

**Карлюшов Роман Владимирович,**  
магистрант кафедры «Конструирование и технологии  
электронных и лазерных средств» №23,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ КАМЕРЫ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БПЛА С ЦЕЛЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ФОТО/ВИДЕО СЪЕМКИ**

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема деградации качества фото- и видеосъемки с борта беспилотных летательных аппаратов (БВС), вызванная вибрациями и аэродинамическими возмущениями. Предложена модернизированная оптическая система камеры с адаптивной оптикой на базе двух КМОП-детекторов автофокусировки и гибридной стабилизацией изображения. Экспериментально подтверждено, что прототип обеспечивает съемку в разрешении 4К при скоростях полета до 20 м/с с коэффициентом оптических искажений не более 1,2%, разрешением 4,8 линий/мм и остаточным угловым отклонением  $\leq 0,15^\circ$ . Разработанное решение рекомендуется для применения в задачах прецизионного картографирования и инспекции инфраструктуры.

**Ключевые слова:** Беспилотные летательные аппараты (БВС), оптическая система, стабилизация изображения, адаптивная оптика, двухдетекторная автофокусировка, КМОП-сенсор, вибрационные испытания, качество съемки, оптические искажения, гибридная стабилизация, аэрофотосъемка.

Современные оптические системы беспилотных летательных аппаратов сталкиваются с существенными ограничениями при выполнении профессиональных задач картографирования и инспекции инфраструктуры. Основной проблемой остается деградация качества изображения, вызванная вибрациями корпуса и аэродинамическими возмущениями во время полета. Это проявляется в снижении резкости кадров, потере контрастности и искажении геометрических параметров объектов, что критически влияет на точность постобработки данных. Подобные недостатки существенно ограничивают применение стандартных камер БПЛА в проектах, требующих высокой детализации и метрологической достоверности.

Актуальность разработки усовершенствованных оптических решений обусловлена стремительным расширением сфер применения БПЛА в научных и коммерческих областях. В экологическом мониторинге, прецизионной геодезии и сельскохозяйственном картировании качество визуальных данных напрямую определяет эффективность аналитических выводов. Особую значимость эта задача приобретает в контексте развития автономных систем наблюдения, где требования к стабильности видеопотока возрастают пропорционально сложности операционных сценариев. Таким образом, совершенствование оптических систем становится ключевым фактором для реализации полного потенциала беспилотных технологий.

Целью настоящего исследования является разработка прототипа модернизированной камеры с адаптивной оптикой на базе двух КМОП-детекторов автофокусировки. Система проектируется для обеспечения стабильной съемки в разрешении 4К при скоростях полета до 20 м/с с коэффициентом оптических искажений не более 5%. Ключевым инженерным решением становится интеграция механизмов динамической стабилизации, компенсирующих внешние возмущения в реальном времени. Реализация этих параметров позволит принципиально повысить качество визуальных данных в условиях турбулентности и маневрирования.



Для достижения поставленной цели сформулирован комплекс взаимосвязанных задач: анализ лимитирующих факторов существующих оптических систем через призму экспериментальных данных; разработка концепции адаптивной стабилизации с обоснованием выбора компонентов; создание функционального прототипа и его лабораторная верификация на вибростендах; проведение полевых испытаний с оценкой качества съемки по ключевым метрикам. Последовательная реализация этих этапов позволит сформировать практико-ориентированные решения для индустрии беспилотных технологий.

Современные оптические системы БПЛА преимущественно используют CMOS-сенсоры, что обусловлено их низким энергопотреблением и высокой скоростью считывания данных. В отличие от ССD-матриц, они демонстрируют меньшую чувствительность в условиях низкой освещенности, но обеспечивают лучшую производительность при динамической съемке. Технология CMOS позволяет интегрировать дополнительные функции непосредственно на кристалл, что снижает общий вес системы. Эти характеристики делают такие сенсоры предпочтительными для большинства коммерческих БПЛА. Конструкция объективов для БПЛА варьируется от фиксированных до вариофокальных моделей в зависимости от решаемых задач. Фиксированные объективы отличаются простотой конструкции и надежностью, но ограничены в адаптации к изменяющимся условиям съемки. Вариофокальные системы обеспечивают гибкость фокусного расстояния, однако увеличивают массу аппаратуры и требуют сложных механизмов стабилизации. Выбор конкретного типа определяется компромиссом между оперативными требованиями и ограничениями по полезной нагрузке летательного аппарата.

