



Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с высокими и компромиссными оптическими характеристиками

И.А. Боголюбов¹, А.А. Лобанов²✉, Г.А. Можаров³

¹ Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

³ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

✉ aa.lobanoff@ya.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Боголюбов И.А., Лобанов А.А., Можаров Г.А. Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с высокими и компромиссными оптическими характеристиками // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 99–114. DOI:10.30533/GiA-2025-048.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА корреляционный пеленгатор, объектив, окуляр, качество изображения, система технического зрения

АННОТАЦИЯ В статье предложена оптическая схема и выполнен детальный расчет параметров объектива с высокими оптическими характеристиками, предназначенного для корреляционного некогерентного четырехканального пеленгатора. Разработанное решение реализуемо на базе доступных материалов и современных технологий производства оптики. Однако достижение высоких оптических характеристик (высокого разрешения, минимальных аберраций и широкого поля зрения) потребовало значительного числа ресурсоемких элементов, что усложняет практическую реализацию. В связи с этим дополнительно исследована возможность компромиссного повышения оптических характеристик объектива для оптического корреляционного пеленгатора с учетом экономически оправданных схем, материалов и стандартных оптических элементов. В рамках расчета компромиссных вариантов предложены и обоснованы две альтернативные оптические схемы: первый вариант основан на известном окуляре Государственного оптического института (ГОИ) с модификацией для пеленгации, второй — на единичном параболическом зеркале с упрощенной конструкцией. Выполнены численные расчеты с использованием специализированного программного обеспечения, описаны ключевые параметры предложенных

объективов (фокусное расстояние, апертура, коэффициент передачи), а также ограничения применения (чувствительность к вибрациям, температурные эффекты). Полученные результаты позволяют создать как объектив с высокими оптическими характеристиками для некогерентного корреляционного пеленгатора, так и компромиссный вариант для практических исследований корреляционного сигнала в реальных условиях, что способствует развитию доступных систем пеленгации.

1 Введение

Системы оптической навигации востребованы в перспективных космических миссиях, которые предполагают посадку на небесные тела Солнечной системы. Анализ предметной области показывает, что практически все уже выполненные и перспективные миссии с посадкой на небесные тела использовали в процессе приповерхностной навигации и посадки сложные оптические системы и комплексы. Необходимость применения систем оптической навигации объясняется высокими требованиями к точности посадки космического летательного аппарата (КЛА) и высокой эффективностью полученных результатов.

Таким образом, оптические системы навигации и посадки де-факто стали неотъемлемой частью бортового оборудования космических аппаратов. Иностранные специалисты делают упор на увеличение мощности бортовых вычислительных ресурсов и использование алгоритмов распознавания образов¹ [1–5]. Отечественные ученые разрабатывают сценарии применения оптических систем, которые менее требовательны к бортовым вычислительным ресурсам КЛА [6–12]. Однако в рамках российских исследований также используются бортовые вычислительные ресурсы для вычисления корреляции в электронном тракте.

Предлагаемая авторами система с корреляцией в оптическом тракте [13] позволяет значительно уменьшить требования к вычислительным ресурсам на борту. Оригинальная схема оптического четырехканального пеленгатора дает возможность создать перспективные быстродействующие высокопроизводительные устройства обработки пространственной информации. Однако разработка для такого пеленгатора объектива с высокими оптическими характеристиками является самостоятельной научно-технической задачей.

Цель настоящей статьи — выбор оптической схемы и расчет показателей объектива оптического корреляционного пеленгатора (ОКП) с высокими и компромиссными оптическими характеристиками. Задачи исследования были сформулированы следующим образом:

- найти оптическую схему и сконструировать объектив с высокими оптическими характеристиками;
- на основании найденного решения исследовать возможность применения существующих отработанных оптических схем для увеличения технологичности и снижения трудоемкости производства объективов;
- исследовать параметры выбранных компромиссных объективов и оптимизировать начальные варианты с добавлением свободных параметров в системе автоматизированного проектирования (САПР) [14].

В процессе работы была предложена оптическая схема, которая обеспечивает высокие оптические характеристики. Такой объектив позволит реализовать потенциал ОКП полностью. Однако для обеспечения высоких характеристик объектива в расчетах были использованы материал и элементы, которые являются

¹ Adams E., Chabot N., Cheng A., et al. Final Technical Report to the National Aeronautics and Space Administration for the Double Asteroid Redirection Test (DART) Mission. October 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230015804/downloads/DART%20Final%20Technical%20Report.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).

весьма ресурсоемкими. Применение таких элементов не всегда бывает оправданным. Открытым, в частности, является вопрос их деградации в условиях длительного космического полета.

Объектив предназначен для системы обеспечения навигации космического аппарата и его посадки на малые тела Солнечной системы. Учитывая ранее изложенное, было решено разработать и рассчитать объектив, построенный на более распространенных и доступных элементах, оптические характеристики которого, однако, отвечали бы требованиям полнофункциональной работы пеленгатора.

2 Материалы и методы

Рассматривая пути дальнейшего повышения оптических характеристик объектива пеленгатора, авторы руководствовались следующими соображениями: диаметр входного зрачка ОКП влияет на количество световой энергии, обрабатываемой коррелятором, и отношение сигнал / шум корреляционного пика в электронном тракте. В условиях космического пространства при работе на большом удалении объекты представляют собой точечные излучатели. Работа ОКП по точечному объекту принципиально возможна, однако ее целесообразность сомнительна, т. к. существуют другие способы навигации. Повышение диаметра входного зрачка ОКП представляется более актуальным для наземных задач, обеспечения работы по земной поверхности в условиях слабой освещенности в ночных условиях.

Угловое поле ОКП целесообразно повышать для обеспечения точной ориентации при работе на малых дальностях, т. к. ослабляется влияние внешних факторов, приводящих к нестабильности работы корреляционного алгоритма, таких как дрожание, непостоянство масштаба изображения и ракурсные искажения объекта.

Чем выше качество изображения объектива, тем более высокие пространственные частоты могут давать больший вклад в корреляционный сигнал, следовательно, ОКП может работать по рельефу поверхности с меньшими неоднородностями. В идеальном случае линейное разрешение объектива ОКП должно быть согласовано с размером зоны управления цифрового эталона (УЦЭ) [15], а качество изображения объектива должно быть дифракционно ограниченным.

На практике представляет интерес расчет оптической системы ОКП с повышением как всех оптических характеристик, так и каждой в отдельности, приводящий к компромиссным схемотехническим решениям. По мнению авторов, главный интерес представляет расчет оптических систем ОКП с повышенным полем и расширенным спектральным диапазоном.

Таблица 1

Оптические характеристики объектива пеленгатора

Table 1

Optical characteristics of the bearing finder objective lens

	D/f'	$2\omega, ^\circ$
1	1 : 0,5	90
2	1 : 1	53
3	1 : 2	28
4	1 : 4	14

2.1 Корреляционный объектив с высокими оптическими характеристиками

В работе М.М. Русинова² с использованием алгебраического метода расчета был получен корреляционный объектив со средними оптическими характеристиками (табл. 1, строка 3; рис. 1). Подход, предложенный ученым, актуален [16].

Для перехода к характеристикам, приведенным в строке 2 табл. 1, в оптическую систему необходимо добавить свободные параметры. Исходя из схемы на рис. 1, делаем вывод, что система аналогична базовой системе из двух плоско-выпуклых линз² и менисков, корректирующих кривизну изображения. Следует заметить, однако, что параметры менисков в данном случае делают

2 Русинов М.М. Композиция оптических систем. 2-е изд. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 382 с.

