

УДК 629.7.018:2.001.2

ЗЕРКАЛЬНЫЕ МЕНИСКОВЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИЦЕЛОВ

Н.В. СЕНАТОРОВ, канд. техн. наук (КП СПС «Арсенал», г. Киев),
А.В. ПАЛЕХИН, инж. (КБ «Артиллерийское вооружение», г. Киев)

Рассмотрена оптическая схема прицела для стрелкового оружия на базе центрированной зеркальной менисковой схемы. Показаны пути повышения точности построения линии прицеливания в оптической схеме прицела и улучшения его светотехнических характеристик.

Розглянуто оптичну схему прицілу для стрілецької зброї на базі центрованої дзеркальної менискової схеми. Показано шляхи підвищення точності побудови лінії прицілювання в оптичній схемі прицілу та покращення його світлотехнічних характеристик.

The optic scheme of sight for shooting weapon on the base of centered mirror meniscus scheme is considered. The ways to increase the accuracy of aiming line construction in optic scheme of sight and improvement of its light technical characteristics are shown.

Идея использования тонкого полупрозрачного мениска в качестве коллимирующего объекта прицела впервые высказана инженером Н.И. Куценко [1] еще в 1960-е годы применительно к авиационным стрелковым прицелам. Позднее она была развита в работе [2] при построении оптических схем авиационных пилотажно-прицельных индикаторов. Сегодня менисковые схемы находят самое широкое применение не только в авиации, но и при создании прицелов для стрелкового оружия. При этом развитие этих схем идет по двум независимым направлениям: децентрированные и центрированные [3]. Достоинство первых — высокое светопропускание в каналах наблюдения пространства целей и визирования прицельной сетки. Недостаток — большая длина, обусловленная необходимостью уменьшать параллактическую ошибку, обусловленную не только сферической аберрацией вогнутого зеркала, но и аберрацией комы, которая прямо пропорциональна углу децентрировки [4]. Например, прицел «Кобра» [3] имеет длину 140 мм, прицел «Монолит» [6] — 155 мм. Достоинство вторых — малые габариты, поскольку сферическая аберрация центрированного зеркала убывает прямо пропорционально третьей степени его фо-

кусного расстояния [4]. Недостаток этих схем связан с вводом в оптическую схему прицельной сетки: использование для этой цели светоделиителя ведет к двукратному снижению светопропускания в канале наблюдения пространства целей [3]. С этой точки зрения преимущество следует отдавать центрированным менисковым схемам, в которых используется сетка с искусственной подсветкой с торца [7]. При этом возможен ряд принципиальных оптических схем, отличающихся конструктивным исполнением сетки.

Цель данной статьи — сопоставить точность и светотехнические характеристики ряда центрированных зеркальных менисковых схем с искусственной подсветкой сетки применительно к прицелам для стрелкового оружия.

Теория [4] устанавливает следующую зависимость между максимальной сферической аберрацией ρ (мрад) и отношением диаметра сферического зеркала D к его фокусному расстоянию f' :

$$\rho = 15,6(D/f')^3. \quad (1)$$

Если принять, что параллактическая ошибка нулевой линии прицеливания не должна превышать 1 мрад (100 мм на дистанции 100 м), то согласно (1) при условном диаметре зеркала $D = 1$ относительное фокусное рас-

© Н.В. СЕНАТОРОВ, А.В. ПАЛЕХИН, 2009

стояние f' его вогнутой отражающей поверхности должно удовлетворять условию $f' \geq 2,5$, т. е. радиус ее кривизны R должен быть более 5. При этом первая сумма Зейделя S_1 , которая характеризует сферическую aberrацию зеркала, находится по известной формуле

$$S_1 = -0,5DP_1, \quad (2)$$

где P_1 — основной параметр оптической поверхности, который для сферического зеркала вычисляется по формуле

$$P_1 = -0,03125(D/f')^3. \quad (3)$$

Подставив в (3) значения $D = 1$ и $f' = 2,5$, вычислим $P_1 = -0,002$. С учетом этого согласно (2) находим $S_1 = 0,001$.

