

УДК 629.7.054.07

С.Н. ПЕТРУК, инж. (Центр. научно-исслед. ин-т вооружений и военной техники Вооруженных Сил Украины, г. Киев),
В.Н. СЕНАТОРОВ, Ю.И. РАДЧЕНКО, кандидаты техн. наук (ГП НИИСК, г. Киев)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИЦЕЛИВАНИЯ В АВИАЦИОННОМ СТРЕЛКОВОМ ПРИЦЕЛЕ

Даны предложения по минимизации (устранению) методической ошибки при построении линии визирования в авиационном стрелковом прицеле. Разработана методика сборки прицела и измерения фактического значения коэффициента передачи оптической схемы.

Дано пропозиції щодо мінімізації (усунення) методичної помилки за побудови лінії прицілювання в авіаційному стрільковому прицілі. Розроблено методику складання прицілу й вимірювання фактичного значення коефіцієнту передачі оптичної схеми.

Постановка задачи. Существующий метод проектирования оптической схемы авиационного стрелкового прицела (АСП) основывается на заданных значениях коэффициента демпфирования визирного луча k_d и погрешности углового положения линии визирования прицельной марки (ПМ). В свою очередь k_d связан с коэффициентом оптической передачи прицела μ зависимостью [1]:

$$k_d = \mu - 1,$$

где μ — отношение угла поворота подвижного зеркала прицела φ к углу визирования ψ_φ , которое при нормированном фокусном расстоянии прицела $f' = 1$ определяется нелинейной зависимостью [2]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi_\varphi &= R \sin 2\varphi / (f' - R + R \cos 2\varphi) = \\ &= \sin 2\varphi / (1/R - 1 + \cos 2\varphi). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь R — удаление подвижного зеркала от фокуса объектива, с которым совмещен формирователь ПМ.

При реализации формул прицеливания вычислителем зависимость (1) чаще всего аппроксимируют линейной функцией [1]:

$$\psi_0 = \varphi / \mu = 2R_\varphi. \quad (2)$$

Из всего вышесказанного следует, что положение подвижного зеркала в оптической схеме прицела влияет на точность всего при-

цела и накладывает ограничения на конструкцию объектива: точка качания зеркала должна быть выбрана таким образом, чтобы удовлетворяли требованиям к управляемости визирного луча [1, 3], а кривизна фокальной поверхности объектива должна быть согласована с кривизной поверхности, по которой перемещается изображение ПМ [4].

Однако аппроксимация формулы (1) ведет к методической ошибке в построении визирного луча из-за того, что вычислитель определяет угол визирования при постоянном значении μ , в то время как оптическая схема реализует его по зависимости (1). Если ограничить μ диапазоном 1–1,43 [3], то, как следует из (1) и (2), наибольшая методическая ошибка имеет место при максимальном μ . В таблице приведены значения угла визирования, рассчитанные по формулам (1) и (2), значения методической погрешности $\Delta\psi = \psi_0 - \psi_\varphi$ при $\mu = 1,43$ и реальные значения μ для диапазона углов поворота зеркала $\pm 16^\circ$.

φ , град	0	4	8	12	16
ψ_0 , град	0	2,8	5,6	8,4	11,189
ψ_φ , град	0	2,7954	5,58	8,3429	11,0719
$\Delta\psi$, мин	0	0,3	1,2	3,4	7,1
μ	1,43	1,431	1,434	1,438	1,445

Как следует из данных этой таблицы, методическая ошибка достигает 7 минут, что неприемлемо для прицельной стрельбы.

© С.Н. ПЕТРУК, В.Н. СЕНАТОРОВ, Ю.И. РАДЧЕНКО, 2014

Цель данной статьи — дать рекомендации по минимизации (устранению) методической ошибки построения угла визирования в АСП.

Наиболее радикальным путем устранения методической ошибки является учет зависимости (1). То есть вычислитель АСП должен рассчитывать угол поворота зеркала по формуле (1), чтобы обеспечить потребный угол визирования. Решение уравнения (1) относительно неизвестного параметра φ дает результат:

$$\varphi = 0,5 \arccos Z,$$

где Z является корнем квадратного уравнения

$$Z^2(1 + \operatorname{tg}^2 \psi) + 2Z(1/R - 1) - \operatorname{tg}^2 \psi + [(1/R - 1)^2 \operatorname{tg}^2 \psi - 1] = 0.$$

Если вычислитель АСП не вычисляет угол φ , то уменьшение методической ошибки может быть достигнуто благодаря использованию усредненного значения коэффициента

оптической передачи, введенного в вычислитель. Например, для данных таблицы среднее значение $\mu = 1,4375$, которое реализуется при $R = 0,3478$. В этом случае предельная методическая ошибка не превысит 1,75 мин. Аналогичное усреднение может быть сделано для любого заданного значения μ .

