

УДК 629.7.018:2.001.2

РЕПЕРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ВЫВЕРКИ СООСНОСТИ КАНАЛОВ ПРИЦЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Н. В. СЕНАТОРОВ, канд. техн. наук (ЦКБ «Арсенал», г. Киев)

Проведено сопоставление четырех вариантов построения моноблочного зеркального коллиматора по точности задания реперного направления.

Проведено порівняння чотирьох варіантів побудови моноблокового дзеркального коліматора за точністю завдання реперного напрямку.

Comparison of four versions of construction of a single-piece mirror collimator on basis of accuracy of the registration points direction assignment is made.

Проблемным вопросом оптико-электронных прицельных комплексов бронетанковой и авиационной техники является разюстировка оптических каналов в условиях периодических динамических воздействий [1]. Таким воздействиям особенно подвержены крупногабаритные подвижные детали: сканирующие зеркала, переключатели оптических каналов, компенсаторы поворота изображения и пр. Именно поэтому в состав комплексов вводятся реперные элементы, излучение которых охватывает все оптические детали и регистрируется фотоприемником [2]. Для этого они устанавливаются, как правило, на входе комплекса (под защитным стеклом) и жестко крепятся к корпусу прибора. Последнее обстоятельство накладывает определенные ограничения на габариты этих элементов, а недопущение их разюстировки требует специальных методик расчета их оптических схем.

Цель данной статьи — разработка методики расчета оптической системы и сравнение ряда малогабаритных коллиматоров по точности задания реперного направления.

Методика расчета и сравнение оптических схем. Оптическая схема зеркального коллиматора в моноблочном исполнении, т. е. в виде толстой плосковыпуклой линзы приведена на рис. 1. На выпуклую поверхность нанесено зеркальное покрытие и в нем сформирована прозрачная точка F , освещаемая светодиодом (на рисунках опущен). На плоскую поверхность также нанесено зеркальное покрытие, но лишь в зоне диаметром $Dr/2(r^2 - D^2)^{1/2}$, где D — световой диаметр линзы; r — радиус кривизны выпуклой поверхности. Для того чтобы изображение точки F в плоском зеркале находилось в главном фокусе сферического зеркала — толщина линзы d должна быть равна $r/4$.

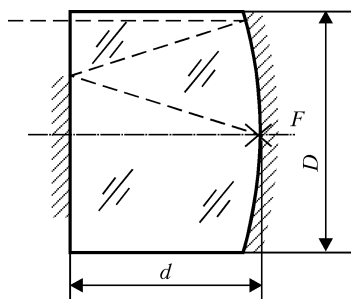


Рис. 1. Оптическая схема зеркального коллиматора на базе плосковыпуклой линзы

© Н. В. СЕНАТОРОВ, 2009

При формировании параллельного пучка световой энергии лучи от точки F (на рис. 1 и других лучи показаны штриховой линией) отражаются плоским зеркалом в направлении сферического зеркала, коллимируются и, не меняя свою структуру, выходят из линзы. Таким образом, создается неразюстируемый источник коллимированного излучения, который может быть использован в качестве реперного элемента. Заметим, что смещения светодиода относительно линзы не влияют на структуру пучков лучей, выходящих из реперного элемента.

Влияние конструктивных параметров сферического зеркала (светового диаметра D и фокусного расстояния $f = r/2$) достаточно полно исследовано в работе [3]. На рис. 2 показан график максимальной расходимости δ пучка параллельных лучей в зависимости от относительной толщины линзы d при условии нормировки $D = 1,0$. Учитывая, что у большинства оптико-электронных прицельных комплексов погрешность прицеливания соизмерима со среднеквадратическим рассеиванием боеприпаса, т. е. не превышает 3 мрад, ошибка задания опорного направления должна быть по крайней мере на порядок меньше этого значения. Из рис. 2 видно, что направление параллельного пучка лучей с ошибкой 0,3 мрад обеспечивается при $d = 1,86$, т. е. при $r = 7,44$. Очевидно, что такие относительные габариты элемента ($\varnothing 1,0 \times 1,86$) приемлемы не для всех прицельных комплексов. Заметим, что моноблочный элемент в линзовом исполнении при тех же габаритах имеет погрешность задания опорного направления более 100 мрад.