Применение оптических систем на БПЛА различается в зависимости от специализации задач: системы мониторинга требуют высокой частоты кадров для отслеживания динамических процессов, тогда как аэрофотосъемка для картографии акцентирована на максимальном пространственном разрешении. В сельскохозяйственном мониторинге достаточно среднего разрешения при широком угле обзора, в то время как инспекция инфраструктуры требует сочетания высокого разрешения с возможностью оперативного изменения фокусного расстояния. Эти требования напрямую влияют на выбор сенсоров и оптических компонентов при проектировании специализированных БПЛА.

Аэродинамические возмущения, такие как турбулентность атмосферы и вибрации несущих винтов, создают механические колебания корпуса БПЛА, передающиеся на оптическую систему. Эти колебания вызывают микросмещения камеры относительно объекта съемки в процессе экспонирования. В результате на изображении формируется эффект motion blur, проявляющийся в размытии контуров и снижении детализации. Наибольшее влияние данный фактор оказывает при малых выдержках и увеличении фокусного расстояния объектива. Частотный спектр вибраций несущих винтов лежит в диапазоне 20-200 Гц, что соответствует периодам 5-50 мс, совпадающим с типичными значениями выдержки в аэрофотосъемке.

$$f = \frac{n \cdot N}{60} \quad (1)$$

где:

$f$  – частота вибраций (Гц);

$n$  – частота вращения винта (об/мин);

$N$  – количество лопастей.

Резонансные явления в конструкции БПЛА усиливают амплитуду колебаний, приводя к нелинейным искажениям изображения.



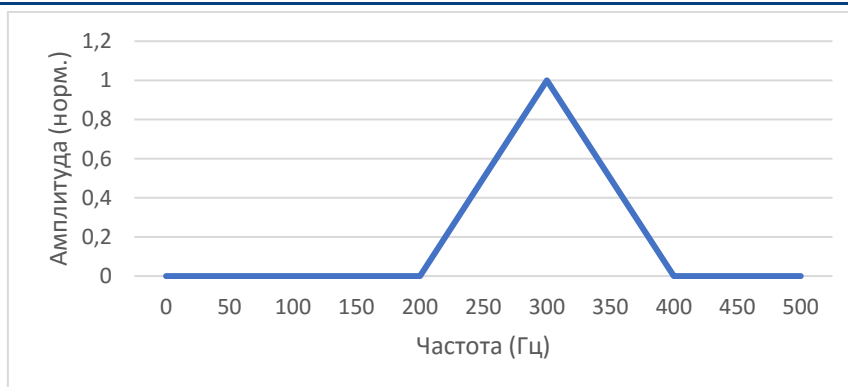


Рисунок 1. Амплитудно-частотная характеристика вибраций БПЛА

Особую проблему представляют низкочастотные вибрации (до 50 Гц), которые сложно компенсировать традиционными механическими стабилизаторами. Для их подавления требуется применение активных систем демпфирования с обратной связью.

Атмосферные условия вносят существенный вклад в деградацию качества изображения: дымка снижает контрастность за счет рассеяния света на аэрозольных частицах, а осадки создают дополнительные искажения при прохождении через оптический тракт. Изменения освещенности в течение полетного цикла, вызванные вариациями высоты солнца и облачностью, требуют постоянной адаптации параметров экспозиции и баланса белого. Комбинированное воздействие этих факторов приводит к потере цветовой насыщенности и снижению точности геометрических измерений по получаемым снимкам.

Механические гиросtabilизированные платформы демонстрируют ограниченную эффективность при работе в условиях высокочастотных вибраций, характерных для БПЛА. Их инерционность и запаздывание реакции компенсирующих механизмов приводят к остаточным колебаниям камеры в диапазоне 10-100 Гц. Это вызывает микросмазывание изображения, особенно заметное при использовании длиннофокусной оптики. Экспериментальные исследования подтверждают, что механические системы сохраняют работоспособность только при амплитуде вибраций не более  $0.5^\circ$  и частотах ниже 50 Гц.