Анализ зависимости (1) показывает: если $R = 0,5$, то есть точка качания зеркала точно делит фокусное расстояние объектива пополам, то

$$\operatorname{tg} \psi_\varphi = \sin 2\varphi / (1 + \cos 2\varphi) = \operatorname{tg} \varphi.$$

А это означает, что $\psi_\varphi = \varphi$, то есть при $\mu = 1$ методическая ошибка исключается автоматически. Однако заметим, что в этом случае $k_d = 0$, что может быть приемлемо не для всех типов носителей.

При реализации любой из перечисленных рекомендаций наиболее ответственным моментом является определение действительного значения R при сборке прицела в серийном производстве и проверка значения μ согласно Техническим условиям.

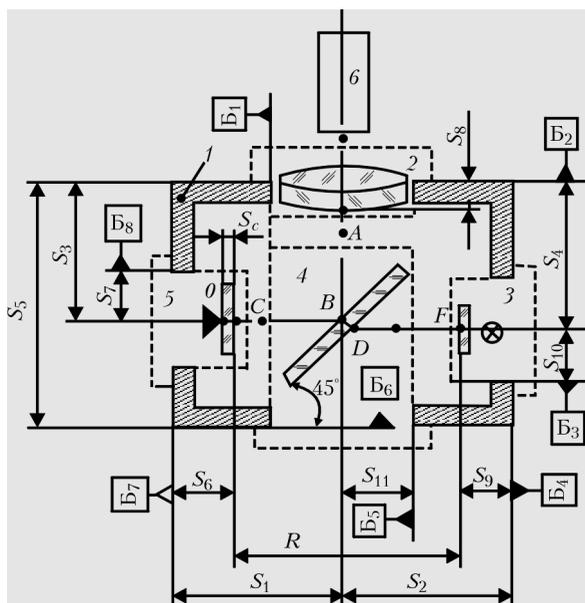
При серийном производстве наиболее эффективен метод эталонирования и взаимозаменяемости. Суть метода применительно к АСП состоит в том, что на станке с ЧПУ изготавливают корпус 1 прицела (рисунок) с базовыми поверхностями B_i и паспортизируют размеры s_1 – s_5 .

В сборочном цеху организуются пять рабочих мест с необходимой контрольно-юстировочной аппаратурой.

На первом рабочем месте производится сборка узла объектива 2. Из оптического цеха сюда поступает объектив с паспортизованными значениями фокусного расстояния f' и рабочего отрезка $s'f'$. В процессе сборки объектив центрируется относительно базовой поверхности B_1 и выдерживается отрезок s_8 между точкой A и базовой плоскостью B_2 :

$$s_8 = a - s'f',$$

где a — расчетное удаление фокуса объектива F от базовой плоскости B_2 , измеренное вдоль оптической оси.



Основные узлы АСП: 1 — корпус полупрозрачного отражателя; 2 — корпус объектива с базовыми поверхностями, предназначенными для сопряжения с базовыми поверхностями корпуса B_1 и B_2 ; 3 — корпус формирователя изображения прицельной марки с базовыми поверхностями, предназначенными для сопряжения с базовыми поверхностями корпуса B_3 и B_4 ; 4 — корпус полупрозрачной пластины с базовыми поверхностями, предназначенными для сопряжения с базовыми поверхностями корпуса B_5 и B_6 ; 5 — корпус подвижного зеркала с базовыми поверхностями, предназначенными для сопряжения с базовыми поверхностями корпуса B_7 и B_8

На втором рабочем месте производится сборка узла формирователя изображения прицельной марки 3. В процессе сборки центральная точка F прицельной марки привязывается к базовым поверхностям узла B_3 (размер s_{10}) и B_4 (размер s_9).

На третьем рабочем месте производится сборка узла полупрозрачной пластины 4. В процессе сборки отражающая плоскость пластины привязывается к базовой плоскости узла B_6 (угол 45°) и базовой поверхности B_5 (размер s_{11}).

На четвертом рабочем месте производится сборка узла подвижного зеркала 5. В процессе сборки точка качания O совмещается с отражающей плоскостью (размер s_c) и с осью базовой поверхности B_7 (размер s_7), а отражающая плоскость привязывается к базовой плоскости B_8 (размер s_6).

Для назначения допусков на размеры s_6 – s_{11} оценим их влияние на точность построения нулевой линии визирования. Ошибки, которые обусловлены допусками, влияющими на параллактическую ошибку, являются случайными, поскольку связаны с произвольным положением глаз летчика в выходном зрачке прицела. Эти допуски должны жестко регламентироваться. Ошибки, которые обусловлены допусками, вызывающими смещение нулевой линии визирования, являются систематическими и могут быть устранены в процессе установки узла полупрозрачного отражателя на конструкцию, изображенную на рисунке. Эти допуски должны регламентироваться в разумных пределах с учетом юстировочных возможностей узла полупрозрачного отражателя АСП.