Возможным путем сокращения длины моноблока является усложнение оптической схемы. Оптическая схема зеркального коллиматора в моноблочном исполнении, у которого плоское зеркало заменено на сферическое, приведена на рис. 3. При расчете конструктивных параметров такого моноблока используем первый вспомогательный луч, выбрав условия нормировки: $\alpha_1 = 0$, $h_1 = 0,5$, $d_1 = -d_2 = -1,86$, где α_1 , h_1 — соответственно угол наклона и высота первого вспомогательного луча на входе элемента; d_k — толщина элемента в обратном (d_1 отрицательное) и прямом (d_2 положительное) ходе лучей.

Высота h_2 вспомогательного луча на втором зеркале определяется уравнениями

$$h_2 = 0,5 + 1,86\alpha_2, \quad (1)$$

или

$$h_2 = 1,86\alpha_3, \quad (2)$$

где α_2 , α_3 — углы наклона вспомогательного луча после первого и второго отражения со-

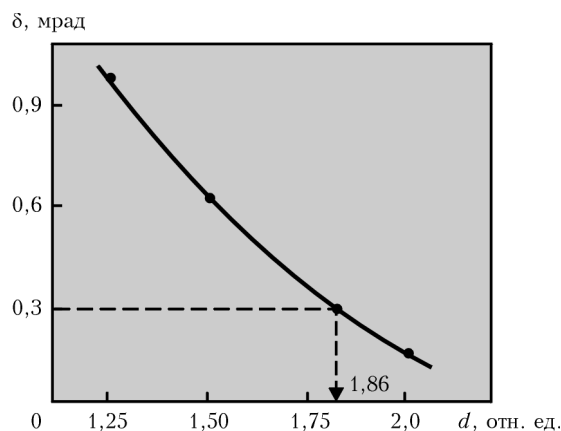


Рис. 2. Зависимость максимальной расходимости пучка от толщины линзы

ответственно. Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет установить взаимосвязь между этими углами:

$$\alpha_3 - \alpha_2 = 0,2688. \quad (3)$$

При таком исполнении оптическая система имеет лишь один свободный параметр α_2 , который можно использовать для коррекции сферической aberrации, определяющей расхождение коллимированного пучка лучей на выходе элемента. Для этого первая сумма Зейделя S_1 , которая характеризует сферическую aberrацию, должна удовлетворять условию [4]

$$S_1 = P_1 h_1 + P_2 h_2 = 0, \quad (4)$$

где P_k (P_1 , P_2) — основной показатель отражающей/преломляющей поверхности элемента, определяемый известным соотношением

$$P_k = [(\alpha_{k+1} - \alpha_k) / (1/n_{k+1} - 1/n_k)]^2 \times (\alpha_{k+1}/n_{k+1} - \alpha_k/n_k), \quad (5)$$

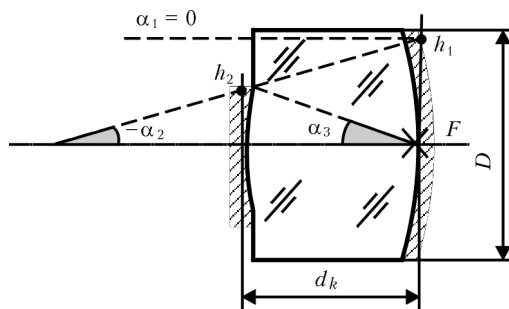


Рис. 3. Оптическая схема зеркального коллиматора на базе двух сферических зеркал

где α_{k+1} , α_k — углы наклона первого вспомогательного луча на выходе и входе поверхности соответственно; n_{k+1} , n_k — показатели преломления оптической среды на выходе и на входе поверхности соответственно; в нашем случае $n_1 = n_3 = n$, а $n_2 = -n$.