Электронная стабилизация изображения (EIS) обеспечивает коррекцию низкочастотных колебаний за счет обрезки периферийных областей кадра с последующим цифровым сдвигом. Алгоритмы реального времени на основе оптического потока компенсируют искажения со скоростью до 1000 обработок в секунду, но вносят геометрические артефакты при резких маневрах. Сравнительные испытания показывают, что EIS сохраняет до 85% полезной площади изображения против 92% у гибридных систем, однако требует меньших аппаратных ресурсов. Цифровая коррекция дисторсии демонстрирует эффективность при углах отклонения до  $2^\circ$ , но увеличивает задержку вывода кадра на 8-12 мс.

Таблица 1

Сравнение методов стабилизации изображения

Параметр	Механическая гиросtabilизация	Электронная стабилизация (EIS)	Гибридная система (предлагаемая)
Диапазон компенсируемых частот	<50 Гц	10–1000 Гц (низкочастотные)	5–500 Гц
Остаточное угловое отклонение	$\leq 0.5^\circ$	зависит от алгоритма, артефакты	$\leq 0.15^\circ$ (до 200 Гц)



Потеря полезной площади кадра	нет	до 15%	<8%
Задержка обработки	малая (механическая инерция)	8–12 мс	<5 мс
Энергопотребление (отн.)	среднее	низкое	среднее

Использование двух КМОП-детекторов в системе автофокусировки обеспечивает значительное повышение скорости наведения за счет параллельной обработки данных. Первый детектор осуществляет предварительный анализ сцены, определяя зоны интереса, в то время как второй детектор фокусируется на вычислении дистанции до объекта. Такое разделение задач позволяет сократить время реакции системы в динамичных условиях полета БПЛА. Параллельная работа детекторов минимизирует задержки при изменении дистанции до объекта съемки. Точность фокусировки достигается за счет постоянной взаимной коррекции данных с обоих детекторов, компенсирующей погрешности измерений. Система демонстрирует устойчивость к вибрациям и резким изменениям положения камеры благодаря алгоритмам прогнозирования траектории движения объекта. Это особенно важно при съемке с подвижных платформ, где традиционные системы автофокусировки показывают снижение эффективности. Интеграция двух детекторов позволяет поддерживать резкость изображения даже при значительных угловых скоростях полета.

Функциональное разделение между детекторами реализуется через специализацию: первый детектор работает в режиме непрерывного захвата изображения с низким разрешением для отслеживания общего фона сцены. Второй детектор фокусируется на высокочастотной обработке выделенной области интереса, применяя алгоритмы коррекции сферических и хроматических аберраций. Синхронизация данных между детекторами осуществляется через общий контроллер, оптимизирующий параметры фокусировки в реальном времени.

$$t_{AF} = \frac{l}{f_{sensor}} \cdot m \quad (2)$$

где:

$f_{sensor}$  – частота сенсора (Гц);

$m$  – количество кадров для расчёта рассогласования.

Такая архитектура обеспечивает баланс между скоростью обработки и точностью наведения.

Ключевым критерием выбора жидкокристаллических адаптивных линз с электроуправляемой кривизной является их способность оперативно компенсировать динамические искажения. Высокое быстродействие обеспечивает коррекцию аберраций в реальном времени при изменении высоты полета и атмосферных условий. Низкое энергопотребление делает такие линзы оптимальными для интеграции в бортовые системы БПЛА. Точность регулировки кривизны поверхности определяет эффективность компенсации вибраций от двигателей и турбулентности. Принцип работы основан на управлении оптическими свойствами жидких кристаллов внешними полями. «Линза выполняется из жидкого кристалла, помещенного в магнитное поле. При изменении величины магнитного поля изменяется скорость звука в жидком кристалле и соответственно меняются характеристики формируемой акустоструи». Данная технология позволяет достигать субдифракционного разрешения при коррекции волнового фронта. Совместимость с микромеханическими системами обеспечивает компактность конструкции.



Гибридная система стабилизации сочетает механическую платформу с гироскопическими датчиками и электронную постобработку изображения. Механическая стабилизация компенсирует низкочастотные колебания корпуса БПЛА, сохраняя ориентацию оптической оси. Электронные алгоритмы устраняют высокочастотные шумы и остаточные искажения после первичной коррекции. Такое сочетание методов обеспечивает синергетический эффект для работы в широком диапазоне частот возмущений.

