

УДК 535.317

Камера коротковолнового инфракрасного диапазона для промышленной инспекции

Барашкина Дарья Владимировна^(*)

barashkinadv@student.bmstu.ru

Пясецкий Вячеслав Борисович

piasetsky@bmstu.ru

SPIN-код: 3970-6110

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе представлена разработка камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR) для применения в системах промышленного контроля на базе технологий дополненной реальности. Проведен синтез 6-линзового объектива с коррекцией аберраций в диапазоне длин волн 0,9–1,7 мкм с рабочим угловым полем 20°, длиной 33,2 мм и диаметром входного зрачка 9,6 мм. Приведены результаты анализа качества изображения, а именно: модуляционная передаточная функция, графики кривизны поля и дисторсии, волновых аберраций и функция концентрации энергии в пятне рассеяния. Описана интеграция разработанной SWIR-камеры с носимой AR-гарнитурой, включая интерфейсы передачи данных и волноводную оптику с дифракционными элементами. Рассмотрена работа камеры в составе инфракрасного визира, дополнительно включающего в себя длинноволновый (LWIR) канал, часто используемый в носимых AR-гарнитурах для промышленного контроля.

Ключевые слова: коротковолновый инфракрасный диапазон, длинноволновый инфракрасный диапазон, тепловизор, комплексирование изображений, промышленный контроль, дополненная реальность

Short-wave infrared camera for industrial inspection

Barashkina Dar'ya Vladimirovna^(*)

barashkinadv@student.bmstu.ru

Pyasetskiy Vyacheslav Borisovich

piasetsky@bmstu.ru

SPIN-code: 3970-6110

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This paper presents a developed short-wave infrared (SWIR) camera designed for industrial inspection applications utilizing augmented reality technologies. A synthesis of a 6-lens objective with aberration correction in the wavelength range of 0.9–1.7 μm with an operating angular field of 20°, a length of 33.2 mm and an entrance pupil diameter of 9.6 mm is carried out. Image quality analysis results are provided, namely modulation transfer function, field curvature and distortion, wave aberration graphs, and encircled energy function. The integration of the developed SWIR camera with a wearable AR headset is described, including data transmission interfaces and waveguide optics with diffractive optical elements. The operation of the camera as part of an infrared sight, additionally including a long-wavelength (LWIR) channel, often used in wearable AR headsets for industrial control, is considered.

Keywords: short-wave infrared, long-wave infrared, thermal camera, image fusion, industrial inspection, augmented reality

Введение. Сегодня камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (short-wave infrared), или SWIR-камеры, работающие в диапазоне длин волн ориентировочно от 0,9 до 1,7 мкм, находят применение в самых разных областях: от систем ночного видения до неразрушающего контроля и экспертизы произведений искусства [1]. SWIR-камеры способны «видеть» сквозь туман, дымку, пыль и тонированное стекло [1, 2]. Для формирования детализированного изображения им достаточно даже слабой инфракрасной подсветки, поскольку матрицы таких камер обладают высокой чувствительностью в рабочем диапазоне [2]. С помощью излучения SWIR-диапазона можно видеть сквозь материалы, поглощающие видимый свет, включая экспертизу банкнот и художественных полотен. SWIR-камерами можно также контролировать кремниевые подложки для солнечных батарей, так как максимум фотолюминесценции кремния приходится на 1150 нм и хорошо улавливается матрицей на основе арсенида индия-галлия (InGaAs), из которых чаще всего изготавливаются сенсоры для SWIR-излучения. К тому же кремний непрозрачен на данной длине волны, что позволяет контролировать качество кремниевых микрочипов. Спектральный SWIR-анализ также используется для сортировки пластика и структурного анализа веществ [2].

В отличие от классических тепловизионных приборов, приборы SWIR-диапазона регистрируют не собственное тепловое излучение объектов, а отражаемое ими излучение внешних источников, что обеспечивает широкий динамический диапазон, необходимый для формирования качественных изображений [3].

Сочетание SWIR-визуализации и дополненной реальности (AR) открывает уникальные возможности, особенно в промышленных сферах, где требуется видеть «невидимое», позволяя оценивать состояние труднодоступных узлов, выявлять скрытые дефекты и контролировать качество изделий [4]. На данный момент только одно коммерчески доступное AR-устройство (RealWear Navigator 520) имеет в своем составе тепловизионный модуль.

Целью данной работы является разработка компактной SWIR-камеры, пригодной для интеграции с носимыми AR-системами промышленного контроля, такими как RealWear, Vuzix и др., и исследование ее основных характеристик.

