

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КАНАЛ ПЕРЕНОСА АЗИМУТАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ПО ВЕРТИКАЛИ

© 2009 г. О. Л. Олендский; М. Н. Сокольский, доктор техн. наук; В. П. Трегуб, канд. техн. наук
ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

В статье описывается прецизионное устройство вертикальной передачи азимутального направления на основе поляризационного канала. Рассматриваются направления работ по повышению точности и стабильности таких устройств.

Ключевые слова: вертикальный поляризационный перенос нормали.

Коды OCIS: 230.0230, 120.4640.

Поступила в редакцию 22.06.2009.

Введение

Задача высокоточного измерения азимутального угла между нормальными к плоским зеркальным поверхностям, привязанным к соответствующим механическим базам, разнесенным в вертикальном направлении на расстояние в несколько метров, весьма актуальна. Такие задачи встречаются в строительстве, машино- и приборостроении [1]. На сегодняшний день во многих прикладных задачах требуемая точность измерения азимутального угла между нормальными к плоским зеркальным поверхностям составляет величины менее десяти угловых секунд.

Есть широкий класс приборов, обеспечивающих измерение углов разворота вокруг оптической (визирной) оси – так называемых углов скручивания [1–3].

Приборы, решающие такие задачи по вертикали, т. е. обеспечивающие измерение углов скручивания вокруг вертикальной оси, будем называть устройствами вертикального переноса направления (УВПН), поскольку наиболее частой задачей для подобных приборов является перенос вектора азимутального направления по вертикали. Соответственно, на каждом высотном уровне к контрольной базе жестко привязаны оптические устройства (плоские зеркала, коллиматоры, автоколлиматоры), задающие (принимающие) азимутальное направление.

Существуют два традиционных способа решения задачи измерения угла скручивания.

Первый способ решает задачу методами геометрической оптики. Суть метода заключается в том, что на одной контрольной базе (первый

уровень) создается протяженная оптическая база, перпендикулярная оси, относительно которой измеряется угол скручивания. Оптическая база может быть представлена световой маркой соответствующей длины и формы или двумя световыми пучками, разнесенными на необходимое расстояние. На второй контрольной базе (второй уровень) находится фотоприемное устройство, чувствительное к смещению и развороту изображения световой марки, или балансный детектор, чувствительный к смещениям (взаимным разворотам) опорных световых пучков. В качестве фотоприемников обычно используют секционные фотодиоды (для ноль-датчиков) или ПЗС-структуры (для измерительных схем).

Предложены различные схемы аналогичных устройств, в том числе и автоколлимационного типа, когда на одном уровне располагается автоколлиматор с маркой и фотоприемным устройством, а на втором уровне – отражатель типа призмы БР-180° [1].

Очевидно, что сам принцип измерения угла скручивания методами геометрической оптики ставит результирующую точность измерения в зависимость от размеров оптических баз, т. е. в конечном итоге от размеров прибора. Кроме того, существуют серьезные проблемы в получении высокой точности при наличии смещений и наклонов контрольных баз. Такие оптические схемы предельно чувствительны к малейшим воздушным потокам, ведущим к локальным изменениям показателя преломления воздуха и, соответственно, к смещениям изображения марки на фотоприемнике. По нашим оценкам, при работе в реальных условиях (строитель-

ство, промышленность) у геометрических схем лучшие результаты соответствуют погрешности измерения угла скручивания $\pm 15''$ при полном изменении угла $\pm 1,5^\circ$ и вертикальном расстоянии между контрольными базами до двух метров. Для современных приборов такие параметры не могут считаться высокими.

Второй способ решения задачи измерения угла скручивания основан на методах физической оптики, в данном случае – на применении поляризованного излучения [2, 3].

Структурная схема поляризационного УВПН

Остановимся на принципе построения УВПН, традиционно реализуемого на “ЛОМО”, основой которого стала классическая схема поляризационного канала, появившаяся более века назад для исследования оптической активности прозрачных сред [2].

Структурная схема прибора приведена на рис. 1.

