УДК 681.786

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ЕДИНЫМ МАТРИЧНЫМ ПОЛЕМ АНАЛИЗА

© 2007 г. **А. А. Горбачев**; **И. А. Коняхин**, доктор техн. наук;
**В. Л. Мусяков**, канд. техн. наук; **А. Н. Тимофеев**, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: oeps@grv.ifmo.ru

Рассматриваются принципиальные особенности построения створных оптико-электронных систем с сопряженным матричным полем анализа, инвариантных к нерегистрируемым разворотам элементов и блоков.

Коды OCIS: 080.3620, 120.4630.

*Поступила в редакцию 16.05.2007.*

В широком смысле слова инвариантность оптико-электронных приборов предполагает независимость параметров выходной измерительной информации от воздействия внешних и внутренних условий [1]. В створных оптико-электронных системах для контроля поперечных смещений [2] под инвариантностью понимается исключение или компенсация влияния возникших в процессе эксплуатации возможных разворотов как элементов оптической системы, так и собственных, не измеряемых разворотов блоков.

В указанных устройствах направление референтной прямой, как правило, определяется взаимным положением оптической системы отклонения лучей, объектива и матричного приемника оптического излучения, установленного в плоскости анализа. Анализ изображения контрольных элементов в едином матричном поле с помощью цифровых электронных средств позволяет регистрировать линейные смещения [3].

В рамках данной статьи предлагается рассмотреть особенности построения оптико-электронных систем, реализующих створные измерения (ОЭССИ), в основу которых положены инвариантные преобразования сигналов, несущих измерительную информацию, как в оптической схеме, так и при обработке сигналов с многоэлементных приемников оптического излучения.

В ОЭССИ контрольные элементы (КЭ) КЭ1 (рис. 1) и КЭ2 реализуются в виде объективов *4*, *11*, в фокальной плоскости которых расположены марки *3*, *12*. Конденсоры *2* и *13* должны обеспечивать эффективное использование источников оптического излучения (ИИ) *1*, *14*. В соответствии с поставленной целью развороты КЭ, размещаемых в точках контроля, не должны влиять на результаты измерений.

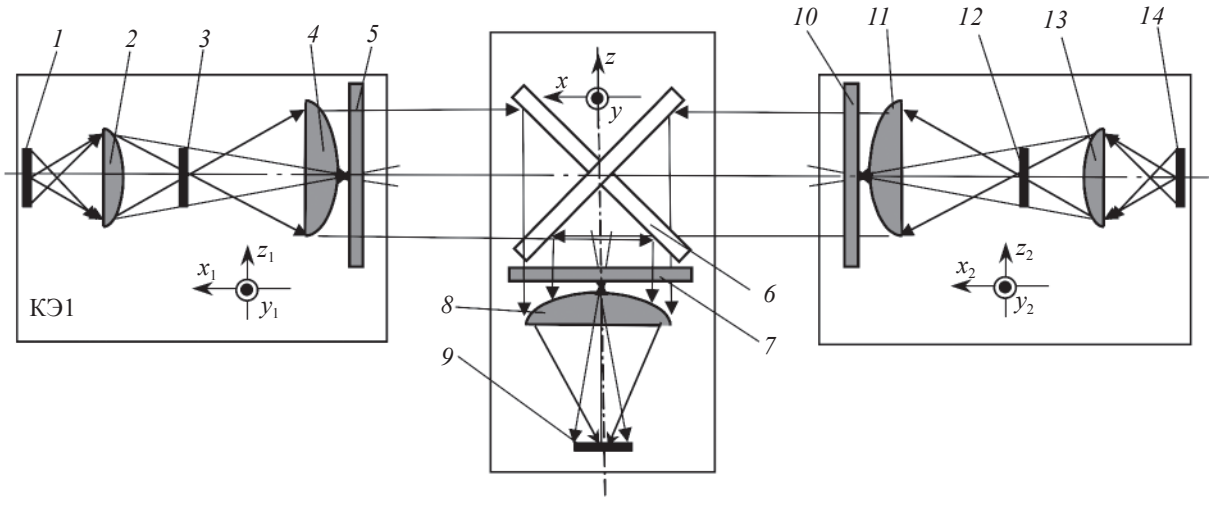



**Рис. 1.** Обобщенная оптическая схема ОЭССИ.

Сопряжение оптической системы базового блока (ББ) с двумерными многоэлементными приемниками оптического излучения (МПОИ), состоящими из структурированного фоточувствительного слоя, электрически связанной с ним системы считывания и адаптивной обработки сигналов, образующихся на отдельных элементах, позволяет в едином поле анализа определять смещении КЭ с референтного направления.