Материалы и методы. Для разработки камеры был использован компактный сенсор IMX990-AABJ-C фирмы «Sony» с разрешением 1280×1024 пикселей, размером пикселя 5×5 мкм. Габариты детектора — 20×16,8 мм, размер сенсора — 1/2".

Объектив синтезировался по методике Русинова [5]. Сначала оптимизировался базовый компонент — склейка, корригирующая сферическую абберацию и кому, а затем вводились дополнительные компоненты для исправления других видов aberrаций.

Синтез объектива на первом этапе (без ахроматизации) производился для основной длины волны — 1,3 мкм и при небольшом угловом поле — около двух градусов. Далее диапазон длин волн расширялся — от 0,9 мкм до 1,7 мкм с шагом 0,1 мкм (этап ахроматизации). По мере оптимизации параметров объектива (радиусов, толщин линз и воздушных промежутков) угловое поле развивалось с 2 до 10 градусов по вертикали.

Результаты. В ходе данной работы был разработан 6-линзовый объектив, работающий в диапазоне длин волн от 0,9 до 1,7 мкм. Из-за малой диагонали фоточувствительной области приемника (8,2 мм) объектив имеет сравнительно небольшое фокусное расстояние — 23,3 мм. Диаметр входного зрачка — 9,6 мм. Угловое поле — 20°.

Оптическая схема разработанного объектива приведена на рис. 1. Материалы линз (по ходу луча): флюорит (CaF_2), БФ21, ЛФ9, ТФ3, СТК8, К8. Флюорит имеет очень низкий коэффициент дисперсии (число Аббе), что позволяет уменьшить хроматические aberrации и улучшить качество изображения.

Габариты оптической системы: 33,2 мм (длина), 11,224 мм (высота). Масса всех линз — около 6 г.

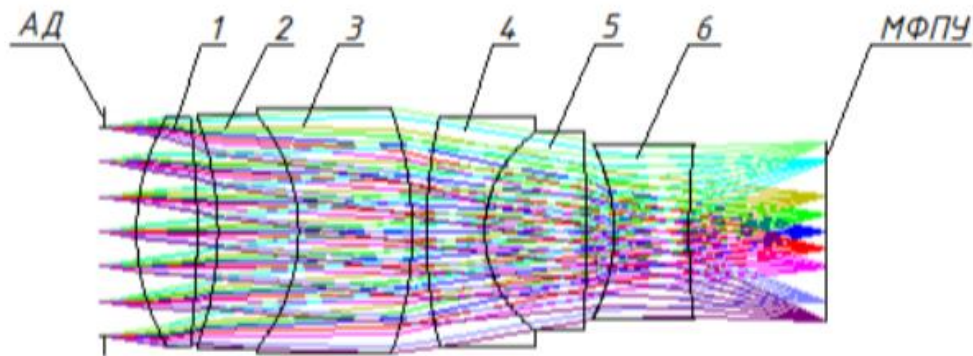


Рис. 1. Схема SWIR-объектива:

1–6 — линзы; АД — апертурная диафрагма; МФПУ — матричное фотоприемное устройство

Модуляционная передаточная функция (функция передачи контраста) для объективов с хорошим качеством должна передавать контраст, равный $K = 0,3$ для максимальной пространственной частоты, которая определяется как $\nu_{\max} = \frac{1}{2a_3}$, где a_3 — размер фоточувствительного элемента. Следовательно, максимальная пространственная частота:

$$\nu_{\max} = \frac{1}{2a_3} = \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ лин/мм.}$$

График модуляционной передаточной функции объектива приведен на рис. 2. Как можно заметить, для данной пространственной частоты присутствует определенный запас по контрасту.

