

СОВРЕМЕННЫЙ КОНСТРУКТОРСКИЙ ПОДХОД К ПРИЦЕЛОСТРОЕНИЮ

А.В. Медведев¹, *design@romz.ru*, С.Н. Князева², *ksn-61@yandex.ru*,
Р.О. Кащеев², *10santyaga05@mail.ru*; А.В. Гринкевич³, *lyu1455@yandex.ru*;
¹ОАО "РОМЗ", Ростов,
²ОКБ ОАО "РОМЗ", Ростов,
³ЗАО "ЭВС", Москва

Представлен обзор вариантов построения оптических схем прицельных устройств, предназначенных для поиска, обнаружения, распознавания и наблюдения объектов в условиях низкой и высокой освещенности. Основная конструкторская цель – создание устройств с повышенным функционалом и уменьшенными массогабаритными характеристиками.

В настоящее время основная тенденция развития прицельных устройств заключается в стремлении создавать системы, способные работать в двух или более спектральных диапазонах без существенного усложнения их конструкции. Появилось достаточно много прицелов кругосуточного действия, в которых для работы днем используется канал видимого излучения, а ночью или в условиях плохой видимости – ИК-канал. В некоторых системах эти каналы работают одновременно. Наряду с такими системами в настоящее время успешно функционируют двух- и многоканальные прицелы, в которых разделение на отдельные спектральные каналы происходит в оптической системе. При этом большое внимание уделяется снижению их массы и габаритов.

Применение двух- и многодиапазонных матричных ФПУ, работающих в двух и более спектральных диапазонах, позволяет упростить оптико-механическую схему современных прицельных устройств, заметно уменьшив их габариты, массу и энергопотребление, а также увеличить быстродействие.

Еще один способ снижения габаритов прицелов – построение приборов с совмещенными каналами. В этом случае работа всех каналов прицельного устройства осуществляется через одно общее входное (выходное) окно.

Широкое распространение в наши дни получили визуальные прицелы со встроенным лазерным дальномером. Как правило, такие приборы имеют два отдельных оптических окна:

