

УДК 535.3:681.75

Обеспечение стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения в оптических панкратических прицелах

© 2017 г. Т. Н. Хацевич, канд. техн. наук; К. Д. Волкова, аспирант

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

E-mail: khatsevich@rambler.ru; volkova_kd@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2017

Приводятся и обсуждаются оптические схемы окуляров для телескопических систем с переменным увеличением. Показано, что применение оптических схем окуляров с мнимым передним фокусом и окуляров с телецентрическим ходом главных лучей в пространстве предметов увеличивает область решений. Найдены соотношения между параметрами оптической схемы окуляра, обеспечивающие изменение положения выходного зрачка системы не более ± 5 мм при номинальном удалении 95 мм. Приводятся результаты разработки оптических систем панкратических прицелов со стабильным положением выходного зрачка при смене увеличения.

Ключевые слова: переменное увеличение, панкратический прицел, стабильность положения, выходной зрачок, окуляр, телескопическая система.

Коды OCIS: 220.4830, 220.2740, 230.1150

Анализ оптических панкратических прицелов, выпускаемых в настоящее время отечественными и зарубежными производителями, позволил выявить тенденции в совершенствовании их технических характеристик: повышение отношения максимального увеличения к минимальному (*zoom*) и значения максимального увеличения, увеличение диаметров входных и выходных зрачков, обеспечение удаления выходного зрачка 90 мм и более. Конечно, пользователям прицелов важна реализация традиционных требований: сокращение массогабаритных характеристик и ограничение диаметра посадочной части прицела. Одновременное соблюдение совокупности условий приводит к тому, что повышаются требования к оптическим элементам оптической системы, которая должна быть более светосильной, более широкоугольной, с более сложной конструкцией, с более сложными законами движения и др. Совершенствование технических характеристик оптических панкратических прицелов основано на совершенствовании оптических систем и механики прицелов.

С целью прицеливания на больших дальностях существенно важно большое увеличение, которое вступает в противоречие с возможностью обеспечения необходимого размера угла измене-

ния направления визирной линии прицела (углов прицеливания, поправок и выверки). Разрешение этого противоречия привело к появлению схемных решений, в которых панкратические оборачивающие системы выполнены качающимися [1]. На рис. 1 приведена оптическая схема в тонких компонентах, иллюстрирующая способ построения панкратического прицела с качающейся оборачивающей системой: компоненты 4, 5 и сетка 3 поворачиваются в пределах небольшого угла $\pm\beta$ вокруг центра качания O , совпадающего с центром

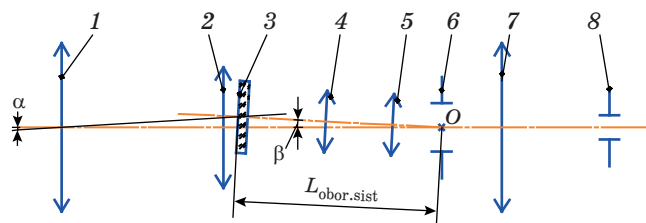


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема панкратического прицела в тонких компонентах. 1 — первый компонент объектива, 2 — второй компонент объектива (коллектив), 3 — сетка, 4 — первый компонент панкратической оборачивающей системы, 5 — второй компонент панкратической оборачивающей системы, 6 — левая диафрагма, 7 — окуляр, 8 — выходной зрачок.

полевой диафрагмы 6, расположенной во второй плоскости промежуточного изображения.

Использование схемных решений на основе качающейся панкратической системы имеет несомненные преимущества. Изображение прицельной марки на сетке 3 при изменении направления визирной линии в пространстве предметов остается в центре поля зрения окуляра 7. Угол изменения направления визирной оси α в пространстве предметов может превышать угловое поле при наибольшем увеличении, что, соответственно, увеличивает диапазон вводимых углов прицеливания, углов выверки и поправок. При размещении прицельной марки в плоскости первого промежуточного изображения (в фокальной плоскости объектива 1, 2) исключаются первичные ошибки, обусловленные подвижками компонентов панкратической оборачивающей системы (4, 5) и вызывающие смещение визирной линии при смене увеличения, что имеет существенное значение для тактических оптических прицелов.

При разработке панкратического прицела с качающейся оборачивающей системой обеспечивается следующее соотношение:

$$f'_{ob} \operatorname{tg} \alpha = L_{\text{obor.sist}} \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

где f'_{ob} — эквивалентное фокусное расстояние объектива, $L_{\text{obor.sist}}$ — расстояние вдоль оптической оси между первой и второй плоскостями действительных изображений (длина оборачивающей системы), β — угол качания плоскопараллельной пластинки 3 с прицельной маркой и шкалами и оборачивающей системы, α — угол изменения направления визирной оси.

При оптическом проектировании реальных оптических систем в соответствии с описанной выше схемой представляется важным проведение исследований по выявлению закономерностей между параметрами и характеристиками ее компонентов, результаты которых позволяют на этапе функционально-структурного синтеза создать исходную схему, потенциально способную удовлетворить совокупности требований, предъявляемых к рассматриваемым изделиям.

