гнуптия трубы устраняется за счет горизонтальной схемы инструмента;
- для исключения коллимации и наклона горизонтальной оси задействован визирный элемент со стационарным углом наклона;
- в качестве хранителя ОГН использовано вертикальное зеркало.

Оптическая функциональная схема астровизира показана на рис. 3.

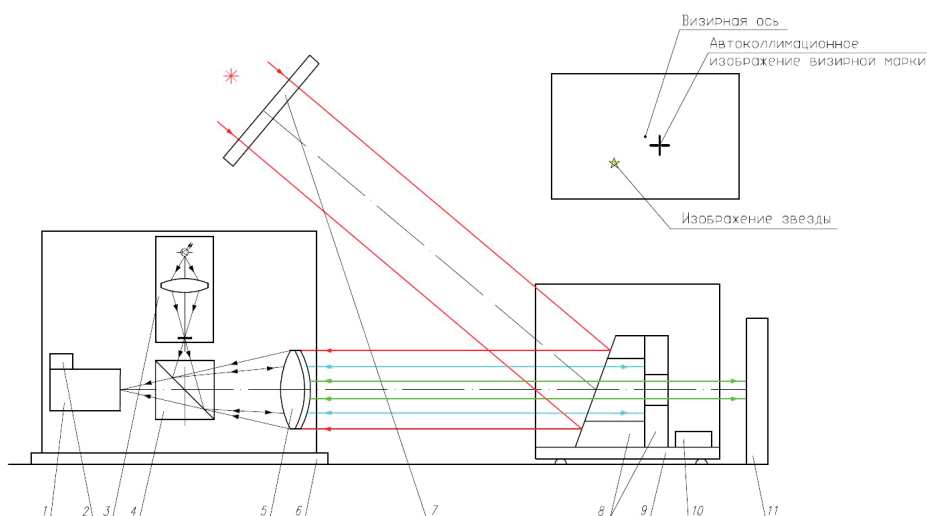


Рис. 3. Оптическая функциональная схема астровизира: 1 – ТВ-камера; 2, 10 – датчики горизонта; 3 – осветитель визирной марки; 4 – призма-куб; 5 – объектив; 6 – основание визира-автоколлиматора; 7 – астроиллюминатор; 8 – КЭ; 9 – основание; 11 – внешний КЭ

Наблюдение за Полярной звездой ведется через астроиллюминатор при помощи контрольного элемента (КЭ), состоящего из двух зеркал: наклонного, обеспечивающего визирование звезды, и вертикального. Вертикальное зеркало двустороннее, нормали к его поверхностям задают ОГН как для самого астровизира, так и для внешних автоколлимационных угломерных устройств. КЭ позволяет совместить в поле зрения визира-автоколлиматора изображение Полярной звезды и полученное при отражении от внутренней поверхности вертикального зеркала КЭ изображение автоколлимационной марки, сформированной автоколлимационным каналом визира-автоколлиматора. По величине линейного смещения изображения автоколлимационной марки относительно изображения Полярной звезды вычисляется горизонтальный угол между направлением на нее и нормалью ко внутренней поверхности собственного КЭ. Из значений азимута Полярной звезды в наблюдаемом положении



нии, вычисленных с помощью включенного в программное обеспечение звездного каталога, и горизонтального угла рассчитывается азимут нормали к поверхности собственного КЭ. Положение КЭ и телевизионной камеры относительно плоскости горизонта контролируется датчиками горизонта.

При передаче направления на внешний КЭ в зоне видимости визира-автоколлиматора наблюдаются два изображения автоколлимационной марки, полученные при отражении от поверхностей собственного и внешнего КЭ. По величине линейного смещения изображений марки относительно друг друга определяется горизонтальный угол между нормальными к поверхности собственного и внешнего КЭ, далее рассчитывается азимут нормали к поверхности внешнего КЭ.

Масштаб изображения (угловой размер пикселя ФПУ) устанавливается на предприятии-изготовителе в процессе калибровки на специальном стенде [19]. В ходе эксплуатации прибора при температуре окружающей среды, отличной от температуры, при которой велась калибровка, фокусное расстояние объектива астровизира может измениться, что повлечет за собой неконтролируемое изменение масштаба изображения и, как следствие, увеличение итоговой погрешности. В связи с этим в астровизире использован термонерасстраиваемый объектив.

