

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.885.5; 531.717.88

ВИЗИР НА ОСНОВЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЛИЛЕЯ

© 2005 г. Е. П. Вовк; Е. И. Криволапчук; Ю. П. Куренев, канд. техн. наук; В. В. Петранговский

Украинский технологический центр оптического приборостроения, г. Киев, Украина

Рассмотрена возможность введения изображения сетки (марки) в поле зрения телескопической системы Галилея и превращения такой системы в визир. Объяснено положение зрачков и люков в телескопической системе Галилея, работающей совместно с глазом. Предложены две схемы визиров Галилея.

Коды OCIS: 220.0220.

Поступила в редакцию 14.10.2004.

Распространенное мнение [1–7] о недостатках телескопической системы Галилея, главными из которых являются малое поле зрения и отсутствие действительного изображения, породило стереотип о невозможности введения изображения сетки (марки) в поле зрения системы.

Однако имеются технические решения [8, 11], пусть не совсем удачные, где изображение сетки в поле зрения введено.

Авторам пришлось столкнуться с дефицитом информации по геометрической теории системы Галилея, особенно в части расположения зрачков и люков, в конечном счете определяющих поле зрения системы.

В отечественной литературе встречаются по меньшей мере 4 формулы для расчета поля зрения:

$$\lg \omega_{\min} = (R - a')/\gamma_p(p\gamma_p + l) \quad [1], \quad (1)$$

$$\lg \omega = D_n/2(L_c - a'_2\Gamma) \quad [4], \quad (2)$$

$$\lg 2\omega' = D_{\text{ог}}/[\Gamma d + f_1(1 - 1/\Gamma)] \quad [2], \quad (3)$$

$$\lg \omega = h_1/[f'_{\text{ог}}(\Gamma - 1) + \Gamma^2 S'_{\text{зр}}] \quad [7], \quad (4)$$

в которых использованы обозначения: R – половина диаметра объектива, a' – половина диаметра зрачка входа, γ_p , Γ – видимое увеличение зрительной трубы; L_c , l – длина зрительной трубы; p , a'_2 , $S'_{\text{зр}}$ – удаление глаза от окуляра; f_1 , $f'_{\text{ог}}$ – переднее и заднее фокусные расстояния объектива, h_1 – высота луча на входном диаметре объектива.

Некоторые параметры в приведенных формулах недостаточно удобны в работе. Например, в формуле (1) параметр a' является расчетным и к тому же еще переменным, зависящим от размера зрачка глаза. Формула (3) определяет размер поля зрения в пространстве изображений. В формулах (3) и (4)

отсутствует очень важный конструктивный параметр – длина трубы L_c .

Наиболее удобной и компактной является формула (2), в которой все параметры, кроме a'_2 , являются конструктивными.

К сожалению, при выводе формулы (2) опущены важные связующие моменты, затрудняющие понимание. Поскольку формула (2) выбрана нами в качестве основной при разработке галилеевских телескопических систем, мы сочли необходимым подтвердить ее корректность, снабдив вывод недостающими пояснениями и сделав его более понятным и строгим. При этом мы опирались на методологию А.И. Тудоровского [1], К. Михеля [9], В.Н. Чуриловского [3], М.М. Русинова [7] и И.А. Турыгина [4].

В соответствии с рис. 1 окуляр 2 строит изображение D'_1 оправы объектива D_1 в промежутке между объективом 1 и окуляром 2. Точно так же, как и в простой телескопической системе Кеплера, здесь диаметр D_1 может быть назван зрачком входа ($D_{\text{вх}}$) и одновременно апертурной диафрагмой, а его изображение D'_1 ,