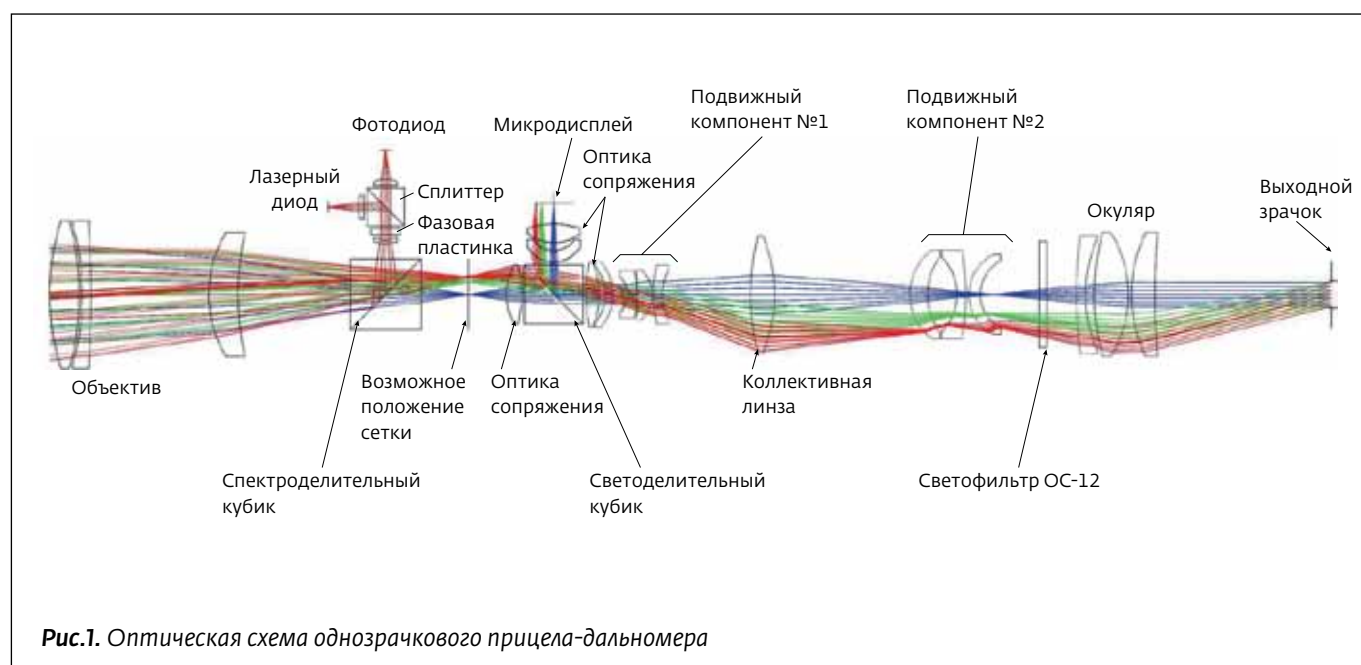


Рис.1. Оптическая схема однозрачкового прицела-дальномера

Таблица 1. Сравнительные характеристики прицелов

Параметры	ПДПО 4-16-01 ОАО РОМЗ	Carl Zeiss Victory Diarange M 3-12x56	Burris Laser Eliminator III 4-16x50	Leupold VX-36,5- 20x56 LRT
Наличие встроенного лазерного дальномера	Есть	Есть	Есть	Нет
Дальность действия дальномера, м	1 200 (1600)	999	700 (1100)	Нет
Увеличение, крат	4-16	3-12	4-16	6,5-20
Угловое поле зрения, град [°]	7,0-1,75	8,3-2,3	4,75-1,32	2,7-1,0
Линейная величина поля зрения при расстоянии 100 м, м	12,2-3,1	14,5-4,0	8,3-2,3	4,7-1,7
Предел разрешения, угл.с ["]	16-4	Не указано	Не указано	Не указано
Диаметр входного зрачка, мм	48	56 (эфф-50)	50	56
Диаметр выходного зрачка, мм	8-3	15-5	12,5-3,1	8,6-2,8
Удаление выходного зрачка, мм	60	90	101,8-88,9	112-91
Сумеречное число	11,3-27,7	7,1-22,4	11,5-28,3	19,1-33,4
Длина по оптической оси, мм	375	360	400	368
Вес оптических деталей, г	354	Не указано	Не указано	Не указано
Вес прицела, г	Не указано	995	735,8	765

окно передающего канала лазерного дальномера и окно визуального канала, являющееся одновременно окном приемного канала лазерного дальномера. Наличие двух отдельных каналов, оснащенных собственными объективами и имеющих отдельные оптические окна, увеличивает массу и габариты устройства.

Задача минимизации габаритов решается в предложенной схеме однозрачкового прицела с лазерным дальномером. В оптической системе такого прибора все каналы работают через одно общее оптическое окно. Визуальный канал однозрачкового прицела-дальномера включает в себя общий для всех каналов объектив, подвижные компоненты № 1 и № 2 оборачивающей системы, коллектив и окуляр (рис.1). Перемещение под-

вижных компонентов № 1 и № 2 оборачивающей системы вдоль оптической оси позволяет менять увеличение прицела-дальномера с 4 до 16 крат.

В сходящихся пучках объектива визуального канала установлен спектроделительный кубик, полностью пропускающий видимый спектральный диапазон и отражающий излучение лазерного диода, формируя дальномерный канал однозрачкового прицела. Далее дальномерный канал содержит коллимирующую линзу (она служит для создания афокальной оптической системы), четвертьволновую фазовую пластинку из кварца и поляризационный кубик-сплиттер. Сплиттер разделяет общий дальномерный канал на излучающий и приемный каналы. В каждый из каналов входит объектив сопряжения, формирующий одинаковое эквивалентное фокусное расстояние приемной и излучающей оптических систем (рис.2).

В предложенной системе сплиттер реализован в виде призмы-куба, состоящего из двух прямоугольных призм. Сплиттер обладает способностью пропускать без потерь p -составляющую поляризованного излучения, параллельную плоскости падения (y p -составляющей вектор напряженности электрического поля E_p лежит в плоскости падения), и отражать s -составляющую, перпендикулярную плоскости падения (y s -составляющей вектор напряженности электрического поля E_s перпендикулярен плоскости падения).

Визуальный и дальномерный каналы имеют достаточно высокие параметры. В табл. 1 приведены основные технические характеристики однозрачкового прицела-дальномера в сравнении с характеристиками аналогичных прицелов различных фирм-изготовителей.

В расходящихся пучках объектива визуального канала установлена оптика сопряжения, формирующая пучки с расходимостью, близкой

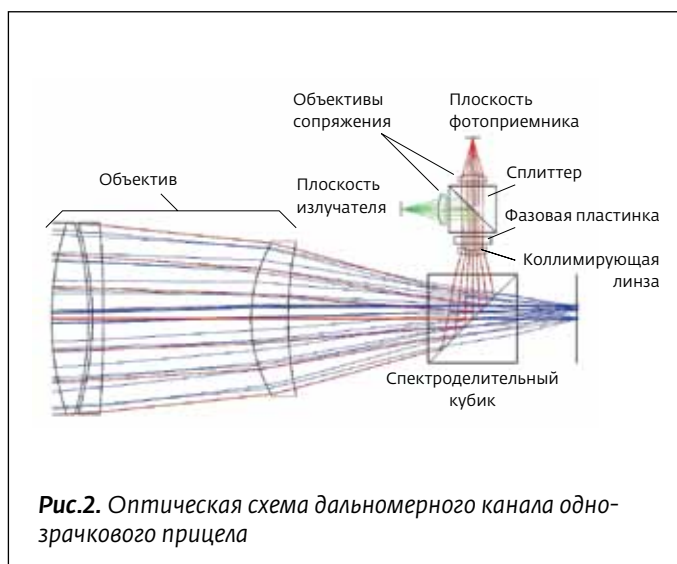


Рис.2. Оптическая схема дальномерного канала однозрачкового прицела

к параллельной, между компонентами которой расположен светоделительный кубик, пропускающий видимый спектральный диапазон с коэффициентом, близким к 0,95, и формирующий проекционный канал однозрачкового прицела. Отображаемое на микродисплее изображение прицельных шкал и сеток переносится в плоскость промежуточного изображения путем отражения от наклонной грани светоделительного кубика. Таким способом изображение шкал и сеток накладывается на изображение местности, построенное визуальным каналом (см. рис.1). В оптической схеме однозрачкового прицела предусмотрена компенсация изменения освещенности экрана микродисплея при изменении линейного увеличения визуального канала. Она

обеспечивает постоянную яркость видимых прицельных меток и шкал.