При эксплуатации астровизир размещается внутри сооружения на стационарном виброизолированном фундаменте, наблюдение за Полярной звездой ведется через специальное окно в крыше – астроиллюминатор (рис. 4).

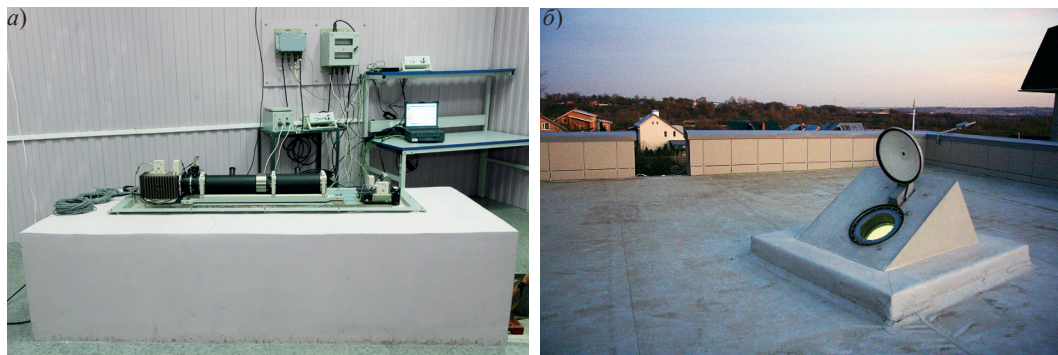


Рис. 4. Размещение астровизира: а) визир-автоколлиматор и блок контрольного элемента, установленные на фундаменте; б) астроиллюминатор в крыше сооружения

Основные недостатки разработанного астровизира:

- зависимость инструментальной погрешности определения астрономического азимута по наблюдениям Полярной звезды от широты места;
- необходимость калибровки масштабного коэффициента визира-автоколлиматора и обеспечения его стабильности в процессе эксплуатации;
- разработка и изготовление КЭ для каждого объекта размещения устройства;
- необходимость точной выставки (с погрешностью до 10 угл. мин) линии визирования визира-автоколлиматора в плоскость меридиана для наблюдения всей траектории движения Полярной звезды в поле зрения оптического прибора.

Для устранения указанных недостатков и уменьшения погрешности определения астрономического азимута ОГН в 2016 г. началась модернизация астровизира, которая успешно завершилась в 2020 г. В результате был разработан автоматизированный астрономический комплекс определения азимута опорного направления [20].

### **Автоматизированный астрономический комплекс определения азимута опорного направления**

Развитие микроэлектроники, а также технологий изготовления ПЗС- и КМОП-матриц за два последних десятилетия позволило существенно усовершенствовать ряд параметров ФПУ – в первую очередь увеличилась квантовая эффективность и чувствительность, улучшились шумовые характеристики.

Благодаря применению КМОП-матриц в астрономических оптико-электронных приборах появилась возможность наблюдать менее яркие звезды (до 12-й звездной величины). Это позволило реализовать метод определения астрономического азимута по наблюдению множества звезд.

Схема астрономического комплекса аналогична схеме астровизира. Однако здесь применяется метод расчета астрономического азимута по наблюдению множества звезд вблизи меридиана и круга равных высот с фиксированным значением  $40^\circ$  (оптимальная высота, найденная с учетом влияния инструментальных погрешностей и боковой рефракции). При таком методе не возрастает инструментальная погрешность при эксплуатации устройства в высоких широтах, а одновременное наблюдение множества звезд в кадре позволяет, во-первых, уменьшить погрешность снятия с матричного ФПУ отсчетов, соответствующих положениям объектов, а во-вторых, определять масштаб изображения непосредственно в процессе наблюдения, т.е. предотвратить влияние его изменения на итоговый результат. Кроме того, снижаются временные затраты, так как отсутствует предварительная калибровка устройства, а наблюдение звезд вблизи круга равных высот исключает разработку и изготовление КЭ для каждого объекта размещения комплекса.

