

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ КОЛЛИМАТОРНЫХ ПРИЦЕЛОВ

*Сенаторов Н.В.*, инж. (КП «ЦКБ «Арсенал»)

*Микитенко В.И.* канд. тех. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),

На базе разработанной классификации и методики сопоставления дано сравнение оптических схем малогабаритных коллиматорных прицелов.

На базі розробленої класифікації та методики зіставлення дано порівняння оптичних схем малогабаритних коліimatorних прицілів.

There is given comparison of the small-size collimator sight optical schemes are based on developed classification and comparing methodic.

Для сопоставления и анализа принципиальных оптических схем малогабаритных коллиматорных прицелов (КП) по методике частных  $K_i$  и обобщенного показателя  $K_\Sigma$ , изложенной в [1], необходимо привести все схемы к нормированным условиям. Будем исходить из равенства единице фокусного расстояния объектива  $f'$  и яркости  $B_c$  прицельной сетки, а относительное отверстие объектива примем равным 1 : 4.

На рис. 1...5 представлены в одном масштабе принципиальные оптические схемы линзовых КП применительно к размещению на стрелковом оружии.

На рис. 1 изображена схема одного из первых КП [2], где обозначено: 1- оптическое совмещающее устройство, 2 – объектив – склеенный дублет, 3 – зеркало для удобства компоновки прицела на оружии и 4 – прицельная сетка; т.е. количество оптических компонентов (Р), которые определяют надежность, равно 4. Прицел предназначается для стрельбы при монокулярном наблюдении цели через оптическое совмещающее устройство 2.

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx f' = 1, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx 2 D = 0,5,$$

где:  $L$  – длина,  $D$  – ширина и  $H$  – высота.

При использовании нейтрального полупрозрачного зеркала (отражателя) в качестве оптического совмещающего устройства эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}, \quad B_\phi = 10 B_c = 10,$$

где:  $d$  и  $t$  – соответственно диаметр и удаление выходного зрачка, а  $B_\phi$  – яркость фона, на котором может наблюдаться прицельная сетка с заданным контрастом.

При использовании источника света с узким спектром свечения и спектроделителя в качестве оптического совмещающего устройства, у которого интегральный коэффициент светопропускания в видимой области спектра составляет 0,5, а коэффициент отражения в области спектра свечения источника равен 0,8:  $B'_\phi = 16 B_c = 16$ .

Основное достоинство прицела – высокая точность построения линии прицеливания благодаря склеенному объективу- дублету. Параллактическая ошибка  $\delta = 0$ .

На рис. 2 изображена иная компоновка рассмотренного прицела. Для решения задачи скрытого прицеливания (без прямого визуального контакта с целью) в ней зеркало 3 установлено между объективом 2 и оптическим совмещающим устройством 1. При этом оно

образует с последним подвижный зеркальный блок [3, 4]. Цель наблюдается в отраженных пучках лучей, а прицельная сетка – в проходящих через элемент 1.

По сравнению с выше рассмотренной схемой эта имеет большую длину:

$$L \approx 1,25f' = 1,25$$

при тех же значениях остальных семи характеристик.

Недостатком обеих рассмотренных схем является их относительно низкая надежность:  $P = 4$ . С этой точки зрения предпочтительнее схемы, изображенные на рис. 3...5 и предназначенные для бинокулярного (стереоскопического) прицеливания. В них цель наблюдается одним глазом при прямом визуальном контакте с целью, а прицельная сетка – другим глазом.

В схеме на рис. 3 прицельная сетка 1 устанавливается в фокальной поверхности объектива - симплета 2 [5, 6], т.е.  $P = 2$ .

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx f' = 1, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx D = 0,25.$$

Остальные характеристики:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}, \quad Вф = 10 \text{ Вс} = 10, \quad \delta = 6'.$$

В схеме на рис. 4 прицельная сетка 1 совмещена с фокусом преломляющей поверхности - схема представляет собой оптический моноблок 2 [7, 8], т.е.  $P = 1$ .

По сравнению с однолинзовой схемой этой свойственна большая погрешность линии прицеливания:  $\delta = 10'$  при неизменных значениях остальных семи характеристик.