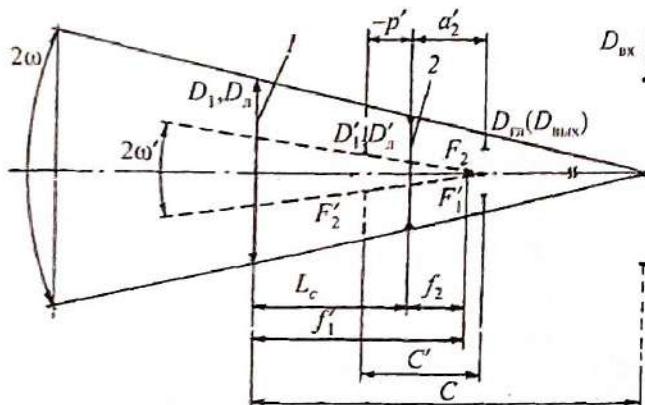


Рис. 1. Положение зрачков и люков в телескопической системе Галилея. 1 – объектив, 2 – окуляр. Пояснения в тексте.

даваемое окуляром в последующем ходе лучей, может быть названо зрачком выхода ($D_{\text{вых}}$) собственно зрительной трубы Галилея.

Как видно из рис. 1, зрачок глаза отстоит от мнимого изображения D'_1 на расстоянии $(-p' + a'_2)$, где a'_2 – удаление зрачка глаза $D_{\text{гн}}$ от последней поверхности окуляра, $-p'$ – удаление мнимого зрачка выхода D'_1 зрительной трубы Галилея от первой поверхности окуляра. Из рисунка также видно, что глаз не может быть совмещен с мнимым зрачком D'_1 выхода зрительной трубы Галилея. Этому препятствует материальная линза-окуляр.

Если предмет находится в бесконечности, то изображение осевой точки A'_0 предмета будет располагаться на сетчатке глаза. Полагаем, что зрачок глаза заполнен осевым пучком полностью. Тогда диаметр зрачка глаза, являющийся в данном случае основанием конуса лучей, образующих изображение точки A'_0 , по определению становится зрачком выхода системы зрительная труба Галилея–глаз. Таким образом, зрачок глаза $D_{\text{гн}}$ “отобрал” у зрачка D'_1 функции выходного зрачка собственно системы Галилея и сам приобрел функции выходного зрачка и апертурной диафрагмы (поскольку апертурная диафрагма всегда материальна) всей системы вместе с глазом. Зрачком входа $D_{\text{вх}}$ всей системы будет теперь изображение зрачка глаза в предшествующем ходе лучей, получаемое путем построения через зрительную трубу Галилея. Зрачок входа всей системы $D_{\text{вх}}(D'_{\text{гн}})$ оказывается мнимым и располагается правее зрачка глаза. Поскольку зрачок глаза может занимать разные положения относительно окуляра, то и зрачок входа системы будет также занимать разные положения на оптической оси системы.

В результате такого обмена функций зрачки входа D_1 и выхода D'_1 превращаются соответственно в люки входа $D_{\text{л}}$ и выхода $D'_{\text{л}}$ всей системы.

Так как зрачки $D_{\text{вх}}$ и $D_{\text{вых}}$ и люки $D_{\text{л}}$ и $D'_{\text{л}}$ попарно сопряжены между собой, то должны быть сопряжены и отрезки C и C' между ними.

С помощью формулы Ньютона $xx' = ff'$ и оптической формулы $f'/a' + f/a = 1$, которые инвариантны к знаку фокусного расстояния, вначале отыскивается отрезок p' и далее отрезки C и C' с учетом их связи через продольное увеличение. Для одиночной линзы (в нашем случае линза окуляра) оптическая формула может быть переписана в виде $1/a' - 1/a = 1/f'$, где a и a' – отрезки от предмета и его изображения до главных плоскостей линзы.

