

ИНВАРИАНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ОПТИКЕ

С.А. Сухопаров, И.Н. Тимошук

Одним из путей совершенствования измерительных, геодезических и других оптических и оптико-электронных приборов является использование инвариантных систем. В оптике под инвариантностью понимают неизменность произведения либо суммы параметров в пространстве предметов по отношению к пространству изображений или одной системы по отношению к другой при прохождении лучей через них.

Под пространственной инвариантностью оптического прибора понимается нечувствительность изображения, им создаваемого, к изменению пространственного положения одного или нескольких элементов этого прибора. Изменение пространственного положения элемента может иметь вид его смещения или поворота, которые в системах, не обладающих пространственной инвариантностью, вызывают изменение положения изображения, изменение направления лучей, поворот изображения либо деформацию волновой поверхности. В зависимости от сложности ОП пространственная инвариантность может быть представлена в одном из следующих видов – абсолютная, относительная, дифференциальная.

Для описания критериев пространственной инвариантности пользуются понятием пространственной передаточной функции (ППФ) U , определяющей реакцию изображения на смещение или поворот оптического элемента $\Delta(\zeta, \zeta, \xi)$, и пространственного передаточного коэффициента K :

$$K = \frac{U}{\Delta(\zeta, \zeta, \xi)},$$

откуда $U = K \cdot \Delta(\zeta, \zeta, \xi)$. Для абсолютной пространственной инвариантности критерием является равенство нулю суммарной ППФ: $\Sigma U = 0$. Для относительной – равенство ППФ разных каналов многоканального прибора: $U_1 = U_2$, т.е. $\Delta U = 0$ (к примеру, равенство ППФ каналов формирования в едином поле визирного прибора изображений объекта и визирной марки). Для дифференциальной – равенство разностей ППФ в каждом из полей: $\Delta U_1 = \Delta U_2$ (к примеру, равенство разностей ППФ каналов формирования изображений марки и объекта в разделенных полях стереоскопического прибора).

Для операции фокусировки оптических приборов и их элементов важными составляющими, обеспечивающими требуемую точность, являются чувствительность индикации и качество эталона, по которому производится фокусировка. Эталон при фокусировке является коллимированный пучок лучей, полученный тем или иным способом. К инвариантным можно отнести некоторые из способов получения коллимированных пучков лучей, в частности:

- по двустороннему плоскому зеркалу с помощью автоколлиматора (абсолютный способ);
- с помощью подвижной пентапризмы и оптического микрометра;
- поочередным диафрагмированием половинок входного зрачка;
- сравнением по глубине с помощью бинокулярного прибора изображений штриха коллиматора, образованного двумя пучками от двух зон объектива, с плоскостью измерительной марки (стереоскопический способ), и другие.

В измерительных, геодезических и других оптических приборах используется пространственная инвариантность, при которой за счет равенства нулю одного или суммы нескольких параметров оптической и измерительной систем при прохождении лучей достигается неизменность направления или параллельность осей пучков лучей, исключаются систематические погрешности, обеспечивается более высокая точность и расширяется диапазон работы прибора. Примером инвариантности измерительной

системы является известная схема фотозлектрического датчика линейных перемещений на дифракционных решетках [1,2] (рис. 1, а).