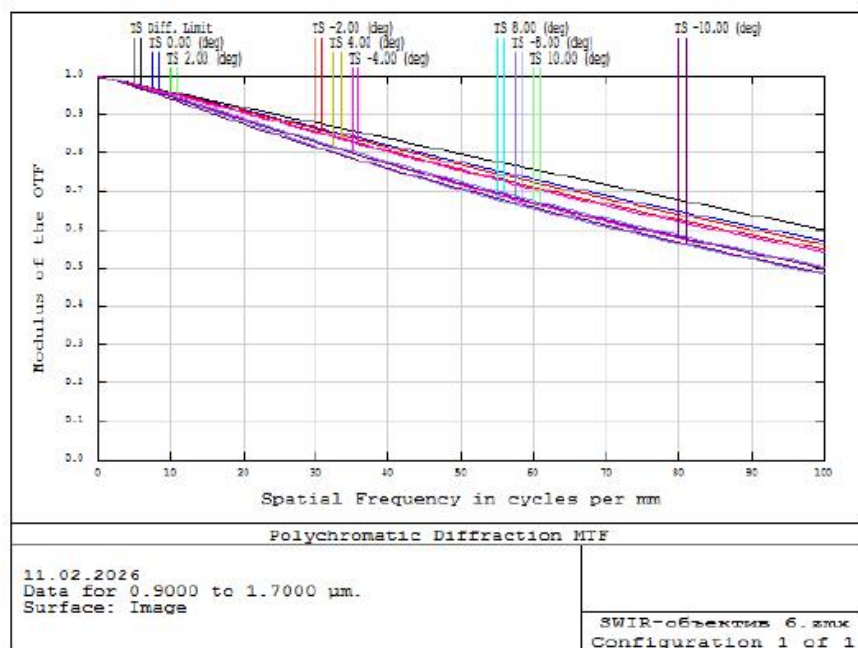


Рис. 2. Модуляционная передаточная функция SWIR-объектива

Графики основных aberrаций полученного объектива представлены на рис. 3. Дисторсия для основной длины волны не превышает 0,35 %, волновые aberrации — не более 0,6 длины волны. Более 50 % энергии сконцентрировано в кружке радиусом 2,5 мкм.

Принцип взаимодействия данной камеры и AR-гарнитуры следующий: сигнал от SWIR-камеры идет по интерфейсу, например MIPI CSI-2 (если камера непосредственно встроена в носимое устройство), в процессор AR-очков, где происходит коррекция неоднородности пикселей, масштабирование под дисплей, наложение AR-интерфейса, и далее изображение отправляется на микродисплей по высокоскоростному последовательному интерфейсу (обычно для подключения дисплеев к мобильным процессорам используют MIPI DSI). После чего поступает в поле зрения оператора с помощью оптической системы с частично прозрачным оптическим элементом (комбинер, волновод, призма, компонент свободной формы и т. п.) [6] или непрозрачного окуляра [4]. В случае крепления камеры на шлеме потребуется кабель USB 3.0/USB-C или беспроводная передача по Wi-Fi на AR-очки.

Аналогичным образом будет работать инфракрасный визир, использующий совмещение изображений в двух областях спектра: SWIR и LWIR. Функциональная схема прибора приведена на рис. 4.

Обсуждение. Продемонстрирована разработка компактного объектива для SWIR-камеры и возможность ее интеграции с системой дополненной реальности. Разработанная SWIR-камера может быть применима в носимых AR-гарнитурах для детального промышленного осмотра трубопроводов с небольшого расстояния (1...3 м), а также интегральных микросхем. Благодаря малому размеру пикселя обеспечивается высокая точность количественных измерений.