их сложными в изготовлении. Особенностью рассматриваемой системы является хорошая коррекция хроматизма без использования склеенных поверхностей благодаря применению кристаллических материалов с существенно различающимися показателями дисперсии. Ранее было показано, что объектив корреляционного пеленгатора должен строиться по схемам, близким к схемам симметричных окуляров с высокой степенью коррекции сферической аберрации. Исходя из этого предположения, сделаем центральные линзы плоско-выпуклыми и добавим коэффициенты деформации на выпуклые поверхности для обеспечения лучшей коррекции сферической аберрации. Будем оптимизировать систему на меньшее фокусное расстояние одновременно с увеличением углового поля. Оптимизация в САПР привела к схеме корреляционного объектива, изображенного на рис. 2.

В полученном объективе на асферических поверхностях применен один коэффициент деформации. Коррекция хроматизма неидеальна также из-за отсутствия склеенных поверхностей.

Полученный корреляционный объектив и построенный на его основе ОКП будет иметь высокие оптические характеристики, а следовательно, может применяться в тех случаях, когда невозможен компромисс между угловым полем и дальностью работы. Конструкция ОКП состоит из четырех групп одинаковых двухлинзовых компонентов с одной плоской и одной асферической поверхностью, что является сравнительно технологичным решением.

Рис. 1 

Схема объектива корреляционного пеленгатора со средними оптическими характеристиками и график кривизны поля, характеризующий качество изображения

Fig. 1

Diagram of the correlation objective lens with average optical characteristics and graph of field curvature characterizing its image quality

Схема корреляционного объектива с характеристиками 3 (табл. 1), фокусным расстоянием 30 мм, спектральным диапазоном 0,8–1,0 мкм / Diagram of the correlation objective lens with characteristics No. 3 (Table 1), focal length 30 mm, spectral range 0.8–1.0 μm

График кривизны поля, характеризующий качество изображения корреляционного объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the correlation objective lens

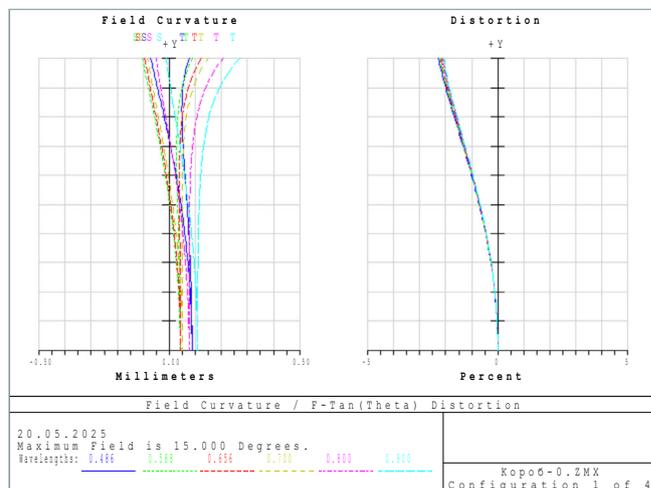
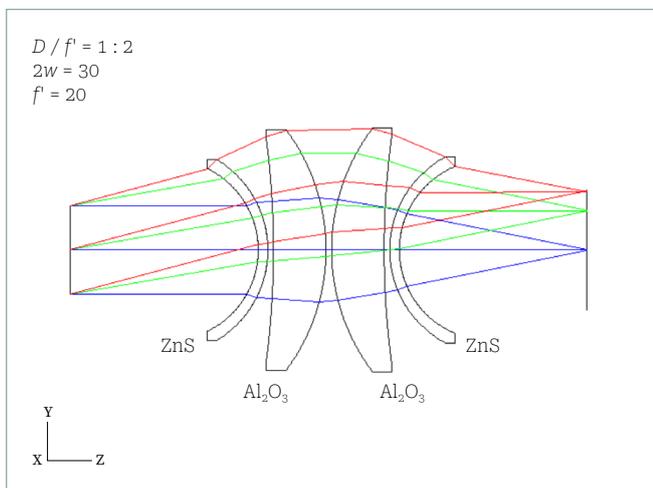


Рис. 2

Корреляционный объектив ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и функции передачи модуляции (ФПМ)

Fig. 2

Correlation objective lens of the optical correlation direction finder: design diagrams, field curvature, and modulation transfer functions (MTF)

Схема корреляционного объектива с характеристиками 2 (табл. 1), фокусным расстоянием 15 мм, спектральным диапазоном 0,8–1,0 мкм / Diagram of the correlation objective lens with characteristics No. 2 (Table 1), focal length 15 mm, spectral range 0.8–1.0 μm

График кривизны поля, характеризующий качество изображения корреляционного объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the correlation objective lens

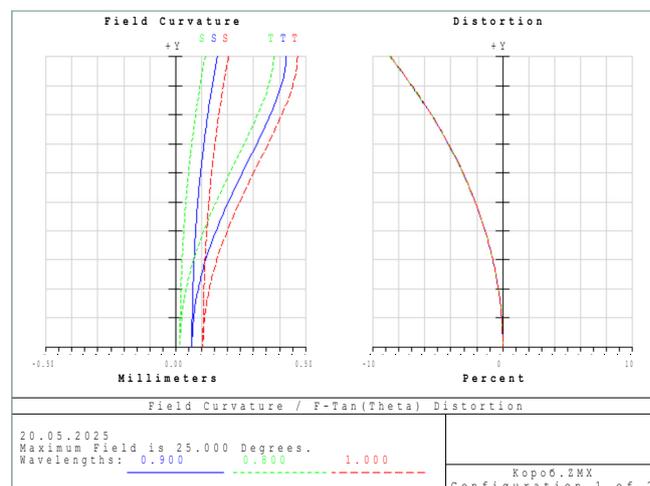
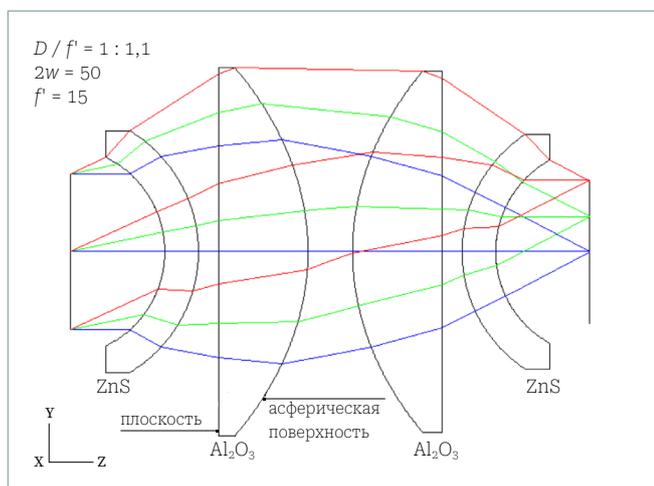
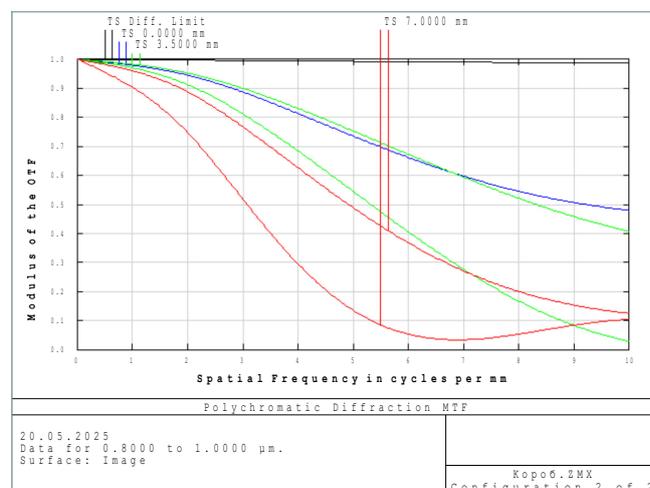
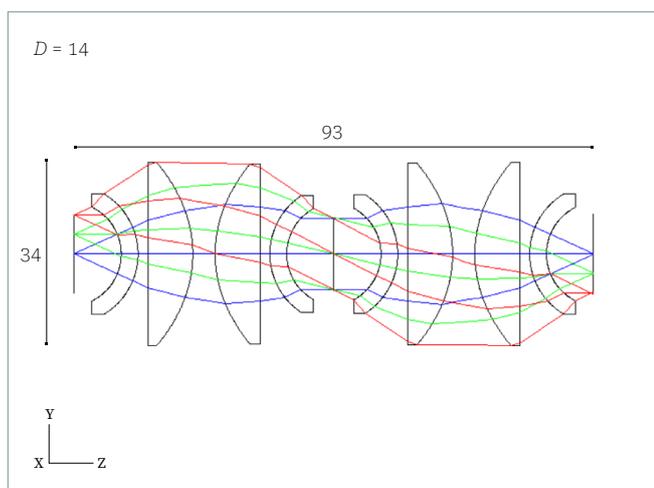