Первая контрольная база образована плоским зеркалом 3, жестко соединенным с призмой-поляризатором 2 (нормаль плоского зеркала 3 строго выставлена относительно оптической оси кристалла призмы-поляризатора 2), и объективом автоколлиматора 4, этот автоколлиматор измеряет азимутальный угол $\alpha_{\text{в}}$ верхнего зеркала 5. Вторая контрольная база образована плоским зеркалом 12, жестко соединенным с призмой-анализатором 11 (нормаль плоского зеркала 12 строго выставлена относительно оптической оси кристалла призмы-анализатора 11), и объективом автоколлиматора 13, этот автоколлиматор измеряет азимутальный угол $\alpha_{\text{н}}$ нижнего зеркала 14. Азимутальный угол скручивания $\Delta\alpha = \alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{н}}$ между зеркалами 5 и 14 и является искомым. Лазерный осветитель 1 создает узкоапертурный пучок света, который проходит через призму-поляризатор 2, модулятор Фарадея 9, призму-анализатор 11 и попадает в фотоприемное устройство 17, где преобразуется в электрический сигнал, содержащий основную частоту модуляции и ее гармоники. Привод 6 разворачивает призму 2, приводя угол скручивания верхней $\beta_{\text{в}}$ и нижней $\beta_{\text{н}}$ контрольных баз к нулю: $\beta_{\text{в}} - \beta_{\text{н}} = 0$. Чтобы компенсировать наклон из плоскости горизонта нижней контрольной базы, призма 11 с прикрепленным зеркалом 12 и объективом 13 (составляющие нижний автоколлиматор) устанавливаются в горизонтальной плоскости по сигналам датчика горизонта 16 с помощью двух

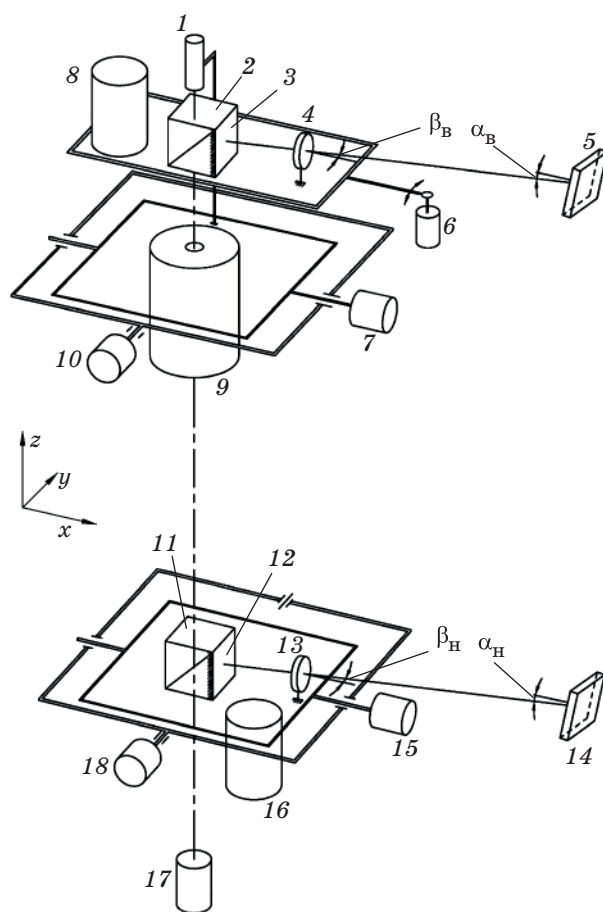


Рис. 1. Структурная схема поляризационного УВПН (пояснения в тексте).

приводов 15 и 18. Наклон верхней контрольной базы с призмой 2, прикрепленным зеркалом 3 и объективом 4 (составляющими верхний автоколлиматор) относительно плоскости горизонта измеряется датчиком горизонта 8. При смещениях нижней контрольной базы относительно верхней в горизонтальной плоскости возможна потеря оптической связи между призмой 2 и призмой 11. Эти смещения компенсируют два привода 7 и 10, которые разворачивают лазерный излучатель 1 вместе с модулятором Фарадея 9 относительно центра призмы 2 так, чтобы его луч всегда проходил через центр призмы 11. Углы разворота приводов 15 и 18, а также значения углов наклона с датчика горизонта 8 измеряются и используются для математической коррекции при расчетах угла скручивания в азимутальной плоскости.