Анализ характеристик и параметров 200 моделей оптических панкратических прицелов отечественных и зарубежных производителей, в которых сетка размещена в плоскости первого промежуточного изображения, показал, что *zoom*, равный пяти и более, имеют менее половины моделей. При этом у 97% прицелов окуляры имеют угловое поле менее 30°, а максимальное угловое поле окуляра панкратического прицела с сеткой, находящейся в первой фокальной плоскости, составляет 45°. Одно из технических требований к оптическим системам современных панкратических прицелов, обусловленное удобством эксплуатации прибора — стабильность положения глаза наблюдателя

(стабильность положения выходного зрачка) при смене увеличения. Однако, несмотря на важность указанной технической характеристики с точки зрения эргономики, только треть производителей приводит в описании прибора информацию об изменении положения выходного зрачка при смене увеличения. Выявлено, что у 38% моделей колебание положения выходного зрачка при смене увеличения не превышает 10 мм, у 35% — лежит в диапазоне от 10 до 20 мм, у остальных — составляет от 20 до 70 мм.

Поэтому, принимая во внимание результаты проведенного анализа, данная статья фокусируется на получении закономерностей, обеспечивающих стабильность удаления выходного зрачка в оптических системах панкратических прицелов при *zoom*, равном 5 или более.

Для решения поставленной задачи при проектировании оптической системы панкратического прицела необходимо накладывать ограничения на стабильность положения двух пар сопряженных плоскостей — «предмет — изображение», «входной зрачок — выходной зрачок» во всем диапазоне увеличений. В табл. 1 приведены результаты анализа ряда научных публикаций, выполненных в русле задач настоящей статьи. Стабильность положения плоскостей «предмет — изображение» в диапазоне сменных увеличений является целевым показателем при исследовании панкратических систем во всех анализируемых источниках, но только в половине из них одновременно проводятся исследования второй пары сопряженных плоскостей «входной зрачок — выходной зрачок». В большинстве источников исследование оптических схем ограничивается параксиальным приближением. Это обстоятельство подчеркивает тот факт, что, несмотря на большое количество публикаций по оптике панкратических систем, разработка реальных оптических систем панкратических прицелов с *zoom*, равным пяти и более, при большом удалении выходного зрачка (90 мм и более), с наложенным ограничением на обеспечение стабильности его положения при смене увеличения является самостоятельной научно-технической задачей.

На основании анализа источников, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что строгое решение задачи одновременного сопряжения двух пар плоскостей в параксиальном приближении может быть обеспечено в оптической системе при количестве подвижных компонентов не менее трех. Однако с точки зрения практической реализации в панкратических прицелах интерес представляют оптические системы с количеством подвижных компонентов не более двух. В этом случае строгое оптическое сопряжение обеспечивается у одной пары сопряженных плоскостей («предмет — изображение») и приближенное — у второй

Таблица 1. Сравнение существующих исследований и методик сопряжения двух пар плоскостей панкратических систем

Позиция в списке литературы	Методики, решения в области параксиального синтеза		Количество компонентов	Количество движущихся компонентов
	Сопряжения плоскостей «предмет – изображение»	Сопряжение плоскостей «входной зрачок – выходной зрачок»		
[2]	+	–	2	2
	+	+	3	3
[3]	+	–	4	2
[4]	+	+	3	3
[5]	+	–	5	3
[6]	+	+	3	3
[7]	+	–	4	2
[8]	+	–	3	2
[9]	+	–	3	2
[10]	+	+	4	3
	+	+*1	3	2
[11]	+	–	2	2
[12]	+	–	5	2
[13]	+	–	4	2
[13]*7	+	–	5	3
[14]*7	+	–	4	2
[15]	+	+*2	3	2
[16]	+	+	3	3
[17]	+	+	3	3
[18]	+	+*3	4	3
[19]	+	+*3	3	3
[20]	+	+*4	3	2
[21]	+	+*3	3	3
[21]*7	+	+*3	4	2
[22]	+*5	–	2	2
[23]*7	+*5	–	2	2
[24]	+	–	2	2
[25]	+	–	2	2
	+	–	3	2
[26]	+	–	2	2
[27]	+	–	2	2
[28]	+	+	5	3
[29]*7	+	–	4	2
[30]*6, *7	+	+	3	3

Примечания. *1. Система состоит из трех компонентов, два из которых подвижны, обеспечивает стабильность положения плоскостей «предмет – изображение» и имеет рассогласование плоскостей «входной – выходной зрачок». *2. Лупа со стабильным положением выходного зрачка и совмещенными в пространстве плоскостями «предмет – изображение». *3. Система с телецентрическим ходом лучей. *4. Система со стабильным положением вынесенного входного зрачка и подвижным положением выходного зрачка. *5. В системе есть расфокусировка изображения. *6. Обеспечивается стабильность плоскостей «предмет – изображение» за счет перемещения двух компонентов оборачивающей системы и стабильность плоскостей «входной зрачок – выходной зрачок» (соответственно, и стабильность выходного зрачка прицела) – перемещением апертурной диафрагмы, находящейся в оборачивающей системе. Погрешность удаления выходного зрачка неизвестна. В таком приборе необходимо предусмотреть пазы для перемещения трех компонентов. *7 Разработки, решения реальных оптических панкратических телескопических систем или их панкратических элементов.