Схема ОКП на основе корреляционного объектива / Diagram of the optical correlation direction finder based on the correlation objective

График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical correlation direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



2.2 ОКП на основе известных окуляров

В работе [15] было показано, что оптимальная конструкция объектива для ОКП во многом схожа с конструкцией окуляров. Особенности оптической схемы окуляров являются вынесенный примерно на 4 мм входной зрачок и угловое поле в диапазоне 45–90°. Схемы симметричных и близких к ним окуляров хорошо изучены и распространены, подобраны оптимальные материалы линз для компенсации хроматических aberrаций, ход главного луча может быть близок к телецентрическому. В связи с этим весьма рациональным представляется решение рассмотреть возможность создания ОКП на основе таких окуляров.

В отдельных работах³ приведен ряд сравнительно новых схем окуляров, которые не представлены в каталогах и используются [17–19] в настоящее время. Рассмотрим схемы ОКП на основе шестилинзового окуляра Государственного оптического института (ГОИ) и пятилинзового окуляра Эрфле. Схемы этих окуляров являются развитием схемы симметричного окуляра Плоссея. В окуляре ГОИ повышена технологичность за счет использования двух плоских поверхностей и четырех поверхностей с равными радиусами, отсутствуют асферические поверхности. Конструкция очень близка к симметричной и также принципиально близка к схеме предыдущего объектива (рис. 2). Относительное отверстие составляет 1 : 4,2.

Рис. 3 Окуляр ГОИ ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и ФПМ

Fig. 3 Eyepiece SOI (State Optical Institute) of the optical correlation direction finder: design diagrams, field curvature, and MTF

Схема ОКП на основе окуляра ГОИ изображена на рис. 3, где видно, что в плоскости наилучшей установки качество изображения зрачка, определяемое по функции передачи модуляции (ФПМ), удовлетворительное, а величина контраста не хуже, чем в ОКП с высокими оптическими характеристиками.

Схема окуляра ГОИ с фокусным расстоянием 15 мм, спектральным диапазоном 0,48–0,90 мкм / Diagram of the SOI eyepiece with focal length 15 mm, spectral range 0.48–0.90 μm

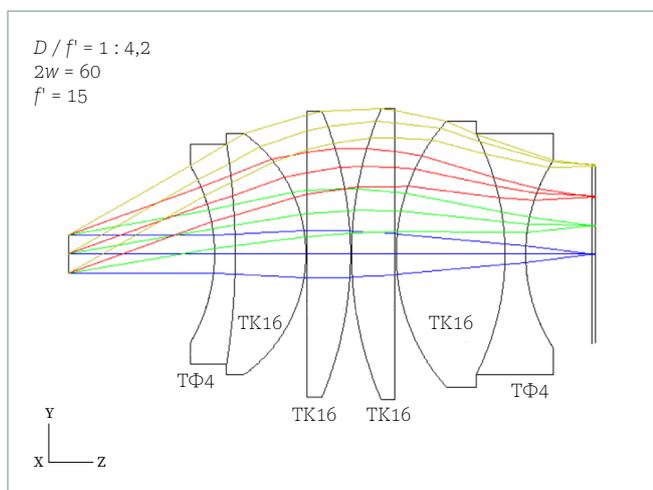


График кривизны поля, характеризующий качество изображения окуляра ГОИ / Field curvature graph characterizing the image quality of the SOI eyepiece

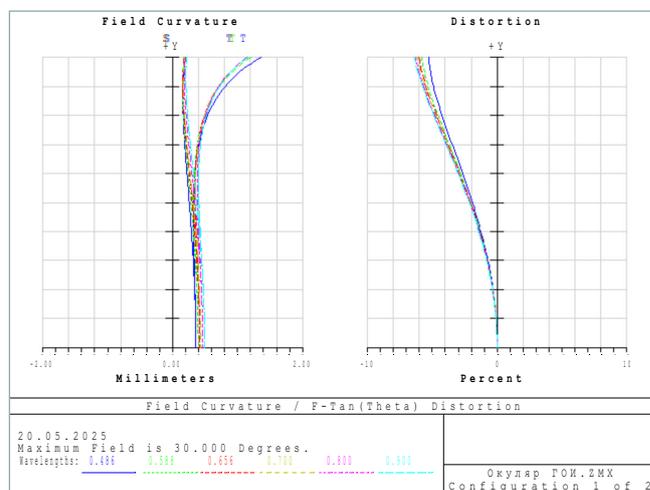


Схема ОКП на основе окуляра ГОИ / Diagram of the optical direction finder based on the SOI eyepiece

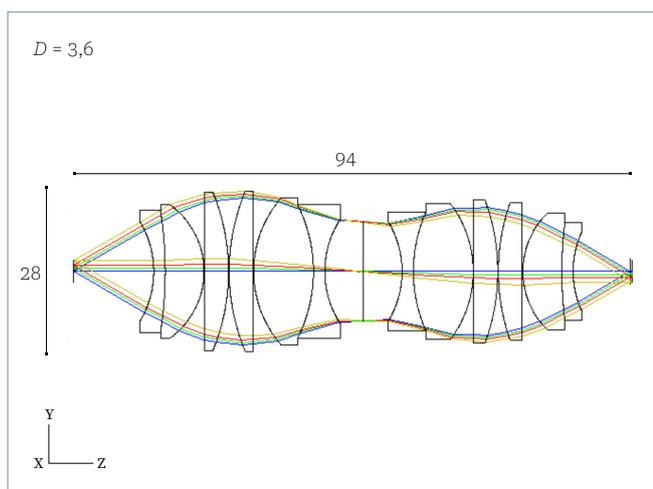
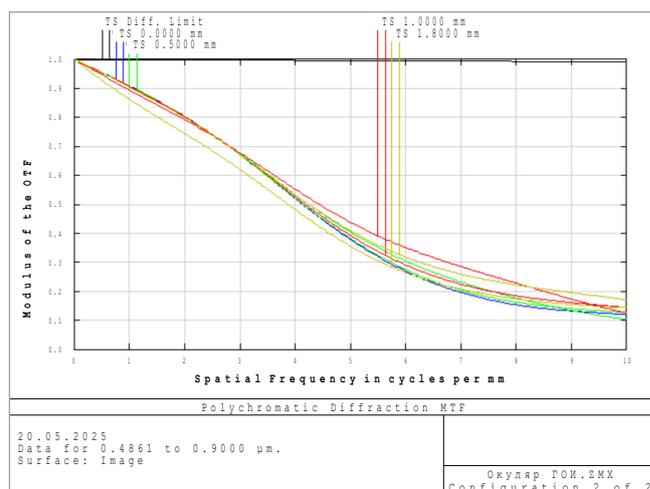


График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



3 Грамматин А.П., Романова Г.Э., Балащенко О.Н. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2011. 132 с.; Адыякова Н.С. Каталог окуляров в OPAL-PC. СПб., 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kmu.itmo.ru/file/download/application/36706> (дата обращения: 08.04.2025).