После подстановки в (5) всех известных значений углов и показателей преломления с учетом (3) находим

$$P_1 = 0,25n\alpha_2^3, \quad P_2 = 0,0181n(0,2688 + 2\alpha_2).$$

Подставив в выражение (4) найденные выражения P_1 , P_2 , h_1 и h_2 и преобразовав его, получим окончательное уравнение для нахождения угла α_2 :

$$\alpha_2^3 - 0,5376\alpha_2^2 - 0,2168\alpha_2 + 0,0192 = 0. \quad (6)$$

Как видим, в выражение (6) не входит показатель преломления среды, т. е. можно использовать стекло с малым удельным весом. Решение этого кубического уравнения методом Кардано дает одно действительное значение $\alpha_2 = -0,1150$. Подставив последовательно найденное значение угла α_2 в (1) и (3), определим $h_2 = 0,2861$ и $\alpha_3 = 0,1538$. При известных значениях углов наклона и высот вспомогательного луча радиусы кривизны r_k отражающих поверхностей элемента находятся по известным формулам [4]:

$$r_1 = 2h_1/\alpha_2 = -8,6956, \\ r_2 = 2h_2/(\alpha_3 + \alpha_2) = 14,7474.$$

Точный расчет лучей, исходящих из точки F , показывает, что максимальная расходимость пучка лучей при таких конструктивных данных составляет 0,3 мрад, т. е. такая же,

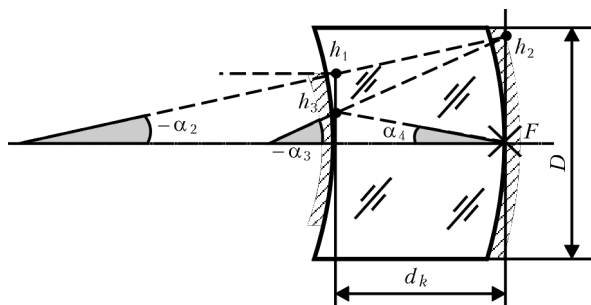


Рис. 4. Оптическая схема зеркального коллиматора на базе линзы в форме мениска

как и у простого сферического зеркала в моноблочном исполнении. По-видимому, существенное влияние на расходимость здесь оказывают aberrации высоких порядков.

Оптическая схема, в которой моноблок выполнен в виде толстого мениска с зеркальным покрытием на обеих сферических поверхностях (на первой — в ограниченной зоне), т. е. $r_1 = r_3$, приведена на рис. 4. При формировании параллельного пучка световой энергии лучи от точки F последовательно отражаются первым сферическим зеркалом в направлении второго сферического зеркала, снова отражаются и преломляются на той же поверхности, на которую нанесен участок зеркального покрытия. При тех же условиях нормировки высота вспомогательного луча на отражающих поверхностях определяется уравнениями

$$h_2 = 0,5 - 1,86\alpha_2, \quad (7)$$

$$h_3 = 0,5 - 1,86(\alpha_2 - \alpha_3) \quad (8)$$

или

$$h_3 = 1,86\alpha_4, \quad (9)$$

где α_2 , α_3 , α_4 — углы наклона вспомогательного луча после преломления и последовательных отражений соответственно. Совместное решение уравнений (8) и (9) позволяет установить взаимосвязь между углами:

$$\alpha_4 = 0,2688 - (\alpha_2 - \alpha_3). \quad (10)$$

При известных значениях углов наклона и высот вспомогательного луча радиусы кривизны r_k первой поверхности элемента находятся по известным формулам [4]:

$$r_1 = (n - 1)/n\alpha_2, \\ r_3 = 3,72\alpha_4/(\alpha_4 + \alpha_3). \quad (11)$$

