

# Панорамная трехдиапазонная зеркально-линзовая система навигационной видеокамеры беспилотных мини-аппаратов

М.П. Егоренко, В.С. Ефремов\*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

Поступила в редакцию 1.12.2020 г.

Выполнено компьютерное моделирование панорамной трехдиапазонной зеркально-линзовой системы (объектива) навигационной видеокамеры беспилотных мини-аппаратов. Оптическая система работает с использованием приемника излучения, чувствительного в трех диапазонах спектра.

*Ключевые слова:* панорамная оптическая система, трехдиапазонная зеркально-линзовая система, ультрафиолетовый, видимый, ближний инфракрасный диапазоны спектра, видеокамера, навигация, беспилотные мини-аппараты; panoramic optical system, three-range catadioptric system, ultraviolet, visible, near-infrared regions, video camera, navigation, unmanned miniature drones.

В последние годы для целей тактической разведки применяют беспилотные роботизированные устройства. Одним из перспективных направлений развития современных технологий является проект Gremlins агентства DARPA [1] по разработке беспилотных мини-аппаратов, которые могут использоваться для выполнения миссий, потенциально опасных или принципиально невыполнимых человеком.

Беспилотные мини-аппараты, применяемые в разных средах (на земле или воде, в воздухе или под водой) могут быть оснащены двумя типами видеокамер: для целей навигации и мониторинга обстановки.

Пример беспилотного роботизированного мини-устройства приведен в работе [2], а миниатюрные оптические системы видеокамер рассмотрены в работах [3, 4]. Наиболее компактные оптические схемы объективов, которые хорошо подходят для видеокамер мониторинга обстановки, предложил L. Sanyek в [5]. Позже выяснилось, что принцип компенсации хроматических aberrаций, присущий этим схемам, пригоден для разработки объективов, работающих в нескольких диапазонах спектра одновременно [6]. В [4] рассмотрены несколько вариантов многодиапазонных схем объективов, работающих с одним или двумя приемниками излучения.

Объективы, используемые для навигации, должны иметь большой угол поля зрения или быть панорамными для обзора верхней полусферы (при работе на земле или воде) и нижней полусферы (при работе в воздухе или под водой) окружающей среды.

Наиболее близкими по применению и параметрам являются объективы видеокамер купольного типа. Некоторые их параметры приведены в таблице (значения взяты из [7]). Основной недостаток этих видеокамер – большие габаритные размеры и масса, не позволяющие установить их на носители размером с крупных насекомых, мелких птиц или мышей.

Некоторые параметры объективов и матриц купольных видеокамер

Параметр	Видеокамера		
	GTI-20FE	DS-I351	VCI-252-05
Фокусное расстояние $f'$ , мм	1,05	1,16	1,42
Относительное отверстие $D/f'$	1:2,5	1:2,2	1:1,6
Поле зрения $2\omega$ , град. × град.	180 × 180	180 × 180	180 × 180
Разрешение, Мп (пикселей)	2 (2304 × 1536)	3 (2048 × 1536)	5 (2592 × 1944)
Размер матрицы по диагонали $2y'$ , мм	5,3	5,7	5,9
Размер пикселя по диагонали $\Delta y'$ , мкм	3,1	3,5	2,0
Угловое пространственное разрешение $\Delta\omega$ , мрад	3,0	3,0	1,4

Создание оптико-электронной элементной базы (объективов и матричных приемников излучения) для таких видеокамер является актуальной задачей.

\* Марина Петровна Егоренко (e\_m\_p@mail.ru); Виктор Сергеевич Ефремов (ews49@mail.ru).

Цель настоящей работы – разработка компактного панорамного трехдиапазонного зеркально-линзового объектива для навигационной видеокамеры беспилотного мини-аппарата.

Объектив для навигационных целей должен обладать большим углом поля зрения (до  $180^\circ$ ) или обеспечивать панорамное зрение [8–10]. Для существующих образцов характерны такие недостатки, как громоздкость оптической системы и сложность конструкции, что неприемлемо для мини-аппаратов.