В классическом варианте построения оптической схемы прицела на базе полупрозрачного мениска [8] — сетка в виде зеркальных или вытравленных на плоскопараллельной пластине 1 (рис. 1) визирных знаков установлена перпендикулярно оптической оси полупрозрачного телескопического мениска 2. Сетка наносится на поверхность пластины, обращенную к глазу стрелка, а подсветка знаков осуществляется светодиодом 3 с торца детали 1. Претерпевая полное внутреннее отражение на плоских поверхностях пластины 1, излучение светодиода 3 освещает визирные знаки и рассеивается на вытравленной канавке или отражается от зеркальных элементов рисунка сетки в направлении мениска 2. Учитывая, что плоскость визирных знаков совмещена с главным фокусом F' зеркального объектива, сформированного светоделителем/спектроразделителем на вогнутой поверхности мениска 2,

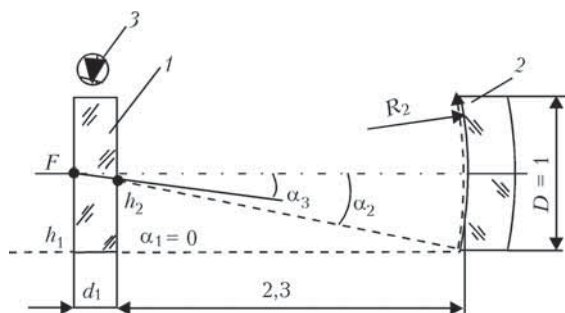


Рис. 1. Оптическая схема прицела с сеткой на плоскопараллельной пластине: 1 — пластина с сеткой; 2 — полупрозрачный мениск; 3 — светодиод

пучки лучей после отражения коллимируются и, проходя пластину 1 в обратном направлении, попадают в глаз стрелка, создавая изображение прицельной сетки. На рис. 1 один из крайних лучей показан штриховой линией. Через пластину 1 и телескопический мениск 2 стрелок наблюдает пространство целей практически с однократным увеличением, учитывая форму и малую толщину детали 2.

Оценим влияние плоской преломляющей поверхности пластины 1 в расходящихся пучках лучей на параллактическую ошибку при определенных выше параметрах отражающей поверхности мениска ($D = 1$ и $f' = 2,5$, т. е. $R_2 = 5$), приняв относительное значение толщины детали 1 равным $d_1 = 0,03037$ (соответствует приведенному к воздуху значению 0,2 для стекла марки К108, у которого показатель преломления $n = 1,5187$). Оценку проведем с помощью первого вспомогательного луча, приняв его высоту $h_1 = -0,5$ и угол наклона к оптической оси $\alpha_1 = 0^\circ$. Углы наклона этого луча после отражения и преломления определяются соответственно по формулам: $\alpha_2 = h_1/f' = 0,2$; $\alpha_3 = \alpha_2/n = 0,13173$. Высота первого вспомогательного луча на преломляющей поверхности пластины составляет: $h_2 = h_1 + (f' - d_1/n) = -0,04$. Первая сумма Зейделя S_1 , которая характеризует сферическую aberrацию системы, находится по формуле

$$S_1 = h_1P_1 + h_2P_2, \quad (4)$$

где P_2 — основной параметр оптической поверхности, который для плоской преломляющей поверхности определяется зависимостью

$$P_2 = [(\alpha_3 - \alpha_2)/(1/n + 1)]^2 (\alpha_3/n + \alpha_2) \quad (5)$$

и составляет $P_2 = 0,00453$. Подставляя в (4) известные значения h_i и P_i , находим $S_1 = 0,00082$.

Сопоставив значения первой суммы Зейделя для зеркала и зеркала, работающего совместно с плоской преломляющей поверхностью, можно сделать вывод — последний вариант уменьшает в 1,2 раза параллактическую ошибку в области aberrаций третьего порядка. В этой оптической схеме точный расчет

хода лучей показывает, что максимальная параллактическая ошибка центральной точки прицельной сетки составляет 0,82 мрад.

Условием полного исключения параллактической ошибки, обусловленной сферической аберрацией третьего порядка, является равенство нулю S_1 в уравнении (4). При определенных выше параметрах отражающей поверхности мениска ($D = 1$ и $f' = 2,5$, т. е. $R_2 = 5$) единственным свободным параметром в этом уравнении является α_3 . Подставив в (4) известные значения $h_1 = -0,5$, $h_2 = -0,04$ и выражение (5) с учетом $\alpha_2 = 0,2$ и $n = 1,5187$ и приравняв его нулю, получим кубическое уравнение

$$0,22607\alpha_3^3 - 0,15908\alpha_3^2 + 0,0365\alpha_3 - 0,00175 = 0.$$

Решение этого уравнения методом Кардано дает одно действительное значение параметра $\alpha_3 = 0,0643$. При известных значениях α_i , n и h_2 радиус кривизны преломляющей поверхности находится по формуле

$$R_1 = h_2(n+1) / (n\alpha_3 + \alpha_2)$$

и составляет $R_1 = 0,20251$. Для того чтобы изображение центральной точки сетки совпало после преломления с главным фокусом зеркального объектива, удаление d_1 сетки от этой преломляющей поверхности должно быть $-0,6221$.