Схема ОКП на основе окуляра Эрфле изображена на рис. 4. Центральная линза данного окуляра, дающая оптическую силу, симметрична, а коррекционная нагрузка распределяется между крайними склеенными компонентами. Угловое поле немного меньше, чем в окуляре ГОИ, но коррекция aberrаций аналогична. Коррекции aberrаций при изображении зрачка в схемах ОКП из окуляров Эрфле и ГОИ практически идентичны. Объективы ОКП, построенные по схеме окуляров, допускают применение четырехсекторных фотоприемных устройств с зазором между площадками не менее 0,1 мм, как это следует из графика ФПМ.

Важно отметить, что при моделировании ОКП из окуляров оптимизация в САПР Zemax не проводилась ни для отдельного окуляра, ни для ОКП в целом. Таким образом, ОКП может быть построен из готовых компонентов, но при этом будут применяться склеенные поверхности, а размер зрачка будет ограничен до 3–4 мм. Это решение сужает область применения конструкции ОКП на основе окуляров. В частности, будет ограничена дальность работы корреляционного пеленгатора, что может быть неприемлемым для некоторых типов миссий.

Рис. 4  Окуляр Эрфле ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и ФПМ

Fig. 4 Erfle eyepiece of the optical direction finder: design diagrams, field curvature, and MTF

Схема окуляра Эрфле с фокусным расстоянием 15 мм, спектральным диапазоном 0,48–0,90 мкм / Diagram of the Erfle eyepiece with focal length 15 mm, spectral range 0.48–0.90 μm

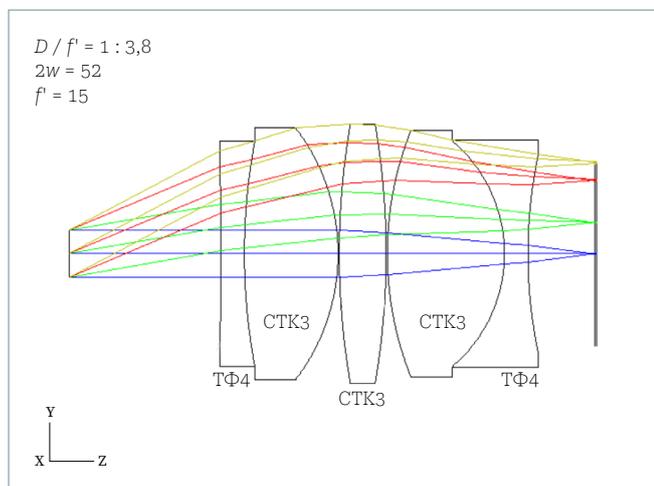


График кривизны поля, характеризующий качество изображения окуляра Эрфле / Field curvature graph characterizing the image quality of the Erfle eyepiece

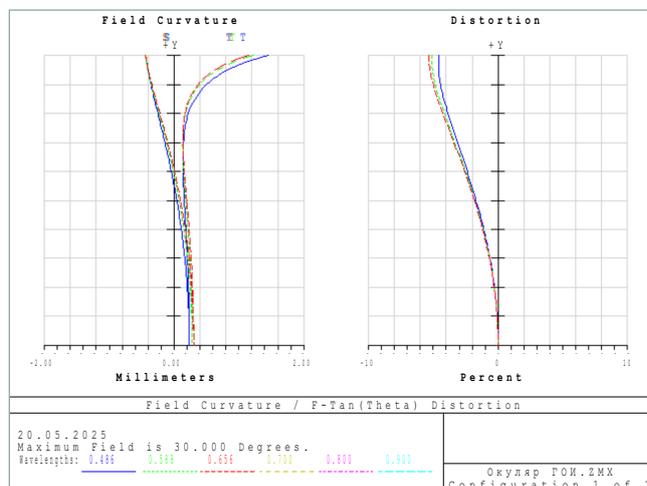


Схема ОКП на основе окуляра Эрфле / Diagram of the optical direction finder based on the Erfle eyepiece

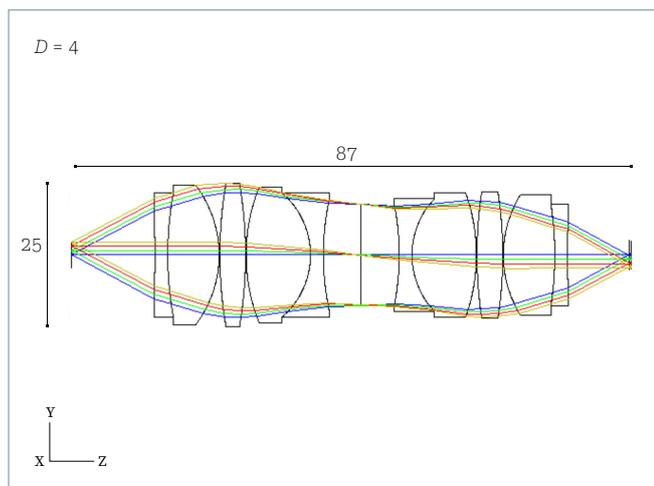
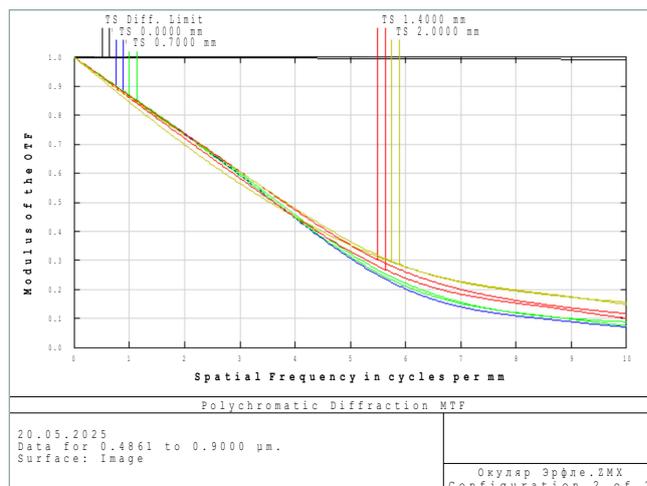


График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



2.3 ОКП на основе зеркала

Дальнейшее повышение оптических характеристик в линзовых симметричных схемах с вынесенным зрачком ограничено уровнем исправления хроматизма, необходимостью применения асферических поверхностей и кристаллических материалов с высоким показателем преломления.

Рассмотрим возможность повышения углового поля ОКП с применением анаберрационного зеркала в автоколлимационной схеме. В работе [15] указывалось, что трудность расчета корреляционного объектива по симметричной схеме заключается в необходимости одновременного исправления сферической aberrации и комы. Анаберрационная зеркальная поверхность строго свободна от сферической aberrации, а кома может быть уменьшена за счет низкого относительного отверстия. Расположим зрачок в фокусе параболического зеркала, обеспечивая этим телецентрический ход главного луча и симметрию хода апертурного луча. Центральное экранирование по полю регулируется фокусным расстоянием зеркала, которое должно быть значительно больше диаметра зрачка. Кома при отображении зрачка будет мала и в последующем будет скомпенсирована в автоколлимационной схеме (работа с увеличением $\beta = -1^x$). Кома при отображении предмета будет мала из-за малой ширины пучка относительно диаметра зеркала. Пятно рассеяния в широком поле будет определяться кривизной изображения, т. к. нет астигматизма и хроматических aberrаций. Используя классические подходы к расчетам оптических систем⁴ [20] и свойство параболы давать безаберрационное изображение⁵ точечного предмета из бесконечности, получим зависимость кривизны изображения Z'_p от угла поля ω :

$$Z'_p(\omega) = -2f' \left[1 + \frac{2}{\omega^2} (1 - \sqrt{\omega^2 + 1}) \right],$$

где f' — фокусное расстояние параболического зеркала.