С учетом равенства этих радиусов выражение (10) при произвольном выборе марки стекла (у наиболее распространенного стекла марки К108 $n = 1,5183$) находим взаимосвязь между углами α_2 и α_3 :

$$\alpha_3 = (\alpha_2^2 - 0,3147\alpha_2 + 0,0123)/(\alpha_2 - 0,3414).$$

Подставляя последовательно это выражение в (10) и (8), находим зависимость параметров α_4 и h_3 от угла α_2 :

$$\alpha_4 = (0,2955\alpha_2 - 0,0794) / (\alpha_2 - 0,3414),$$

$$h_3 = 1,86(0,2955\alpha_2 - 0,0794) / (\alpha_2 - 0,3414).$$

Как видим, и этом случае оптическая система имеет лишь один свободный параметр α_2 , который можно использовать для коррекции сферической aberrации. Для этого первая сумма Зейделя S_I , которая характеризует сферическую aberrацию, должна удовлетворять условию [4]:

$$S_I = P_1 h_1 + P_2 h_2 + P_3 h_3 = 0, \quad (12)$$

где P_k определяется по формуле (5).

После подстановки в (12) всех значений углов, высот, показателя преломления выбранного стекла и преобразований находим окончательное выражение, которое описывает условие устранения сферической aberrации в этой системе в зависимости только от свободного параметра α_2 :

$$2,826\alpha_2^3(\alpha_2 - 0,3414)^4 - 0,3796(0,5 - 1,86\alpha_2) \times$$

$$\times (2\alpha_2^2 - 0,6561\alpha_2 + 0,0123)(0,0267\alpha_2 + 0,0123)^2 \times$$

$$\times (\alpha_2 - 0,3414) + 0,706(0,2955\alpha_2 - 0,0794) \times$$

$$\times (-\alpha_2^2 + 0,6102\alpha_2 - 0,0918)^2 \times$$

$$\times (\alpha_2^2 - 0,0192\alpha_2 - 0,0671) = 0.$$

Графическое решение этого уравнения дает три действительных значения параметра α_2 , из которых выбираем наименьшее по абсолютному значению: $\alpha_2 = -0,1110$. Подставив найденное значение угла α_2 в (11), вычислим: $r_1 = r_3 = -1,5377$. Второй радиус r_2 целесообразно определять путем последовательного применения нулевого инварианта Аббе [4]: $r_2 = -3,4831$.

Точный расчет лучей, исходящих из точки F , показывает, что максимальная расходимость пучка лучей при таких конструктивных данных составляет 0,5 мрад, т. е. значительно хуже, чем у простого сферического зеркала в моноблочном исполнении. По-видимому, существенное влияние на расходимость здесь также оказывают aberrации высоких порядков.

Иная оптическая схема, в которой моноблок выполнен в виде толстой линзы с зер-

кальным покрытием на двух сферических поверхностях (на первой — в ограниченной зоне), при этом $r_1 \neq r_2 \neq r_3$, изображена на рис. 5.

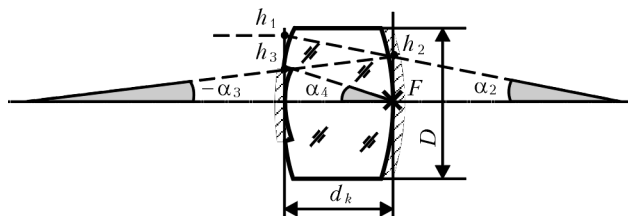


Рис. 5. Оптическая схема зеркального коллиматора на базе линзы с двумя зеркальными поверхностями

При формировании параллельного пучка световой энергии лучи из точки F последовательно отражаются первым сферическим зеркалом в направлении второго сферического зеркала, снова отражаются и затем преломляются на третьей поверхности. Такая оптическая система имеет два независимых параметра. Один из них можно использовать для коррекции сферической aberrации, а второй — для сохранения площади выходного зрачка реперного элемента такой же, как и у элемента на базе плосковыпуклой линзы, т. е. следует принять высоту вспомогательного луча на второй отражающей поверхности $h_3 = 0,25$ и угол наклона вспомогательного луча после второго отражения $\alpha_4 = h_3/d = 0,1344$.