На рис. 2 изображена принципиальная оптическая схема прицела, построенная на основе расчетных данных. Поскольку радиус R_1 получается крутым при малом световом диаметре ($|2h_2| = 0,08$), то для исключения влияния детали 1 на условия наблюдения через нее окружающего пространства, она должна иметь форму толстой плоскопараллельной пластины с сеткой на плоскости, которая обращена к глазу наблюдателя, и сферической вогнутой поверхностью с противоположной стороны.

Проблемным вопросом такой схемы остается паразитный рефлекс, образующийся лучами от сетки, которые, преломляясь на плоскости детали 1, заполняют апертуру зеркального объектива на мениске 2. Для предотвращения этого явления сферическая поверх-

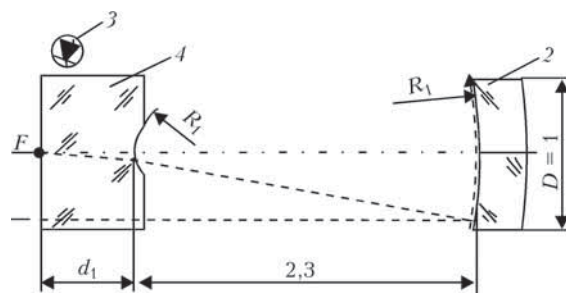


Рис. 2. Оптическая схема прицела с сеткой на пластине со сферической вогнутой поверхностью: 1 — пластина с сеткой; 2 — полупрозрачный мениск; 3 — светодиод

ность на детали 1 должна быть окаймлена непрозрачной дорожкой шириной 0,03687.

Точный расчет хода лучей в этой оптической схеме показывает, что максимальная параллактическая ошибка центральной точки прицельной сетки составляет 0,04 мрад. На рис. 2 один из крайних лучей показан штриховой.

Следовательно, сферическая преломляющая поверхность в сочетании с зеркальной поверхностью практически исключает параллактическую ошибку в прицеле, и эту схему целесообразно использовать для прицелов высокоточного оружия. Единственный недостаток этой оптической схемы — виньетирование коллимированных пучков лучей в центральной зоне диаметром 0,15374, соизмеримой с диаметром зрачка глаза.

Проблемным вопросом обеих рассмотренных принципиальных оптических схем является низкая освещенность визирных знаков на прицельной сетке. Дело в том, что при использовании зеркальных знаков ось индикатрисы отражения направлена не к центру зеркального объектива. Поэтому в этих схемах необходимо использовать несколько светодиодов для повышения яркости изображения прицельной сетки.

С этой точки зрения практический интерес представляет оптическая схема, изображенная на рис. 3. В основе ее построения лежит тот факт, что если на обе поверхности телескопического мениска 2 нанести светоделительные покрытия, то в оптической схеме образуется два фокуса. Например, если вогнутая поверхность имеет радиус кривизны $R_2 = 5$, то ее главный фокус F'_1 удален от мениска на рас-

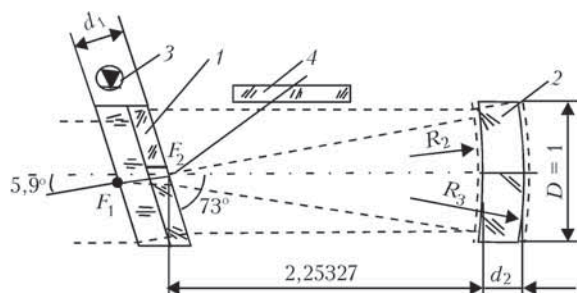


Рис. 3. Оптическая схема прицела с сеткой на составной плоскопараллельной пластине: 1 — пластина с сеткой; 2 — полупрозрачный мениск; 3 — светодиод; 4 — светофильтр

стояние $-2,5$. Радиусы кривизны преломляющих поверхностей телескопической линзы связаны известным соотношением:

$$R_3 = R_2 + (1 - 1/n)d_2,$$

где d_2 — толщина мениска. При $d_2 = 0,3037$ и $n = 1,5187$ радиус кривизны выпуклой поверхности мениска составляет $R_3 = 5,10367$ и ее главный фокус F'_2 удален от мениска на расстояние $-2,25327$. Следовательно, в такую оптическую схему можно ввести две сетки. Первую сетку можно выполнить в виде зеркальных знаков, совмещенных с фокусом F'_2 , а на выпуклую поверхность мениска нанести нейтральный светоделитель. Подсветка этих знаков может осуществляться естественным светом. Вторую сетку можно выполнить в виде вытравленных знаков, совмещенных с фокусом F'_1 , а на вогнутую поверхность мениска нанести спектроделитель, спектр отражения которого согласован со спектром свечения светодиода 3, который освещает эти знаки.