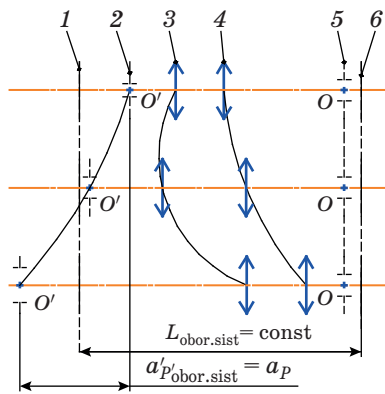


Рис. 2. Принципиальная схема панхроматической оборачивающей системы в тонких компонентах. 1 — предметная плоскость, 2 — выходной зрачок оборачивающей системы, совпадающий с входным зрачком окуляра, 3 — первый линзовый компонент, 4 — второй линзовый компонент, 5 — входной зрачок оборачивающей системы, 6 — плоскость изображения, O и O' — центры входного и выходного зрачков оборачивающей системы.

(«входной зрачок — выходной зрачок») (рис. 2). Соответственно, в данной статье предметом обсуждения является допустимое значение рассогласования $\Delta a'_{P'_{obor.sist}} = \Delta a_P$ в оптическом сопряжении второй пары плоскостей, во многом зависящее и (или) определяющее оптическую схему окулярной части. Метод исследования — численное моделирование в области паракиального синтеза с наложением ограничений, связанных с возможностью практической реализации, на параметры оптической схемы. Численными методами определялись параметры компонентов окуляра, которые при максимальном смещении плоскости выходного зрачка панхроматической проекционной системы в процессе перемещения ее компонентов обеспечивают минимальное смещение плоскости выходного зрачка окуляра и, соответственно, всей оптической системы.

В зависимости от расположения плоскости предмета относительно первого компонента окуляра (a_F) были рассмотрены следующие три типа построения окуляров, схематически представленные на рис. 3: тип «А» — $a_F > 0$: плоскость предмета (поз. 3) находится между первым (поз. 2) и вторым (поз. 4) линзовыми компонентами окуляра — рис. 3а; тип «Б» — $a_F = 0$: плоскость предмета (поз. 3) совпадает с главной плоскостью первого компонента (поз. 2) окуляра — рис. 3б; тип «В» — $a_F < 0$: плоскость предмета (поз. 3) находится перед первым компонентом (поз. 2) окуляра при прямом ходе лучей — рис. 3в.

На основании анализа отобранных 200 моделей панхроматических прицелов, соответствующих определенному ограничению — сетка должна находиться в первой фокальной плоскости, было принято, что оптимальным размером удаления выходного зрачка является 90–100 мм. При рас-

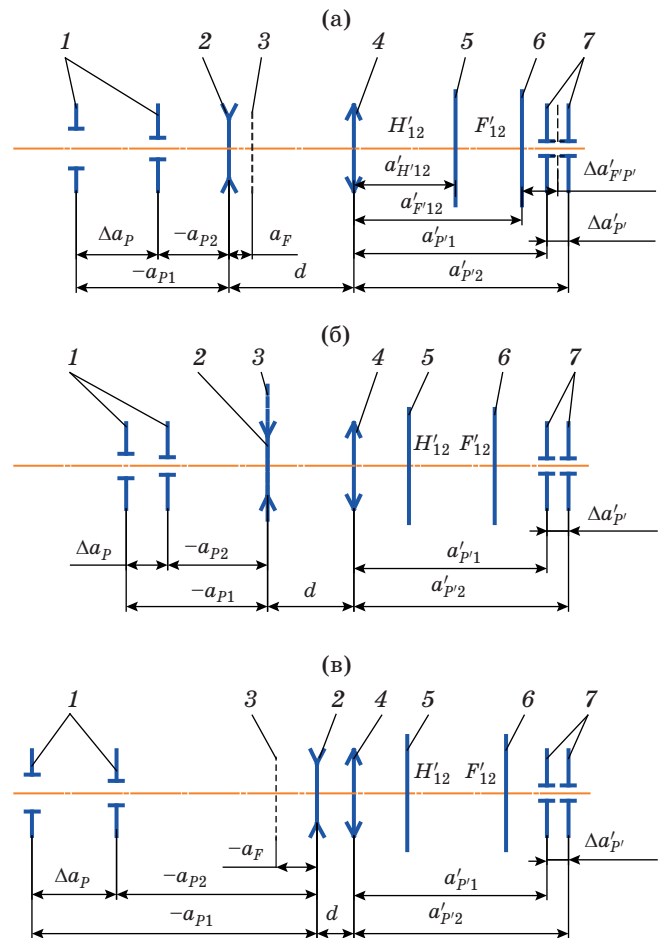


Рис. 3. Принципиальные схемы окуляров (а — типа «А», б — типа «Б», в — типа «В») панхроматических прицелов в тонких компонентах. 1 — входной зрачок окуляра, 2 — первый компонент, 3 — предметная плоскость, 4 — второй компонент, 5 — задняя главная плоскость окуляра, 6 — задняя фокальная плоскость окуляра, 7 — выходной зрачок.

четах было необходимо соблюсти условие стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения: максимальное отклонение удаления выходного зрачка не должно превышать $\pm 5\%$ от его номинального значения.