Оборачивающая система с переменным увеличением является общей для визуального и проекционного каналов, поэтому изменение углового увеличения визуального канала ведет к пропорциональному изменению линейного поля зрения, отображаемого на микродисплее. Таким образом, визуализированный на микродисплее угол прицеливания после измерения дальности лазерным дальномером остается неизменным во всем диапазоне увеличений визуального канала для определенной дальности и применяемого типа оружия.

Предложенная схема однозрачкового прицела дальномера представляет собой визуальный прибор, применяемый в условиях достаточной освещенности. Для работы в ночное время или в условиях плохой видимости прицельные устройства необходимо оснащать дополнительным функционалом, обеспечивающим их эксплуатацию в данных условиях.

Таким функционалом располагает вариант схемы двухзрачкового дневно-ночного прицела-дальномера с окулярным выходом, содержащий три основных канала: прицельно-визирный канал, излучающий и приемный каналы лазерного дальномера. Излучающий канал дальномера в предложенной схеме прицельного устройства выполнен в виде отдельного канала с собственным выходным окном, а приемный канал дальномера совмещен с прицельно-визирным трактом (рис.3).

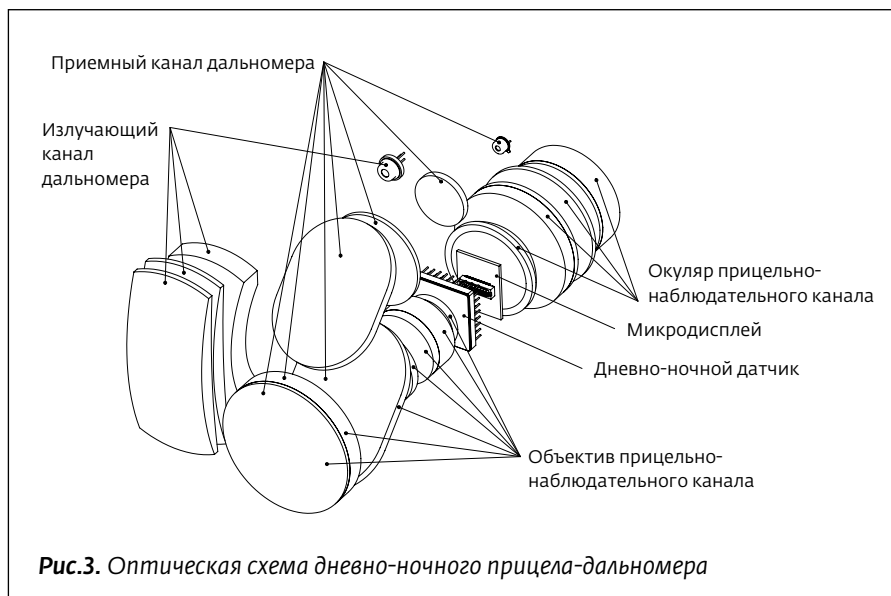
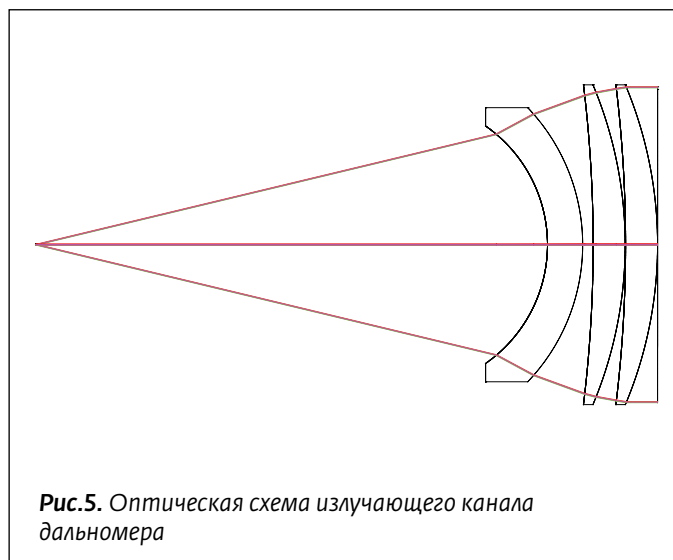
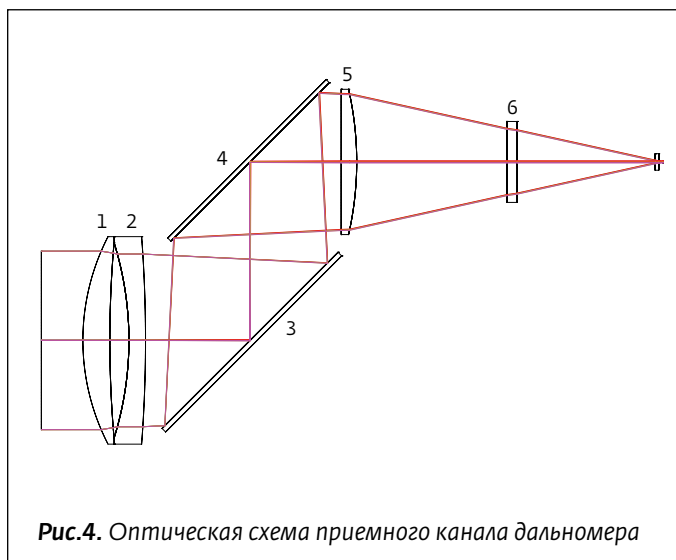