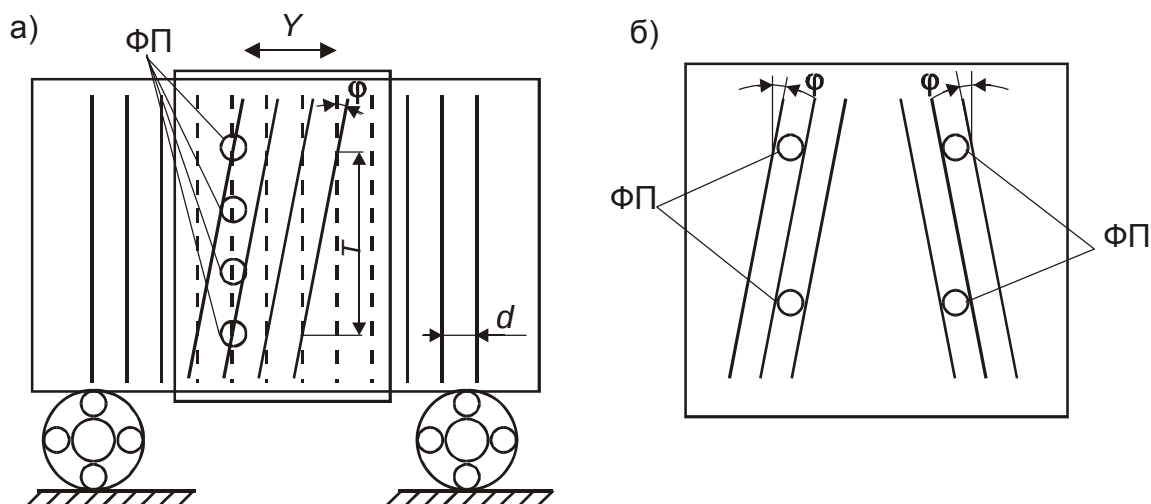


Рис. 1. Компенсация погрешностей наклона измерительной дифракционной решетки фотозлектрического датчика линейных перемещений

Для компенсации погрешности фотозлектрического датчика из-за погрешностей направляющих на прозрачную решетку наносятся два участка наклонных штрихов с равными, но противоположно направленными углами (рис. 1, б). В этом случае при наклоне решетки для одного участка ϕ увеличивается, а для другого уменьшается на ту же величину, следовательно, увеличивается и уменьшается соответственно шаг муаровых полос. Таким образом, исключаются погрешности шага $\Delta T_{\Delta\phi}$ и фазы $\Delta\gamma$:

$$\Delta T_{\Delta\phi} + (-\Delta T_{\Delta\phi}) = 0, \quad \Delta\gamma + (-\Delta\gamma) = 0.$$

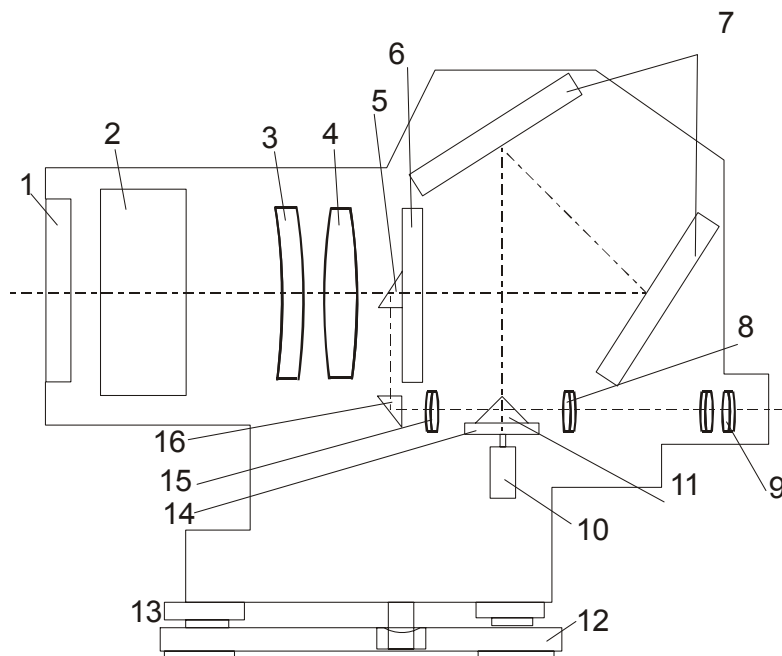


Рис. 2. Схема самоустанавливающегося нивелира HC2

Погрешности в измерениях, производимых геодезическими приборами, возникающие вследствие погрешностей их установки, могут быть устранены за счет использования инвариантной схемы построения прибора. В геодезии хорошо зарекомендовали себя нивелиры с самоустанавливающейся линией визирования. Линия

визирования в таких приборах автоматически устанавливается в горизонтальное положение при помощи маятниковых и оптических устройств, называемых компенсаторами.

На рис. 2 приведена известная схема нивелира НС2 с компенсатором, линия визирования которого автоматически устанавливается в горизонтальное положение [3]. Оптическая схема данного нивелира является инвариантной к наклонам системы в целом. Зеркало 14 компенсатора, расположенное на половине фокусного расстояния объектива (поз. 3, 4), находится в свободном подвесе относительно визирной трубы нивелира. При этом угол наклона зеркала компенсатора всегда равен углу наклона визирной трубы, но противоположен ему по знаку, поэтому пространственная передаточная функция зеркала компенсатора равна пространственной передаточной функции визирной трубы нивелира и противоположна ей по знаку: $U_z = -U_{\text{виз}}$. Сумма же их равна нулю. Таким образом, визирная линия нивелира сохраняет горизонтальное положение при наклонах корпуса прибора в процессе его эксплуатации.