При наблюдении регистрируется последовательность кадров, содержащих изображения звезд в зоне видимости прибора, с одновременной фиксацией времени их регистрации. После регистрации производится первичная обработка изображения, включающая фильтрацию (для исключения шумовой и фоновой составляющих) и поиск объектов. Затем вычисляются координаты энергетических центров найденных объектов и формируется массив, их содержащий. С учетом геодезических координат точки размещения и времени регистрации кадра из звездного каталога выделяется область, содержащая предположительно все звезды, в текущий момент попадающие в поле зрения прибора, и формируется массив из их координат (азимутов и высот).

После создания двух массивов – из координат видимых объектов и координат звезд из каталога – проводится идентификация звезд [21]. Ее результатом является массив, где сопоставляются координаты видимых на изображении звезд и звезд из каталога. По нему производится расчет параметров преобразования между системой координат ФПУ и стандартной системой координат [22], с использованием которых координаты центральной точки ФПУ переводятся в горизонтальные координаты точки пересечения визирной осью небесной сферы. Дальнейший алгоритм расчета азимута ОГН аналогичен алгоритму астровизира.

Астрономический комплекс, так же как астровизир, при эксплуатации размещается внутри сооружения на стационарном виброизолированном фундаменте, наблюдение за звездами ведется через астроиллюминатор. Погрешность выставки линии визирования прибора относительно плоскости меридиана может составлять до 30 угл. мин.

В настоящее время модернизированный астрономический комплекс производится серийно. Несмотря на высокую точность вычисления астрономического азимута, он не лишен недостатков, основным из которых является невозможность применения в полевых условиях в связи с габаритными и конструктивными ограничениями.

### Автоматизированный комплекс для высокоточного и оперативного определения составляющих уклонения отвесной линии

Следующим шагом в развитии астрономо-геодезического направления стала разработка автоматизированного комплекса для высокоточного и оперативного определения составляющих уклонения отвесной линии (АКОЛ), функционирующего в полевых условиях. Благодаря опыту, полученному в конце 1990-х гг. при исследованиях по созданию комплексов для расчета составляющих УОЛ в морских условиях, в 2016 г. удалось успешно завершить эту работу.

Принцип действия АКОЛ основан на определении направления на расположенные непосредственно в зените звезды с известными экваториальными координатами (прямым восхождением  $\alpha$ , склонением  $\delta$ ). При этом используется эквивалентность астрономических координат (широты  $\varphi$  и долготы  $\lambda$ ) пункта наблюдения и экваториальных координат звезд. Составляющие УОЛ вычисляются согласно астрономо-геодезическому методу [23, 24].

Функциональная схема АКОЛ представлена на рис. 5. Основные компоненты комплекса – оптико-электронный прибор, прибор управления и устройства системы электропитания.

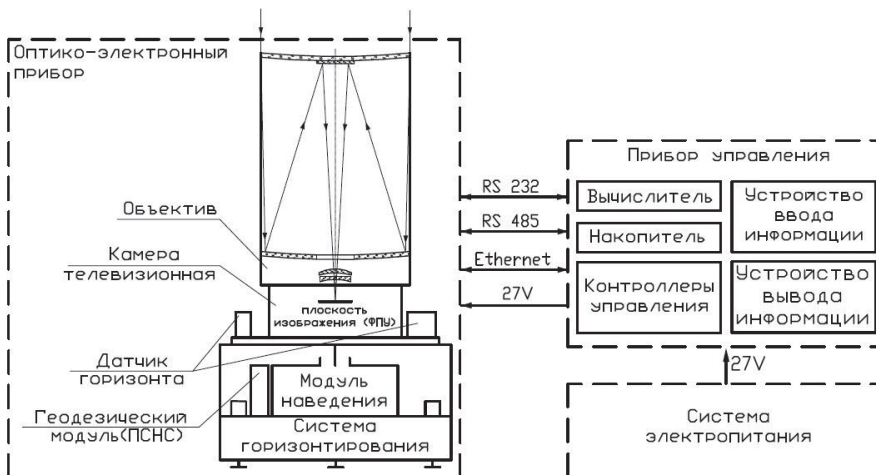


Рис. 5. Функциональная схема АКОЛ

Целью наблюдения является регистрация при помощи телевизионной камеры последовательности кадров с изображениями звезд, находящихся в околзенитной зоне (в пределах зоны видимости прибора), с одновременной фиксацией времени регистрации кадра. Расчет экваториальных координат точки пересечения визирной осью небесной сферы выполняется так же, как в астрономическом комплексе определения азимута, а затем с учетом гринвичского истинного звездного времени экваториальные координаты преобразуются в астрономические.