Рис.3. Оптическая схема дневно-ночного прицела-дальномера

Прицельно-наблюдательный (визуальный) тракт предложенной схемы прицельного устройства, предназначенный для поиска, обнаружения, распознавания и наблюдения объектов в условиях низкой и высокой освещенности. Он является оптико-электронным и включает в себя ряд элементов: объектив, формирующий изображение предметного поля на фоточувствительной поверхности дневно-ночного датчика; микродисплей, отображающий обработанное датчиком и дополненное сервисным меню монохромное изображение; окуляр, осуществляющий сопряжение микро-



дисплея с глазом наблюдателя. Для обеспечения безопасности окуляр выполнен по схеме с удаленным выходным зрачком, позволяющей снизить вероятность травмирования оператора изделия при ведении огня.

Дневно-ночной датчик визуального тракта представляет собой КМОП-матрицу, созданную специально для эффективного применения в условиях низкого уровня освещенности. Эта новейшая разработка в области ночного видения основана на полностью твердотельной технологии. Прибор работает с частотой обновления изображения до 100 кадров в секунду с минимально возможным уровнем шума. Основные параметры дневно-ночной КМОП-матрицы представлены в табл.2. Приемный канал дальномера дневно-ночного прицела состоит из трехкомпонентного объектива (линзы 1, 2, 5), светоделительной пластины 3, зеркала 4, светофильтра 6 и приемника излучения.

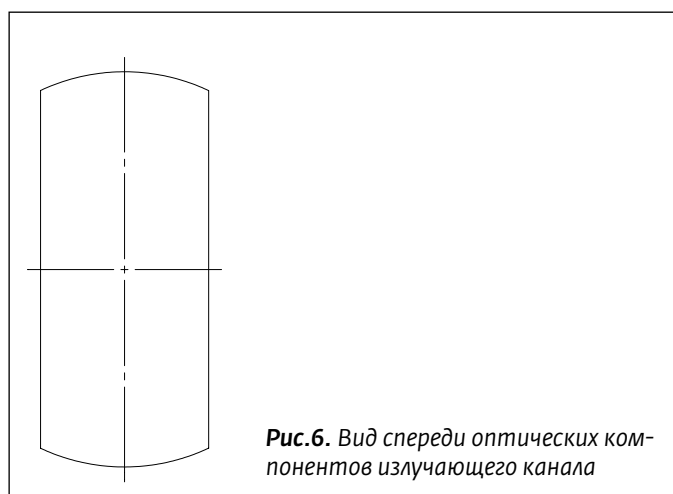
Объектив приемного канала включает в себя две входные линзы объектива визуального канала (1 и 2), функцию разделения каналов выполняет светоделительная пластина 3 с дихроичным покрытием, пропускающим рабочий спектральный диапазон прицельно-визирного тракта (0,4–0,9) мкм, и отражающая излучение лазерного диода (1,54 мкм). Оптическая схема приемного канала приведена на рис.4.

Пучок лазерного излучения, отраженный от наблюдаемого объекта, последовательно проходит линзы 1 и 2 объектива прицельно-визуального канала, попадает на переднюю грань светоделительной пластины 3 и отражается, а затем фокусируется зеркалом 4 и линзой 5 на чувствительной площадке приемника излучения.

Излучающий канал лазерного дальномера состоит из трехлинзового объектива, спроектированного под требуемую угловую расходимость

Таблица 2. Характеристики датчика визуального тракта (КМОП-матрица)

Параметры	Значение
Формат	1280×1024 пикселей
Размер пиксела, мкм	9,7×9,7
Динамический диапазон	От звездного до дневного света
Предельное разрешение	51 штр/мм (1280 линий)
Спектральная чувствительность, мкм	(0,4–1,1)



**Таблица 3.** Параметры оптической системы двухзрачкового дневно-ночного прицела-дальномера

Для прицельно-визирного канала спектрального диапазона (0,4–0,9) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,4–0,9
Расчетная длина волны, мкм	0,7
Фокусное расстояние, мм	41,9
Относительное отверстие	1:1,36
Увеличение, крат	2,7
Угловое поле зрения	17×13,5°
Динамический диапазон, лк	10 ⁻⁴ –10 ⁵
Для излучающего канала дальномера спектрального диапазона (1,52–1,58) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	1,52–1,58
Расчетная длина волны, мкм	1,54
Фокусное расстояние, мм	141,8
Относительное отверстие	1:2,17
Увеличение, крат	2,7
Линейное поле, мкм	180×2
Для приемного канала дальномера спектрального диапазона (1,53–1,55) мкм	
Рабочий спектральный диапазон	1,53–1,55
Расчетная длина волны, мкм	1,54
Фокусное расстояние, мм	110
Относительное отверстие	1:2,32
Линейное поле зрения, мкм	350

пучка и эффективное использование потока излучателя (рис.5). Оптические компоненты объектива выполнены в виде линз с обрезанными краями, что обусловлено разницей в размерах излучающей площадки лазера и ориентацией лазера в канале. Вид спереди оптических компонентов представлен на рис.6. Параметры такого варианта исполнения оптической системы дневно-ночного прицела-дальномера приведены в табл.3.