При назначении допуска δs_8 на размер s_8 в узле объектива 2 учитываем, что он влияет только на параллактическую ошибку ρ_8 , которая определяется по формуле

$$\rho_8 \max = D\delta s_8 / 2f^2, \quad (3)$$

где D — диаметр объектива.

Если учесть, что в АСП применяется объектив с относительным отверстием 1:2, то формулу (3) можно представить в виде

$$\rho_8^{\max} = \delta s_8 / 4f. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, чтобы параллактическая ошибка, обусловленная допуском на размер s_8 , не превышала 1 угловой минуты (0,0003 рад), допуск не должен превышать 0,12 % фокусного расстояния объектива. Если принять во внимание, что диапазон фокусных расстояний существующих АСП лежит в диапазоне 200–300 мм, то допуск δs_8 составляет 0,24...0,36 мм.

При назначении допусков δs_9 и δs_{10} на размеры s_9 и s_{10} в узле формирователя изображения 3 учитываем, что первый из них влияет только на параллактическую ошибку ρ_9 :

$$\rho_9 = \delta s_9 / 4f, \quad (5)$$

а второй вызывает только систематическую ошибку $\Delta\psi_{10}$ углового положения нулевой линии визирования:

$$\Delta\psi_{10} = \delta s_{10} / f.$$

Из формулы (5) следует, чтобы параллактическая ошибка, обусловленная допуском на размер s_9 , не превышала 1 угловой минуты, допуск не должен превышать 0,12 % фокусного расстояния объектива.

При назначении допусков δs_{11} и $\delta\alpha_{45}$ на размер s_{11} и угол 45° в узле полупрозрачной пластины 4 учитываем, что оба они теоретически влияют на параллактическую ошибку и на смещение нулевой линии визирования. Однако практически допуск на угол не оказывает существенного влияния на параллактическую ошибку. Поэтому можно записать:

$$\rho_{11} = \delta s_{11} / 4f; \quad \Delta\psi_{11} = \delta s_{11} / f; \quad \Delta\psi_{45} = 2l\delta\alpha_{45} / f, \quad (6)$$

где l — удаление точки B от фокуса объектива.

Из формулы (6) следует, чтобы параллактическая ошибка, обусловленная допуском на размер s_{11} , не превышала 1 угловой минуты, допуск не должен превышать 0,12 % фокусного расстояния объектива.

При назначении допусков δs_6 на размер s_6 и допусков δs_c и δs_7 на размеры $s_c = 0$ мм и s_7 (удаление точки качания O от отражающей

плоскости зеркала и от отрезка оптической оси СВ) в узле подвижного зеркала 5 учитываем, что первый из них влияет только на параллактическую ошибку

$$\rho_6 = \delta s_6 / 2f', \quad (7)$$

а два других — на параллактическую ошибку на углах визирования кроме $\psi_\varphi = 0^\circ$:

$$\rho_c = \delta s_c (1 - \cos \varphi) \cos \varphi / 2f';$$

$$\rho_7 = D [R \cos 2\varphi - (R^2 + \delta s_7^2)^{1/2} \cos (2\varphi + \gamma)] / 2f'^2,$$

где $\gamma = \arctg (\delta s_7 / R)$, и на угловое положение прицельной марки на углах визирования, кроме $\psi_\varphi = 0^\circ$:

$$\Delta\psi_c = \arctg [R \sin 2\varphi + 2\delta s_c (1 - \cos \varphi) \sin \varphi] / [f' - R + R \cos 2\varphi + 2\delta s_c (1 - \cos \varphi) \cos \varphi] - \arctg [(R \sin 2\varphi) / (f' - R + R \cos 2\varphi)];$$

$$\Delta\psi_7 = \arctg [R \sin^2 \varphi / (f' - R + R \cos 2\varphi)] - \arctg \{[(R^2 + \delta s_7^2)^{1/2} \sin (2\varphi + \gamma) - \delta s_7] / [f' - R + (R^2 + \delta s_7^2)^{1/2} \cos (2\varphi + \gamma)]\}.$$

Из формулы (7) следует, чтобы параллактическая ошибка, обусловленная допуском на размер s_6 , не превышала 1 угловой минуты, допуск не должен превышать 0,06 % фокусного расстояния объектива. Если принять во внимание, что диапазон фокусных расстояний существующих АСП лежит в диапазоне 200–300 мм, то допуск δs_6 составляет 0,12–0,18 мм.