Таким образом, в качестве УЦЭ можно предложить ряд эталонов в виде колец конечной площади, смещенных вдоль оптической оси в соответствии с (1). Расположим после УЦЭ плоское зеркало, отражающее пучок от объекта обратно на параболу. Таким образом получаем симметричную схему ОКП (оптическая схема объектива ОКП на основе параболического зеркала изображена на рис. 5, а ОКП в целом представлен на рис. 6).

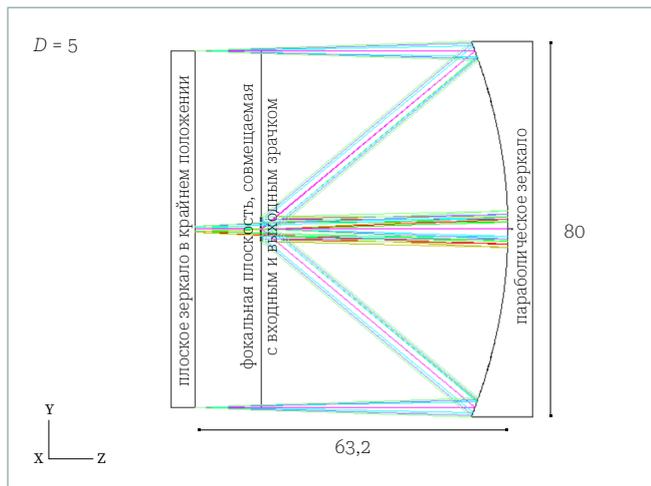
Рис. 5

Оптическая схема объектива ОКП на основе параболического зеркала

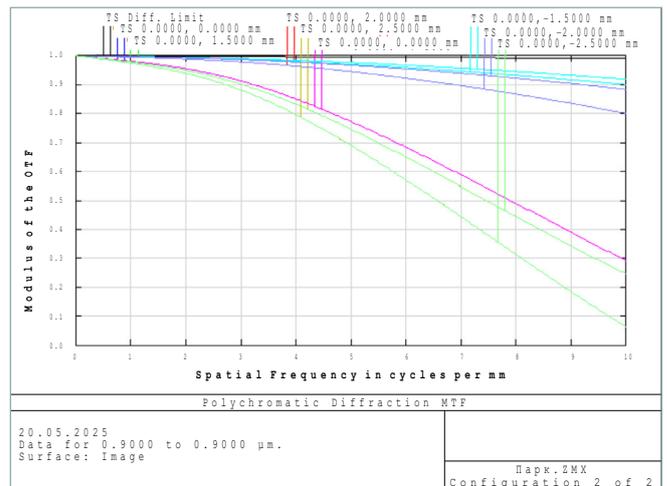
Fig. 5

Optical scheme of the optical direction finder objective based on parabolic mirror: ray tracing and modulation transfer function

Схема хода лучей (входной зрачок $D = 5$, угол поля $8^\circ 32'$) / Ray tracing diagram (entrance pupil $D = 5$, field angle $8^\circ 32'$)



ФПМ объектива / MTF of the objective across the field



- 4 Граматин А.П., Романова Г.Э., Балащенко О.Н. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2011. 132 с.
- 5 Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем: учебник: в 2 ч. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. 348 с.

Рис. 6 

Объектив ОКП на основе параболического зеркала: схемы конструкции, кривизна поля, смещение плоскости и пятно рассеяния

Fig. 6

Optical direction finder objective based on parabolic mirror: design diagrams, field curvature, defocus compensation, and spot diagram

Выходной зрачок сформируется строго с увеличением -1^x в плоскости входного зрачка и будет расположен симметрично относительно оптической оси, что позволяет разместить в этой плоскости фотоприемник⁶.

Особенностью зеркальной схемы ОКП является необходимость усложнения УЦЭ, увеличения его до размеров, сравнимых с размером параболического зеркала, а также обязательное применение отражающих систем на кремнии LCOS [21]. К преимуществам зеркальной схемы относятся возможность развития углового поля до 80° , отсутствие преломляющих поверхностей⁷, к недостаткам — большие поперечные габариты при малом диаметре зрачка, центральное экранирование по полю, сложность УЦЭ.

Схема объектива ОКП на основе параболического зеркала с фокусным расстоянием 50 мм / Diagram of the optical direction finder objective based on parabolic mirror with focal length 50 mm

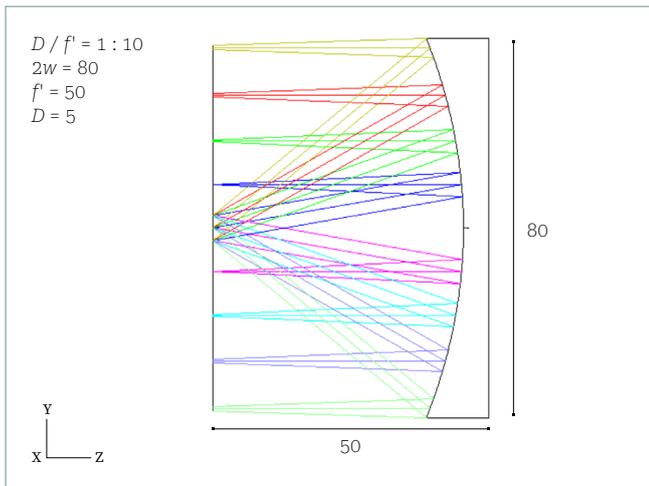


График кривизны поля, характеризующий качество изображения объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the objective

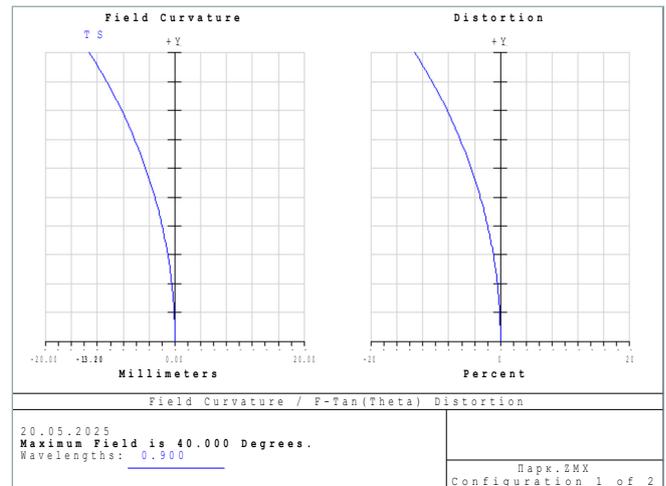


Иллюстрация необходимости смещения плоскости установки объектива для получения дифракционного качества изображения / Illustration of objective mounting plane shift requirement for diffraction-limited image quality

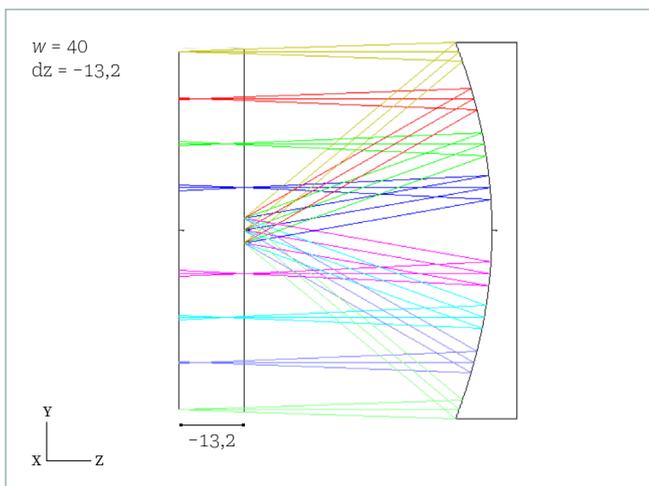
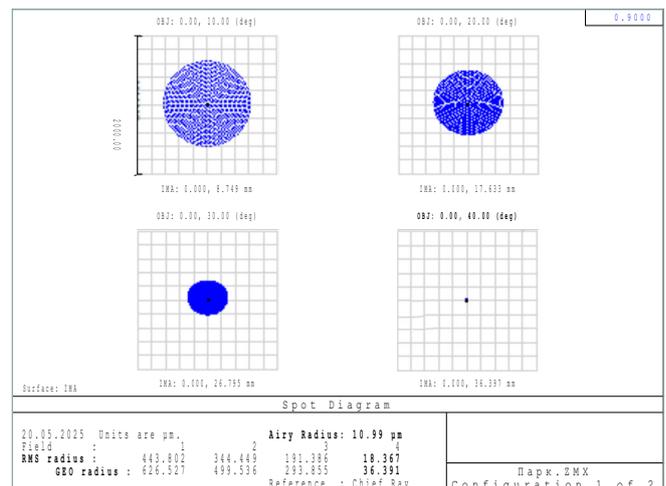