Оптическая система ББ содержит систему отклонения лучей (СОЛ) *6* и объектив *8*, которые обеспечивают сведение потоков оптического излучения от КЭ на едином поле анализа МПОИ. В то же время необходимо, чтобы построение оптической системы ББ максимально упрощало процедуру обработки изображений на МПОИ при разворотах ББ относительно осей *Ox*, *Oy* и *Oz* приборной системы координат.

Чтобы реализовать в ББ поставленные задачи, необходимо проанализировать возможные схемы построения СОЛ как с помощью зеркально-призменных систем [4], так и зеркальных систем.

Все существующие зеркальные системы можно представить в виде комбинации трех элементарных: одиночного зеркала, углового зеркала, зеркального ромба. В качестве зеркальных систем будем рассматривать только одиночное и угловое зеркала, так как зеркальный ромб приводит лишь к смещению оптической оси системы [5]. В результате получаются три варианта оптических схем: два одиночных зеркала (рис. 2а), одиночное и угловое зеркало (рис. 2б), два угловых зеркала (рис. 2в). Одиночные зеркала *1* и *2* (рис. 2) перпендикулярны друг другу, одиночные зеркала *1* и *3* расположены под углом 45° к оси *x* неподвижной системы координат (СК) *xyz*.

Рассмотрим, как будут вести себя орты отраженных лучей $\mathbf{A}'_i$ и $\mathbf{B}'_i$: орт $\mathbf{A}'$ характеризует направление отраженного излучения, орт $\mathbf{B}'$ – вертикальное смещение изображения КЭ после разворотов зеркальных систем (рис. 2) относительно координатных осей *x*, *y*, *z*. Следует учесть, что плоскость изображения $x_л y_л$ жестко связана с зеркальными системами, поэтому в процессе разворотов она и разворачивается вместе с ними.

Орты направления осевых лучей $\mathbf{A}'_1$–$\mathbf{A}'_6$ и орты вертикальных смещений изображения КЭ $\mathbf{B}'_1$–$\mathbf{B}'_6$ после поворота лучевой СК $x_л y_л z_л$ относительно осей *x*, *y*, *z* в неподвижной СК *xyz* определяются выражением [5]

$$\mathbf{X}'_i = S_i^{-1} M S_i \mathbf{X}_i, \qquad (1)$$

где *M* – матрица действия системы плоских зеркал, $S_i$ и $S_i^{-1}$ – матрица перехода (поворота относительно осей *x*, *y*, *z*) от исходной неподвижной СК *xyz* к