Для компенсации наклона оптической оси объектива относительно оси вращения оптико-электронного прибора и исключения влияния смещений нулей датчиков горизонта наблюдения проводят в двух диаметрально противоположных положениях (с разворотом прибора на  $180^\circ$ ). Итоговые астрономические координаты точки пересечения небесной сферы осью вращения оптико-электронного прибора получают осреднением астрономических координат, рассчитанных в двух положениях. После этого осуществляется коррекция наклона относительно горизонта и смещения мгновенного полюса относительно среднего.

Для эксплуатации АКОЛ размещается в требуемой точке, производится стыковка и соединение его составных частей (рис. 6). Следует отметить, что требования к стабильности положения оптико-электронного прибора не предъявляются, так как система горизонтирования автоматически отслеживает его наклон относительно горизонта и осуществляет соответствующую коррекцию.



Рис. 6. АКОЛ в ходе эксплуатации

Для подтверждения точностных характеристик АКОЛ были проведены испытания на пунктах Лапласа астрономо-геодезической сети, расположенных на разных широтах. Во всех случаях отклонения средних значений и СКП составляющих УОЛ, рассчитанных при помощи АКОЛ, не превышали допустимых величин.

### **Полевой автоматизированный астрономический прибор определения азимута**

Опыт, полученный при разработке комплексов определения астрономического азимута и составляющих УОЛ, позволил АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»

приступить к разработке полевого прибора для высокоточного и оперативного определения в полевых условиях астрономических координат (широты и долготы) места установки прибора, азимутов наземных ориентиров, задаваемых предметно-световыми визирными целями и автоколлимационными отражателями, а также горизонтальных углов между заданными направлениями.

Для наблюдения участка звездного неба и наземных ориентиров полевой астрономический прибор должен функционировать при различных положениях визирной оси (рис. 7), т.е. должен иметь механизмы, обеспечивающие наведение по вертикальному и горизонтальному углам.

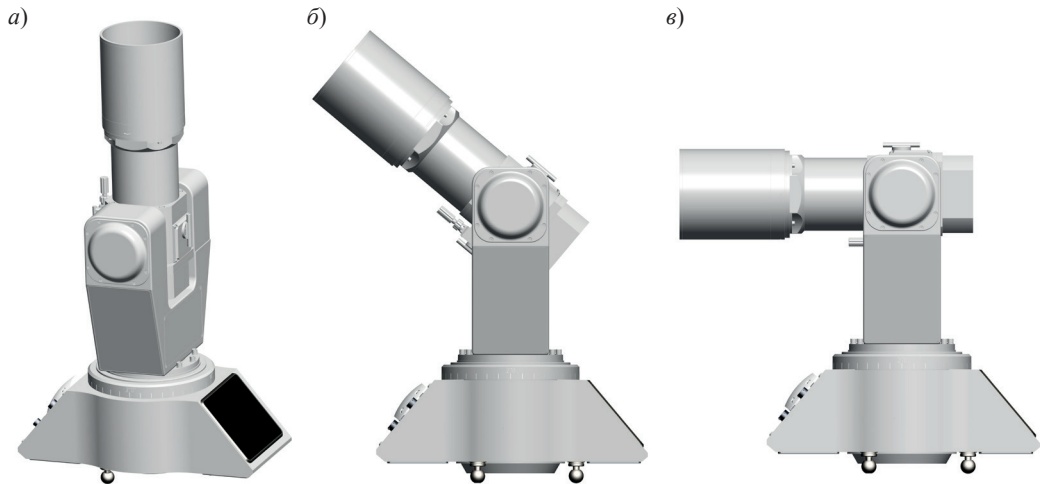


Рис. 7. Положения визирной оси астроуниверсала при определении: а) астрономических координат; б) азимута визирной оси; в) азимутов наземных ориентиров и горизонтальных углов между направлениями

На рис. 8 представлена функциональная схема полевого астрономического прибора, который состоит из автоматизированного астрономического универсала и системы электропитания, содержащей блок питания, блоки аккумуляторной батареи и зарядные устройства.