График пятна рассеяния ОКП при смещенной плоскости установки / Spot diagram of the optical direction finder with shifted mounting plane



- 6 Существенно то, что из-за свойств параболической поверхности сферическая абберация в изображении зрачка будет отсутствовать для любого поля.
- 7 В условиях дальнего космоса критически важна радиационная стойкость оптических материалов. Использование отражающей зеркальной поверхности принципиально исключает эту проблему.

3 Результаты и обсуждение

Рис. 7 

Прототип корреляционного объектива и ОКП: схемы конструкции, кривизна поля и ФПМ

Fig. 7

Prototype of correlation objective lens and optical direction finder: design diagrams, field curvature, and MTF

В предыдущей работе [15] авторы предложили схемы, которые позволили достичь только средних и низких параметров. Поиск схем для реализации оптимального объектива продолжался, поскольку схема самого ОКП нетривиальна и создание объектива представляется самостоятельной научно-технической задачей прикладного характера.

Уместно сравнить полученные схемы ОКП с первоначальной схемой прототипа ОКП, представленной на рис. 7.

Схема прототипа корреляционного объектива с фокусным расстоянием 25 мм, спектральным диапазоном 0,8–1,0 мкм / Diagram of the correlation objective lens prototype with focal length 25 mm, spectral range 0.8–1.0 μm

График кривизны поля, характеризующий качество изображения прототипа корреляционного объектива / Field curvature graph characterizing the image quality of the correlation objective lens prototype

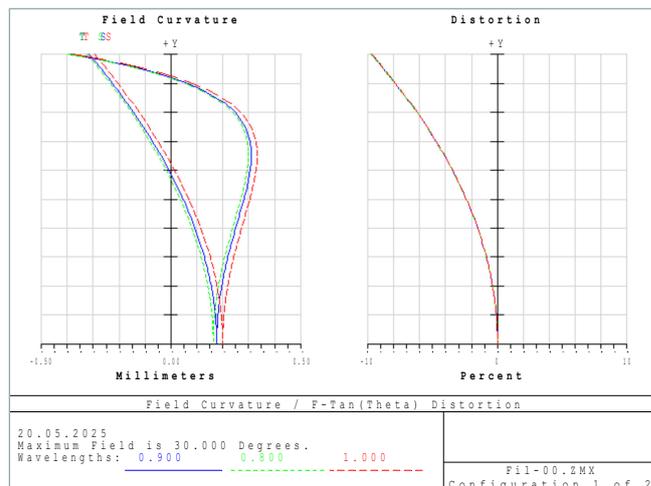
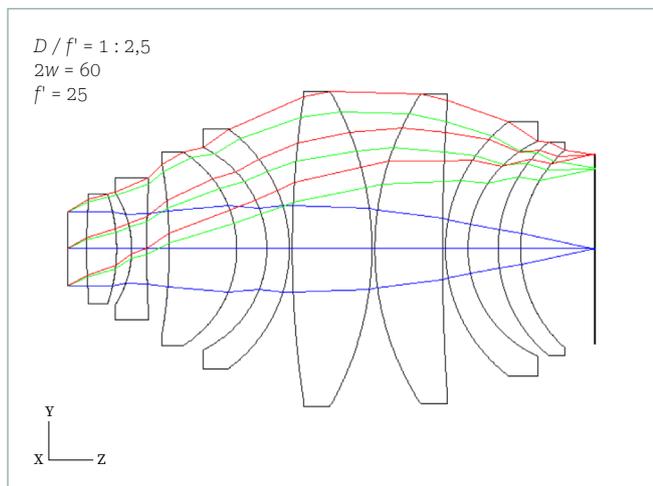
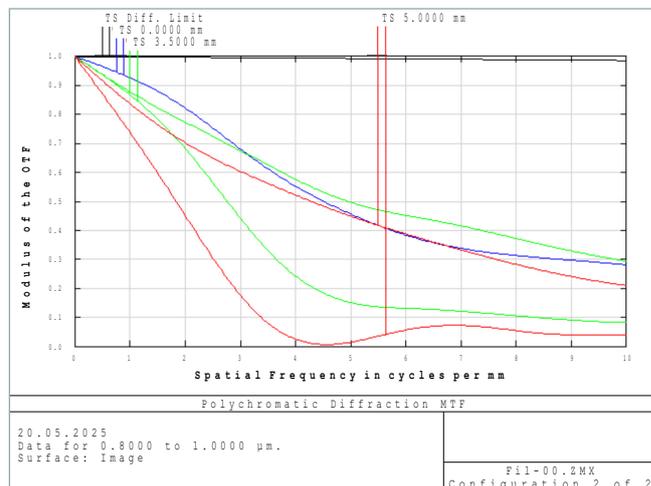
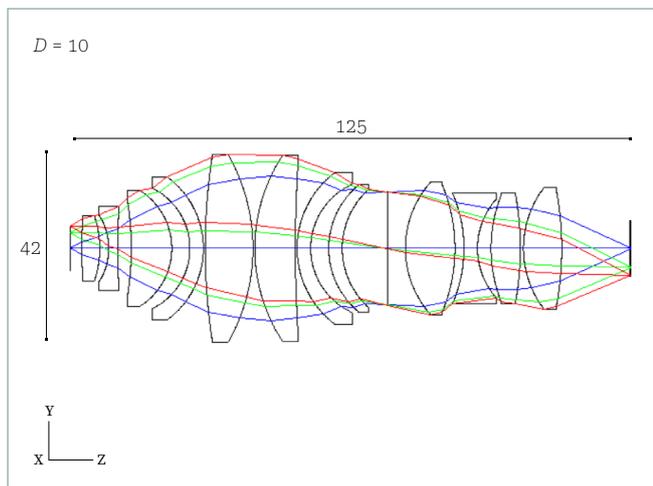


Схема прототипа ОКП / Diagram of the optical direction finder prototype

График ФПМ ОКП при отображении зрачка (максимальная частота на графике ФПМ 10 мм⁻¹) / MTF graph of the optical direction finder when imaging the pupil (maximum frequency on the MTF graph: 10 mm⁻¹)



В оптической схеме отсутствуют асферические поверхности, выполнена коррекция aberrаций для точки на оси и хорошо исправлены aberrации в зрачке. Оптические характеристики всех приведенных вариантов схем ОКП сведены в табл. 2.

Предложенные в данной работе схемы позволяют либо обеспечить высокие оптические характеристики, как, например, корреляционный объектив (табл. 2, строка 1). При этом схема является ресурсоемкой. Предложены также схемы (табл. 2), которые в значительной степени менее требовательны к ресурсам в процессе изготовления, но каждая из них в какой-то степени уступает первой.

Использование данных схем целесообразно в зависимости от задач, которые ставятся перед космическим аппаратом и миссией в целом. Возможно, что несколько меньшие параметры будут вполне достаточны для конкретной миссии и в совокупности с сокращением затрат получат большее распространение.