Для теодолитов погрешность из-за наклона вертикальной оси, возникающей из-за неточного горизонтирования прибора, погрешностей работы осевой системы вследствие дефектов изготовления, деформации или износа деталей осевой пары, является одной из основных погрешностей, оказывающих влияние на точность угловых измерений. Для устранения погрешностей в измерениях в теодолитах также применяются инвариантные схемы построения.

На рис. 3 приведена схема визирной трубы теодолита с самоустанавливающейся линией визирования [3]. В качестве компенсатора в данном случае применена оборачивающая призмная система Малафеева-Порро 2-го рода, находящаяся на маятниковом подвесе.

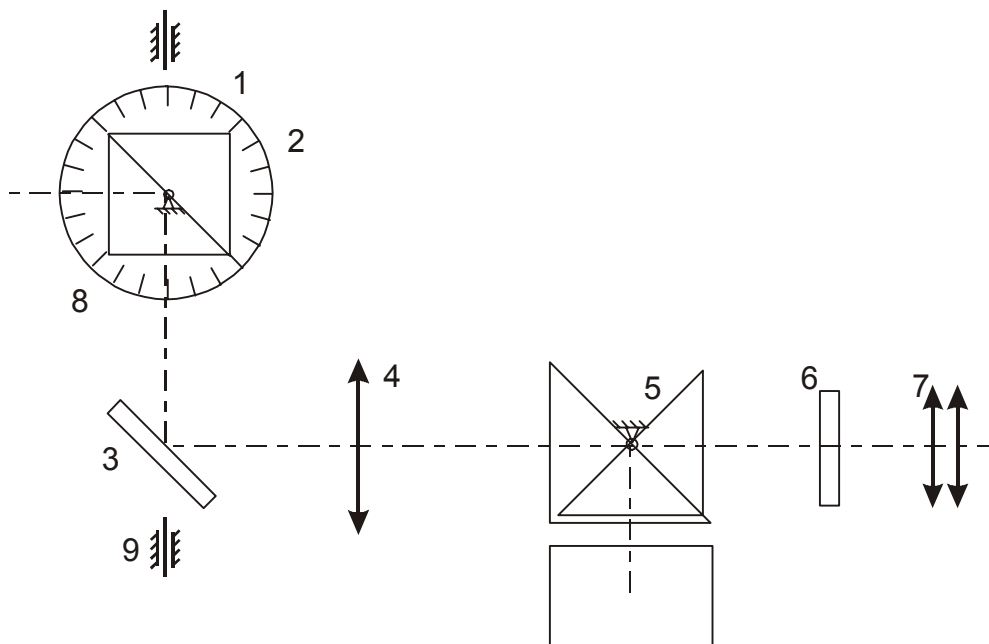


Рис. 3. Схема самоустанавливающегося теодолита

Пространственные передаточные функции визирной трубы и призмной оборачивающей системы при наклоне корпуса теодолита будут равны по величине и противоположны по знаку, а сумма их, следовательно, будет равна нулю:

$$\Sigma U = U_{\text{виз}} - U_{\text{пр}} = 0.$$

Таким образом, данная система также является инвариантной к наклону корпуса прибора, но лишь в пределах диапазона действия компенсатора. Для визирования на объект в вертикальной плоскости при любом угле используется зеркально-призмная

система с четным числом отражений, также являющаяся инвариантной к наклону в вертикальной плоскости. При визировании на объект поворачивается призма-куб 1 вместе с угломерным лимбом 2 и шкалой углов визирования (рис. 3). Таким образом, теодолит в целом становится инвариантным на всем диапазоне измерения углов.

Пространственная инвариантность измерительных приборов позволяет исключить либо компенсировать погрешности оптической системы прибора, однако остаются еще погрешности введения или компенсации измеряемой величины. Для их исключения может быть использован метрологически инвариантный метод введения измеряемой величины. Под метрологической инвариантностью понимается независимость результата измерения от положения и погрешностей оптической системы и ее элементов.