Дальнейшие работы по оптимизации массогабаритных характеристик прицельного устройства позволяют перейти от двухзрачковой трехканаль-

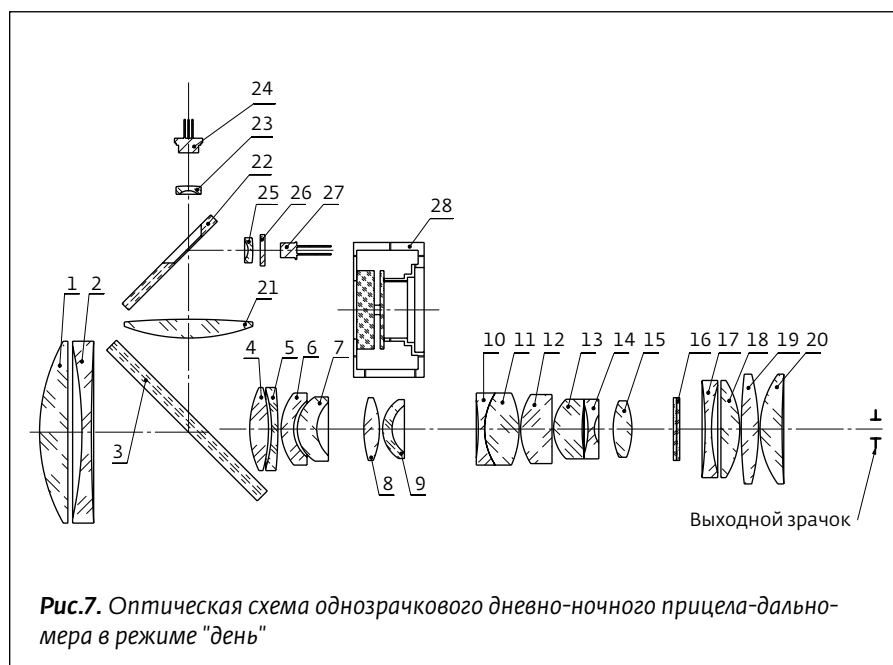
ной оптической схемы прибора к однозрачковой системе, все каналы которой работают через общее оптическое окно.

Оптическая схема однозрачкового дневно-ночного прицела-дальномера представляет собой многофункциональный комбинированный канал с окулярным выходом, объединяющий три рабочих приборных канала: прицельно-визирный канал, излучающий и приемный каналы лазерного дальномера (рис.7).

Прицельно-визирный канал в режиме "день" включает в себя объектив (линзы 1, 2, 4, 5, 6), компенсационный коллектив (линзы 8, 9), оборачивающую систему (линзы 10, 11, 12, 13, 14, 15), просветный индикатор 16 и окуляр (линзы 17, 18, 19, 20). В плоскости просветного индикатора изображение объектов, построенное объективом совместно с коллективом и оборачивающей системой, накладывается на изображение прицельных сеток и служебной информации, сформированное непосредственно просветным индикатором. Итоговое изображение рассматривается оператором через окуляр с удаленным выходным зрачком.

Таблица 4. Параметры оптической системы однозрачкового дневно-ночного прицела-дальномера

Для прицельно-визирного канала спектрального диапазона (0,48–0,85) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,48–0,85
Расчетная длина волны, мкм	0,7
Фокусное расстояние, мм	54,54
Относительное отверстие	1:1,46
Увеличение, крат	2,8
Угловое поле зрения	18°
Динамический диапазон, лк	10 ⁻⁴ –10 ⁵
Для дальномерного канала на длине волны лазерного диода 0,905 мкм	
Расчетная длина волны, мкм	0,905
Фокусное расстояние, мм	195,0
Относительное отверстие	1:5
Линейное поле излучающей части канала, мкм	235×400
Линейное поле приемной части канала, мкм	500



чающую и приемную части, каждая из которых содержит отрицательную линзу сопряжения (линзы 23 и 25). Линзы сопряжения формируют эквивалентное фокусное расстояние излучающего и приемного трактов дальномера, в состав которого входят лазерный диод 24 и фотодиод 27 соответственно. Ход лучей в каналах лазерного дальномера однозрачкового дневно-ночного прицела представлен на рис.8.

Особенностью прибора, позволяющей использовать его как днем, так и в условиях пониженной освещенности, является наличие между объективом и оборачивающей системой электронно-оптиче-

ского преобразователя 28 (поколения 2+ или 3), имеющего возможность перемещения и включения в прицельно-визирный тракт вместо компенсационного коллектива (рис.9). Параметры рассмотренного варианта исполнения оптической системы однозрачкового дневно-ночного прицела-дальномера в табл. 4.