Схема, изображенная на рис. 5, отличается от схемы на рис. 4 лишь тем, что в ней для индикации зоны, где погрешность линии прицеливания не превышает  $6'$ , применен интерференционный светофильтр 3 и моноблок 2 образован склейкой двух оптических деталей с одинаковым показателем преломления.

Все характеристики этой схемы тождественны характеристикам предыдущей.

На рис. 6...10 представлены в одном масштабе принципиальные оптические схемы зеркальных КП применительно к размещению на стрелковом оружии.

На рис. 6 изображена схема одного из первых КП [2], где обозначено: 1- зеркальный объектив, 2- полупрозрачное зеркало, 3 – зеркало для удобства компоновки прицела на оружии и 4 – прицельная сетка; т.е.  $P = 4$ . Прицел предназначается для стрельбы при монокулярном наблюдении цели через полупрозрачное зеркало 2.

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx 0,75f' = 0,75, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx 2 D = 0,5.$$

Эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}, \quad Вф = 5 \text{ Вс} = 5.$$

При использовании сферического зеркала с относительным отверстием  $1 : 4$  погрешность линии прицеливания составляет:  $\delta = 1'$ .

К недостатку схемы следует отнести необходимость применения относительно тонкого полупрозрачного зеркала 2, установленного в сходящихся пучках лучей перед объективом 1, что снижает надежность конструкции прицела. При увеличении его толщины

начинает сказываться сферическая абберрация плоскопараллельной пластинки, пропорциональная толщине [9], увеличивая  $\delta$ .

С этой точки зрения предпочтительнее схема, изображенная на рис. 7 [10]. В ней полупрозрачное зеркало 2 установлено в параллельных пучках лучей, сформированных зеркальным объективом 1. Однако такая схема требует дополнительного зеркала 5 ( $P = 5$ ) для монокулярного наблюдения цели, увеличивая в итоге высоту прицела:

$$H \approx 3 D = 0,75$$

при неизменных остальных шести характеристиках.

К недостатку двух последних схем следует отнести низкую яркость фона, на котором может наблюдаться прицельная сетка, по сравнению с линзовыми схемами. На рис. 8 представлена зеркальная схема, позволяющая улучшить этот показатель [11, 12]. Ее принципиальное отличие от схемы, изображенной на рис. 6, заключается в том, что она дополнена вторым зеркальным объективом 5 со светоделителем на вогнутой поверхности мениска. Цель наблюдается одним глазом через оптическое совмещающее устройство 2 и мениск 5. При ограничении светопропускания фона значением  $\tau_{\phi} = 0,5$  и оптимизации отношения  $\rho : \tau$  светоделителей [11] показатель  $V_{\phi}$  в этой схеме достигает 5,6 при  $\tau_c = 0,28$ . При использовании источника света с узким спектром свечения и спектроделителя на дополнительном зеркале, у которого интегральный коэффициент светопропускания в видимой области спектра и коэффициент отражения в области спектра свечения источника составляют 0,8:  $V'_{\phi} = 8,4$   $V_c = 8,4$ .

Недостаток двух последних зеркальных схем – низкая надежность ( $P = 5$ ) по сравнению с линзовыми, у которых  $P = 1 \dots 4$ . Этот недостаток устраняется в моноблочной зеркальной схеме (рис. 9) [13], у которой  $P = 1$ . Схема строится из трех склеенных деталей: призмы 1 типа АР-90° со сферической зеркальной поверхностью, призмы 2 типа БР-180° и толстой пластины 3 с сеткой 4 на торце. Прицел предназначается для стрельбы при монокулярном наблюдении цели через плоскопараллельную пластину, образованную деталями 1 и 2. По всем остальным семи характеристикам эта схема идентична схеме на рис. 6. В тоже время, эта моноблочная зеркальная схема уступает моноблочной линзовой схеме (рис. 4 и 5) по высоте.