Соответственно, крайними положениями выходного зрачка ($a'_{P'1}$ и $a'_{P'2}$, мм) окуляра в исследовании были приняты

$$a'_{P'1} = 90, a'_{P'2} = 100, \quad (2)$$

при этом диапазон изменения положения выходного зрачка $\Delta a'_{P'}$ (мм)

$$|\Delta a'_{P'}| = |a'_{P'2} - a'_{P'1}| = 10. \quad (3)$$

Положения входного зрачка окуляра, соответствующие крайним положениям его выходного зрачка, рассчитываются по формуле

$$a_{Pi} = \frac{f'_1(a'_{P'i}f'_2 + d(f'_2 - a'_{P'i}))}{f'_1f'_2 - f'_1a'_{P'i} - f'_2a'_{P'i} + d(a'_{P'i} - f'_2)}, \quad (4)$$

где $i = 1, 2$ — индекс, указывающий на крайнее первое или второе положение выходного и соответствующего ему входного зрачка окуляра, f'_1 — фокусное расстояние (мм) первого линзового компонента окуляра (поз. 2 на рис. 3) согласно прямому ходу лучей, f'_2 — фокусное расстояние (мм) второго линзового компонента окуляра (поз. 4 на рис. 3) согласно прямому ходу лучей, d — расстояние (мм) по оси между тонкими компонентами окуляра.

Диапазон изменения положения входного зрачка (Δa_P) вычисляется как

$$|\Delta a_P| = |a_{P2} - a_{P1}|. \quad (5)$$

Использование в окуляре продольного увеличения в зрачках более 1^\times нерационально и противоречит основной задаче данного исследования, так как в этом случае усложняется конструкция компонентов панкратической оборачивающей системы при ее практической реализации. По приведенным выше причинам при численном моделировании продольное увеличение в зрачках окуляра было принято не более 1^\times . Таким образом, рассмотрены варианты с колебанием положения входного зрачка

$$|\Delta a_P| \geq 10. \quad (6)$$

При нахождении областей ограничений и областей решений параметров и характеристик окуляров панкратических прицелов численными методами было просчитано и рассмотрено более 5 млн вариантов систем. Значение шага характеристик f'_1 , f'_2 и d при расчетах было принято равным 2 мм.

В массиве полученных решений была сделана выборка области решений, приемлемых при разработке реальных систем. Для этого накладывались ограничения на ряд параметров.

В силу значительного удаления выходного зрачка, ограничений по относительному отверстию окуляра и габаритным характеристикам — длине системы, введено ограничение на фокусное расстояние окуляра

$$20 \leq f'_{12} \leq 55, \quad (7)$$

где f'_{12} — фокусное расстояние (мм) окуляра.

Учитывая необходимость уменьшения массогабаритных характеристик системы, расстояние по оси между тонкими компонентами окуляра было задано

$$d \leq 130. \quad (8)$$

Исходя из ограничения на относительное отверстие второго компонента окуляра, его фокусное расстояние должно быть

$$24 \leq f'_2 \leq 70. \quad (9)$$

На одном из этапов вычислений с точки зрения оптимизации скорости компьютерных вычислений и их анализа было принято ограничение

$$-500 \leq f'_1 \leq 500. \quad (10)$$

Так как f'_1 приближается к бесконечности, то оптическая сила (дптр) первого компонента окуляра $\Phi_1 \rightarrow 0$. Ограничение принято в виду того, что дальнейшее увеличение диапазона незначительно влияет на результат исследования, но существенно увеличивает время вычисления и анализа результатов.

Помимо перечисленных выше параметров и характеристик, в исследовании были определены расстояния окуляра: a'_{H12} — расстояние (мм) от второго компонента до задней главной плоскости окуляра, $a'_{F'12}$ — расстояние (мм) от второго компонента до задней фокальной плоскости окуляра, $|\Delta a'_{F'P}|$ — модуль расстояния (мм) от задней фокальной плоскости окуляра до номинального положения, соответствующего 95 мм, выходного зрачка.

При выполнении всех перечисленных выше условий и ограничений (2)–(10) было отобрано и проанализировано более 100 тыс вариантов систем.

На рис. 4 приведены области решений характеристик окуляров панкратических систем в зависимости от различных переменных.

Результаты, представленные на рис. 4а, демонстрируют взаимосвязь оптических сил компонентов окуляра (Φ_1 и Φ_2) и расстояния между ними и позволяют определить области решений для нахождения соотношения «оптическая сила компонента — расстояние между компонентами» в зависимости от типа окуляра. Взаимосвязь между оптическими силами первого и второго компонентов окуляра иллюстрирует рис. 4б.

Согласно рис. 4в, можно сделать вывод о диапазоне возможных положений входного зрачка окуляра: отношение максимального удаления входного зрачка к минимальному может быть более или равным двум в 30% систем.

На рис. 4г представлена зависимость диапазона изменения положения входного зрачка от положения задней фокальной плоскости окуляра. Из рисунка видно, что чем ближе фокальная плоскость окуляра находится к плоскостям выходного зрачка (90 и 100 мм), тем больше по модулю диапазон изменения положения входного зрачка. Проведенный анализ показал, что 38% вариантов окуляров имеет телецентрический или близкий к нему ($|a_{P_{\max}}| \geq 100$) ход лучей в пространстве предметов, у 39% вариантов окуляров максимальный вынос входного зрачка находится в диапазоне $100 > |a_{P_{\max}}| \geq 50$. Полученный результат обусловлен наличием первого компонента, который существенно расширяет диапазон положений входного зрачка (на порядок и выше — согласно результатам расчетов) вследствие выноса задней фокальной плоскости окуляра относительно второго компонента на расстояние от 40 до 150 мм и приближения ее к плоскости выходного зрачка (рис. 4г, д).