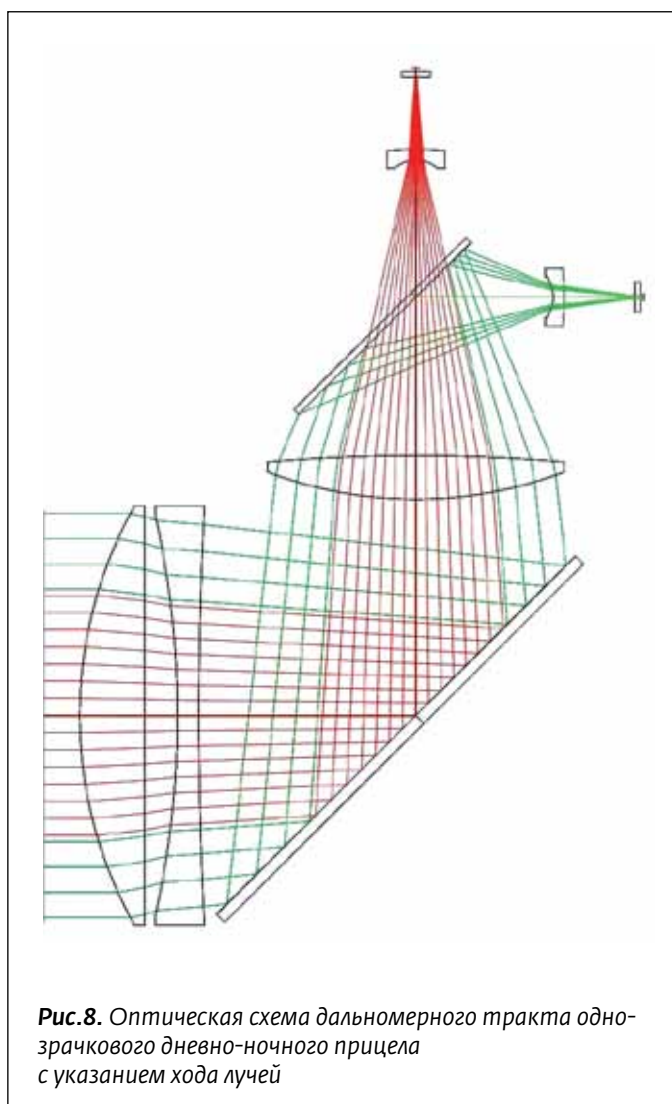
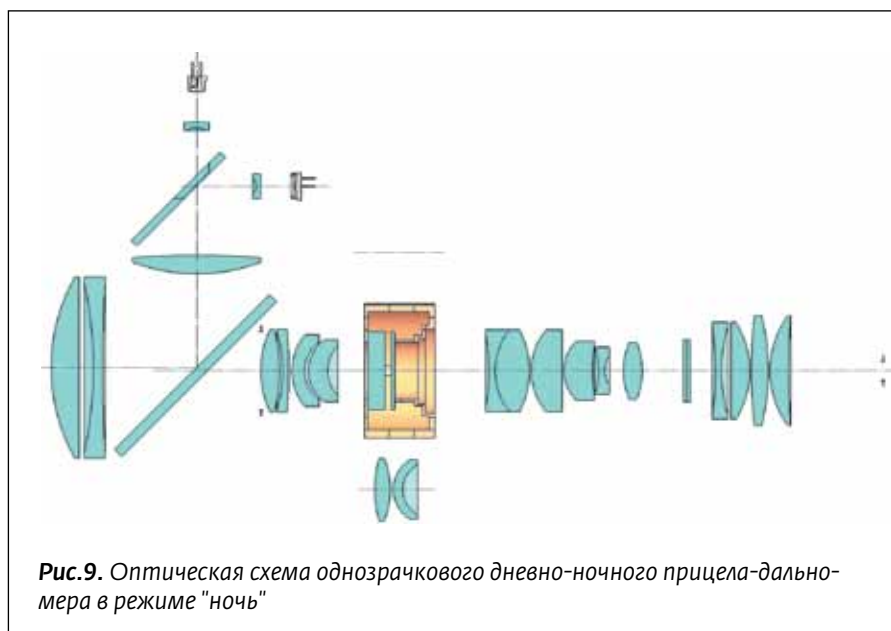
Анализ качества изображения однозрачкового дневно-ночного прицела показывает, что разрешающая способность прицельно-визирного тракта для внеосевой точки поля составляет величину порядка 16 угл. мин. в режиме "день" и порядка 18 угл. мин. в режиме "ночь". Сравнивая полученные значения с общепринятыми величинами остаточных угловых сферических aberrаций сложных телескопических систем, составляющими порядка 20 угл. мин. [1], можно отметить, что разрешающая способность

Совмещение прицельно-визирного тракта с каналом лазерного дальномера обеспечивается спектроразделительной пластиной 3 (с дихроичным покрытием, пропускающим спектральный диапазон 0,48-0,85 мкм и отражающим спектральный диапазон 0,85-0,95 мкм), установленной между линзами 2 и 4 объектива прицельно-визирного канала.

Дальномерный канал рассматриваемой схемы прицела-дальномера состоит из трехлинзового объектива, первые два компонента которого (линзы 1 и 2) являются общими для всех каналов системы, и зеркала апертурного разделения 22 с центральным отверстием, установленного в отраженном от спектроразделительной пластины 3 пучке лучей спектрального диапазона (0,85-0,95) мкм. Зеркало апертурного разделения разветвляет общий дальномерный канал на излу-

Таблица 5. Параметры первого варианта мультиспектральной оптической системы

Для тепловизионного канала спектрального диапазона (8–14) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8–14
Расчетная длина волны, мкм	10,6
Фокусное расстояние, мм	38,5
Относительное отверстие	1:1,1
Линейное поле зрения, мм	13,6
Для телевизионного канала спектрального диапазона (0,6–0,95) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,6–0,95
Расчетная длина волны, мкм	0,7
Фокусное расстояние, мм	45,0
Относительное отверстие	1:1,28
Линейное поле зрения, мм	16
Для дальномерного канала на длине волны лазерного диода 1,54 мкм	
Рабочий спектральный диапазон	1,53–1,55
Расчетная длина волны, мкм	1,54
Фокусное расстояние, мм	119,4
Относительное отверстие	1:4,9
Линейное поле зрения, мкм	350


Рис.8. Оптическая схема дальномерного тракта однозрачкового дневно-ночного прицела с указанием хода лучей

Рис.9. Оптическая схема однозрачкового дневно-ночного прицела-дальномер в режиме "ночь"

прицельно-визирного тракта соответствует рекомендуемым допускам для обоих режимов работы.