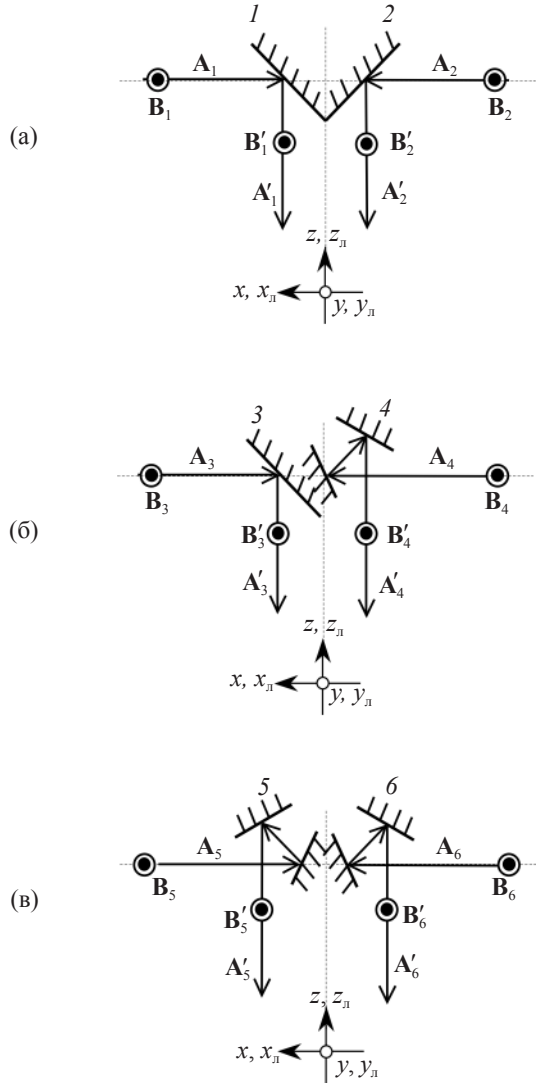



**Рис. 2.** Оптическая схема с использованием двух одиночных зеркал (а), одного одиночного и одного углового зеркал (б), двух угловых зеркал (в).

лучевым осям $x_л y_л z_л$ и транспонированная матрица обратного перехода от осей $x_л y_л z_л$ к исходным осям *xyz*; $\mathbf{X}_i$ – орт луча $\mathbf{A}_i$ (орт осевого луча) или $\mathbf{B}_i$ (орт вертикального смещения КЭ), $\mathbf{X}'_i$ – орт луча $\mathbf{A}'_i$ (орт отраженного осевого луча) или $\mathbf{B}'_i$ (орт вертикального смещения изображения КЭ) после поворота зеркальной системы вокруг осей *x*, *y*, *z*.

Для решения пространственных задач поворота так называемой лучевой системы $x_л y_л z_л$ относительно неподвижных осей *x*, *y*, *z* используются известные матрицы поворотов [4].

Рассмотрим, как ведут себя орты отраженных осевых лучей $\mathbf{A}'_1$–$\mathbf{A}'_6$ и орты вертикальных смещений $\mathbf{B}'_1$–$\mathbf{B}'_6$ после поворота зеркальной системы в неподвижной СК *xyz*. Следует отметить, что в процессе вращения вокруг любой оси плоскость изображения $x_л y_л$ вращается вместе с зеркальной систе-

мой, поэтому следует перейти к плоскости, ортогональной орту отраженного осевого луча $\mathbf{A}'_i$ с учетом поворота плоскости изображения $x_л y_л$. Для этого необходимо умножить орты $\mathbf{A}'_i$ и $\mathbf{B}'_i$ на матрицу поворота осей против часовой стрелки

$$\mathbf{X}_i'' = S_i \mathbf{X}'_i, \qquad (2)$$

где $\mathbf{X}''_i$ – орт луча $\mathbf{A}''_i$ (орт отраженного осевого луча $\mathbf{A}'_i$ с учетом поворота плоскости изображений $x_л y_л$) или $\mathbf{B}''_i$ (орт вертикального смещения изображения КЭ $\mathbf{B}'_i$ с учетом поворота плоскости изображений $x_л y_л$).

Подставляя выражение (1) в выражение (2), получаем

$$\mathbf{X}''_i = M S_i \mathbf{X}_i. \qquad (3)$$

После преобразований по формуле (3) получаем

$$\mathbf{A}''_{x1} = \mathbf{A}''_{x2} = \ldots = \mathbf{A}''_{x6} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}''_{y1} = \mathbf{A}''_{y2} = \mathbf{A}''_{y3} = \begin{pmatrix} -\sin\beta \\ 0 \\ -\cos\beta \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}''_{y4} = \mathbf{A}''_{y5} = \mathbf{A}''_{y6} = \begin{pmatrix} \sin\beta \\ 0 \\ -\cos\beta \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}''_{z1} = \mathbf{A}''_{z3} = \mathbf{A}''_{z5} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin\gamma \\ -\cos\gamma \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}''_{z2} = \mathbf{A}''_{z4} = \mathbf{A}''_{z6} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin\gamma \\ -\cos\gamma \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}''_{x1} = \mathbf{B}''_{x3} = \mathbf{B}''_{x4} = \mathbf{B}''_{x6} = \begin{pmatrix} -\sin\alpha \\ \cos\alpha \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}''_{x2} = \mathbf{B}''_{x5} = \begin{pmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}''_{y1} = \mathbf{B}''_{y2} = \ldots = \mathbf{B}''_{y6} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}''_{z1} = \mathbf{B}''_{z3} = \mathbf{B}''_{z5} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos\gamma \\ \sin\gamma \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}''_{z2} = \mathbf{B}''_{z4} = \mathbf{B}''_{z6} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos\gamma \\ -\sin\gamma \end{pmatrix}.$$