Принцип работы поляризационного УВПН

Поляризационный УВПН состоит из излучателя, поляризатора, модулятора Фарадея, анализатора и фотоприемника. Излучатель обе-

спечивает световой луч нужной интенсивности. Поляризатор делает этот луч плоскополяризованным. Модулятор, основанный на эффекте Фарадея, обеспечивает раскачку плоскости поляризации по гармоническому закону без постоянной составляющей по углу. Анализатор, находящийся в скрещенном положении относительно поляризатора, преобразует модуляцию плоскости поляризации по углу в амплитудную модуляцию интенсивности светового потока. Фотоприемник преобразует модулированный световой поток в электрический сигнал, который проходит узкополосную фильтрацию с целью выделить сигнал с частотой модуляции. При нулевом угле скручивания поляризатора относительно анализатора электрический сигнал равен нулю. Таким образом, данная схема выполняет роль ноль-датчика в составе следящей системы, в которой привод разворачивает поляризатор относительно анализатора.

Оптическая схема поляризационного УВПН

Принципиальная оптическая схема УВПН (см. рис. 1) с поляризационным каналом и разнесенными в вертикальном направлении по высоте плоскими зеркальными поверхностями (контрольными элементами) состоит из следующих элементов: 5, 14 – верхнее и нижнее плоские зеркала, расположенные относительно друг друга на необходимом расстоянии по вертикали; верхний (объектив 4 и контрольное зеркало 3) и нижний (объектив 13 и контрольное зеркало 12) измерительные автоколлиматоры, работающие по плоским зеркалам 5 и 14; поляризационный канал, состоящий из двух поляризационных призм 2 (верх), 11 (низ) с жестко соединенными плоскими контрольными зеркалами 3 (верх), 12 (низ).

Принципиальная оптическая схема автоколлиматоров (вид в азимутальной измерительной плоскости) показана на рис. 2.

Автоколлиматор состоит из объектива 2 с вынесенной передней главной плоскостью Н, в исходном состоянии во внешней системе координат $xу$ (система координат $xу$ лежит в азимутальной измерительной плоскости) оптическая ось объектива 2 совпадает с осью x . Точка O – главная точка объектива, совпадающая с его узловой точкой. Измерительная марка А совмещается с точкой O . Марка А с увеличением $+1$ изображается в заднюю главную точку O' . На расстоянии $0,5f'$, где f' – заднее фокусное расстояние объек-

тива, устанавливается плоское зеркало 1. Параллельный пучок лучей, вышедших из объектива, отражается от плоского зеркала 1 и в обратном ходе образует в плоскости Н автоколлимационное изображение марки А. Если зеркало 1 наклонено относительно оси x на угол β , то из объектива выходит параллельный пучок лучей также под углом β относительно оси x . Если автоколлимационное зеркало 3 наклонено на угол α относительно оптической оси объектива, то изображение марки А смещается в точку с координатой y' в плоскости Н, при этом

$$y' = f' \operatorname{tg} 2(\alpha - \beta). \quad (1)$$

Такая оптическая система делает автоколлиматор нерасстраиваемым, так как малые смещения объектива 2 в плоскости, перпендикулярной оси x , а также малые наклоны объектива не приводят к смещению автоколлимационного изображения марки А, т. е. к изменению значения координаты y' и, соответственно, не приводят к изменению контролируемой разности $(\alpha - \beta)$.

Примером объектива с вынесенной главной плоскостью является положительный мениск (рис. 2). Известно [4], что у одиночной линзы расстояние до передней главной плоскости S_H определяется формулой

$$S_H = -f' \left(\frac{n-1}{nr_2} \right) d, \quad (2)$$

где f' – заднее фокусное расстояние линзы, r_2 – второй радиус линзы, d – толщина линзы по оптической оси. Поскольку $f' > 0$, $r_2 > 0$, то $S_H < 0$ и, следовательно, главная точка линзы лежит перед ее первой поверхностью (см. рис. 2).