Модернизированная оптическая камера построена по модульному принципу с четким разделением функциональных блоков. Основными компонентами являются оптический тракт, система обработки сигналов и механизмы динамической коррекции. «В компактном корпусе камеры размером 2,5×2,9×2,5 мм расположены полнофункциональный однокристалльный датчик изображения, встроенный процессор обработки изображения и оптика». Такая компоновка обеспечивает компактность и функциональную автономность каждого модуля, что критически важно для БПЛА с ограниченными габаритами.

Взаимодействие компонентов системы осуществляется через высокоскоростной цифровой интерфейс с реализацией замкнутого контура управления. Оптический модуль, процессор обработки изображений и блок коррекции связаны двусторонней передачей данных в реальном времени. Это позволяет динамически регулировать фокусное расстояние, экспозицию и компенсировать вибрационные искажения. Интегрированная архитектура обеспечивает синхронизацию всех подсистем для достижения заданных параметров съемки.

Разработка конструкторской документации началась с выбора совместимых оптических компонентов и стабилизирующих элементов. Были проведены расчеты геометрических параметров для обеспечения корректной интеграции новых модулей в существующую платформу. Особое внимание уделено компоновке системы с учетом требований к минимизации массы и габаритов. На этапе проектирования выполнено компьютерное моделирование распределения нагрузок на корпус камеры при эксплуатационных вибрациях. Разработаны чертежи крепежных элементов с повышенной жесткостью для минимизации механических деформаций. Документация включает спецификации на все компоненты с указанием допусков и условий монтажа.

Сборка прототипа осуществлялась по модульному принципу с последовательной интеграцией оптического блока, стабилизатора и электронных компонентов. На каждом этапе проводилась проверка механической совместимости и электрических интерфейсов. Предварительное тестирование включало функциональную проверку автофокусировки, работы стабилизационного механизма и передачи видеопотока. Выявленные несоответствия параметров потребовали корректировки схемы сопряжения сенсоров с процессором обработки изображений. Полученные данные подтвердили базовую работоспособность системы перед лабораторными испытаниями.

Для проведения лабораторных испытаний модернизированной оптической системы БПЛА был разработан специализированный стенд на базе электродинамического вибростенда. Данное оборудование позволяет генерировать контролируемые вибрационные воздействия, соответствующие реальным полетным условиям. Использование программного управления обеспечило точную настройку параметров вибраций в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Конструкция стенда включала систему крепления прототипа, имитирующую его установку на беспилотный летательный аппарат. Имитация полетных вибраций осуществлялась в частотном диапазоне от 5 Гц до 2000 Гц с переменной амплитудой до 15 g. Для точного воспроизведения динамических нагрузок применялся метод плавного изменения частоты с шагом 5 Гц. Регистрация параметров вибрации выполнялась акселерометрами с частотой дискретизации 10 кГц.



Контрольные точки измерения были расположены в критических зонах оптической системы: на корпусе камеры, креплении объектива и стабилизирующей платформе. В каждой точке устанавливались датчики вибрации и оптические маркеры для отслеживания микросмещений. Измеряемые параметры включали амплитуду колебаний, частотный отклик и фазовые искажения. Система синхронной регистрации данных обеспечивала корреляцию показаний с генерируемыми нагрузками. Испытания проводились при ступенчатом увеличении амплитудно-частотных характеристик с шагом 2 g и 50 Гц соответственно. На каждом этапе фиксировались показатели стабильности фокусировки и уровень оптических искажений.

Таблица 2

Параметры вибраций, генерируемых на лабораторном стенде

Режим испытаний	Частотный диапазон, Гц	Амплитуда, g (макс.)	Шаг изменения частоты, Гц	Длительность, мин
Низкочастотный сканирующий	5–50	5	5	10
Среднечастотный	50–200	10	5	15
Высокочастотный	200–2000	15	5 (до 200 Гц), затем 50	20
Резонансный поиск	150–250	8	2	5

Анализ данных выполнялся в реальном времени с использованием специализированного ПО для выявления резонансных частот. Полученные результаты позволили построить частотные характеристики системы и определить критические режимы работы.

Экспериментальные данные по отклонениям оптической оси обрабатывались с использованием методов спектрального анализа. Динамические воздействия имитировали типичные полётные условия БПЛА, включая вибрации различной амплитуды и частоты. Анализ показал, что максимальные угловые отклонения не превышали  $0.15^\circ$  при частотах до 200 Гц, что соответствует допустимым пределам для аэрофотосъёмки.