Тогда в обозначениях на рис. 1 можно записать $a' = p'$, $-a = L_c$ и $f' = f'_2$, где f'_2 – фокусное расстояние окуляра, a – расстояние от входного люка $D_{\text{л}}$ до окуляра. После этого оптическая формула может быть записана в виде:

$$1/p' + 1/L_c = 1/f'_2 \quad (5)$$

После преобразований имеем

$$1/p' = (L_c - f'_2)/Cf'_2 = (f'_1 + f'_2 - f'_2)/L_c f'_2 = f'_1/L_c f'_2 = -\Gamma/L_c$$

и окончательно

$$p' = -L_c/\Gamma. \quad (6)$$

Формула (6) является ключевой при отыскании отрезков C и C' . Она также определяет положение выходного люка $D'_{\text{л}}$ относительно окуляра.

Из рис. 1 находим

$$C' = -p' + a'_2. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7), получаем

$$C' = L_c/\Gamma + a'_2 = (L_c + a'_2\Gamma)/\Gamma. \quad (8)$$

Но поскольку C и C' , как сопряженные отрезки, связаны [4] между собой зависимостью

$$C = C'\Gamma^2, \quad (9)$$

то, подставляя (8) в (9), получаем

$$C = (L_c + a'_2\Gamma)\Gamma. \quad (10)$$

Имея выражения (8) и (10) и глядя на рис. 1, нетрудно записать формулы для полей зрения телескопической системы Галилея в пространстве предметов и пространстве изображений:

$$\text{tgw} = D_{\text{л}}/2C = D_{\text{л}}/2(L_c + a'_2\Gamma)\Gamma, \quad (11)$$

$$\text{tgw}' = D'_{\text{л}}/2C' = D_{\text{л}}/2(L_c + a'_2\Gamma). \quad (12)$$

Максимальное поле зрения для луча, идущего из края входного зрачка в противоположный край входного люка:

$$\text{tgw}_{\text{max}} = (D_{\text{л}} + D_{\text{вх}})/2C = (D_{\text{л}} + \Gamma D_{\text{гн}})/2(L_c + a'_2\Gamma). \quad (13)$$

Несмотря на, казалось бы, ограниченные возможности телескопической системы Галилея в части значений поля зрения и видимого увеличения, рядом авторов (М. Рор, фирма Карл Цейсс, Германия; А.И. Ильина-Слюсарева, ГОИ; М.М. Русинов, ЛИТМО, СССР) рассчитаны телескопические системы Галилея с полями зрения и увеличениями, вполне сопоставимыми с полями зрения и увеличениями визиров, построенных по схеме Кеплера.

Но эти системы не являются визирами или прицелами, это наблюдательные приборы.

Введение изображения сеток (марок) в поля зрения этих приборов переводит их в разряд визиров или прицелов.

Для реализации этого необходимо создать мнимое или коллимированное изображение сетки (марки), сопряженное с мнимым или коллимированным изображением, создаваемым объективом телескопической системы Галилея.

Схема визира Галилея–Степина

Оптическая схема визира, предложенная Ю.А. Степиным [8], приведена на рис. 2.

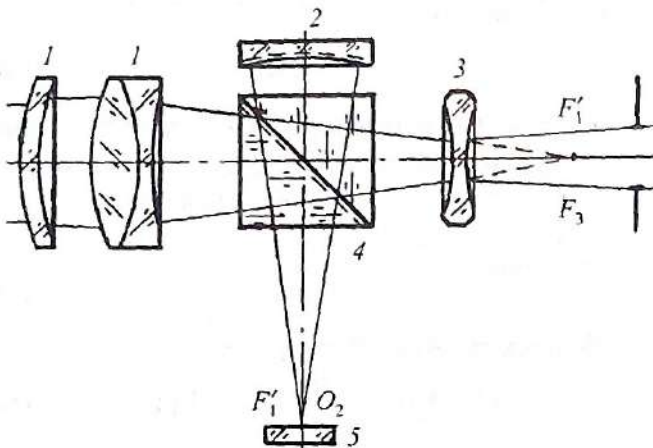


Рис. 2. Оптический визир Галилея–Степина. 1 – объектив, 2 – зеркало, 3 – окуляр, 4 – светоделитель, 5 – сетка.