Метрологическая инвариантность может обеспечиваться следующими способами:

- оптическая синхронизация, при которой изменение положения оптической системы или элемента вызывает одинаковые отклонения пучков лучей как в оптической, так и в измерительной системах и, следовательно, равные смещения изображений в этих системах;
- компенсация погрешности измерительного устройства другим элементом оптического прибора.

Условием оптической синхронизации является равенство передаточных функций оптического элемента (или системы) и измерительной системы, которое достигается использованием одного и того же элемента (или системы) для введения либо компенсации измеряемой величины. Примером тому может служить схема самоустанавливающегося автоматического нивелира (рис. 4) [4].

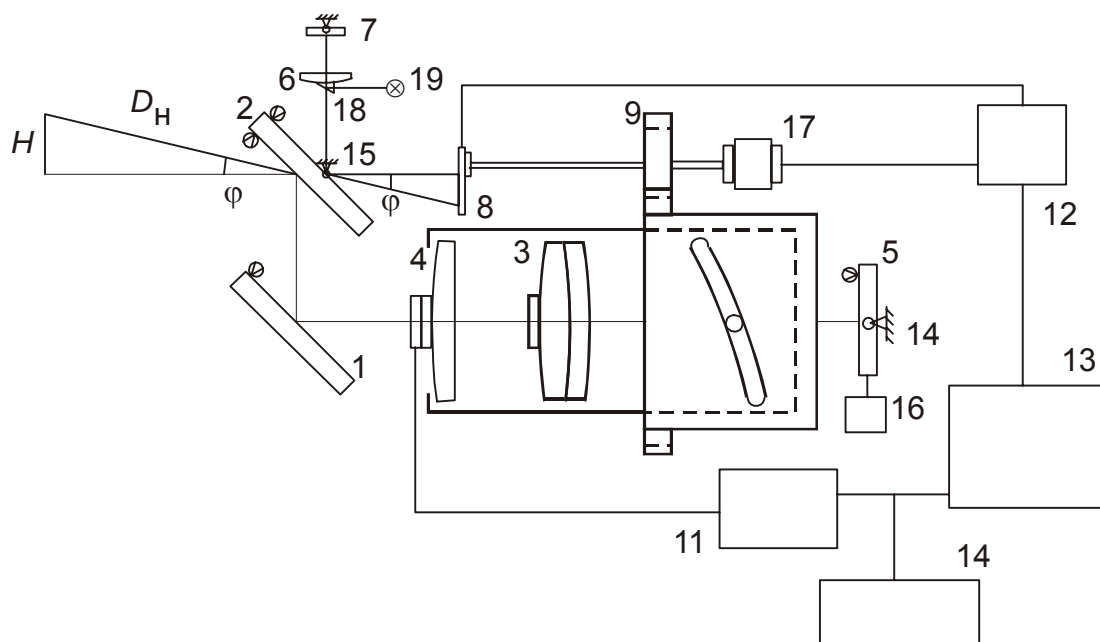


Рис. 4. Схема самоустанавливающегося оптико-телевизионного нивелира

Нивелир состоит из системы зеркал 1 и 2 с переменным углом отклонения, инвариантного зеркально-линзового объектива 3, на половине фокусного расстояния которого расположено плоское зеркало 5, подвешенное на шарнире. Приемник излучения 4 – матрица ПЗС – наклеена на линзу объектива. Измерительная система состоит из осветителя, в который входит объектив 6 с наклеенной призмой 18, зеркала 7, подвешенного на шарнире, осветителя 19 и измерительной каретки с позиционно-чувствительным приемником лучистой энергии 8 (типа "мультискан"). Преломляющая поверхность призмы 18, контактирующая с объективом 6, покрыта непрозрачным

слоем со щелью, изображение которой проецируется на приемник 8 измерительной линейки. Подвижное зеркало 2 служит для визирования и одновременно для передачи углов визирования на измерительную линейку с приемником "Мультискан" 8. Здесь осуществляется абсолютно синхронная передача углов визирования в измерительную схему. При изменении угла визирования φ ось пучка лучей коллиматора 6, 7 также отклонится на угол φ , что вызовет смещение l на приемнике измерительной линейки 8.

Другим примером инвариантного введения измеряемой величины является метрологически инвариантный оптический телевизионный сумматор, схема которого приведена на рис. 5 [5].