С целью коррекции сферической aberrации и комы удобно принять двухлинзовый склеенный объектив. Можно выполнить геометрический и

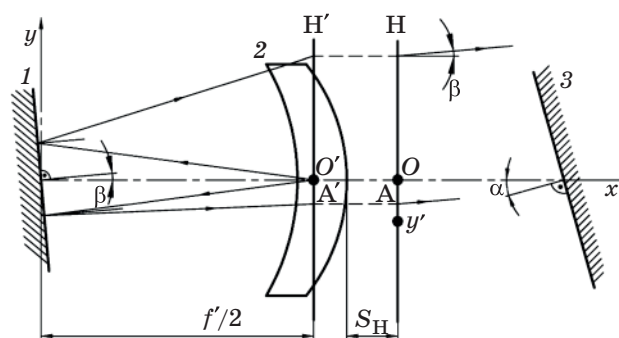


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема автоколлиматора (вид в азимутальной измерительной плоскости) (пояснения в тексте).

абберационный расчет, при котором объектив удовлетворяет следующим требованиям:

- исправлены сферическая абберация и кома,
- передняя главная плоскость вынесена на заданное расстояние S_H ,
- подобраны марки стекол из условия стабильности значений фокусного расстояния при перепадах температур.

При реализации конструкции такого автоколлиматора (рис. 2) марка А, подсвечиваемая светодиодным осветителем, располагается на светоделительном кубике, а в обратном ходе автоколлимационное изображение марки А с помощью дополнительного объектива подается на матричный фотоприемник. В качестве фотоприемника в нынешних модификациях автоколлиматоров используется ПЗС-линейка с числом рабочих пикселей 1000 и размером пиксела 13×500 мкм [5].

Возвращаясь к рис. 1 (на котором оси x и y системы координат лежат в азимутальной измерительной плоскости, а ось z – вертикальна), видим, что верхний автоколлиматор (объектив 4 и зеркало 3) измеряет в азимутальной плоскости угол $(\alpha_B - \beta_B)$ между зеркалами 5 и 3, нижний автоколлиматор (объектив 13 и зеркало 12) измеряет в азимутальной плоскости угол $(\alpha_H - \beta_H)$ между зеркалами 14 и 12.

Работа поляризационного канала сводится к тому, чтобы добиться нулевого угла скручивания анализатора (призма 11) относительно поляризатора (призма 2) и, соответственно, строгой параллельности зеркальных поверхностей 12 и 3, т. е. равенства углов $\beta_H = \beta_B$. В этом случае угол

$$\Delta\alpha = (\alpha_B - \beta_B) - (\alpha_H - \beta_H) = (\alpha_B - \alpha_H), \quad (3)$$

определяет искомый угол скручивания в азимутальной плоскости между нормальными к плоским зеркалам 5 и 14.

С целью обеспечения исходного нулевого значения угла скручивания между верхним и нижним автоколлиматорами УВПН, для компенсации ошибок изготовления и сборки, производится юстировка прибора с использованием, например, уровневых поверхностей. При этой операции прибор укладывается так, чтобы оптические оси автоколлиматоров были номинально перпендикулярны выставленным по уровню поверхностям (например, поверхности жидкостного уровня). Путем юстировки в нулевом положении поляризационного канала добиваются нулевых отсчетов на “верхнем” и “нижнем” автоколлиматорах.

Знаки отсчетов обоих автоколлиматоров делают одинаковыми (например, знак “+” при повороте контролируемых зеркал по часовой стрелке). В этом случае при повороте всего прибора, например, против часовой стрелки автоколлимационные отсчеты от неподвижных контролируемых зеркал (5 и 14 на рис. 1) изменятся на одинаковую величину в плюс, а разность $\Delta\alpha = \alpha_B - \alpha_H$ останется без изменений, т. е. прибор УВПН будет нейтральным к этому повороту (поворот прибора не внесет ошибок в измеренное значение угла скручивания $\Delta\alpha$).

Опыт создания и направления работ по совершенствованию УВПН

ОАО “ЛОМО” традиционно разрабатывает каналы вертикального переноса азимутального направления. Во всех разработках УВПН ставилась задача получить максимальную точность, при этом часто возникали ограничения на размеры отдельных узлов прибора, связанные с реальными условиями эксплуатации. По этим причинам основой всех УВПН нашей фирмы стала классическая схема поляризационного канала.