На рис. 10 изображена зеркальная моноблочная схема КП, которая по меньше моноблочной линзовой по длине и высоте. Моноблок представляет собой толстую плосковыпуклую линзу 1, сферическая поверхность которой зеркальная и с ней совмещена прицельная сетка 2, а на плоскую нанесен светоделитель, т.е.  $P = 1$ . Толщина линзы равна четверти радиуса кривизны выпуклой поверхности линзы. Прицел предназначен для бинокулярного прицеливания.

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx 0,5f' = 0,5, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx D = 0,25.$$

Эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}, \quad V_{\phi} = 2,5 \quad V_c = 2,5.$$

При сферической поверхности линзы 1 погрешность линии прицеливания при относительном отверстии зеркального объектива 1: 4 составляет:  $\delta = 1'$ .

На рис. 11...16 представлены в одном масштабе принципиальные оптические схемы менисковых КП применительно к размещению на стрелковом оружии. Всех их объединяет то, что они предназначены для монокулярного наблюдения цели через оптическую деталь в

форме мениска со светоделителем на вогнутой поверхности, и этот светоделитель является, по существу, коллимирующим зеркальным объективом для прицельной сетки.

На рис. 11 изображена схема одного из первых менисковых КП [14], где обозначено: 1- менисковый объектив, 2 - оптическое совмещающее устройство, 3 – зеркало для удобства компоновки прицела на оружии и 4 – прицельная сетка; т.е.  $P = 4$ .

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx 0,75 f' = 0,75, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx 2 D = 0,5.$$

Эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм.}$$

При ограничении светопропускания фона значением  $\tau_{\phi} = 0,5$  и оптимизации отношения  $\rho : \tau$  светоделителей [11] показатель  $V_{\phi}$  в этой схеме составляет:  $V_{\phi} = 1,25 V_c = 1,25$  при  $\tau_c = 0,0624$ . При использовании мениска со сферическими поверхностями погрешность линии прицеливания при относительном отверстии зеркального объектива 1: 4 составляет:  $\delta = 1'$ .

При использовании источника света с узким спектром свечения и спектроделителя на мениске, у которого интегральный коэффициент светопропускания в видимой области спектра и коэффициент отражения в области спектра свечения источника составляют 0,8:  $V'_{\phi} = 3,75 V_c = 3,75$ .

Как видно из этих данных, схеме присуща самая низкая яркость фона, на котором может наблюдаться прицельная сетка, по сравнению со всеми рассмотренными схемами, большая высота и низкая надежность. Следующие три схемы свободны от этих недостатков. Их особенность в том, что используется отражающая прицельная сетка, освещаемая внешним светом.

В оптической схеме на рис. 12 прицельная сетка 1, нанесенная на плоскопараллельную пластину, располагается непосредственно в фокальной поверхности светоделителя на мениске 2 [15], т.е.  $P = 2$ . Цель наблюдается одним глазом через плоскопараллельную пластину 1 и мениск 2, который одновременно выполняет функцию объектива для прицельной сетки и оптического совмещающего устройства. При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx f' = 1, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx D = 0,25.$$

Эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}, \quad V_{\phi} = 5 V_c = 5.$$

При использовании мениска со сферическими поверхностями погрешность линии прицеливания при относительном отверстии зеркального объектива 1: 4 составляет:  $\delta = 1'$ .

В оптической схеме на рис. 13 прицельная сетка 1 также располагается непосредственно в фокальной поверхности светоделителя на мениске 2 [16, 17], т.е.  $P = 2$ , но децентрирована относительно его геометрической оси. Все характеристики этой схемы тождественны предыдущей за исключением  $V_{\phi}$  и  $\delta$ :  $V_{\phi} = 10 V_c = 10$ , так как схема открытая и сетка освещается не через мениск; а  $\delta$  существенно больше из-за децентрировки. Разработанная методика оценки погрешности линии прицеливания в децентрированных зеркальных схемах дает следующий результат:  $\delta = 6'$ .

При использовании источника света с узким спектром свечения для освещения сетки на просвет и спектроделителя вместо светоделителя -  $V'ф = 16 Bc = 16$ .