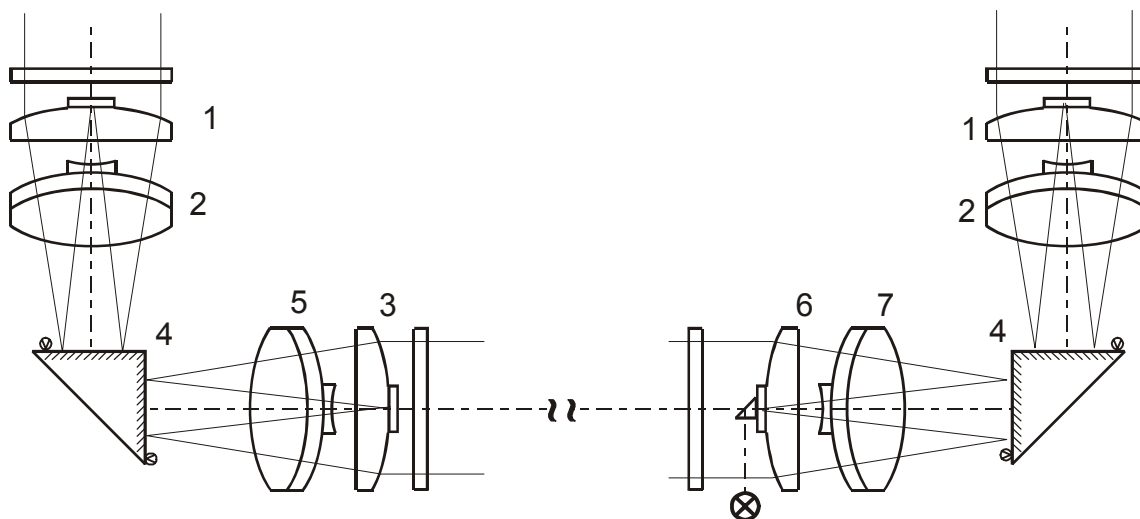


Рис. 5. Автоматический оптико-телевизионный измерительный модуль

Сумматор состоит из двух рабочих передающих камер (поз. 1, 2, 4). Передающая камера (поз. 3, 5, 4) и инвариантный коллиматор (поз. 6, 7, 4) оптически связаны с рабочими передающими камерами отражательными призмами 4. Все объективы построены по инвариантной схеме – с зеркалом на половине фокусного расстояния и приемником (матрицей ПЗС), наклеенным на линзу объектива. Их поперечные смещения и повороты вокруг осей, перпендикулярных оптической, не вызывают смещения изображений [6].

При повороте любой призмы или передающей камеры в целом возникает соответствующее смещение изображения на матрице ПЗС рабочей камеры и такое же смещение изображения на матрице ПЗС камеры оптико-телевизионного сумматора. Таким образом, повороты указанных элементов системы не могут вызвать погрешности в измерениях.

Измеряемое модулем расстояние вычисляется ПЭВМ, на которую поступают сигналы с приемников, по следующей формуле:

$$D = \frac{B \cdot f'}{a_{\text{пр}} - a_{\text{л}} + a_{\text{к}}},$$

где $a_{\text{пр}}$, $a_{\text{л}}$, $a_{\text{к}}$ – смещение изображений на матрицах ПЗС соответственно правой, левой рабочих камер и камеры оптического сумматора; B – база модуля, f' – фокусное расстояние объективов.

Таким образом, можно сделать вывод, что совмещенная инвариантность оптических и измерительных систем позволяет передавать информацию из оптической в измерительную систему без потерь и искажений и, в случае необходимости, построить измерительные системы из нестабильных элементов, исключая их влияние на систематические погрешности.

Литература

1. Латыев С.М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л., Машиностроение, 1985.
2. Маламед Е.Р. Влияние поворотов в процессе перемещения дифракционной решетки на работу преобразователя линейных перемещений. // ОМП. 1983. №8. С.15–17.
3. Сухопаров С.А., Тимошук И.Н. Самоустанавливающиеся оптические приборы для угловых и линейных измерений. // ОМП. 1991. № 2. С.40–46.
4. Патент № 2154809 от 03.04.96.
5. Сухопаров С.А., Горлушкина Н.Н. Автоматический телевизионный измерительный модуль. // Оптический журнал. 1994. № 9. С.85–88.
6. Сухопаров С.А., Горлушкина Н.Н., Тимошук И.Н. Проектирование и расчет пространственно-инвариантных объективов. // ОМП. 1991. № 1. С.40–43.