Таблица 2 

Оптические характеристики предложенных схем ОКП

Table 2

Optical characteristics of the proposed optical direction finder schemes

	Тип схемы	Характеристики				
		$2\omega, ^\circ$	$D, \text{мм}$	$f', \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$N, \text{мм}^{-1}$
1	Прототип	60	10	25	125	10
2	Корреляционный объектив	50	14	15	93	10
3	Окуляр ГОИ	60	3,6	15	94	7
4	Окуляр Эрфле	52	4	15	87	7
5	Зеркальная система	80	5	50	63,2	>10

Данная статья и все исследование в целом направлены на то, чтобы доказать, что создание объектива ОКП с высокими характеристиками в принципе возможно. Предложенные схемы с компромиссными оптическими параметрами — решение другой задачи: показать, что можно не только создать объектив, но и выбрать оптимальную схему, исходя из задач и ограничений (в том числе финансовых) конкретной миссии.

Заметим, что ОКП, построенные по симметричной схеме, имеют во всех случаях меньшую, чем в прототипе, длину L . ОКП на основе схемы окуляров отличается от прототипа сниженным более чем в два раза диаметром входного зрачка и уменьшенным фокусным расстоянием, но при этом они более технологичны и просты в изготовлении, что непременно позволит снизить себестоимость.

ОКП на основе зеркала отличается от прототипа увеличенным полем зрения, уменьшенной в два раза длиной самого объектива, лучшим качеством изображения зрачка. Однако следствием этих улучшений стало увеличение поперечных габаритов, экранирование поля зрения и усложнение УЦЭ. Корреляционный объектив имеет сравнимые с прототипом характеристики, но уменьшенное с 12 до 8 число линз за счет применения асферической поверхности.

Зеркальная схема ОКП интересна еще и тем, что ее масштабирование позволяет увеличить диаметр входного зрачка до любых величин без ухудшения абберационной коррекции как для предмета, так и для зрачка. Это возможно именно благодаря использованию зеркального объектива, который не вносит хроматических aberrаций. Практическая целесообразность в таком случае определяется только типом решаемых задач, а также ограничениями УЦЭ и фотоприемника. Другими словами, теоретически возможно создание ОКП без компромисса между угловым полем и размером входного зрачка.

4 Выводы

В статье предложены схемы, которые позволяют создавать для некогерентного корреляционного пеленгатора объективы с высокими и компромиссными оптическими характеристиками. Представлены оптические характеристики всех приведенных вариантов схем ОКП (табл. 2).

Были исследованы схемы ОКП с высокими оптическими характеристиками, получен корреляционный объектив ОКП, позволяющий создать ОКП, сравнимый по характеристикам с прототипом, предложены альтернативные схемы ОКП на основе известных окуляров, зеркальная схема ОКП, имеющая преимущество в угловом поле и в качестве изображения зрачка. Вопрос о возможности достижения сверхвысоких оптических характеристик ОКП, определяемых корреляционным объективом (табл. 1, строка 1), остается предметом дальнейших исследований.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Cocaud C., Kubota T. Autonomous navigation near asteroid based on visual SLAM // Proceedings of the 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics. Pasadena, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.issfd.org/ISSFD_2012/ISSFD23_AD_5.pdf (дата обращения: 09.04.2025).
 2. Cocaud C., Kubota T. SLAM-based navigation scheme for pinpoint landing on small celestial body // *Advanced Robotics*. 2012. Vol. 26. Iss. 15. P. 1747–1770. DOI:10.1080/01691864.2012.685227.
 3. Jaumann R., Schmitz N., Koncz A., et al. The camera of the MASCOT asteroid lander on board Hayabusa 2 // *Space Science Reviews*. 2017. Vol. 208. P. 375–400. DOI:10.1007/s11214-016-0263-2.
 4. Viola P.A., Jones M.J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai: IEEE, 2001. Vol. 1. P. 511–518. DOI:10.1109/CVPR.2001.990517.
 5. Bellerose J., Vaughan A.T., Bhaskaran S., et al. Double asteroid redirection test (DART): navigating to obliteration // *Acta Astronautica*. 2024. Vol. 219. P. 417–432. DOI:10.1016/j.actaastro.2024.02.021.
 6. Жуков Б.С., Жуков С.Б. Алгоритм автономного выбора места посадки КА «Фобос Грунт» по телевизионным изображениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8, № 2. С. 281–288.
 7. Балдина Е.А., Бессонов Р.В., Гришин В.А. и др. Оценка возможности использования карты береговых линий GSHHG для автономной оптической навигации космических аппаратов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 3. С. 217–228. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-217-228.
 8. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Форш А.А. Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 2. С. 61–76.
 9. Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Сметанин П.С. Стенд для отработки технологии автономной припланетной навигации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 3. С. 108–117. DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117.
 10. Жуков Б.С., Полянский И.В., Жуков С.Б. Автономная оптическая навигация на окололунных орбитах и при посадке на Луну с помощью сверхширокоугольной камеры // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 2. С. 24–35. DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35.
 11. Буслаев С.П. Техническое зрение искусственного интеллекта в будущих задачах посадок и перемещений космических аппаратов // *Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность: материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 15–17 сентября 2020 г.* Ч. 2. Калуга: ИП Стрельцов И.А., 2020. С. 86–89.
 12. Косова А.Е., Корииков А.М. Автоматическая посадка малых беспилотных летательных аппаратов с использованием компьютерного зрения // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2017. Т. 20, № 3. С. 191–196.
 13. Лобанов А.А., Можаров Г.А., Филонов А.С. Оптический пеленгатор для автономной посадки космического зонда на малые тела Солнечной системы // *Фотоника*. 2022. Т. 16, № 5. С. 404–415. DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.5.404.414.
 14. Кузнецов-Фетисов И.Н., Якубовский С.В. Разработка инструментария для анализа оптических систем в области аббераций третьего порядка в программе Zemax // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2022. Т. 66, № 4. С. 101–115. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-4-101-115.
 15. Боголюбов И.А., Лобанов А.А. Расчет объектива некогерентного оптического корреляционного пеленгатора с низкими и средними оптическими характеристиками // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2024. Т. 68, № 5. С. 143–154. DOI:10.30533/GiA-2024-045.
 16. Поляков М.П., Хохлов Д.Д., Быков А.А. Апохроматический объектив для изображающих спектральных систем видимого, ближнего

- и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 585–590. DOI:10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590.
17. Табачков А.Г., Латыев С.М., Фролов Д.Н. Унификация конструкций линзовых микрообъективов // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 1. С. 38–44.
 18. Семенов А.В., Табачков А.Г., Мухина Е.Н. и др. Модернизация конструкции микрообъектива для возможности работы с разными покровными стеклами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 4. С. 23–28. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://applied-research.ru/article/view?id=12177> (дата обращения: 23.04.2025).
 19. Арасланов Д.Ю., Табачков А.Г. Разработка и исследование конструкции широкопольных микрообъективов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19278> (дата обращения: 23.04.2025).
 20. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Модульное проектирование оптических систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 3. С. 57–62.
 21. Zhang Z., You Z., Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices // Light: Science and Applications. 2014. Vol. 3, No. 10. P. e213. DOI:10.1038/lsa.2014.94.

АВТОРЫ Боголюбов Игорь Александрович✉ bogol007@mail.ru

АО «Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”», Москва, Россия

🆔 0009-0005-8219-1713

Лобанов Александр АнатольевичФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», Москва, Россия
кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий

канд. техн. наук, доцент

🆔 0000-0003-2690-5660

Можаров Григорий Афанасьевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», Москва, Россия

кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

д-р техн. наук, профессор

Поступила 10.06.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



Calculation of a Lens for an Incoherent Optical Correlation Direction Finder with High and Compromise Optical Performance

Igor A. Bogolyubov¹, Aleksandr A. Lobanov²✉, Grigorij A. Mozharov³

¹ Joint-stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instrument”, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

✉ aa.lobanoff@ya.ru

CITATION Bogolyubov IA, Lobanov AA, Mozharov GA. Calculation of a Lens for an Incoherent Optical Correlation Direction Finder with High and Compromise Optical Performance. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 99–114. DOI:10.30533/GiA-2025-048.