Для решения этой проблемы можно использовать оптическое устройство (рис. 1), разработанное авторами по патенту [11], в котором учтены достоинства многодиапазонной системы L. Sanzek [5] и широкоугольной системы Г.Г. Ленгауэра [12]. Оптическая система панорамной двухдиапазонной зеркально-линзовой системы модернизирована для единого приемника излучения – трехдиапазонной фокально плоскостной матрицы (ФПМ).

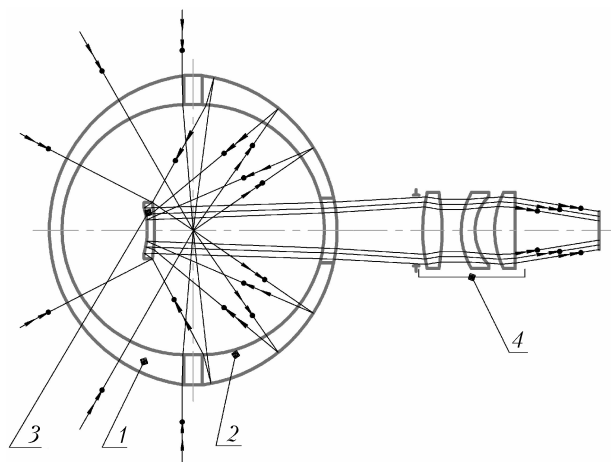


Рис. 1. Оптическая система панорамного трехдиапазонного зеркально-линзового объектива: 1 – защитное стекло; 2, 3 – зеркала; 4 – линзовая система;  $f' = 1$  мм;  $2\omega = 28 \div 85^\circ$  по вертикали и  $360^\circ$  по горизонтали;  $D/f' = 1/2,5$

ФПМ GSENSE1516BSI [13] на основе модифицированного кремния (Si) работает в трех спектральных диапазонах (УФ (0,2–0,4 мкм), видимом (0,4–0,75 мкм), ближнем ИК (0,75–1,1 мкм)). Однако эта матрица имеет большой формат  $61,4 \times 61,4$  мм ( $4096 \times 4096$  пикселей) и разместить ее на малогабаритном носителе проблематично.

На основе чувствительных элементов (пикселей) ФПМ GSENSE1516BSI представляется возможным изготовление специальной ФПМ частного применения гораздо меньших размеров конкретно для беспилотных мини-аппаратов, например с диагональю  $2y' = 4\text{--}5$  мм.

Поставленная задача может быть решена за счет того, что панорамная трехдиапазонная зеркально-линзовая система (рис. 1) выполнена из двух зеркал Манжена с внутренним отражением (вогнутого 2 и выпуклого 3), а также линзовой системы 4 переноса изображения УФ- (0,365–0,400 мкм), видимого (0,486–0,656 мкм) и ближнего ИК- (0,656–

0,900 мкм) диапазонов спектра на трехдиапазонный фотоприемник. В систему введено защитное стекло 1 в виде полусферы. Сплошное вогнутое зеркало не имеет зеркального покрытия в центральной части. Диаметры защитного стекла и вогнутого зеркала равны и конструктивно объединены в единую полую сферу для повышения герметизации внутренней части системы, а выпуклое зеркало закреплено внутри нее в центральной части защитного стекла. Детали 1–3 выполнены из сополимера циклоолефин (Cyclic olefin copolymer – СОС), прозрачного в вышеуказанных спектральных диапазонах, а линзовая система 4 – из комбинации силикатных стекол SK16/F2/SK16 (диапазон пропускания излучения – от 0,31 до 1,1 мкм по каталогу ШОТТ).

На рис. 2 приведен график спектральной чувствительности ФПМ GSENSE1516BSI.

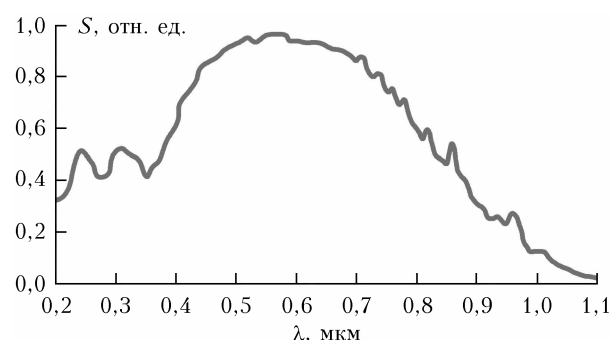


Рис. 2. Спектральная чувствительность ФПМ GSENSE1516BSI

Оптическая система имеет ряд особенностей: объектив, работающий на единый фотоприемник; асферические внутренняя поверхность зеркала 2 и внешняя поверхность зеркала 3 (асферизация упрощает изготовление зеркал, но позволяет уменьшить число преломляющих поверхностей, что повышает светопропускание системы). Для снижения массы крупногабаритных оптических деталей использован материал СОС удельной плотностью  $1,02$  г/см<sup>3</sup>.