Астроуниверсал строится по схеме классического теодолита, в его состав входят:

- блок оптико-электронный (БОЭ), состоящий из зеркально-линзового объектива с автоколлимационным каналом, который позволяет наблюдать не только предметно-световые цели, но и автоколлимационные отражатели, и телевизионной аппаратуры на основе КМОП-матрицы;
- приводы вертикального и горизонтального наведения (ПВН и ПГН), обеспечивающие поворот визирной оси БОЭ в вертикальной и горизонтальной плоскости;
- система горизонтирования, отслеживающая наклон вертикальной оси вращения прибора относительно горизонта;
- приемник сигналов ГНСС;
- блок управления, где реализуется управление режимами работы астроуниверсала, хранится звездный каталог и обрабатываются данные астрономических наблюдений.

В отличие от классических астрономических инструментов полевой астрономический прибор не требует точного наведения на наземный ориентир – достаточно,

чтобы он наблюдался в поле зрения оптической системы. Положение наземного ориентира оценивается относительно визирной оси оптической системы прибора. Астрономический азимут визирной оси рассчитывается относительно наблюдаемых в зоне видимости прибора звезд по их взаимному положению.

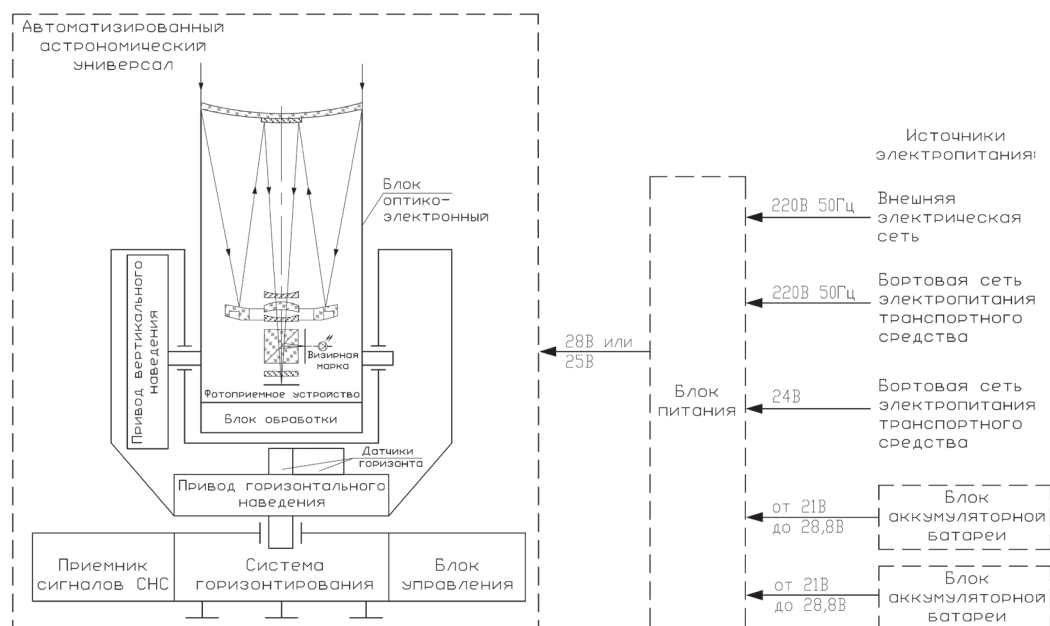


Рис. 8. Функциональная схема полевого астрономического прибора

Как показал опыт создания автоматизированных астрономо-геодезических комплексов, предпочтительным методом определения астрономического азимута является многократное наблюдение множества звезд, кульминирующих вблизи меридиана.

Для нахождения плоскости меридиана в полевых условиях необходимо реализовать режим определения астрономических координат согласно принципам, примененным в АКОЛ, в результате чего находят также азимут направления строки ФПУ [23].