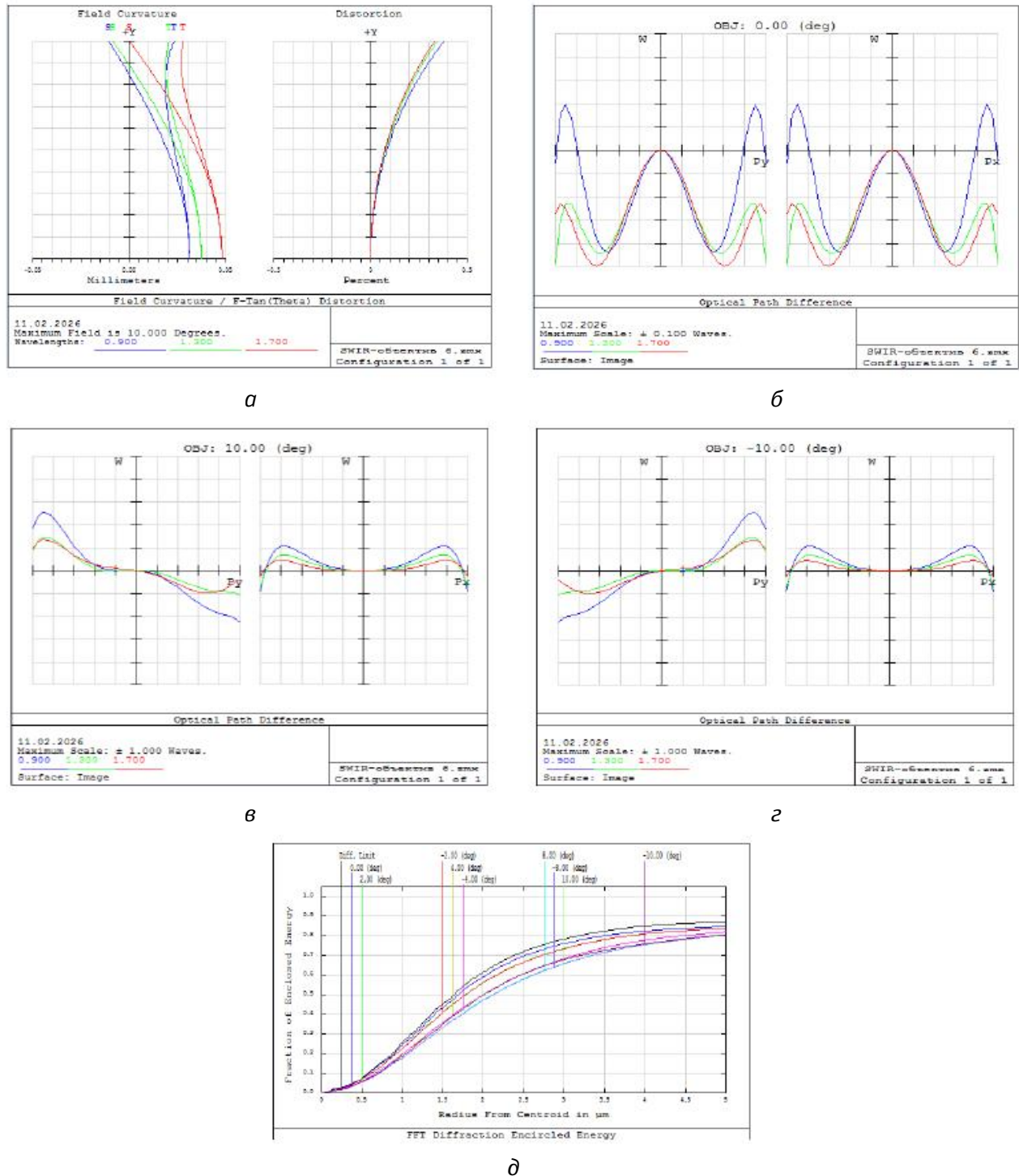


Рис. 3. а — графики кривизны поля и дисторсии; б — графики волновых aberrаций ($\omega = 0^\circ$); в — графики волновых aberrаций ($\omega = 10^\circ$); z — графики волновых aberrаций ($\omega = -10^\circ$); д — график функции концентрации энергии в пятне рассеяния

Предложенная камера может использоваться как независимо, так и в паре с LWIR-тепловизором. Изображение во втором случае будет содержать данные с двух каналов: LWIR и SWIR. Как итог, комплексированное изображение обладает большей информативностью, чем любое из исходных изображений [7]. Например, LWIR-канал показывает температурные аномалии,

а SWIR-канал — коррозию под изоляцией. Для достижения наилучшего результата комплексирования угловые поля SWIR- и LWIR-тепловизоров должны быть сопоставимы.



Рис. 4. Функциональная схема инфракрасного двухдиапазонного визира

Заключение. SWIR-визуализация в дополненной реальности — это мощный инструмент для профессиональных отраслей. Она расширяет человеческое зрение, позволяя видеть информацию о составе, состоянии и скрытых свойствах объектов, интегрируя эти данные непосредственно через AR-интерфейс.

Список источников

- [1] Что увидит SWIR. URL: <https://rostec.ru/media/news/chto-uvidit-swir/#start> (дата обращения 12.02.2026).
- [2] SWIR-камеры. URL: <https://lasercomponents.ru/blog/swir-kamery/> (дата обращения 12.02.2026).
- [3] Хацевич Т.Н., Мордвин Н.Н., Дружкин Е.В. *Объектив для SWIR диапазона спектра*. Патент № 2675195 С1 РФ, 2018, бюл. № 35.
- [4] Solomashenko A., Afanaseva O., Shishova M., Gulianskii I. A systematic review of assisted reality applications in manufacturing. *Virtual Reality*, 2025, vol. 30, no. 32, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10055-025-01281-3>
- [5] Русинов М.М. *Композиция оптических систем*. Ленинград, Машиностроение, 1989, с. 216–217.
- [6] Solomashenko A., Afanaseva O., Shishova M., Gulianskii I., Sobolnikov S., Petrov N. Industrial applications of AR headsets: a review of the devices and experience. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, vol. 6, no. 2, pp. 358–387. <https://doi.org/10.37188/lam.2025.023>
- [7] Васильев А.С., Тимофеев А.Н., Васильева А.В., Ряпосов С.А. Критерии оценки качества процесса комплексирования изображений в многоспектральных оптико-электронных системах. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2017, №7, с. 647–653.