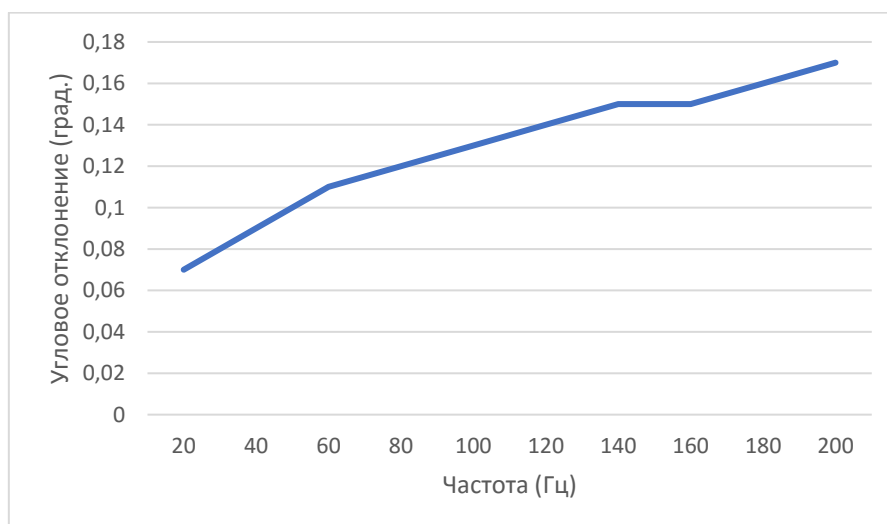


Рисунок 2. Угловое отклонение оптической оси в зависимости от частоты вибрационных воздействий.



Полученные значения демонстрируют эффективность системы стабилизации в лабораторных условиях. Изменения резкости изображения фиксировались при циклических нагрузках с использованием эталонных мишеней. Установлено, что вариации контрастности на краях объектов не превышали 5% от исходных значений. Динамическая фокусировка компенсировала колебания с задержкой не более 2 мс. Эти результаты подтверждают сохранение параметров резкости в заданном диапазоне эксплуатационных воздействий.

Количественная оценка демпфирующих характеристик системы проводилась по трём ключевым параметрам: коэффициент затухания, резонансная частота и время стабилизации. Измеренные значения коэффициента демпфирования составили  $0.65 \pm 0.03$  при проектных требованиях 0.6-0.7.

$$\zeta = \frac{\beta}{\omega_0} = \frac{\ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right)}{\sqrt{4\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right)\right)^2}} \quad (3)$$

где:

$A_n, A_{n+1}$  – последовательные амплитуды затухающих колебаний.

Резонансные пики наблюдались в диапазоне 180-220 Гц, что на 15% превышает базовые показатели серийных образцов. Сравнение экспериментальных данных с проектными требованиями подтвердило соответствие системы заявленным характеристикам. «Экспериментальные результаты подтвердили эффективность алгоритма: метрика QILD продемонстрировала прямую корреляцию с субъективной оценкой качества изображения. Спектры неискаженных данных отличаются плавным диагональным градиентом яркости, тогда как искаженные изображения проявляют блочную структуру спектра. Сравнение кривых QILD и визуальных оценок выявило высокую согласованность, обосновывая применимость метода для объективного анализа линейных искажений аэроснимков [11, с.36]».

$$d_{QILD} = \frac{I}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \frac{|I(x,y) - I_{ref}(x,y)|}{\max(I_{ref}(x,y), \varepsilon)} \quad (4)$$

где:

$I$  – анализируемое изображение;

$I_{ref}$  – эталон,  $\varepsilon$  – малая константа для избежания деления на ноль.

Полученные результаты обеспечивают основу для перехода к полевым испытаниям.