Анализируя полученные выражения, можно сделать следующие выводы:

– при опрокидывании зеркальных систем против часовой стрелки вокруг оси $x$ на угол $\alpha$ орты $\mathbf{A}''_{x1}$–$\mathbf{A}''_{x6}$ вращаются в плоскости $y_л z_л$ вместе и синхронно с плоскостью $x_л y_л$ (рис. 3а), орты $\mathbf{B}''_{x2}$ и $\mathbf{B}''_{x5}$ вращаются относительно оси $z_л$ в направлении движения часовой стрелки (рис. 3б), а орты $\mathbf{B}''_{x1}$, $\mathbf{B}''_{x3}$, $\mathbf{B}''_{x4}$ и $\mathbf{B}''_{x6}$ – против часовой стрелки на угол $\alpha$;

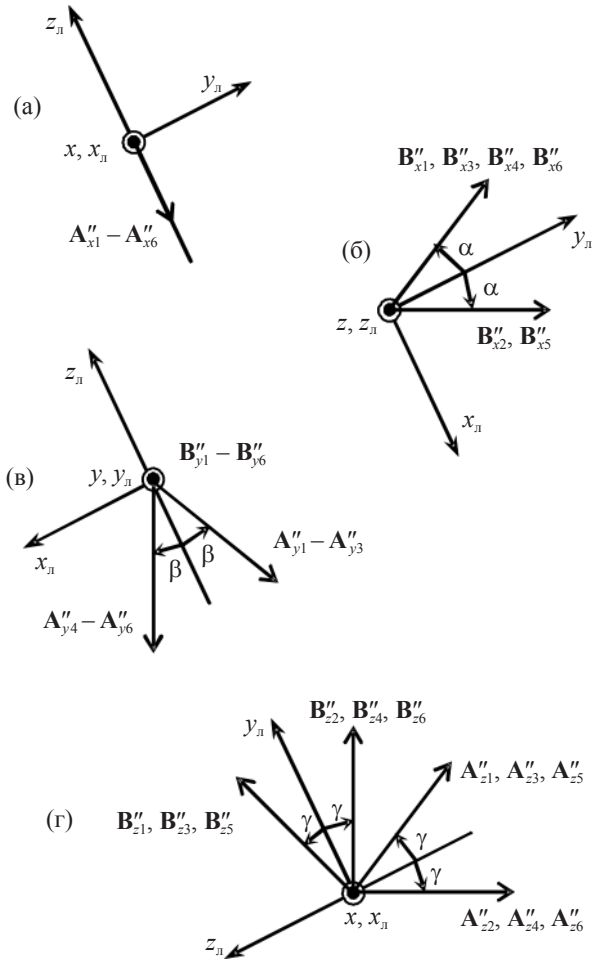



**Рис. 3.** Определение угла отклонения выходящего осевого луча $\mathbf{A}''_i$ и угла поворота изображения $\mathbf{B}''_i$, возникающих при опрокидывании зеркальных систем вокруг оси $x$ на угол $\alpha$ (а, б), вокруг оси $y$ на угол $\beta$ (в), вокруг оси $z$ на угол $\gamma$ (г).

– при опрокидывании зеркальных систем против часовой стрелки вокруг оси $y$ на угол $\beta$ орты $\mathbf{A}''_{y1}$–$\mathbf{A}''_{y3}$ вращаются относительно оси $y_л$ против часовой стрелки (рис. 3в), а орты $\mathbf{A}''_{y4}$–$\mathbf{A}''_{y6}$ – в направлении движения часовой стрелки на угол $\beta$, орты $\mathbf{B}''_{y1}$–$\mathbf{B}''_{y6}$ не изменяют своего направления;

– при опрокидывании зеркальных систем против часовой стрелки вокруг оси $z$ на угол $\gamma$ орты $\mathbf{A}''_{z1}$, $\mathbf{A}''_{z3}$, $\mathbf{A}''_{y5}$, $\mathbf{B}''_{z1}$, $\mathbf{B}''_{z3}$ и $\mathbf{B}''_{z5}$ вращаются относительно оси $x_л$ в направлении, противоположном движению часовой стрелки (рис. 3г), а орты $\mathbf{A}''_{z2}$, $\mathbf{A}''_{z4}$, $\mathbf{A}''_{z6}$, $\mathbf{B}''_{z2}$, $\mathbf{B}''_{z4}$ и $\mathbf{B}''_{z6}$ – по часовой стрелке на угол $\gamma$.