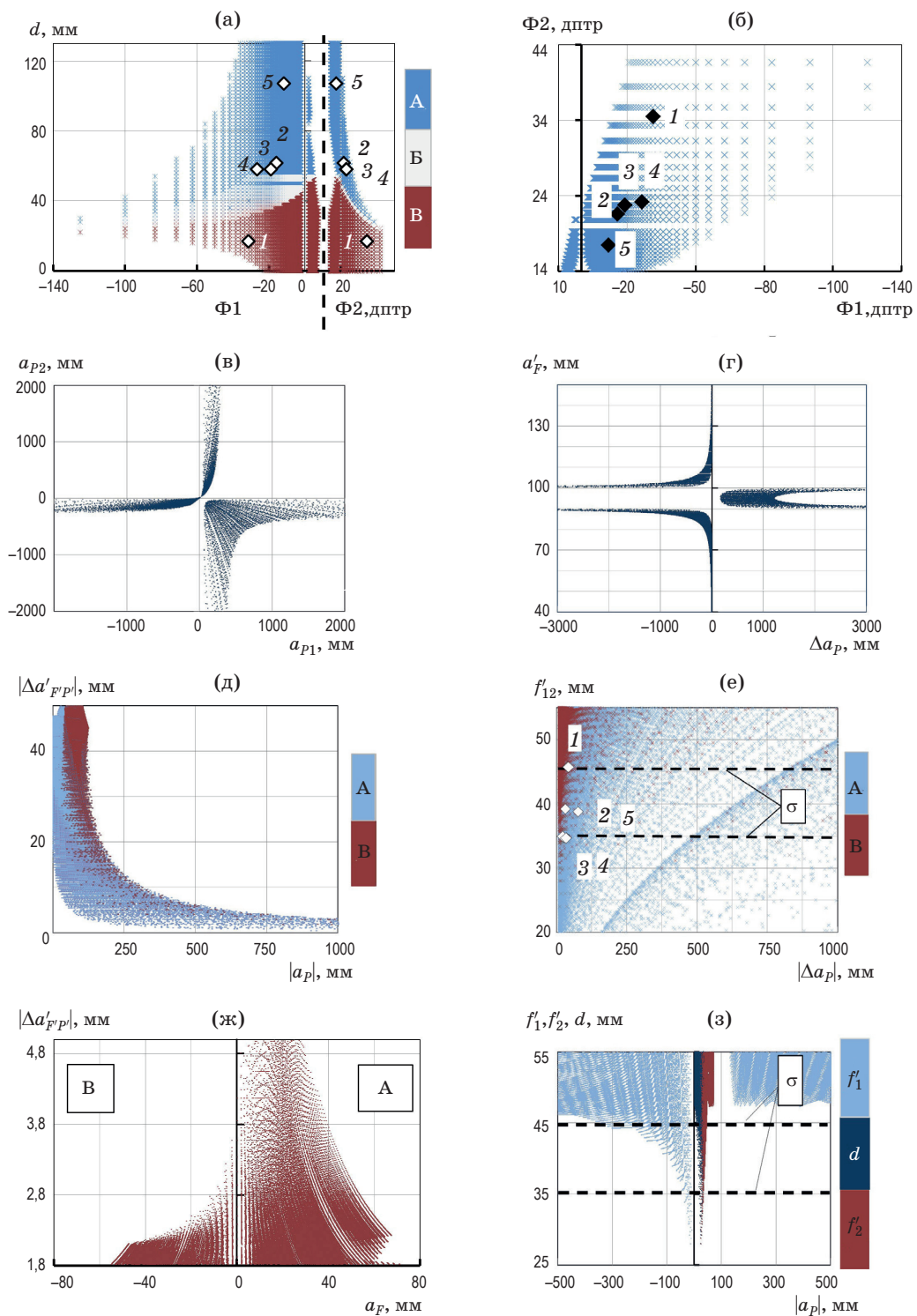


Рис. 4. Области ограничений и решений параметров и характеристик окуляров панкратических прицелов. А — варианты решений окуляра типа «А», Б — варианты решений окуляра типа «Б», В — варианты решений окуляра типа «В», σ — наиболее предпочтительная область решений окуляра типа «В». 1 — прицел 1, 2 — прицел 2 — 6×26 , 3 — прицел 3 — 15×50 , 4 — прицел 4 — 20×56 , 5 — прицел 5 — 25×56 . Пояснения в тексте.

По результатам, представленным на рис. 4д, помимо сказанного выше, можно сделать следующие выводы.

- Количество решений у окуляра типа «В» в два раза меньше, чем у окуляра типа «А».
- Удаление входного зрачка $|a_p|$ в 97% систем окуляров типа «В» находится в диапазоне от 29 до 150 мм.