Расширение функциональных возможностей прицельных устройств было продолжено в направлении обеспечения работы в нескольких спектральных диапазонах. Интересно рассмотреть несколько вариантов построения мультиспектральной оптической системы, содержащей тепловизионный, телевизионный каналы и встроенный лазерный дальномер.

Оптическая схема первого варианта однозрачковой

Таблица 6. Оценка качества первого варианта однозрачковой мультиспектральной системы

КПК в различных сечениях	Тепловизионный канал спектрального диапазона (8–14) мкм			Телевизионный канал спектрального диапазона (0,6–0,9) мкм		
	Точка на оси	Точка поля 4 мм от центра изображения	Точка поля 6,8 мм от центра изображения	Точка на оси	Точка поля 2 мм от центра изображения	Точка поля 7,75 мм от центра изображения
КПК _{м,%}	51	33	31	48	36	26
КПК _{с,%}	51	48	50	48	42	35

мультиспектральной системы со встроенным лазерным дальномером представлена на рис.10. Мультиспектральная система в первом варианте содержит общий входной канал: менисковая линза 1, спектроделительная пластина 2 (с дихроичным покрытием, пропускающим спектральный диапазон 8–14 мкм и отражающим спектральный диапазон 0,6–0,95 мкм); оптический канал в проходящем через спектроделительную пластинку 2 направлении (он включает в себя две положительные линзы 3, 4 и микроболометрическую матрицу 5); оптический канал в отраженном от пластинки 2 направлении. Оптиче-

ский канал в отраженном направлении состоит из двухкомпонентного объектива (первый компонент – линзы 6, 7; второй компонент – линзы 9, 10, 11, 12) и телевизионной ПЗС-матрицы 13. Между первым и вторым компонентами установлена спектроделительная пластинка 8. Спектроделительная пластинка 8 отражает излучение спектрального диапазона телевизионного канала и пропускает спектральный диапазон дальномерного канала с помощью зеркала апертурного разделения 14 с центральным отверстием. Оно разветвляет общий дальномерный канал на излучающую (лазерный диод 17) и приемную (зеркало

Таблица 7. Параметры второго варианта мультиспектральной оптической системы

Для тепловизионного канала спектрального диапазона (8–14) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8–14
Расчетная длина волны, мкм	10,6
Фокусное расстояние, мм	60
Относительное отверстие	1:1,2
Линейное поле зрения, мм	13,6
Для телевизионного канала спектрального диапазона (0,6–0,95) мкм	
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,6–0,95
Расчетная длина волны, мкм	0,7
Фокусное расстояние, мм	26,5
Относительное отверстие	1:1,25
Линейное поле зрения, мм	6
Для дальномерного канала на длине волны лазерного диода 0,905 мкм	
Расчетная длина волны, мкм	0,905
Фокусное расстояние, мм	101,0
Относительное отверстие	1:3,3
Линейное поле зрения, мкм	500

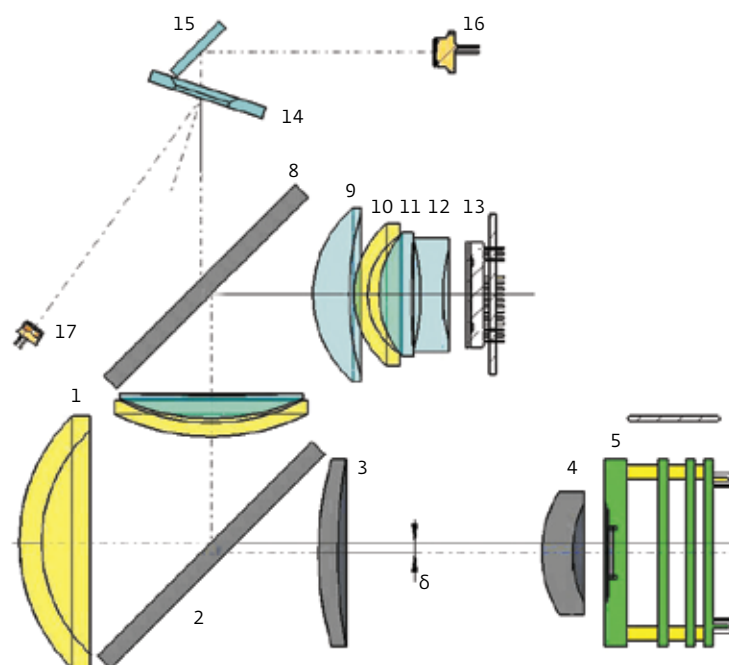
электронных приборов с общим входным каналом.