Таким образом, для построения СОЛ целесообразно применять зеркальную систему с одним одиночным и одним угловым зеркалом (угол между

зеркалами 45°) или призменную систему (призма АР-90° и пентапризма). Такие системы инвариантны к разворотам относительно оси *y*, а опрокидывание системы относительно осей *x* и *z* может быть скомпенсировано программными средствами. В этом случае на едином поле анализа можно определять смещения КЭ с референтного направления ($Y_{л1}$ для КЭ1, $Y_{л2}$ для КЭ2, рис. 4а). Разность вертикальных координат ($Y_{л1} - Y_{л2}$) определяет прогиб, например, плавающего дока. Поворот ББ относительно вертикальной оси приводит к изменению лишь горизонтальных координат (положения *1′* ($X_{л1}$, $Y_{л1}$) и *2′* ($X_{л2}$, $Y_{л2}$), рис. 4а). Наклон ББ относительно оси *z* приводит к изменению как координаты *X*, так и координаты *Y* (положения *1″* ($X'_{л1}$, $Y'_{л1}$) и *2″* ($X'_{л2}$, $Y'_{л2}$), рис. 4б). Зная угол наклона ББ относительно оси *z* (измеряется инструментальными средствами), предлагается компенсировать такой поворот программно в модуле обработки информации.

При определении координат изображений КЭ наиболее приемлемым является алгоритм определения энергетического центра тяжести изображения, достоинствами которого являются простота и высокая точность (погрешность составляет 0,1–0,01 размера элемента МПОИ – ПЗС) [6]. С другой стороны, существует достаточно жесткая связь между

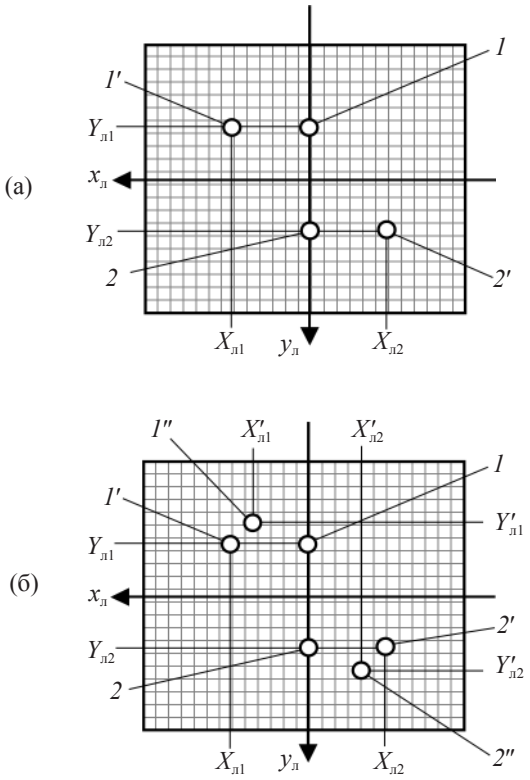



**Рис. 4.** Схема, поясняющая определение координат смещения ББ на едином матричном поле приемника излучения при возможных разворотах блока.

фотометрическими и оптическими параметрами оптической системы, нарушение которой приводит к энергетическим потерям в оптическом тракте, к перераспределению энергии в изображениях КЭ и погрешностям работы системы. Поэтому, чтобы обеспечить нечувствительность КЭ к разворотам относительно осей $Ox_1$ (рис. 1), $Oy_1$ $Oz_1$ и $Ox_2$, $Oy_2$, $Oz_2$ необходимо обеспечить постоянство яркости выходного зрачка объектива КЭ в пределах возможных углов разворотов. В этом случае ИИ, как минимум, должен являться ламбертовским.

