

## ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЦЕЛЫ СО СМЕННЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ

*Евгений Владимирович Шмелев*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (958)853-34-69, e-mail: shmelev-1998@mail.ru

*Татьяна Николаевна Хацевич*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

В статье отмечается тенденция развития оптических прицелов, выполненных с дискретной сменой увеличения. На примере двух оптических схем в идеальных компонентах рассматривается возможность отступления от классических подходов к реализации дискретной смены увеличения для повышения эксплуатационных характеристик приборов относительно существующих аналогов.

**Ключевые слова:** телескопическая система, дискретная смена увеличения, улучшение характеристик, схемные решения

## OPTICAL SIGHTS WITH INTERCHANGEABLE MAGNIFICATION

*Evgeniy V. Shmelev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (958)853-34-69, e-mail: shmelev-1998@mail.ru

*Tatiana N. Khatsevich*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The article notes the development trend of optical sights made with a discrete change in magnification. Using two optical schemes in ideal components as an example, we consider the possibility of deviating from the classical approaches to the implementation of a discrete change in magnification to improve the performance of devices relative to existing analogs.

**Keywords:** telescopic system, discrete change of magnification, improvement of characteristics, schematic solutions

### *Введение*

Новый виток в развитии оптических прицелов с дискретной сменой увеличения связан с поиском путей дальнейшего улучшения технических характеристик прицелов, их эргономики и скорости взаимодействия с ними. Типичным сценарием использования оптических прицелов является решение задачи обна-

ружения цели при малых увеличениях и больших полях зрения, и распознавание, идентификация, прицеливание – при больших увеличениях и малых угловых полях [1]. Преимущество прицелов с дискретным сменным увеличением по сравнению с панкратическими прицелами заключается в большей скорости переключения с широкого поля зрения на узкое, так как в них конструктивно заложена смена увеличения одним движением, что упрощает и ускоряет работу с ним. Для того, чтобы не потерять указанное преимущество, число ступеней в оптических прицелах со сменным увеличением делают небольшим: две или три ступени.

Технические характеристики конкретной разработки закладываются на этапе структурной схемы оптической системы, т. е. на этапе выбора принципиального схемного решения построения оптической схемы. Существенным фактором, влияющим на выбор схемного решения, являются массогабаритные ограничения. Традиционно в оптических прицелах для стрелкового оружия [2] применяют такие способы смены увеличений как смена компонентов оборачивающей системы, перемещение оборачивающей системы вдоль оптической оси, включение в систему галилеевской системы. При этом для изменения увеличения галилеевская система может быть либо поворотной, либо в ней реализуется линейное перемещение внутреннего компонента вдоль оптической оси, эквивалентное по оптической сути изменению значения углового увеличения на обратное [3].

Вторым фактором, влияющим на структурную схему оптического прицела, является характер выверки, закладываемый при разработке. На примере отечественных и зарубежных моделей можно говорить о том, что применение внешней выверки может привести к упрощению схемного решения [4], необходимость внутренней выверки – к усложнению [5].

В прицелах с двумя плоскостями действительных промежуточных изображений важным фактором, влияющим на структурную схему оптической системы, является размещение сетки в первой или второй плоскости действительного изображения (в первой или второй фокальной плоскости предшествующей оптической системы). Несмотря на то, что при размещении сетки во второй фокальной плоскости изменение увеличения приводит к изменению цены деления сетки в пространстве предметов и повышает требования к точности характеристик и положений компонентов предшествующей оптики, схемные решения с размещением сетки во второй фокальной плоскости позволяют сократить длину оптической системы.

Разнообразие технических характеристик разрабатываемых изделий совместно с вышеперечисленными факторами стимулирует разработчиков к поиску новых схемных решений. Целью статьи является рассмотрение двух схемных решений с позиции возможного сокращения габаритных размеров за счет отступления от классических подходов проектирования телескопических системы прицелов с дискретной сменой увеличения.

В исследовании применяются методы геометрической оптики и компьютерного моделирования оптических систем.

### Вариант схемного решения с двухступенчатой сменой увеличения

В предлагаемом схемном решении, представленном на рис. 1 применяется поворотная система смены увеличения, а также призмная оборачивающая система. Изменение оптической силы объектива линейным перемещением или введением в ход лучей компонентов наиболее часто используется в компактных инфракрасных объективах [6, 7]. Применение поворотной системы позволяет точно и быстро позиционировать поворотные компоненты относительно неподвижных компонентов. Компромиссом для пользователя является кратковременная потеря поля зрения при ускоренном изменении кратности наблюдаемого изображения. Применение призмной оборачивающей системы также несет свои достоинства и недостатки. Применение призмы сокращается габаритную длину системы, также снижаются требования к точности механики, тогда как требования к точности изготовления оптических компонентов увеличиваются. Особенно это касается углов крыши призм, неточное изготовление которых может привести к двоению изображения.