По рис. 4е можно судить, как зависит от типа окуляра отношение диапазона изменения положения входного зрачка к фокусному расстоянию окуляра. На этом рисунке выделена наиболее оптимальная с целью использования в реальных системах область вариантов решений (σ) окуляра типа «В» при $35 \leq f'_{12} \leq 45$ (1453 решения). Такое ограничение обусловлено массогабаритными характеристиками панкратического прицела: длиной (из-за увеличения фокусного расстояния окуляра и, соответственно, объектива) и массой (из-за уменьшения фокусного расстояния окуляра и повышения его относительного отверстия — конструктивно более сложное исполнение окуляра). На рис. 4з представлены решения только окуляра типа «В», анализируя которые, можно выделить границы оптимальной области решения в рамках параметров f'_1, f'_2, d .

Границы областей решений трех типов окуляров приведены в табл. 2.

По результатам проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы и дать рекомендации.

Выбор типа окуляра и его параметров определяет допустимое рассогласование между плоскостями входного и выходного зрачков при смене увеличения в панкратической проекционной системе.

При выборе окуляра типа «А» количество решений, найденных при расчете, будет в два-три раза больше, чем при выборе окуляра «В» (так как больше локальных максимумов), но если использовать уже полученные области решений, то расчет окуляра типа «В» при его проектировании в реальных компонентах будет проводиться значительно быстрее. При выборе окуляра типа «А» необходимо учитывать размер переднего фокального отрезка окуляра: значение более 50 мм может ограничить перемещение второго компонента обочаивающей системы и, соответственно, *zoom*.

С целью достижения стабильности положения выходного зрачка в оптической системе панкратического прицела (колебание положения не превышает 5% от номинального удаления выходного зрачка) рекомендуется выбирать фокусное рассто-

Таблица 2. Границы областей решений параметров и характеристик окуляров панкратических прицелов

Все рассмотренные типы окуляров	Типы окуляров (рис. 3)		
	«А»	«Б»	«В»
	$a_F > 0$ (мнимая плоскость предмета)	$a_F = 0$ (плоскость предмета совпадает с первой линзой)	$a_F < 0$ (действительная плоскость предмета)
101510 решений	65139 решений	1544 решений	34827 решений
$-500 \leq f'_1 \leq -8, 130 \leq f'_1 \leq 500$	$-500 \leq f'_1 \leq -8, 215 \leq f'_1 \leq 500$	$-500 \leq f'_1 \leq -8, 222 \leq f'_1 \leq 500$	$-500 \leq f'_1 \leq -8, 130 \leq f'_1 \leq 500$
$24 \leq f'_2 \leq 70$	$26 \leq f'_2 \leq 70$	$24 \leq f'_2 \leq 54$	$24 \leq f'_2 \leq 70$
$0 \leq d \leq 130$	$28 \leq d \leq 130$	$24 \leq d \leq 54$	$0 \leq d \leq 52$
$20 \leq f'_{12} \leq 55$			
$40 \leq a'_{F'12} \leq 150$			
$-15 \leq a'_{H'12} \leq 95$			
$1,8 \leq a'_{p'}/f'_{12} \leq 5$	$1,8 \leq a'_{p'}/f'_{12} \leq 5$	$1,8 \leq a'_{p'}/f'_{12} \leq 4,2$	$1,8 \leq a'_{p'}/f'_{12} \leq 3,6$. В 99% случаев $1,8 \leq a'_{p'}/f'_{12} \leq 2,5$
	$-\infty < \Delta a_p \leq -10$, $10 \leq \Delta a_p < +\infty$		$-\infty < \Delta a_p \leq -10$, $10 \leq \Delta a_p < +\infty$. В 99% случаев $10 \leq \Delta a_p \leq 220$
$0 \leq a_p \leq \infty$	$0 \leq a_p \leq \infty$	$20 \leq a_p \leq \infty$	$29 \leq a_p \leq \infty$ В 97% случаев $29 \leq a_p \leq 150$

Примечание. $f'_1, f'_2, f'_{1,2}, d, a'_{F'12}, a'_{H'12}, \Delta a_p, a'_{p'}, a_F$ в миллиметрах, максимальное значение $a'_{p'}$ принято равным 100 мм.

яние окуляра примерно в 2,5 раза меньше требуемого расстояния удаления выходного зрачка окуляров типа «В», при этом амплитуда колебания положения входного зрачка окуляра в 99% систем будет меньше или равной 220 мм.

Фокусное расстояние в окулярах типа «А» можно выбирать в 2–3,5 раза менее требуемого расстояния удаления выходного зрачка, при этом амплитуда колебания положения входного зрачка окуляра может достигать бесконечности. Такое соотношение удаления выходного зрачка к фокусному расстоянию позволяет создавать системы меньшей длины в реальном исполнении.