На рис. 3–5 (дв. вкладка) приведены результаты компьютерного моделирования панорамной трехдиапазонной зеркально-линзовой системы для трех полей зрения ( $\omega = 28, 65$  и  $85^\circ$ ). Результаты даны для плоскостей наилучшей установки в каждом диапазоне спектра:  $S'_{F'} = 2,85$  (УФ),  $3,01$  (видимый) и  $3,09$  мм (ближний ИК) ( $S'_{F'}$  – задний фокальный отрезок объектива). Максимальное смещение ФПМ при фокусировке  $\Delta S'_{F'} = 0,24$  мм.

Оптические системы, работающие совместно с приемниками оптического излучения, принято оценивать по поперечным aberrациям в геометрическом приближении. Такой критерий оценки рекомендован для светосильных кино-, фото- и телевизионных объективов [14, с. 282]. Распределение энергии в плоскости пиксела представлено диаграммой распределения энергии и графиком концентрации энергии  $T$  в квадрате (пикселе) размером  $15 \times 15$  мкм. Размерность на графиках дана в микронах, кроме полей

зрения в пространстве: предметов — в градусах, изображений — в миллиметрах.

В результате компьютерного моделирования показана принципиальная возможность разработки панорамной трехдиапазонной зеркально-линзовой системы для единой ФПМ. Приведен вариант расчета трехдиапазонной оптической системы видеокамеры беспилотного мини-аппарата для целей навигации с фокусировкой в каждом спектральном диапазоне. Отмечена необходимость разработки специальных малогабаритных ФПМ для беспилотных мини-аппаратов.

1. *Defense* Advanced Research Projects Agency [Electronic resource]. URL: <https://www.darpa.mil/program/gremlins> (last access: 17.01.2021).
2. *PD-100* Black Hornet Nano Unmanned Air Vehicle [Electronic resource]. URL: <http://www.army-technology.com/projects/pd100-black-hornet-nano/> (last access: 21.12.2020).
3. Egorenko M.P., Efremov V.S. Mirror-lens camera system for underwater drones // Proc. SPIE. DOI: 10.1117/12.2573572.
4. *Егоренко М.П., Ефремов В.С.* Выбор оптических материалов для многоканальных зеркально-линзовых систем с зеркалами Манжена видеокамер беспилотных миниаппаратов // *Опт. журн.* 2020. Т. 87, № 12. С. 18–31.
5. *Canzek L.* Neue Richtung in der Entwicklung der katioptrischen Objektive // *Optica acta.* 1979. N 2. P. 279–287. DOI: 10.1080/713819973.
6. *Егоренко М.П., Ефремов В.С.* Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2009. Т. 52, № 6. С. 53–57.
7. *Каталог* продукции ООО Корпорации «Груммант» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.grumant.ru> (дата обращения: 23.12.2020).
8. *Прудников Н.В., Шлишевский В.Б.* Панорамные оптико-электронные устройства кругового и секторного обзора // *Вестн. СГУГиТ.* 2016. Вып. 1. С. 148–161.
9. *Соломатин В.* Панорамная видеокамера // *Фотоника.* 2009. № 4. С. 26–29.
10. *Панорамная* зеркально-линзовая система с видеокамерой: Пат. 2335003. Россия, G02B 17/08 (2006.01), G03B 37/06 (2006.01). Колочкин В.Я., Тимашова Л.Н., Колобов К.В., Князев А.А.; ООО «Лаборатория трехмерного зрения». № 2006133677/28; Заявл. 27.03.2008; Опубл. 27.09.2008. Бюл. № 27.
11. *Панорамная* двухспектральная зеркально-линзовая система: Пат. 2728321. Россия, МПК, G 02B 17/08, G 03B 37/06, G 02B 13/06. Егоренко М.П., Ефремов В.С.; Сиб. гос. ун-т геосистем и техн. № 2020100496; Заявл. 12.02.2020; Опубл. 29.07.2020. Бюл. № 22.
12. *Ленгауэр Г.Г., Михельсон Н.Н., Никанорова И.Н.* Теория сверхширокоугольной камеры Г.Г. Ленгауэра // *Изв. ГАО АН СССР.* 1989. № 206. С. 75–79.
13. *НПП «Фотоника»* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.npk-photonica.ru/> (дата обращения: 21.10.2020).
14. Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д., Андреев Л.Н., Агальцова Н.А., Ишанин Г.Г., Василевский О.Н., Родионов С.А. / под общ. ред. М.М. Русинова. *Вычислительная оптика: справочник.* Изд. 2-е. М.: URSS, 2008. 424 с.