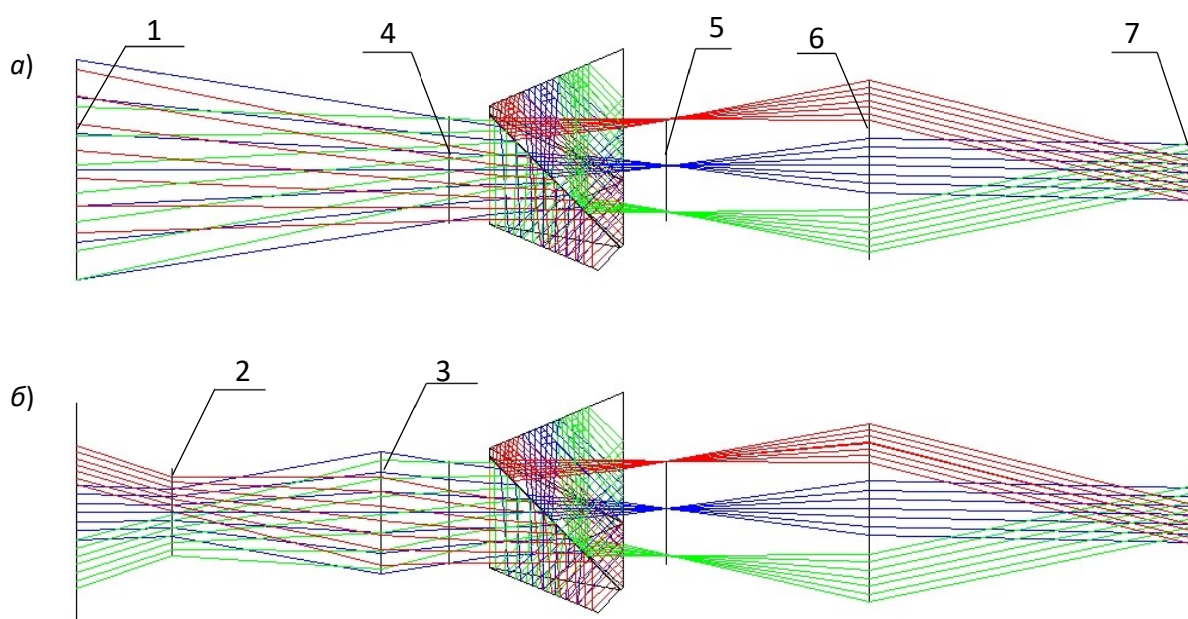


Рис. 3. Схемное решение с фокальной поворотной системой смены увеличения, где: а) конфигурация с  $\gamma = 4$ ; б) конфигурация с  $\gamma = 1$

1, 4 – неподвижные компоненты объектива; 2, 3 – поворотная фокальная система смены увеличения; 5 – полевая диафрагма; 6 – окуляр; 7 – выходящий зрачок

В отличие от обычно используемых афокальных двухкомпонентных систем (типа Галилея) в схеме применена двухкомпонентная оптическая система, имеющая положительную оптическую силу. Оптическая сила компонентов 2, 3 такова, чтобы относительное отверстие компонентов 1-3 и диаметр компонента 4 сохранялись неизменным в обеих конфигурациях. Такое решение позволяет сов-

местить апертурную диафрагму с компонентом 4, а также сохранить неизменным диаметр и положение выходного зрачка при смене увеличения. Между параметрами компонентов имеют место следующие соотношения:

$$kf_2'f_3' - f_2'f_3' - f_1'f_3' - f_1'f_2' + d_1f_3' + d_1f_2' + d_2f_2' + d_2f_1' - d_1d_2 = 0, \quad (1)$$

$$(1-k)(f_1 - d_1 - d_2 - d_3)f_2f_3 + (d_1 - f_1)(f_3(d_2 + d_3) + f_2d_3) + d_2d_3(f_2 + f_1 - d_1) = 0, \quad (2)$$

где  $f_i'$  – фокусное расстояние  $i$ -го компонента;

$d_1$  – расстояние вдоль оси между компонентами 1 и 2;

$d_2$  – длина поворотной системы;

$d_3$  – расстояние вдоль оси между компонентом 3 и 4;

$k$  – кратность смены увеличения.

Система уравнений (1) и (2) имеет множество решений. Одним из решений, соответствующих выбранной схеме и системе уравнений (1), (2), является решение, приведенное на рис. 1, обеспечивающее два значения углового увеличения  $\gamma$ , равного 4 и 1 крат.