Результаты исследования апробированы при разработке реальных оптических систем оптических панкратических прицелов с $zoom = 5$. В табл. 3 приведены результаты разработок, представленные с позиций исследованных в данной статье типов окуляров, оптического сопряжения двух рассматриваемых пар плоскостей и достигнутой стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения. Во всех системах смещение выходного зрачка не превышает 10% от номинального зна-

чения удаления выходного зрачка, при этом в трех из них колебание положения выходного зрачка в процессе оптического проектирования реальных систем уменьшена практически в два раза. Все оптические системы обеспечивают качество изображения, соответствующее критериям «хорошо» и «отлично» применяемых для полевых наблюдательных приборов [31–33]. В качестве примера на рис. 5а представлена оптическая схема оптического панкратического прицела, построенная с использованием только сферических преломляющих поверхностей, со следующими оптическими характеристиками: увеличение от 4 до 20 \times , диаметр входного зрачка 56 мм, длина 362 мм. На рис. 5б приведены результаты расчетной оценки предела разрешения, выполненные по критерию функции передачи модуляций и учитывающие остаточные геометрические aberrации и дифракцию на входном зрачке. Расчеты выполнялись при номинальных значениях конструктивных параметров оптической системы для плоскости наилучшей установки окуляра в центре поля зрения и при диаметре выходного зрачка

Таблица 3. Некоторые характеристики рассчитанных реальных оптических систем

$\Gamma_{\min} - \Gamma_{\max} \times D$	Линейное увеличение оборачивающей системы, крат	Тип окуляра	s'_p/f'_{ok}	Сопряжение плоскостей «предмет – изображение» панкратической оборачивающей системы в параксиальной области	Изменение расстояния между плоскостями «входной зрачок – выходной зрачок» панкратической оборачивающей системы в параксиальной области, мм	Удаление выходного зрачка при смене увеличения (s'_p), мм
5 – 25 × 56	1,22–6,06	«А»	2,58	+	78	94 ⁺⁵
4 – 20 × 56	0,87–4,34	«А»	2,88	+	35	95 ₋₅
3 – 15 × 50	0,77–3,87	«А»	2,87	+	26	95 ₋₁₀
2 – 10 × 46	0,73–3,66	«А»	2,55	+	32	95 ₋₅
1,2 – 6 × 26	0,82–4,08	«В»	2,18	+	41	93 ₋₁₀

Примечание. s'_p — удаление (мм) выходного зрачка от последней поверхности окуляра, Γ_{\min} — минимальное увеличение прицела, крат, Γ_{\max} — максимальное увеличение (крат) прицела, D — диаметр (мм) входного зрачка.

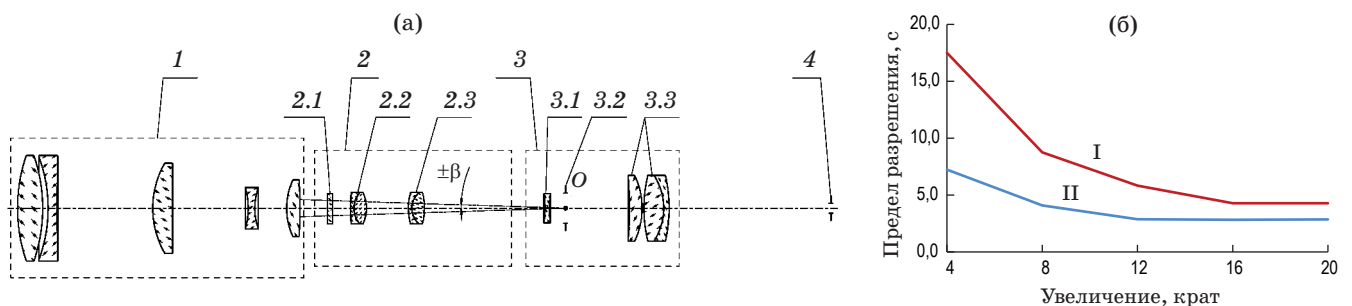


Рис. 5. Схема панкратического прицела 4 – 20×56 (а) и расчетная оценка предела разрешения этого прицела (б). 1 — объектив, 2 — качающаяся оборачивающая панкратическая система, 3 — окуляр, 4 — выходной зрачок, 2.1 — сетка, 2.2 — первый компонент оборачивающей панкратической системы, 2.3 — второй компонент оборачивающей панкратической системы, 3.1 — первый компонент окуляра, 3.2 — полевая диафрагма, 3.3 — второй компонент окуляра, O — центр поворота панкратической оборачивающей системы, I — предел разрешения по общим техническим условиям, II — предел разрешения прицела 4 – 20×56.

не более 5 мм. При расчете требуемого предела разрешения в соответствии с общими техническими условиям на полевые наблюдательные приборы значение коэффициента сложности системы принималось равным 2 [34]. На рис. 4а, б, е точками отмечены решения, положенные в основу разработанных оптических систем панкратических прицелов, приведенных в табл. 3. Таким образом, при разработке реальных оптических систем панкратических

прицелов с $zoom = 5$, доказана эффективность полученных рекомендаций и выводов с целью обеспечения стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения.