Далее с использованием алгоритма астрономического комплекса определения азимута опорного направления вычисляется азимут визирной оси БОЭ  $A_{\text{ВО}}$ . Для этого БОЭ наводится на участок небесной сферы вблизи плоскости меридиана и круга равных высот  $h_{\text{ВО}}$  (рис. 9). Затем он наводится на наземный ориентир и одновре-

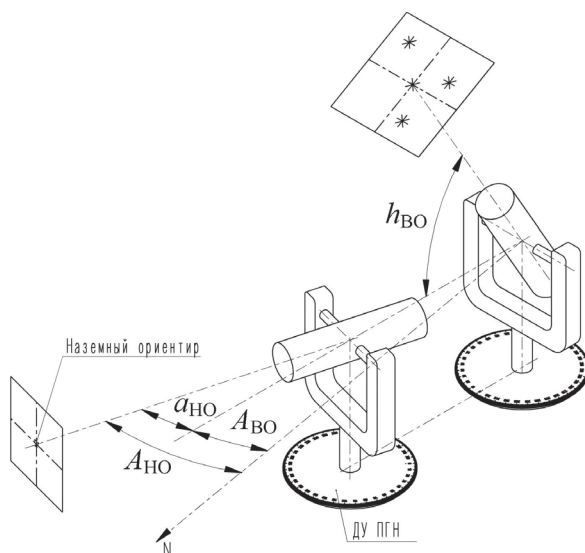


Рис. 9. Схема определения азимута наземного ориентира

менно рассчитывается горизонтальный угол  $a_{\text{но}}$  между положением визирной оси в моменты наблюдения звезд и наземного ориентира.

Таким образом, астрономический азимут наземного ориентира  $A_{\text{но}}$  вычисляется как сумма значений азимута визирной оси и горизонтального угла  $a_{\text{но}}$  между положениями визирной оси в моменты наблюдения звезд и наземного ориентира [25].

Для уменьшения систематических составляющих погрешности измерений [26] азимут определяют с перекладкой визирной оси БОЭ (последовательными ее поворотами вокруг осей вращения ПВН и ПГН).

При эксплуатации астроуниверсал устанавливается на штативе или астрономическом столбе (рис. 10).



Рис. 10. Размещение астроуниверсала при эксплуатации

Точностные характеристики прибора подтверждены проверками на испытательных полигонах, расположенных на разных широтах. Во всех случаях отклонения средних значений и СКП астрономических координат и астрономических азимутов, рассчитанных при помощи астроуниверсала, не превышали допустимых величин.

### Заключение

В статье освещен вопрос совершенствования астрономо-геодезических комплексов АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», предназначенных для оперативного высокоточного определения астрономических координат и азимутов опорного геодезического направления, в том числе в полевых условиях.

Показано, что направление разработки таких комплексов успешно развивается, а полученный опыт может быть применен при решении других задач, связанных с определением параметров гравитационного поля Земли.