Визир содержит трубу Галилея, образованную объективом 1 и отрицательным окуляром 3, между которыми размещен светоделитель 4, выполненный в виде куба-призмы. Марка 5 нанесена на плоскую пластину. Изображение марки оптически сопряжено посредством светоделителя 4 и отражающего фиксирующего элемента (зеркала) 2 с задней фокальной плоскостью объектива 1. Пластина 5 расположена перпендикулярно оптической оси зеркала 2 и одновременно в задней фокальной плоскости объектива 1.

Существенным недостатком предложенного визира является его обнаруживаемость со стороны цели, так как порядка 50% коллимированного излучения направляется в ее сторону.

Схема визира Галилея–УкрТЦОП, вариант I

Оптическая схема визира, предложенного УкрТЦОП [10] (рис. 3), содержит два канала: телескопический в виде трубы Галилея, образованной светофильтром 1, объективом 2, светоделителем 3, выполненным из плоскопараллельной пластины, склеенной из двух призм с нанесением узкоспектрального покрытия в месте склейки, и окуляром 4; и канал сетки, представляющий собой микроскоп Галилея, образованный осветителем 8, сеткой 7, установленной в фокальной плоскости объектива 6; объективом 5, светоделителем 3 и окуляром 4 (последние – общие для обоих каналов).

Плоскость склейки светоделителя 3 наклонена к оптическим осям телескопа и микроскопа так, чтобы излучение направлялось только в сторону окуляра. В этом состоит существенное отличие нашей схемы от схемы Ю.А. Степина.

Визир со стороны цели не обнаруживается.

Микрообъектив, состоящий из двух линз 5 и 6 с параллельным ходом лучей между ними, имеет увеличение $\beta = -2\times$, изображение сетки при этом совмещается с задней фокальной плоскостью объектива 2 телескопа Галилея.

Перед объективом 2 нормально к оптической оси телескопа установлен светофильтр 1, выполненный из фотохромного стекла марки ФХС-4 ОСТЗ-3994-85.

Сетка выполнена из стекла К8, на одну из плоскостей пластины нанесено плотное покрытие (хромовое). Центральная точка диаметром 9 мкм и два концентрических кольца с такой же шириной линии выполнены прозрачными.

Покрывание на светоделителе выполнено высокоотражающим ($R \geq 0,9$) в узком спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 660 \pm 20$ нм, в таком же спектральном диапазоне находится излучение светодиода. Расходимость излучения с излучающей площадки светодиода $2\theta = 60^\circ$.

При такой схеме изображение сетки в коллимированном виде направляется в глаз через окуляр 4, являющийся общим как для телескопа, так и для микроскопа Галилея. Из спектра пропускания канала телескопа $\Delta\lambda = 0,4\text{--}0,78$ мкм вырезается узкая красная часть спектра $\Delta\lambda = 660 \pm 20$ нм. Таким образом обеспечивается максимальный световой баланс как по каналу наблюдения за объектом (широкий спектральный диапазон), так и по каналу наблюдения сетки (узкий спектральный диапазон). Цвет штрихов сетки – красный.