*M.P. Egorenko, V.S. Efremov. Three-range panoramic catadioptric navigation video camera system for unmanned miniature drones.*

Computer simulation of a panoramic three-range catadioptric system (lens) of a navigation video camera of unmanned miniature drones is presented. The optical system operates using a three-channel radiation receiver sensitive in three spectral regions.

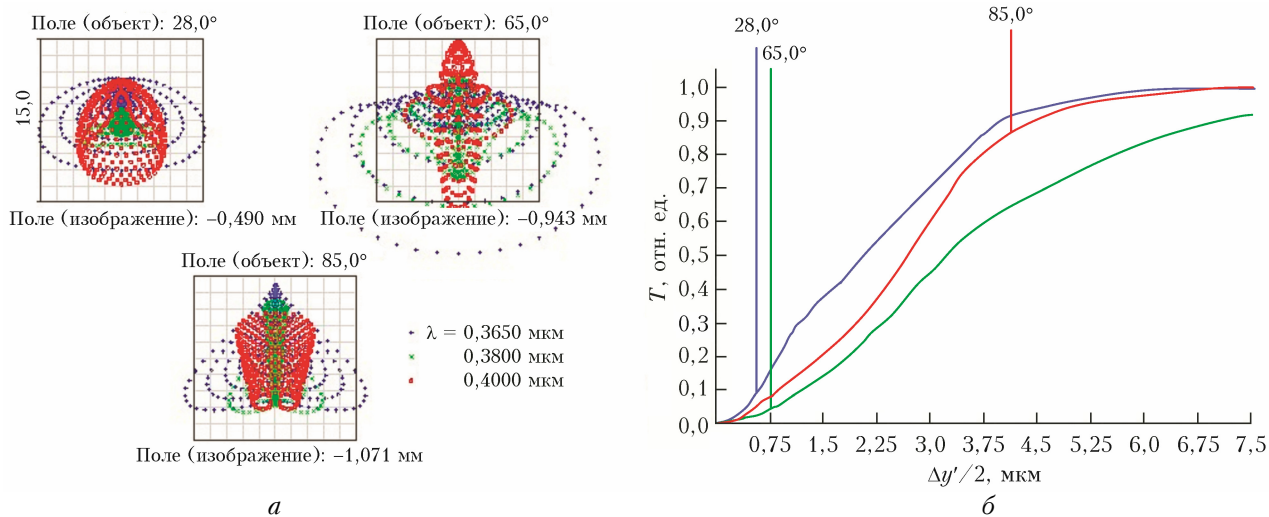


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования панорамной трехдиапазонной зеркально-линзовой системы в УФ-диапазоне спектра при  $S_{F'} = 2,85$  мм: *a* – точечная диаграмма пятна рассеивания в пикселе; *b* – график концентрации энергии в пиксел; поле (объект/изображение) – размер половины поля зрения в пространстве предметов/изображений