При использовании в качестве источника полупроводникового излучающего диода (ПИД) плоской конструкции распределение энергетической яркости выходного зрачка приближается к идеальному равнояркостному излучателю [7]. Это обусловливается ламбертовским характером распределения излучения по поверхности *n*-слоя ПИД и малыми размерами поверхности по сравнению с диаметром входного зрачка КЭ. ПИД полусферической конструкции с расположением *p–n*-перехода вблизи точки Вейерштрасса могут обладать несимметричной диаграммой излучения, что приводит к различному уровню энергетической яркости в точках выходного зрачка КЭ. Однако в излучении выходного зрачка КЭ участвует лишь малая, ограниченная полевой диафрагмой часть *p–n*-перехода ПИД, в пределах которой энергетическая яркость может быть скорректирована транспарантом в марках *3* и *12* (рис. 1).

Кроме того, чтобы достичь инвариантности КЭ при разворотах его элементов, необходимо обеспечить определенным образом ограничение пучков в оптической схеме. Для передающей оптической системы (ПОС) КЭ необходимо, чтобы весь диапазон смещений КЭ $\Delta$ и диаметр выходного зрачка $D_1$ умещались на выбранном поле анализа МПОИ, т. е.

$$\frac{D_1 + 2\Delta}{2S_2} = \frac{h + S'_2 \mathrm{tg}\varphi_2}{S'_2}, \qquad (4)$$

где $h$ – линейный размер фоточувствительной поверхности МПОИ, $S_2$ – расстояние между задней главной плоскостью ПОС КЭ и передней главной плоскостью приемной оптической системы (ПрОС) ББ, $S'_2$ – расстояние между задней главной плоскостью ПрОС ББ и плоскостью установки МПОИ, $\varphi_2$ – угол поворота ББ.

В этом случае диаметр выходного зрачка ПОС $D_1$ и диаметр изображения выходного зрачка ПОС $D'_1$ связаны соотношением

$$D_1 = 2D'_1 \frac{\Delta - S_2 \mathrm{tg}\varphi_2}{2h - D'_1}. \qquad (5)$$

Из выражения (5) видно, что диаметр выходного зрачка ПОС $D_1$ в первом приближении прямо

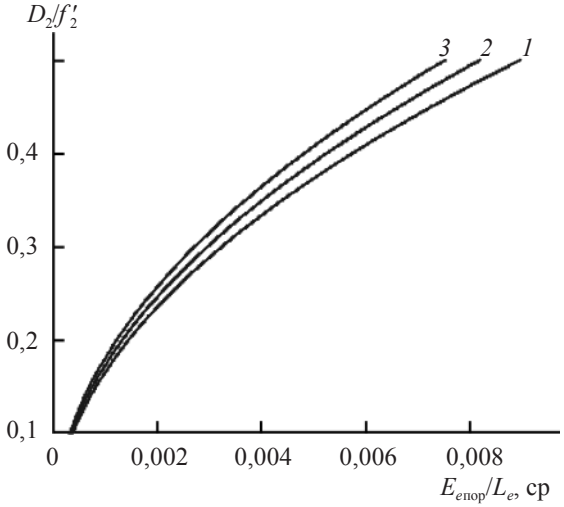



**Рис. 5.** Зависимости относительного отверстия ББ $D_2/f'_2$ от отношения шумовых параметров МПОИ и энергетических параметров источника излучения ($E_{e\text{пор}}/L_e$) при различных размерах МПОИ: *1* – 1/3, *2* – 2/3, *3* – 1 дюйм.

пропорционален диапазону смещений КЭ Δ и требуемому (из условий точности) диаметру изображений $D'_1$ и обратно пропорционален линейному размеру $h$ выбранного МПОИ.

Угол расхождения пучка ПОС находится из условия

$$\mathrm{tg}\omega_1 = \frac{D_2 + 2\Delta + 2S'_1\mathrm{tg}\varphi_1}{2S'_1}, \qquad (6)$$

где $D_2$ – диаметр входного зрачка ПрОС ББ, $\varphi_1$ – угол разворота КЭ, $S'_1$ – расстояние между задней главной плоскостью ПОСа КЭ и передней главной плоскостью ПрОС ББ.

Заднее фокусное расстояние ПОС находится из условия

$$f'_1 = -f_1 \le \frac{D_1}{2\mathrm{tg}\omega_1}, \qquad (7)$$

где $f_1, f'_1$ – переднее и заднее фокусные расстояния.