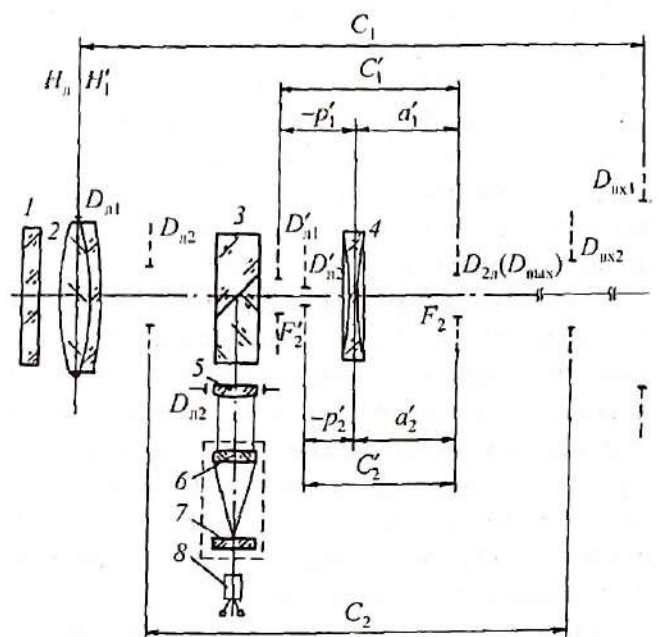


Рис. 3. Телескопический визир Галилея–УкрТЦОП, вариант I. А. Канал телескопа: 1 – светофильтр, 2 – объектив, 3 – светоделитель, 4 – окуляр. Б. Канал микроскопа (сетки): 8 – светодиод, 7 – сетка, 6 – объектив, 5 – объектив, 3 – светоделитель, 4 – окуляр.

Наименование параметров	Схема визира I		Схема визира II
	Модель ПТ-1	Модель ПТ-2	Модель ПТ-3
Видимое увеличение, крат	4,0	2,5	4,0
Поле зрения, град	6,0	14,0	9,0
Разрешающая способность в центре поля зрения, угл. с	30,0		
Вид марки	Точка и два концентрических кольца		
Цвет марки	Красный		
Поле зрения большого кольца марки, град	2,0		8,0
Угловой размер штрихов сетки (марки) за окуляром, угл. с	36,0		
Фокусировка окуляра, дптр	$\pm 5,0$		
Диаметр входного люка, мм	40,0		
Длина трубы, мм	95,0	60,0	85,0
Число компонентов и оптических деталей объектива	1(2)	1(2)	2(6)
Способ введения изображения марки в поле зрения	Микроскопный		Автоколлимационный
Масса, г	250,0	200,0	300,0

В дневное время, когда освещенность на местности достаточно высока и сам прибор находится в освещенной части местности, искусственная подсветка от светодиода не требуется. Для этого достаточно обеспечить доступ излучения к сетке непосредственно с местности.

Фотохромный светофильтр 1 автоматически регулирует яркость (освещенность) изображения объектов на сетчатке глаза. Для получения комфортного контраста между яркостями изображения объектов и яркостью изображения сетки необходимо регулировать, например, ток светодиода. Если регулировка яркости сетки не предусмотрена, то можно потерять выгоды визира Галилея при работе в сумеречное время, так как возможно "ослепление" наблюдателя слишком яркой сеткой, в результате чего слабые наблюдаемые объекты будут потеряны.

Параметры двух моделей телескопических прицелов (визиров) Галилея по схеме варианта I приведены в таблице.

Изменение положения линии визирования относительно оси канала ствола в данном варианте осуществлено с помощью механической регулировки визира по углу места и азимуту.

Схема визира Галилея-УкрТЦОП, вариант II

На основе оптической схемы трубы Галилея, рассчитанной А.И. Ильиной-Слюсаревой [2], разработана модель визира Галилея (рис. 4б), в которой изображения сеток вводятся в поле зрения методом автоколлимации [12].

Недостатком предыдущей схемы является неудобство регулирования прицельной марки относительно нулевой линии визирования (НЛВ). Под НЛВ

подразумевается линия, совпадающая с оптической осью визира и параллельная оси канала ствола, рядом с которым устанавливается визир.

В предлагаемом визире регулирование положения прицельной марки относительно НЛВ во время прицелки оружия осуществляется за счет введения двух сеток с прозрачными штрихами, которые подсвечиваются двумя узкоспектральными ($\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$) источниками излучения, например, красным и зеленым, а также введения двух узкоспектральных плоских зеркал, одно из которых неподвижно, а другое имеет возможность угловой регулировки вокруг осей, перпендикулярных оптической оси визира. Изображение сеток (марок) формируется уже не методом микроскопа, а автоколлимационным методом.