KEYWORDS incoherent optics, correlation direction finder, lens calculation, optical system optimization, practical implementation image quality, machine vision system

ABSTRACT The article proposes an optical layout and presents a detailed parameter calculation of a high-performance objective lens designed for a four-channel incoherent optical correlation direction finder. A feasible solution is developed using currently available materials and manufacturing technologies. However, achieving high optical performance required the inclusion of a significant number of resource-intensive components. Taking this into account, the study further explores the possibility of achieving a compromise improvement in optical characteristics by employing widely used and economically justified optical materials and elements. Two alternative optical configurations for the direction finder objective are proposed and substantiated as part of the compromise design. The first is based on the well-known SOI (State Optical Institute) eyepiece, and the second utilizes a single parabolic mirror. The optical parameters of both configurations are calculated, and their application limitations are discussed. The results obtained enable the development of both a high-performance objective for an incoherent correlation direction finder and a practical compromise variant suitable for experimental correlation signal analysis.

REFERENCES

1. Cocard C, Kubota T. Autonomous navigation near asteroid based on visual SLAM. *Proceedings of the 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics*. Pasadena, 2012. Available from: https://www.issfd.org/ISSFD_2012/ISSFD23_AD_5.pdf (Accessed 9 April 2025).
2. Cocard C, Kubota T. SLAM-based navigation scheme for pinpoint landing on small celestial body. *Advanced Robotics*. 2012;26(15): 1747–1770. DOI:10.1080/01691864.2012.685227.
3. Jaumann R, Schmitz N, Koncz A, et al. The camera of the MASCOT asteroid lander on board Hayabusa 2. *Space Science Reviews*. 2017;208: 375–400. DOI:10.1007/s11214-016-0263-2.
4. Viola PA, Jones MJ. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Kauai: IEEE; 2001;1: 511–518. DOI:10.1109/CVPR.2001.990517.
5. Bellerose J, Vaughan AT, Bhaskaran S, et al. Double Asteroid Redirection Test (DART): Navigating to Obliteration. *Acta Astronautica*. 2024;219: 417–432. DOI:10.1016/J.ACTAASTRO.2024.02.021.
6. Zhukov BS, Zhukov SB. Algoritm avtonomnogo vybora mesta posadki KA “Fobos Grunt” po televizionnym izobrazhenijam [Algorithm for autonomous landing site selection of the Phobos-Grunt spacecraft]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space*. 2011;8(2): 281–288. (In Russian).
7. Baldina EA, Bessonov RV, Grishin VA, et al. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya karty beregovykh linij GSHHG dlja avtonomnoj opticheskoy navigacii kosmicheskikh apparatov [Assessment of GSHHG shoreline map applicability for autonomous optical navigation of spacecraft]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2016;13(3): 217–228. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-3-217-228.
8. Zhukov BS, Zhukov SB, Forsh AA. Vozmozhnosti navigacionnykh izmerenij po limbu Zemli v vidimom i blizhnem IK diapazone [Potential of navigational measurements using Earth's limb in visible and near-IR range]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015;12(2): 61–76. (In Russian).
9. Avanesov GA, Zhukov BS, Smetanin PS. Stend dlja otrabotki tehnologii avtonomnoj priplanetnoj navigacii [Test bench for autonomous planetary approach navigation technologies]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021;18(3): 108–117. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117.
10. Zhukov BS, Polyanskiy IV, Zhukov SB. Avtonomnaja opticheskaja navigacija na okololunnykh orbitah i pri posadke na Lunu s pomow'ju sverhshirokougol'noj kamery [Autonomous optical navigation in cislunar orbits and lunar landing using ultra-wide-angle camera]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2017;14(2): 24–35. (In Russian). DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35.
11. Buslaev SP. Tehnicheskoe zrenie iskusstvennogo intellekta v buduwih zadachah posadok i peremewenij kosmicheskikh apparatov [Computer vision and artificial intelligence for future spacecraft landing and mobility tasks]. *Proceedings of the 55th Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 15–17, 2020*. Part 2. Kaluga: IP Strel'cov I.A.; 2020: 86–89. (In Russian).
12. Kosova AE, Korikov AM. Avtomaticheskaja posadka malyh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem komp'yuternogo zrenija [Automatic landing of small UAVs using computer vision]. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2017;20(3): 191–196. (In Russian).
13. Lobanov AA, Mozharov GA, Filonov AS. Opticheskij pelengator dlja avtonomnoj posadki kosmicheskogo zonda na malye tela Solnechnoj sistemy [Optical direction finder for autonomous spacecraft landing on small Solar System bodies]. *Photonics*. 2022;16(5): 404–415. (In Russian). DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.5.404.414.
14. Kuznetsov-Fetisov IN, Yakubovsky SV. Razrabotka instrumentarija dlja analiza opticheskikh sistem v oblasti aberracij tret'ego porjadka v programme Zemax [Development of tools for third-order aberration analysis in Zemax]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(4): 101–115. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-4-101-115.
15. Bogolyubov IA, Lobanov AA. Raschet obektiva nekogerentnogo opticheskogo korreljacionnogo pelengatora s nizkimi i srednimi opticheskimi harakteristikami [Lens design for an incoherent optical correlation direction finder with low to medium optical characteristics]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(5): 143–154. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-045.

16. Poljakov MP, Hohlov DD, Bykov AA. Apohromaticheskij ob'ektiv dlja izobrazhajuwih spektral'nyh sistem vidimogo, blizhnego i korotkovolnovogo infrakrasnogo diapazonov spectra [Achromatic objective for imaging spectral systems of visible, near and short-wave infrared spectrum ranges]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025;25(4): 585–590. (In Russian). DOI:10.17586/2226-1494-2025-25-4-585-590.
17. Tabachkov AG, Latyev SM, Frolov DN. Unifikatsiya konstruksiy linzovykh mikroob'ektiv [Unification of lens micro-objective designs]. *Opticheskij Zhurnal*. 2011;78(1): 38–44. (In Russian).
18. Semenov AV, Tabachkov AG, Mukhina EN, et al. Modernizatsiya konstruksii mikroob'ektiva dlja vozmozhnosti raboty s raznymi pokrovnymi steklami [Modernization of the micro-objective design for the possibility of working with different cover glasses]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;4: 23–28. (In Russian). Available from: <https://applied-research.ru/article/view?id=12177> (Accessed 23 April 2025).
19. Araslanov DY, Tabachkov AG. Razrabotka i issledovanie konstruksii shirokopol'nykh mikroob'ektiv [Development and research of wide-field micro-objective designs]. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;1-1. (In Russian). Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19278> (Accessed 23 April 2025).
20. Andreev LN, Ezhova VV, Degtyareva GS. Modul'noe proektirovanie opticheskikh sistem [Modular design of optical systems]. *Instrument Engineering Higher Education Institutions Reports*. 2014;57(3): 57–62. (In Russian).
21. Zhang Z, You Z, Chu D. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices. *Light: Science and Applications*. 2014;3(10): e213. DOI:10.1038/lssa.2014.94.

AUTHORS Igor A. Bogolyubov

✉ bogol007@mail.ru

Joint-stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instrument”, Moscow, Russia

🆔 0009-0005-8219-1713

Aleksandr A. Lobanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies
PhD in Engineering, Associate Professor

🆔 0000-0003-2690-5660

Grigorij A. Mozharov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

Submitted: June 10, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.