Чтобы создать благоприятные условия для заполнения апертуры зеркального объектива естественным светом, отражающимся от зеркальных знаков, сетка должна быть нанесена на наклонную пластину 1. Угол ее наклона к оптической оси должен быть в диапазоне $45...75^\circ$. При угле наклона 73° относительная толщина пластины должна составлять $d_1 = 0,3666$ для показателя преломления стекла К108 на длине волны 625 нм (соответствует максимуму излучения светодиода STAR/OLXHL-ND98, у которого $\lambda_{\max} = 625$ нм; ширина спектра на уровне сигнала $0,5$ равна 20 нм; световой поток равен 27 лм).

При прицеливании в условиях высокой яркости неба (и как результат высокой яркости фона) естественный свет отражается зеркальными знаками на пластине 1 в направлении мениска 2, проходит спектроделитель на вогнутой поверхности мениска, отражается от нейтрального светоделителя на выпуклой поверхности в обратном направлении, снова проходит спектроделитель и выходит коллимированными пучками лучей. При этом апертура зеркального объектива полностью заполнена, и центральная точка прицельной сетки наблюдается в пределах всего выходного зрачка прицела. Для того чтобы в оптической схеме не формировались паразитные рефлекссы при отражении естественного света от спектроделителя — в оптической схеме предусмотрен светофильтр 4, отсекающий свет в области спектра отражения спектроделителя. Для того чтобы естественный свет не попадал на канавку пластина 1 выполнена склеенной из трех деталей, при этом плоскость контакта двух деталей разделена непрозрачной маской. Плоскость маски параллельна плоскости светофильтра 4, а ее положение выбрано из условия непопадания лучей, прошедших светофильтр 4, на вытравленную сетку.

При прицеливании в условиях низкой освещенности (например, в сумерках, когда нет необходимости в ярком изображении прицельной сетки) включается светодиод 3. Свет рассеивается канавкой в направлении мениска 2 и полностью отражается спектроделителем на его вогнутой поверхности коллимированными пучками в глаз стрелка.

На рис. 3 крайние лучи показаны штриховой. Точный расчет хода лучей в этой оптической схеме дал такие результаты. Максимальная параллактическая ошибка центральной точки прицельной сетки, сформированной зеркальными знаками, составляет $2,6$ мрад (260 мм на дистанции 100 м), хроматизм в спектральном диапазоне $480...610$ нм не превышает $0,3$ мрад. Максимальная параллактическая ошибка центральной точки прицельной сетки, сформированной вытравленными знаками, составляет $1,2$ мрад. Таким образом, эта схема имеет ограниченное применение по

дальности стрельбы при использовании прицельной сетки в виде зеркальных знаков.

Рассмотренные подходы к проектированию прицелов для стрелкового оружия на базе центрированных зеркальных менисковых схем показывают возможность создания высокоточного прицела, в котором для повышения яркости изображения прицельной сетки необходимо использование нескольких светодиодов и прицела с естественной подсветкой сетки, но с более низкой точностью. Выбор одной из трех рассмотренных оптических схем должен производиться разработчиком оружия совместно с разработчиком прицела, исходя из условий боевого применения оружия. 🗨

1. А. с. 243880 СССР. Коллиматорный визир / Н.И. Куценко, Е.Г. Делеур. — БИ. — 1969. — № 17.
2. Сенаторов В.Н., Полежаев В.В. Авиационные стрелковые прицелы и пилотажно-прицельные индикаторы // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2008. — № 1(26). — С. 30–34.
3. Сенаторов В.Н., Микитенко В.И. Сопоставительный анализ оптических схем коллиматорных прицелов // Там же. — 2003. — № 7. — С. 11–19.
4. Турыгин И.А. Прикладная оптика. — М.: Машиностроение, 1966. — 431 с.
5. Колдунов С. Коллиматорный прицел «Кобра» // Магнум. — 1999. — Март–апрель. — С. 44–45.
6. Кожохин В.В. Оптические прицелы с точки зрения инженера-оптика // Ружье. — 1999. — № 5. — С. 34–37.
7. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. М.Я. Кругера, В.А. Панова. — Л.: Машиностроение, 1967. — 760 с.
8. Пат. 2229669 Россия. Оптический прицел для стрелкового оружия / А.М.-Ш. Итигин, П.Ф. Шульженко, С.И. Лепин. — Оpubл. 27.05.2004.



MSPO

Международная выставка оборонной промышленности

06.09.2010 — 09.09.2010 Польша, Кельце