Визир (рис. 4б) включает в себя регулируемое по угловым координатам зеркало 1 с узкоспектральным покрытием $\Delta\lambda_1$ (красным), неподвижное зеркало 2 с узкоспектральным покрытием $\Delta\lambda_2$ (зеленым), объектив 3-8, окуляр 9, светоделитель 10, сетки 11, 12, светодиода 13 (зеленый) и 14 (красный). Светоделитель 6 с нейтральным полупрозрачным покрытием вклеен между положительной линзой 5 и отрицательной линзой 8. Сам светоделитель склеен из двух призм 6 и 7, которые после склеивания образуют плоскопараллельную пластину. Детали 5-8 после склейки образуют склеенный компонент всего объектива 3-8 трубы Галилея. Детали 3-5, 7, 10 образуют коллимационный объектив. Все детали 5-8 выполнены из одного материала, например, ТК-23. Вид нулевой и прицельной марок показан на рис. 4а. Нулевая марка представляет собой перекрестие зеленого цвета с делениями, прицельная марка – точку красного цвета.

Принцип действия визира сводится к следующему. Канал наблюдения за целью (1-9) представляет

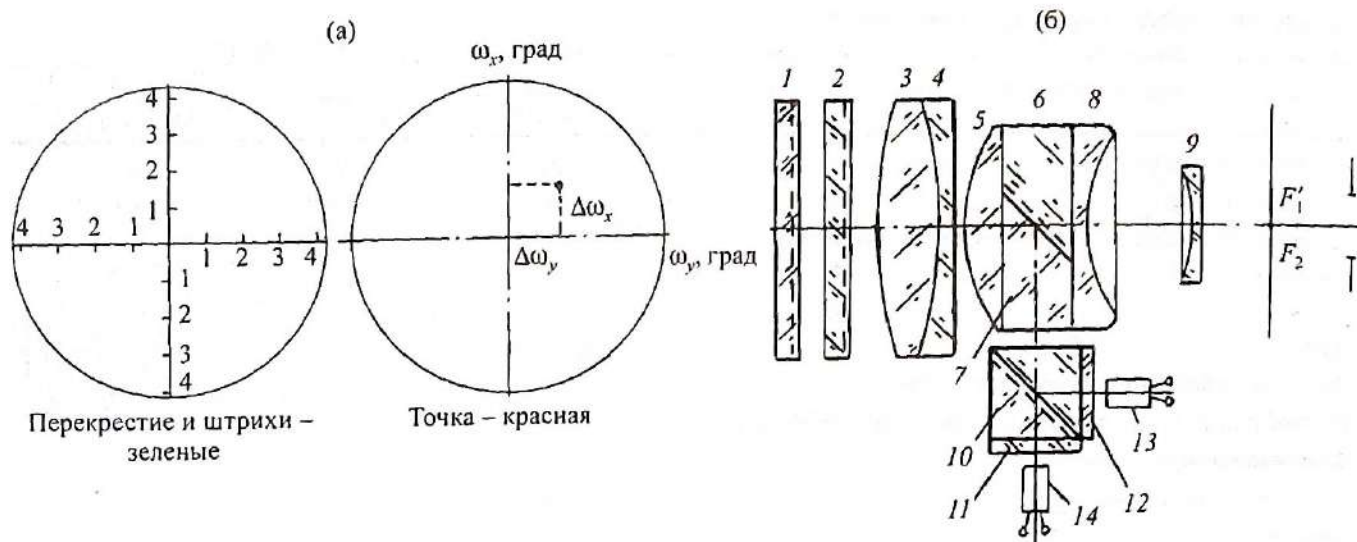


Рис. 4. Телескопический визир Галилея–УкрТЦОП, вариант II. а – вид сеток в поле зрения. б – оптическая схема визира: 1 – зеркало с узкоспектральным отражающим покрытием $\Delta\lambda_1$ (красным), 2 – зеркало с узкоспектральным покрытием $\Delta\lambda_2$ (зеленым), 3–8 – объектив, 9 – окуляр; 10 – светоделитель, 11, 12 – сетки с прозрачными штрихами, 13 – светодиод (зеленый), 14 – светодиод (красный).