Оценим значения ρ_c , ρ_7 , $\Delta\psi_c$ и $\Delta\psi_{11}$ для числового примера: $\mu = 1,43$; $f' = 228,8$ мм; $D = 114,4$ мм; $\delta s_c = \delta s_7 = 1$ мм для угла поворота зеркала $\varphi = 16^\circ$; $\rho_c = 0,3$ мин; $\rho_7 = 2$ мин; $\Delta\psi_c = 6$ мин и $\Delta\psi_{11} = 0,73$ мин.

Согласно рисунку параметр R определяется длиной оптической оси CF:

$$R = CB + BD/n + DF = (s_1 - s_6) + \sqrt{2}d / (2n^2 - 1)^{1/2} + [s_2 - s_9 - \sqrt{2}d \cos (45^\circ - i) / (2n^2 - 1)^{1/2}], \quad (8)$$

где n — показатель преломления стекла, из которого изготовлена полупрозрачная пластина 4, а i — вспомогательный угол, который вычисляется по формуле

$$i = \arcsin (\sqrt{2} / 2n).$$

Поскольку каждый параметр, входящий в формулу (8), имеет допуск, то фактическое значение R отличается от теоретического.

На пятом рабочем месте производится измерение фактического значения параметра R . Для этой цели в корпус 1 устанавливаются на свои базы узлы 3, 4 и 5. Собранный блок помещается на оптическую скамью так, чтобы зрительная труба теодолита 6 находилась против базовой плоскости B_2 вблизи оси базовой поверхности B_1 (рисунок). На базовую плоскость B_2 устанавливается эталонная плоскопараллельная пластина с зеркальным покрытием. Сетка трубы совмещается с автоколлимационным бликом. Снимается эталонная пластина, и поворачивая зеркало 5, автоколлимационный блик от зеркала 5 совмещают с сеткой трубы. В результате этой операции отражающая плоскость зеркала 5 перпендикулярна базовой плоскости B_2 . В корпус 1 устанавливается на свои базы узел объектива 2. Перекрестие сетки теодолита совмещается с центральной точкой коллимированного изображения ПМ и снимается отсчет с горизонтального лимба теодолита ψ_0 . Извлекается узел объектива 2 со своего посадочного места. Труба теодолита разворачивается на горизонтальный угол 4–5°. Поворачивая зеркало 5, автоколлимационный блик от зеркала 5 совмещают с сеткой трубы. В результате этой операции зеркало 5 развернуто на фиксированный угол φ . Узел объектива 2 возвращается на свое место в корпусе. Перекрестие сетки теодолита совмещается с центральной точкой коллимированного изображения ПМ на угле визирования и снимается отсчет с горизонтального лимба теодолита ψ_4 . Разность отсчетов ($\psi_4 - \psi_0$) дает значение угла ψ_φ , соответствующее конкретному значению угла φ . Подставляя известные значения ψ_φ , φ и паспортное значение фокусного расстояния объектива f' в формулу (1), вычисляем действительное значение параметра R по формуле

$$R = f' / (1 - \cos 2\varphi + \sin 2\varphi / \operatorname{tg} \psi_\varphi).$$

Зная действительное значение R , можно вычислить либо аппроксимированное значение

коэффициента оптической передачи μ по формуле (2), либо усредненное значение μ , как это было сделано выше в числовом примере. Это значение μ заносится в паспорт прицела для последующего ввода в вычислитель АСП.

Далее на собранный блок на базовую плоскость B_2 устанавливается узел полупрозрачного отражателя и устраняется суммарная систематическая ошибка смещения нулевой линии визирования.

Вывод

На основании всего вышеизложенного можно сделать следующий вывод. Допуски на размеры s_{10} , s_{11} и на угол наклона плоскопараллельной пластины приводят к систематической ошибке положения нулевой линии визирования, которая может быть устранена при окончательной юстировке прицела. Допуски на размеры s_6 , s_8 , s_9 и s_{11} влияют на парал-

лактическую ошибку линии визирования и должны жестко регламентироваться. Допуски на размеры s_7 и s_c , привязывающие точку качания подвижного зеркала к его отражающей плоскости, не влияют на ошибку нулевой линии визирования, но незначительно влияют на параллакс и смещение линии визирования на углах, отличных от 0° , и должны регламентироваться. ➡

Список литературы

1. Мубаракшин Р.В., Балчев В.М., Воронов Б.В. Прицельные системы стрельбы. — М.: Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1973. — 332 с.
2. Кулагин С.В., Дикарев В.Н., Мосягин Г.М. и др. Оптико-механические приборы. — М.: «Машиностроение», 1975. — 400 с.
3. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения. — М.: «Машиностроение», 1989. — 760 с.
4. Сенаторов В.Н., Василенко А.В. Авиационный стрелковый прицел // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2011. — № 4. — С. 37–41.