В оптической схеме на рис. 14 прицельная сетка 1 также располагается непосредственно в фокальной поверхности светоделителя на децентрированном мениске 2. В отличие от предыдущей в ней вблизи сетки установлен второй мениск 3 для компенсации погрешности углового положения линии прицеливания, обусловленной децентрировкой [18], т.е.  $P = 3$ . Благодаря этому погрешность линии прицеливания сокращается до  $5'$  при неизменности остальных шести характеристиках.

Иная принципиальная оптическая схема изображена на рис. 15 [19]. В этой схеме сферическая полупрозрачная поверхность заключена между двумя плоскостями, образуя плоскопараллельную пластинку 1. Через эту деталь 1 стрелок наблюдает цель, т.е. пластинка выполняет функцию оптического сумматора изображений. Поскольку оптическая ось, соединяющая сетку 2 и объектив, претерпевает преломление на границе плоскопараллельной пластинки 1, то это существенным образом влияет на точность линии прицеливания:  $\delta = 17'$ . Все остальные характеристики этой схемы равны характеристикам схемы, которая изображена на рис. 13.

Недостатком четырех последних менисковых схем является их большая длина и относительно высокий показатель  $P$ .

Этот недостаток устраняется в моноблочной менисковой схеме (рис. 16) [20], у которой  $P = 1$ . Схема строится из четырех склеенных деталей: двух линзовых элементов 1 и 2 со сферической светоделительной поверхностью между ними, и двух призм 3 и 4, с торцом одной из которых совмещена сетка 5.

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx 0,5 f' = 0,5, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx 1,5 D = 0,375.$$

Эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}, \quad Bф = 10 Bc = 10, \quad V'ф = 16 Bc = 16.$$

Погрешность линии прицеливания при относительном отверстии зеркального объектива 1: 4 составляет:  $\delta = 22'$ .

На рис. 17...18 представлены в одном масштабе принципиальные схемы голографические КП применительно к размещению на стрелковом оружии. Их специфика заключается в том, что для восстановления коллимированного изображения прицельной сетки необходим источник света с узким спектром свечения. Наблюдение за целью осуществляется через голограмму.

В схеме на рис. 17 голографический оптический элемент 1 с записанным изображением прицельной сетки выполнен синтезированным из оптически прозрачных слоев с разным показателем преломления на криволинейной подложке [21, 22]. В качестве источника света 2 используется светодиод.  $P = 2$ .

При принятых условиях нормировки габариты этой схемы составляют:

$$L \approx f' = 1, \quad D \approx 0,25 f' = 0,25, \quad H \approx D = 0,25.$$

Эргономические характеристики прицела равны:

$$d \approx D = 0,25, \quad t = 75 \text{ мм}.$$

При интегральном коэффициенте светопропускания голограммы в видимой области спектра, равном 0,85, и коэффициенте дифракционной эффективности голограммы в области спектра свечения источника, равном 0,7 [23], -  $V_f = 8$   $V_c = 8$ .

Погрешность построения линии прицеливания составляет:  $\delta = 6'$ .

В схеме на рис. 18 голографический оптический элемент 1 выполняет функцию коллимирующего объектива для прицельной сетки 2, сформированной источником света с узким спектром свечения; зеркало 3 используется для сокращения длины схемы [23, 24].  $P = 3$ .

По сравнению с предыдущей схемой эта имеет меньшую длину в ущерб высоте при неизменных остальных пяти характеристиках:

$$L \approx 0,75f' = 0,75, \quad H \approx 1,5D = 0,375.$$

В таблицу 1 сведены значения характеристик всех восемнадцати схем, которые были рассмотрены.

В таблице 2 приведены расчетные значения показателей качества всех схем по разработанной выше методике для схем с нейтральными светоделителями. В таблице 3 - средние показатели качества по группам прицелов.

В таблице 4 даны значения показателей качества всех схем по этой же методике для схем со спектроделителями. В таблице 5 - средние показатели качества по группам прицелов.