Если угловое поле ПрОС ББ определяется диапазоном контроля поперечных смещений (задается из условий эксплуатации ОЭССИ), то диаметр объектива $D_1$ может быть определен размером ИИ $d_и$, углом излучения ПИД 2θ и углом расхождения пучка ПОС $2\omega_1$ из закона синусов по формуле

$$D_1\mathrm{tg}\omega_1 \le d_и\sin\theta. \qquad (8)$$

В свою очередь в ПрОС ББ диаметр входного зрачка при заданных величинах яркости ИИ, пороговой облученности МПОИ и коэффициента пропускания оптических систем и атмосферы должен обеспечивать надежную работу системы.

Из энергетического расчета [8] нетрудно найти диаметр входного зрачка ПрОС

$$D_2 = S'_2\sqrt{\frac{\mu E_{e\,\text{пор}}}{\pi\tau L_e}}, \qquad (9)$$

где $S'_2$ – расстояние между задней главной плоскостью ПрОС ББ и плоскостью установки МПОИ, $L_e$ – яркость ИИ, τ – интегральный коэффициент пропускания оптических систем и атмосферы, $E_{e\,\text{пор}}$ – пороговая чувствительность МПОИ, μ – требуемое для работы ОЭССИ отношение сигнал/шум.

Учитывая, что расстояние $S'_2$ можно найти из выражений (4) и (5)

$$S'_2 = \frac{S_2}{2}\frac{h - D'_1}{\Delta + S_2\mathrm{tg}\varphi_2}, \qquad (10)$$

окончательный диаметр входного зрачка ПрОС

$$D_2 = \frac{S_2}{2}\frac{h - D'_1}{\Delta + S_2\mathrm{tg}\varphi_2}\sqrt{\frac{\mu E_{e\text{пор}}}{\pi\tau L_e}}. \qquad (11)$$

Таким образом, чтобы удовлетворить условию инвариантности, необходимо, чтобы диаметр входного зрачка ПрОС $D_2$ был пропорционален квадратному корню отношения пороговой облученности МПОИ к яркости ИИ. Поэтому выбор ИИ и МПОИ должен осуществляться в соответствии с указанным соотношением, поскольку он обуславливает размер входного зрачка ПрОС.

Для серийно выпускаемых МПОИ размером 1/3, 2/3, 1 дюйм получены зависимости *1–3* (рис. 5), которые помогают при практических расчетах быстро найти значение относительного отверстия объектива ББ в зависимости от отношения шумовых параметров МПОИ и энергетических параметров ИИ ($E_{e\,\text{пор}}/L_e$).

При этом, основываясь на положениях геометрической оптики, можно показать, что фокусное расстояние объектива $f'_2$ ПрОС должно удовлетворять выражению

$$f'_2 = \frac{S_2\Delta y'}{\Delta y + \Delta y'}, \qquad (12)$$

где $\Delta y'$ – погрешность определения смещения изображения КЭ в вертикальной плоскости на МПОИ, $\Delta y$ – погрешность определения смещения КЭ в вертикальной плоскости.

Практическая реализация указанных условий в макете показала, что в створных оптико-электронных системах контроля смещений применение зеркальной системы с одним одинарным и одним угловым зеркалом (угол между зеркалами 45°) или призменной системы (призма АР-90° и пентапризма) и объектива, сопряженного с единым матрич-

ным полем анализа, при программной обработке положения изображений позволяет достичь полной инвариантности к разворотам как базового блока, так и контрольных элементов.

*ЛИТЕРАТУРА*


1. *Коняхин И.А., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н.* Об инвариантности в оптико-электронных приборах и системах // Тр. VI Междунар. конф. “Прикладная оптика-2004”. СПб., 2004. Т. 2. С. 46–48.
2. *Джабиев АН., Коротаев В.В., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н.* Дистанционный автоматический контроль предельных деформаций экологически опасных крупногабаритных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41. № 3. С. 18–21.
3. *Коротаев В.В., Мусяков В.Л, Панков Э.Д., Тимофеев А.Н.* Оптический прогибомер // Патент России № 2095755. 1995.
4. *Грейм И.А.* Зеркально-призменные системы. М.: Машиностроение, 1981. 125 с.
5. *Погарев Г.В.* Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 237 с.
6. *Соломатин В.А.* Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками. М.: Машиностроение, 1992. 128 с.
7. *Ишанин Г.Г., Козлов В.В.* Источники излучения. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 400 с.
8. *Якушенков Ю.Г.* Проектирование оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2000. 488 с.