В конкретном варианте, показанном на рис.1, оптическая сила компонентов 2, 3 примерно в 5 раз превышает оптическую силу компонента 1. Выполнение поворотной системы в виде двух компонентов позволяет снизить относительные отверстия компонентов 2, 3.

### ***Вариант схемного решения с трехступенчатой сменой увеличения***

Для практического применения интересны случаи реализации трехступенчатая дискретной смены увеличения. Классическим приемом обеспечения трехступенчатой смены увеличения является использование поворотной афокальной системы, что требует организации внутри оптической системы пространства с параллельным ходом лучей осевых и наклонных пучков, и приводит к увеличению длины телескопической системы. Многоступенчатую (панкратическую) смену увеличения наиболее часто осуществляют путем перемещения компонентов оборачивающей системы вдоль оптической оси, обеспечивая при этом минимизацию смещения плоскости выходного зрачка во всем диапазоне увеличений [6]. Ограничение числа положений подвижных компонентов до трех может использоваться для получения трехступенчатой смены увеличений. При дополнительном условии размещения сетки во второй фокальной плоскости для уменьшения длины телескопической системы предлагается отойти от соблюдения постоянства длины оборачивающей системы (расстояния между плоскостями предметов и изображений) и включить в расчет такие положения компонентов, при которых расстояние между первым компонентом оборачивающей системы и второй фокальной плоскостью могут превышать длину оборачивающей системы.

Для иллюстрации предложенного подхода на рис. 2 представлен ход лучей в идеальной оптической системе с трехступенчатой сменой увеличения.

В качестве примера рассматривается система с трехкратным перепадом увеличения между конфигурациями, имеющая увеличения 1, 3 и 9 крат.

Параметры компонентов для различных вариантов системы приведены в таблице.

$\gamma$ , крат	$f_1'$ , мм	$d_1$ , мм	$f_2'$ , мм	$d_2$ , мм	$f_3'$ , мм	$d_3$ , мм	$f_{ок}'$ , мм	$L$ , мм	$A_{p'}'$ , мм	$D_{p'}'$ , мм
1	50	39,92	13,76	42,23	18,56	37,84	30	160	53,78	10
3		55,82		26,34		37,84				
9		58,56		5,00		56,44				

При увеличениях 1, 3 и 9 крат угловые поля системы 16, 6 и 2 градуса соответственно. Непостоянство удаления выходного зрачка не превышает общетехнических рекомендованных 10 %.

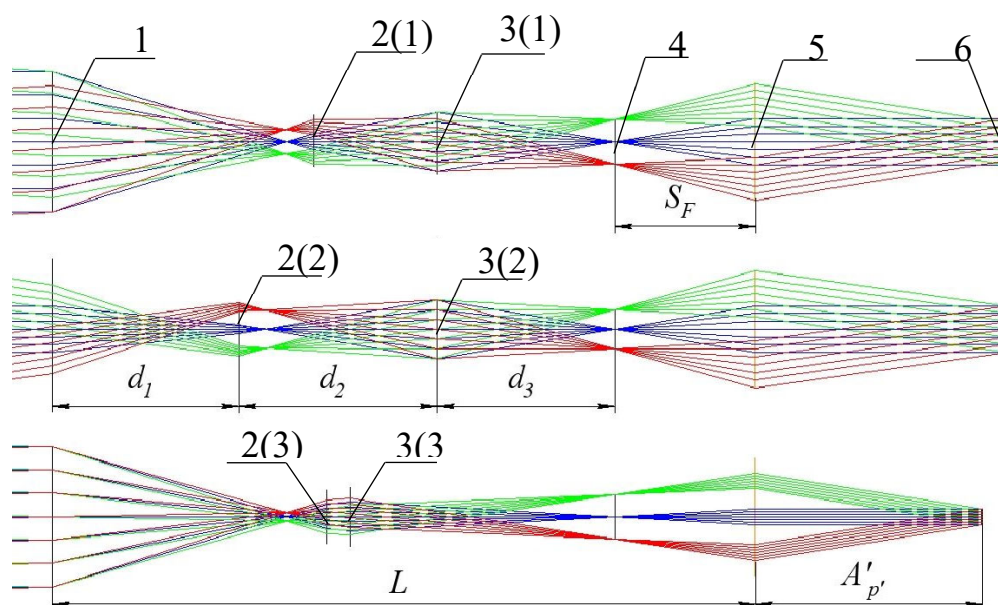


Рис. 4. Ход лучей в идеальной системе с трехступенчатой сменой увеличения:

а)  $\gamma = 3$ ; б)  $\gamma = 1$ ; в)  $\gamma = 9$

1 – объектив; 2, 3 – подвижные компоненты оборачивающей системы; 4 – полевая диафрагма; 5 – окуляр; 6 – выходной зрачок