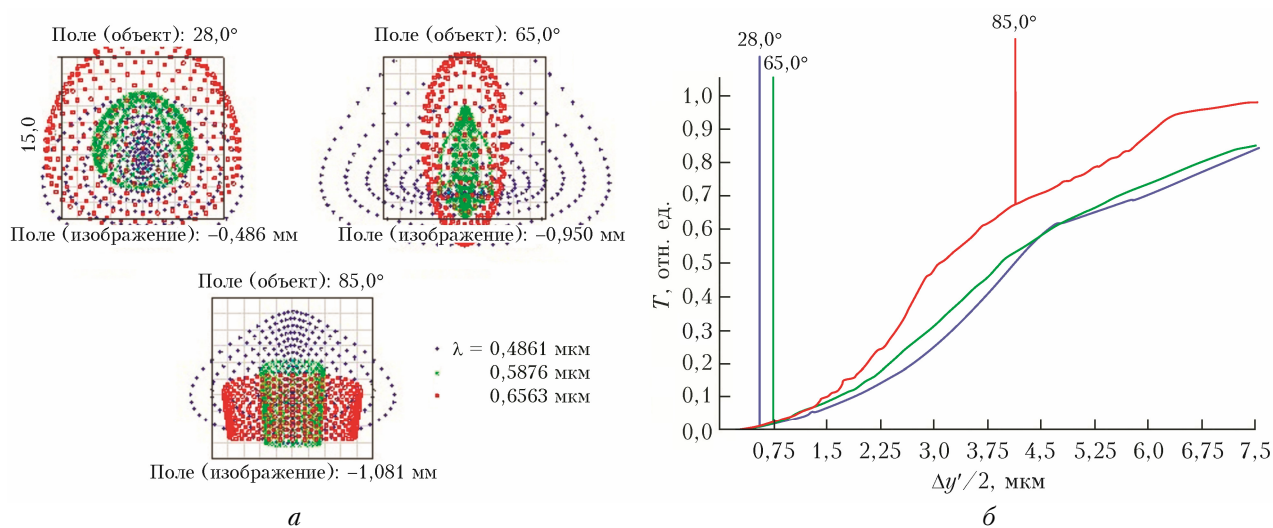
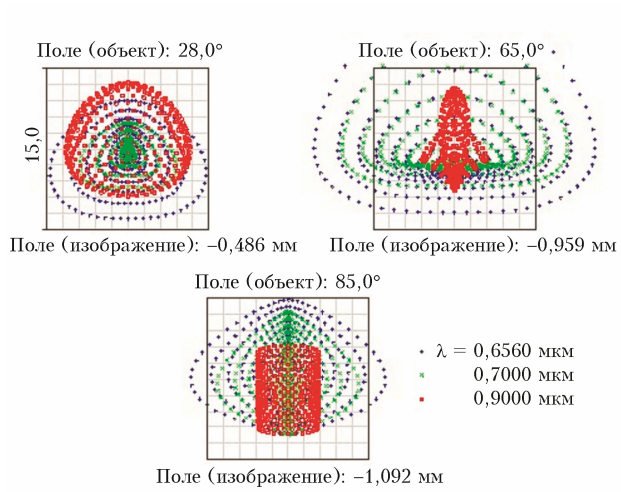
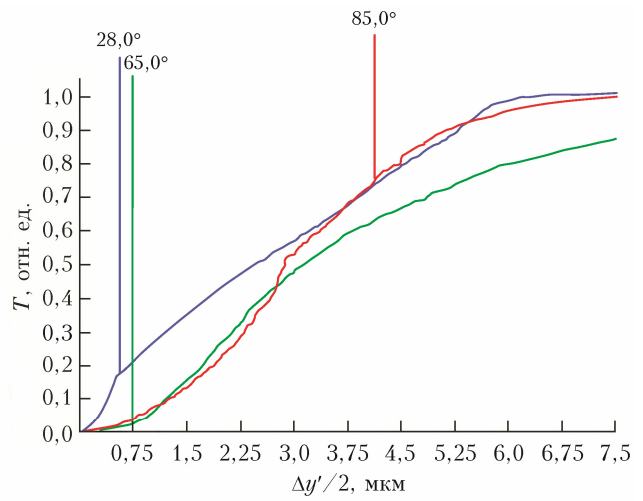


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для видимого диапазона спектра и  $S_{F'} = 3,01$  мм



*a*



*b*

Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для ближнего ИК-диапазона спектра и  $S_{F'} = 3,09$  мм