собой телескопическую систему Галилея, у которой задний фокус F'_1 объектива 3–8 совпадает с передним фокусом F_2 окуляра. Канал формирования прицельной и нулевой марок содержит зеркало 1 с красным узкоспектральным высокоотражающим покрытием, светофильтр 2 с нанесенным на одну из сторон дополнительным зеленым узкоспектральным высокоотражающим покрытием, автоколлимационный объектив 3–7, светоделительный кубик 10, нулевую марку 11 со светодиодом 13 (зеленым) и прицельную марку 12 со светодиодом 14 (красным). Формирование марок происходит следующим образом. Светодиоды 13, 14 (зеленый и красный) подсвечивают сетки 11 и 12 одновременно. Поскольку штрихи сеток прозрачны, а сами они расположены в фокальных плоскостях коллимационного объектива 3–7, то излучение, прошедшее сквозь светоделительный кубик с нанесенным на плоскости склейки узкоспектральным $\Delta\lambda_2$ (зеленым) высокоотражающим покрытием, выйдет из объектива 3–7 коллимированным. При этом на нейтральном полупрозрачном покрытии светоделителя 6, 7 будет потеряно порядка 50% светового потока.

Коллимированное излучение красного и зеленого участков спектра встретит на своем пути последовательно установленные нормально к оптической оси визира монохроматические зеркала 2 и 1, которые соответственно отразят падающие на них потоки, т. е. произойдет автоколлимация.

Эти отраженные от зеркал 1 и 2 коллимированные потоки, которые разнесены по спектру, пройдут сквозь объектив 3–8 и окуляр 9 визира и создадут в окулярном поле зрения визира автоколлимационные изображения марок: нулевой – в виде

перекрестия зеленого цвета с делениями и прицельной – в виде точки красного цвета.

Таким образом, в визире изображение марки в поле зрения окуляра формируется автоколлимационным способом. В коллимации принимает участие объектив 3–7, в автоколлимации – объектив 3–8. Объектив 3–8 выполняет две функции: наблюдательную (для наблюдения местности) и коллимационно-автоколлимационную (для формирования изображения марок).

Закключение

1. При работе в сумерках яркость изображения марки должна быть регулируемой в сторону уменьшения, так как из-за избыточной яркости марки цель может быть потеряна (невыполнение условий оптимального контраста).

2. Когда требования минимизации веса и габаритов визира (прицела) преобладают над другими требованиями, а удаление глаза от окуляра может быть небольшим, предпочтение может быть отдано визир Галилея.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тудоровский А.И. Теория оптических приборов. Ч. II. М.–Л.: АН СССР, 1952.
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение. 1975. 639 с.
3. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966.
4. Турыгин И.А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1965.

5. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973.
6. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. М.: Наука, 1971.
7. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
8. Степин Ю.А. Оптический прицел. А.с. SU 16305.04 А1, 18.09.1989.
9. Михель К. Основы теории микроскопа. Пер. с немецкого М.В. Лейкина /Под ред. Г.Г. Слюсарева. М.: Гостехиздат, 1955. 276 с
10. Борисюк Л.В., Загреба О.Н., Куреньов Ю.П., Сербін В.В., Яценко Ю.О. Оптичний візир. Деклараційний патент на винахід. UA, 64284 A, 16.02.2004. Бюл. № 2.
11. Rickert G.E. Self – Luminous Reflex Sight. Патент США № 3.524.710, 1970.
12. Борисюк Л.В., Вовк О.П., Криволапчук О.І., Куреньов Ю.П., Петранговський В.В. Оптичний візир. Деклараційний патент на винахід. UA, № 67199A G02B27/32, F41G1/00, 15.06.2004 Бюл. № 6.