### Выводы

1. Голографические и менисковые схемы КП предпочтительнее остальных по массово-габаритным показателям ( $K_{MG} > 0,79$ ) вне зависимости от типа оптического совмещающего устройства.
2. Линзовые схемы превосходят все остальные по эргономическим показателям ( $K_{эр} > 0,91$ ) вне зависимости от типа оптического совмещающего устройства.
3. Линзовые и зеркальные схемы превосходят все остальные по эксплуатационным показателям ( $K_{э} > 0,7$ ) вне зависимости от типа оптического совмещающего устройства.
4. Линзовые и менисковые схемы равноценны по обобщенному показателю ( $K_{\Sigma} = 0,81$ ) при нейтральных светоделителях.
5. Менисковые схемы превосходят остальные по обобщенному показателю ( $K_{\Sigma} = 0,79$ ) при использовании спектроделителей.
6. Зеркальная моноблочная схема (рис. 11) имеет преимущество перед остальными по массово-габаритным ( $K_{MG} = 1$ ) и эксплуатационным ( $K_{э} = 0,98$ ) показателям вне зависимости от типа оптического совмещающего устройства.
7. Высокими эргономическими показателями обладают линзовые схемы и большинство менисковых при нейтральных светоделителях.
8. Все моноблочные оптические схемы имеют преимущество перед немноблочными в своих группах по обобщенному показателю вне зависимости от типа оптического совмещающего устройства.

1. *Микитенко В.И., Сенаторов Н.В.* Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов// Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-техн. сб.- Киев: НТЦ АСВ.- 2002.- Вып. \_\_.- С. \_\_.
2. *Лазарев Л.П.* Оптико-электронные приборы наведения. М.: «Машиностроение», 1989.- 760с.
3. Пат. 22423 А (Україна). Коліматорний приціл.-1998.- Бюл. №3.
4. *Сенаторов Н.В.* Решение задачи скрытого прицеливания стрелкового оружия// Специальная техника и вооружение: Научно-методическое издание. -2001.- Вып. 2.- С.30-32.

5. *Кучеренко О.К., Сенаторов Н.В.*. Однолинзовый колиматорный прицел // Оптический журнал. - 1997.- т. 64, № 11.- С. 58-59.
6. Пат. 2011139 С1 (Россия). Прицельное приспособление для гладкоствольного оружия.-1994.-БИ № 7.
7. Пат. 38605 А (Україна). Колімакторний приціл.- 2001.- Бюл. № 4.
8. *Сенаторов Н.В.* Моноблочный коллиматорный прицел для стрелкового оружия// Зб. праць 4-ї Міжнарод. конф. “Артилерійські ствольні системи, боєприпаси, засоби артилерійської розвідки та керування вогнем”.- К.: НТЦ АСО, 2000. – С.194-199.
9. *Турьгин И.А.* Прикладная оптика. М.: «Машиностроение», 1966.- 431с.
10. *Р. Хадсон.* Инфракрасные системы. М.: «Мир», - 1972. – 534 с.
11. *Сенаторов В.Н., Полежаев В.В.* Оптимизация коэффициентов светопропускания зеркал в менисковом коллиматорном визире // Оптико - механическая промышленность. - 1979.- № 8.- С. 59-60.
12. А.с. 556403 (СССР). Коллиматорный визир.- 1977.- БИ № 16.
13. Пат. 1630505 (Россия). Оптический прицел. - 1994.- БИ № 10.
14. А.с. 243880 (СССР). Коллиматорный визир. – 1969. – БИ № 17.
15. А.с. 1173145 (СССР). Оптический коллиматорный визир. – 1985. – БИ № 30.
16. Пат. 5653034 (США). Sighting device. – 1995.
17. Пат. 2122698 (Россия). Коллиматорный прицел. – 1998. – БИ № 33.
18. РСТ WO 97/00419 А1. Improvement relating to sighting devices. – 1996.
19. Пат. 4665622 (США). Optical sighting devices. – 1987.
20. EP 0069575 А2. Improved collimator gun sight. – 1982.
21. Пат. 2034321 (Россия). Голографический прицел. – 1995. – БИ №12.
22. Пат. 3633988 (США). Holographic sight. – 1972.
23. Новые тенденции в развитии систем отображения информации и управления боевых самолетов (Обзор по материалам иностранной печати), под общ. ред. *Федосова Е.А.* М.: Научно-информационный центр, 1984.- 62с.
24. NAESON’82, p. 752-759.