Постоянно ведутся работы по усовершенствованию отдельных элементов этой классической поляризационной схемы. Первоначально основным направлением работ было усовершенствование поляризационных призм из кальцита. Это позволило выйти на точности порядка $\pm 12''$.

Создан высокоточный модулятор Фарадея на ферритовом магнитопроводе (с очень низкой остаточной намагниченностью). В качестве источника излучения применен лазерный диод, позволивший поднять поток мощности излучения в рабочем сечении призм на три порядка. Разработано фотоприемное устройство на основе кремниевого фотодиода. Это фотоприемное устройство обеспечивает требуемый коэффициент усиления на частоте модуляции 4 кГц, способно работать при засветке внешними источниками на уровне 100 лк и обеспечивает отношение сигнал/собственный шум не хуже 40 дБ.

Перечисленные выше меры привели к тому, что последние модификации прибора УВПН обеспечивают точность передачи азимутального направления не хуже $\pm 3''$, причем точность самого поляризационного канала в составе прибора не хуже $\pm 2''$.

На основе описанной выше схемы УВПН был создан макет, позволяющий передавать азимутальное направление по вертикали до трех метров при смещениях нижней контрольной базы от-

носителем верхней в поперечном направлении до ± 40 мм. Нижняя контрольная база может иметь произвольный наклон относительно горизонтальной плоскости до полутора градусов, а верхняя контрольная база – до трети градуса; максимально возможный угол скручивания – до трех градусов. Точность передачи азимутального направления не хуже $\pm 5''$. Необходимо отметить, что оптический тракт поляризационного канала между верхним и нижним приборами не требует защиты от воздушных потоков. Кроме того, при продувании оптического тракта поляризационного канала нагретыми воздушными потоками существенного влияния на погрешность передачи азимутального направления отмечено не было.

В настоящее время ведутся работы по повышению точности и стабильности передачи азимутального направления при вертикальном переносе. Одно из направлений – это замена поляризационных призм на основе кальцита на другие типы поляризационных элементов. Планируется применить в качестве поляризатора комбинированную призму с использованием дихроичного поляризатора и кварцевой призмы; ведется работа по созданию поляризационных элементов на основе регулярных структур типа “поляризационная решетка” [6]. В случае успеха эти перспективные работы позволят резко снизить стоимость поляризующих элементов и увеличить точность привязки плоскости поляризации к контрольной базе, в частности для кварцевой призмы, за счет лучшей зонной структуры кристаллического кварца.

Следующее направление работ связано с особенностями рассеяния поляризационного излучения на препятствиях, которые в поляризационном канале могут быть обусловлены пылью, микроскопическими дефектами элементов оптической схемы, краями непрозрачных элементов

оптического тракта. Компоненты излучения, рассеянные вперед под малыми углами, имеют большой вес в ошибках измерения угла скручивания. В настоящее время разработана оптическая схема, позволяющая устранить этот тип ошибок, в том числе и для каналов, имеющих взаимные смещения нижнего и верхнего приборов.

Есть все основания полагать, что комплекс мер, выработанных в процессе проведения перечисленных перспективных работ, позволит довести собственно поляризационный канал до точностей менее одной угловой секунды и создать устройство передачи азимутального направления с вертикальным переносом на несколько метров с погрешностью порядка двух угловых секунд, с повышенной долговременной и температурной стабильностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буюкян С.П. Видеоизмерительные системы. М.: МИИГАиК, 2008. 72 с.
2. Ильин Р.С., Федотов Г.И., Федин Л.А. Лабораторные оптические приборы. М.: Машиностроение, 1966. 496 с.
3. Панков Э.Д., Коротаев В.В. Поляризационные угломеры. М.: Недра, 1992. 240 с.
4. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
5. Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Васильев И.С., Илизавская Е.Ю., Прокофьев А.Е. Линейные ФПЗС и фотоприемные модули на их основе // Тез. докл. XX Междунар. научно-технич. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2008. С. 135–137.
6. Нагибина И.М., Москалев В.А., Полушкина Н.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2002. 565 с.