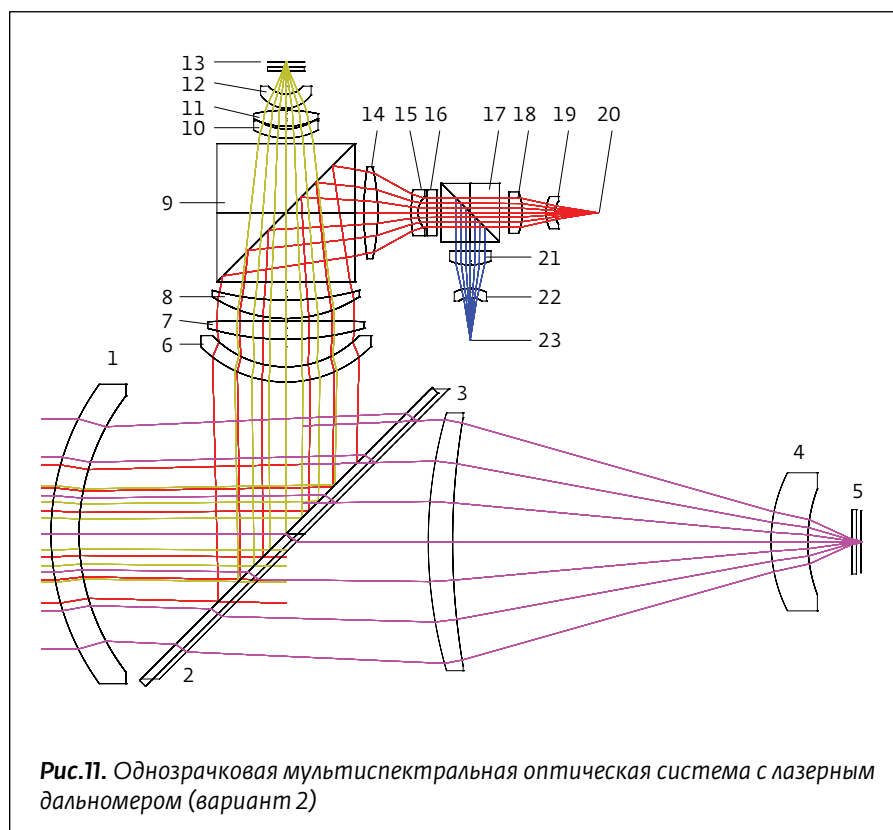
Второй вариант мультиспектральной оптической системы отличается принципом построения лазерного дальномера (см. рис.1). Мультиспектральная система во втором варианте также содержит общий входной канал: менiscoвая линза 1, спектроделительная пластина 2 (с дихроичным покрытием, которое пропускает излучение в спектральном диапазоне 8–14 мкм и отражает в спектральном диапазоне 0,6–0,95 мкм); тепловизионный канал – он работает в проходящем через спектроделительную пластинку 2 направлении и включает в себя положительные линзы 3 и 4, а также микро-боллометрическую матрицу 5; оптический канал – он работает в отраженном от пластинки 2 направлении.

15, фотодиод 16) части. Параметры первого варианта мультиспектральной оптической системы приведены в табл. 5.

Для каналов наблюдения первого варианта мультиспектральной системы за оценочный критерий качества изображения принята величина полихроматического коэффициента передачи контраста (КПК). Качество однозрачковой мультиспектральной системы характеризуется данными, представленными в табл. 6.

Анализируя данные табл. 2, можно отметить, что однозрачковая мультиспектральная оптическая система обеспечивает хорошее качество изображения тепловизионного (спектральный диапазон 8–14 мкм) и телевизионного (спектральный диапазон 0,6–0,9 мкм) каналов для оптико-


Рис.10. Однозрачковая мультиспектральная оптическая система с лазерным дальномером (вариант 1)



(линзы 18, 19 и лазерный диод 20) и приемную (линзы 21, 22 и фотодиод) части. Параметры второго варианта системы приведены в табл. 7.

Оценка качества изображения каналов наблюдения второго варианта мультиспектральной оптической системы, проведенная аналогично оценке первого варианта, позволяет сделать вывод о том, что качество изображения как для тепловизионного, так и для телевизионного каналов хорошее.

Таким образом, рассмотренные варианты построения прицелов с совмещенными каналами могут быть применены в самых различных приборах: от визуальных прицелов носимого класса, до сложных мультиспектральных многоканальных систем специального назначения. Это в значительной степени

также состоит из двухкомпонентного объектива, однако между первым компонентом (линзы 6, 7, 8) и вторым компонентом (линзы 10, 11, 12, 13) расположен спектроделительный кубик 9. Спектроделительный кубик 9 пропускает излучение спектрального диапазона телевизионного канала (линзы 6, 7, 8, 10, 11, 12 и телевизионная ПЗС-матрица 13) и отражает спектральный диапазон дальномерного канала. Дальномерный канал состоит из оптики сопряжения (линзы 14, 15), четвертьволновой фазовой пластинки 16, поляризационного сплиттера 17 и объективов (линзы 18, 19 и 21, 22). Поляризационный сплиттер разветвляет общий дальномерный канал на излучающую

пению позволяет расширить функциональные возможности изделий и уменьшить их массогабаритные характеристики. Следует также отметить, что предложенные оптические схемы – лишь остов современного прицела, который может включать в себя множество различных функциональных устройств, в значительной мере повышающих его эксплуатационные качества и удобство применения, например автомат захвата-сопровождения цели и система разрешения выстрела.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Заказнов Н.П. и др.** Теория оптических систем. – Москва: Машиностроение, 1992.