При принятых выше условиях нормировки высота вспомогательного луча на второй отражающей поверхности определяется уравнениями:

$$h_2 = 0,5 - 1,86\alpha_2 \quad (13)$$

или

$$h_2 = h_3 - 1,86\alpha_3 = 0,25 - 1,86\alpha_3. \quad (14)$$

Совместное решение уравнений (13) и (14) позволяет установить взаимосвязь между углами α_3 и α_2

$$\alpha_3 = \alpha_2 - 0,1344. \quad (15)$$

После подстановки в (5) всех известных значений углов наклона вспомогательного луча с учетом (15) находим выражения для основного показателя всех поверхностей элемента:

$$P_1 = \alpha_2^3 n / (1 - n)^2, P_2 = -0,0045n(2\alpha_2 - 0,1340), \\ P_3 = 0,25\alpha_2 n(0,2688 - \alpha_2)^2.$$

Подставив в (12) найденные выражения P_1, P_2, P_3 , известные значения h_1 и h_3 и преобразовав это выражение с учетом $n = 1,5183$, получим окончательное уравнение для нахождения угла α_2

$$2,11\alpha_2^3 - 0,067\alpha_2^2 + 0,0125\alpha_2 - 0,0003 = 0.$$

Решение этого кубического уравнения методом Кардано дает одно действительное значение $\alpha_2 = 0,025$. Подставив последовательно найденное значение угла α_2 в (13) и (15), получаем $h_2 = 0,4535$ и $h_3 = -0,1094$. При известных значениях углов наклона и высот вспомогательного луча радиусы кривизны r_k рабочих поверхностей элемента находятся по известным формулам [4]:

$$r_1 = (n - 1) / n\alpha_2 = 6,8272, \\ r_2 = 2h_2 / (\alpha_3 + \alpha_2) = -10,746, \\ r_3 = 2h_3 / (\alpha_4 + \alpha_3) = 20,0.$$

Точный расчет лучей, исходящих из точки F , показывает, что максимальная расходимость пучка лучей при таких конструктивных данных составляет 0,45 мрад, т. е. несколько хуже, чем у простого сферического зеркала в моноблочном исполнении. По-видимому, существенное влияние на расходимость здесь также оказывают аберрации высоких порядков.

Заключение. Проведенные расчеты показали, что усложнение оптической схемы ре-

перного элемента не дает выигрыша в точности построения пучка параллельных лучей, который можно было бы использовать для сокращения длины моноблока. Поэтому, если габариты зеркального коллиматора в моноблочном исполнении (см. рис. 1) неприемлемы, остаются два пути сокращения его габаритов. Во-первых, можно учесть экранирование выходящего пучка лучей плоским зеркалом и определить плоскость наилучшей установки прозрачной точки. Как видно из рис. 2, максимальная расходимость δ имеет постоянный знак: на внешнем крае кольцевой зоны она составляет 0,3 мрад, а на внутреннем — 0,04 мрад, т. е. среднее значение расходимости равно 0,13 мрад. Этому значению расходимости соответствует высота луча 0,377 на выходе элемента, и плоскость наилучшей установки обеспечивается при толщине плосковыпуклой линзы $d = -1,857$. Вторым является радикальный путь — использование асферической оптики. ■

1. Хомченко А. Я., Ревякин Л. Д., Гордиенко В. И. и др. Автоматизация контроля выверки согласования линии визирования прицела с осью канала ствола танковой пушки // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2005. — № 4(25). — С. 29–32.
2. Соловьев Г. Я., Гордиенко В. И., Мазуркин И. В. и др. Согласование каналов наблюдения и лазерных дальномеров в комплексированных приборах наблюдения и прицеливания // Збірка наук. праць 3-ї наук.-техн. конф. «Приладобудування 2004: стан і перспективи». — К.: НТУУ «КПІ», 2004. — С. 57–58.
3. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972. — 534 с.
4. Турыгин И. А. Прикладная оптика. — М.: Машиностроение, 1966. — 431 с.