По мнению авторов, результаты проведенного исследования могут быть востребованы на этапе структурного синтеза и разработки реальных оптических систем новых панкратических прицелов, в том числе и с $zoom$ более 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хацевич Т.Н., Дружкин Е.В. Способ изменения направления визирной оси в оптическом прицеле и прицел с переменным увеличением, реализующий способ // Патент России № 2501051. 2013.
2. Kryszczyński T. Method for solving paraxial pupil problems in zoom systems // Proc. SPIE. 1997. V. 3129. Zoom Lenses II. P. 193–204.
3. Kryszczyński T. Paraxial determination of the general four-component zoom system with mechanical compensation // Proc. SPIE. 1995. V. 2539. Zoom Lenses. P. 180–191.
4. Kryszczyński T. Development of the double-sided telecentric three-component zoom systems by means of matrix optics // Proc. SPIE. 2008. V. 7141. P. 71411Y.1–7.
5. Kryszczyński T., Leśniewski M., Mikucki J. Use of matrix optics to analyze the complex multi-group zoom systems // Proc. SPIE. 2012. V. 8697. P. 86970I.1–7.
6. Mišs A., Novak J. Paraxial analysis of three-component zoom lens with fixed distance between object and image points and fixed position of image-space focal point // Opt. Exp. 2014. V. 22. № 13. P. 15571–15576.
7. Pal S., Hazra L.N. Structural design of optically compensated zoom lenses using genetic algorithm // Proc. SPIE. 2009. V. 7429. Novel Optical Systems: Design and Optimization XII. P. 742910.1–6.
8. Pal S., Hazra L.N. A novel approach for structural synthesis of zoom systems // Proc. SPIE. 2010. V. 7786. P. 778607.1–11.
9. Pal S. Structural design of mechanically compensated zoom lenses by evolutionary programming // Opt. Eng. 2012. V. 56(6). P. 063001.1–6.
10. Pal S., Hazra L.N. Stabilization of pupils in a zoom lens with two independent movements // Appl. Opt. 2013. V. 52. № 23. P. 5611–5618.
11. Tanaka K. Zooming-component loci of mechanically compensated zoom lenses // Proc. SPIE. 1999. V. 3729. P. 452–457.
12. Tanaka K. General paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses // Proc. SPIE. 1999. V. 3749. 18th Congr. Intern. Commiss. Opt. P. 286–287.
13. Dodoc A. Toward the global optimum in zoom lens design // Proc. SPIE. 2012. V. 8488. Zoom Lenses IV. P. 848802.1–18.
14. Xiaotong Li, Zhaofeng Cen. Optimization design of zoom lens systems // Proc. SPIE. 2002. V. 4927. Optical Design and Testing. P. 44–49.
15. Chaohsien Chen. Complete solutions of zoom curves of three-component zoom lenses with the second component fixed // Appl. Opt. 2014. V. 53. № 29. P. H58–H66.
16. Mau-Shiun Yeh, Shin-Gwo Shiue. First-order analysis of a two-conjugate zoom system // Opt. Eng. 1996. V. 35(11). P. 3348–3360.
17. Mau-Shiun Yeh, Shin-Gwo Shiue, Mao-Hong Lu. Solution for first-order design of a two-conjugate zoom system // Opt. Eng. 1997. V. 36(8). P. 2261–2267.
18. Jinkai Zhang, Xiaobo Chen, Juntong Xi, Zhuoqi Wu. Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with four components // Opt. Eng. 2014. V. 53. № 11. P. 115103.1–10.
19. Jinkai Zhang, Xiaobo Chen, Juntong Xi, Zhuoqi Wu. Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with three components // Appl. Opt. 2014. V. 53. № 22. P. 4957–4967.
20. Bystricky K.M., Yoder P.R.Jr. An improved zoom lens with external entrance pupil // Proc. SPIE. 1974. V. 0039. P. 299–304.
21. Zinter B., Sanson M. Telecentric zoom lens // Proc. SPIE. 2001. V. 4487. Zoom Lenses III. P. 130–139.

22. *Зверев В.А., Рамин Хои, Точилина В.Т.* Линеаризация взаимосвязи перемещений компонентов в двухкомпонентной системе переменного увеличения // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 11. С. 37–39.
23. *Андреев Л.Н.* Двухкомпонентные «неточные» панкратические системы // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 3. С. 66–67.
24. *Нгуен Ван Луен.* Автоматизация проектирования панкратической телескопической системы // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 12. С. 22–25.
25. *Журова С.А., Зверев В.А.* Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. 1999. Т. 60. № 10. С. 68–86.
26. *Ежова К.В., Зверев В.А., Нгуен Ван Луен.* Абберрационные свойства тонкого компонента как базового элемента композиции оптической системы переменного увеличения // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 12. С. 26–30.
27. *Зверев В.А., Нгуен Ван Луен, Точилина Т.В.* Композиция принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Труды 10 Междунар. конф. «Прикладная оптика-2012». СПб., 2012. Т. 2. С. 51–56.
28. *Острун А.Б., Иванов А.В.* Исследование алгоритма синтеза оптических систем двойного сопряжения в области Гаусса // Науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наука и образование. 2014. № 3. С. 219–228.
29. *Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М.* Численный метод расчета систем переменного увеличения с произвольным числом подвижных компонентов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. № 9(9). С. 25–35.
30. *Wagner T., Tautz V.* Telescope with variable magnification // US Patent № 20070159685. 2007.
31. *Хацевич Т.Н.* Прикладная оптика: лабораторный практикум. Новосибирск: СГГА, 2006. 108 с.
32. *Запрягаева Л.А., Свешникова. И.С.* Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос, 2000. 584 с.
33. *Верхотуров О.П.* Введение в вычислительную оптику: учебное пособие. Новосибирск: СГГА, 1998. 273 с.
34. *Справочник конструктора оптико-механических приборов.* Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.