Перемещение первого подвижного компонента 2 происходит таким образом, что в конфигурации, обеспечивающей наименьшее увеличение, плоскость предметов для оборачивающей системы становится мнимой, что позволяет сократить общую длину схемы. Предполагается, что для исключения увода визирной линии при смене увеличения в системе предусматривается внешняя выверка

или специальные конструктивные приемы компенсации увода. Явным преимуществом относительно системы с поворотной системой смены увеличения является уменьшенное число силовых компонентов, что сокращает разницу между длиной идеальной системы и реальной, а также в перспективе улучшает такие характеристики системы как масса и коэффициент светопропускания.

Опыт реального проектирования показывает, что переход от идеальной системы к реальной влечет за собой увеличение длины системы примерно на 20 %. Закладывая коэффициент увеличения 1,2, можно спрогнозировать длину реальной системы при разработке по представленному схемному решению, а также сравнить с длиной известного аналога с трехступенчатой сменой увеличения [9, 10]. Длина скомпонованной системы в тонких компонентах составляет 150 мм. При оценке возможной длины в реальных компонентах с учетом закладываемого коэффициента, результирующая длина составит около 180 мм. Известный аналог, построенный по классическому принципу с поворотной афокальной системой, имеет длину 265 мм.

### *Заключение*

В заключение отмечается следующее:

– в малогабаритных оптических прицелах со сменным увеличением число ступеней обычно равно двум, реже – трем;

– в телескопической системе с двумя ступенями увеличения сочетание силовой двухкомпонентной поворотной системы, состоящей из положительного и отрицательного компонентов, и призменной оборачивающей системы позволяет снизить длину прибора. На примере моделирования в параксиальном приближении телескопической системы со ступенями увеличения 1 / 4 крата показано, что реализация сменного увеличения в объективной части при размещении апертурной диафрагмы после системы смены увеличения приводит к уменьшению длины системы и принципиальному отсутствию смещения положения выходного зрачка;

– в телескопической системе с тремя ступенями увеличения при размещении сетки во второй фокальной плоскости смена увеличения приводит к изменению цены деления сетки в пространстве предметов. На примере схемного решения со ступенями увеличения 1 / 3 / 9 крата показано, что отступление от классических решений может повлечь за собой улучшение такой эксплуатационной характеристики как длина, коэффициент пропускания системы и ее масса.

Результаты компьютерного моделирования будут использованы для разработки оптических систем малогабаритных оптических прицелов с двумя и тремя ступенями увеличений.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Волкова, К.Д., Хацевич Т.Н. Оптические системы с переменными характеристиками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2014. – С. 13-20.

2. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем : в 2 ч. / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – 2-е изд., испр. и доп. – Ч. 2., М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. – 348 с.
3. Шмелев, Е.В., Хацевич Т.Н. Проектирование оптической системы прицелов с дискретной сменой увеличения // Материалы VII Всероссийской научно-практической online-конференции (10 ноября 2020 г.) : В рамках III Молодежного форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова» (10–11 ноября 2019 г.) – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. – 190 с.
4. Пат. US7869125B2 Соединенные Штаты Америки, МПК51 G02B 23/00 G02B 23/14; Multi-magnification viewing and aiming scope / Szapiel S., Ross B.; патентообладатель «Raytheon Company». – 11/975109; заявл. 16.10.2007.
5. Пат. RU2547044 Российская Федерация, МПК7 F41G 1/14; Оптический прицел с дискретной сменой увеличения / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В.; патентообладатель ООО «Оптическое Расчетное Бюро». – 2014120776/12; заявл. 22.05.2014; опубл. 10.04.2015. – Бюл. № 10. – 11 с. : ил.
6. Li Y., Yang C., Li S. Design of infrared zoom system with rotating lens group // Proc.SPIE. 2007. Vol. 6834.
7. Yee A.J. et al. The first order solutions for two configurations of discrete zoom lenses // Proc.SPIE. 2016. Vol. 9822.
8. Хацевич, Т.Н., Волкова К.Д. Обеспечение стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения в оптических панкратических прицелах // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84. – № 9. – С. 34-43.
9. Пат. US8988773B2 Соединенные Штаты Америки, МПК51 G02B 23/00 G02B15/10; Optical sighting device / Szapiel S.; патентообладатель «Raytheon Canada Limited». – 13/631040.; заявл. 28.09.2012.
10. SpecterTR 1x/3x/9x // Armament Technology Inc. [Электронный ресурс] URL: <https://armament.com/> (дата обращения: 05.05.2021).

© Е. В. Шмелев, Т. Н. Хацевич, 2021