# ЛИТЕРАТУРА

1. **Руководство по астрономическим определениям:** Геодезические картографические инструкции, нормы и правила. М.: Недра, 1984. 381 с.
2. **Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск.** Ч. 1. Геодезические работы. М.: РИО ВТС, 1980. 423 с.
3. **Гиенко Е.Г.** Астрометрия и геодезическая астрономия: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2011. 168 с.
4. **Hirt, C., Buerki, B.** Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21<sup>st</sup> Century. URL: [https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/pdf/Hirt\\_Buerki2006\\_status\\_geodetic\\_astronomy.pdf/](https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/pdf/Hirt_Buerki2006_status_geodetic_astronomy.pdf/).
5. **Hirt, C., Buerki, B.** The Digital Zenith Camera – A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Deflections of the Vertical, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Meeting International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy*, Thessaloniki, 2002, pp. 161–166.
6. **Gerstbach, G., Pichler, H.** A small CCD zenith camera (ZC-G1) – developed for rapid geoid monitoring in difficult projects, *Proceedings of the XIII National Conference of Yugoslav Astronomers. Astronomical Observatory of Belgrade*, 2003, no. 75, pp. 221–228.
7. **Halicioglu, K., Deniz, R., Ozener, H.** Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey, *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2012, vol. 1, iss. 2, pp. 115–120, <https://doi.org/10.9733/jgg.131212.1>.
8. **Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W., Wang, Z., Wang, B., Yin, Z., Wang, H.** Digital zenith telescope prototype of China, *Science China Press.*, 2014, pp. 1978–1983, <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0256-z>.
9. **Abele, M., Balodis, J., Janpaule, I., Lasmane, L., Rubans, A., Zarins, A.** Digital zenith camera for vertical deflection determination, *Geodesy and Cartography*, 2012, 38, pp. 123–129, <https://doi.org/10.3846/20296991.2012.755324>.
10. **Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Пругло А.В., Равдин С.С.** Результаты астроизмерений уклонов отвеса с использованием нового метода измерений // Альманах современной метрологии. 2020. № 2 (22). С. 42–56.
11. **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, <https://doi.org/10.1080/0396265.2016.1171960>.
12. **Baladimos, D.D., Korakitis, R., Lambrou, E., Pantazis, G.** Fast and accurate determination of astronomical coordinates  $\Phi$ ,  $\Lambda$  and azimuth using a total station and GPS receiver, *Survey Review*, 2003, vol. 37, pp. 269–275, <https://doi.org/10.1179/003962603791482604>.
13. **Lambrou, E., Pantazis, G.** Astronomical azimuth determination by the hour angle of Polaris using ordinary total stations, *Survey Review*, 2008, vol. 40, pp. 164–172.
14. **Khanzadyan, M.A., Mazurkevich, A.V.** Development of a method for measuring the astronomical azimuth using an electronic total station, *E3S Web Conf.* 310 03007 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131003007>.
15. **Луповка В.А., Брагин А.А.** Определение астрономического азимута с помощью электронного тахеометра с цифровой фотокамерой // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. №3. С. 51–58.
16. **Васильев В.А., Зиненко В.М., Коган Л.Б., Пешехонов В.Г., Савик В.Ф., Романенко С.К.** Всеширотная автоматическая астролябия // Кинематика и физика небесных тел. 1991. Т. 7. №3. С. 33–36.
17. **Патент РФ №2120108.** Устройство для определения астрономических координат / В.Г. Пешехонов, В.А. Васильев, В.М. Зиненко, Л.Б. Коган, А.Г. Латоха, С.К. Романенко, В.Ф. Савик, В.В. Троицкий. Заявл. 10.01.1990. Опубл. 10.10.1998. Бюл. №18.
18. **Гайворонский С.В., Кузьмина Н.В., Цодокова В.В.** Результаты разработки высокоточной оптико-электронной системы определения астрономического азимута // Материалы XXVIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 25.
19. **Гайворонский С.В., Цодокова В.В.** Метод определения калибровочных параметров оптико-электронного астровизира // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» / науч. ред. О.А. Степанов, под общ. ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 188–194.



20. Патент № 2800187 С1 Российская Федерация, МПК G01C 21/24. Устройство определения астрономического азимута. № 2023110778 / Н.В. Кузьмина, С.М. Тарасов, В.В. Цодокова; заявитель АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Заявл. 26.04.2023. Опубл. 19.07.2023.
21. Гайворонский С.В., Русин Е.В., Цодокова В.В. Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // Научно-технический вестник информационных технологий механики и оптики. 2015. Т. 15. №1. С. 22–29.
22. Блажко С.Н. Курс практической астрономии. М.: Наука, 1979.
23. Гайворонский С.В., Кузьмина Н.В., Цодокова В.В. Автоматизированный зенитный телескоп для решения астрономо-геодезических задач // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение: докл. науч.-техн. конф. Менделеево: Всерос. науч.-исслед. ин-т физ.-техн. и радиотехн. измерений, 2017. С. 197–205.
24. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор, 2017. 390 с.
25. Кузьмина Н.В., Тарасов С.М., Цодокова В.В. Алгоритм определения азимута наземного ориентира автоматизированным астрономическим универсалом // Девятая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), 2021. С. 78.
26. Тарасов С.М. Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира // Гирокоспия и навигация. 2021. Т. 9. №2 (113). С. 97–109. DOI: 10.17285/0869-7035.0065.

---

Sokolov, A.V., Gaivoronskiy, S.V., Kuzmina, N.V., Tarasov, S.M., Tsodokova, V.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg).

High-Accuracy Astrogeodetic Optoelectronic Systems. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 3 (130), pp. 51–64.

**Abstract.** Research and development in the field of automated astrogeodetic optoelectronic systems started in the late 1980s and continues successfully to this day due to the progress in optoelectronic equipment and acquisition of new technologies based on the use of CCD and CMOS image sensors. The article traces the development of astrogeodetic systems, discusses their design and operation principles, composition and main performance characteristics.

**Key words:** automated astrogeodetic system, optoelectronic unit, astronomical azimuth, astronomical coordinate.

Материал поступил 27.05.2025.