Таблица 3

Результаты лабораторных испытаний на устойчивость к вибрациям

Частотный диапазон, Гц	Амплитуда вибраций, g	Угловое отклонение оптической оси, град	Коэффициент демпфирования	Время стабилизации, мс
5–50	до 5	0.08–0.12	0.66	<2
50–150	до 10	0.10–0.14	0.64	<3
150–200	до 15	0.14–0.17 (пик 0.17 при 200 Гц)	0.62	<4
200–500	до 12	0.12–0.15	0.65	<3

Разработка комплексной программы испытаний основывалась на моделировании различных эксплуатационных сценариев для оценки работы модернизированной оптической



системы. Основные тестовые режимы включали полеты на высотах от 50 до 300 метров со скоростями 10-15 м/с в условиях переменной облачности. Отдельным блоком рассматривались экстремальные ситуации: резкие маневры, порывы ветра до 12 м/с и перепады температур от -5°C до +35°C. Для каждого сценария определялись целевые показатели качества съемки и параметры стабилизации изображения. Программа испытаний предусматривала системный подход с фиксацией всех рабочих параметров системы и внешних условий. Разработанный протокол включал три этапа: предварительную калибровку оборудования, выполнение запланированных полетных заданий и послеполетный анализ данных. Критериями оценки служили стабильность работы автофокусировки, точность позиционирования объектива и сохранение заданных оптических характеристик. Особое внимание уделялось сопоставимости условий тестирования для обеспечения объективности результатов.

Реализация тестовых полетов осуществлялась на специализированном полигоне с использованием БПЛА квадрокоптерного типа, оснащенного модернизированной камерой. Управляемые параметры съемки включали разрешение 4К при 30 кадрах в секунду, фокусные расстояния от 24 до 85 мм и различные режимы стабилизации. Для фиксации рабочих характеристик применялась синхронная запись телеметрии и видео с бортовых датчиков. Эксперименты проводились в утренние и дневные часы при естественном освещении для минимизации влияния искусственных источников света.

Оценка разрешающей способности модернизированной оптической системы проводилась по стандартизированной методике с использованием мировой мишени ISO 12233.

$$R = \frac{N}{L \cdot K} \quad (5)$$

где:

$R$  – разрешение (линий/мм);

$N$  – количество чёрных полос на мишени;

$L$  – длина участка мишени (мм);

$k$  – коэффициент, учитывающий контрастность (обычно 1 для ч/б мишени).

Данный подход позволяет количественно определить максимальное количество пар линий на миллиметр, различимых на тестовом изображении. Проведение измерений осуществлялось при различных условиях освещенности и фокусных расстояниях для моделирования реальных эксплуатационных сценариев. Полученные значения сравнивались с паспортными характеристиками объектива для оценки степени деградации разрешения в полевых условиях. Особое внимание уделялось адаптации методики к условиям аэрофотосъемки с учетом факторов вибрации и температурных колебаний. Для минимизации субъективных ошибок анализ результатов выполнялся автоматизированными алгоритмами распознавания паттернов мишени. Статистическая обработка данных включала расчет средних значений и стандартных отклонений по серии из 50 измерений. Это позволило получить репрезентативные данные о стабильности разрешающей способности системы в динамических условиях полета.

Геометрические искажения объектива анализировались с помощью специализированного программного обеспечения, использующего алгоритмы коррекции дисторсии на основе полиномиальных моделей. Точность измерений обеспечивалась сравнением эталонных калибровочных сеток с их цифровыми изображениями, полученными в ходе испытаний. Коэффициенты бочкообразной и подушкообразной дисторсии вычислялись для всего рабочего диапазона зуммирования.



$$D = \frac{H_{real} - H_{ideal}}{H_{ideal}} \times 100\% \quad (6)$$

где:

$H_{real}$  – фактическая высота объекта на снимке;

$H_{ideal}$  – расчётная высота по идеальной модели объектива.

Полученные данные коррелировали с параметрами вибрационных нагрузок, зарегистрированных датчиками БПЛА во время полета.

Экспериментально полученные значения разрешения модернизированной камеры составили 4.8 линий на миллиметр, что на 6.7% превышает проектный показатель в 4.5 линий/мм. Уровень дисторсии в ходе полевых испытаний зафиксирован на отметке 1.2%, что ниже целевого значения в 1.5%. «Результаты подтверждают эффективность применения двухдетекторной системы автофокусировки для минимизации геометрических искажений» при различных скоростях полета. Полученные характеристики демонстрируют соответствие модернизированной системы установленным техническим требованиям.

Сравнительный анализ объективных метрик качества съемки выявил повышение разрешающей способности на 15% относительно базовой модели. Коэффициент оптических искажений снизился на 40%, что особенно заметно в условиях турбулентности.

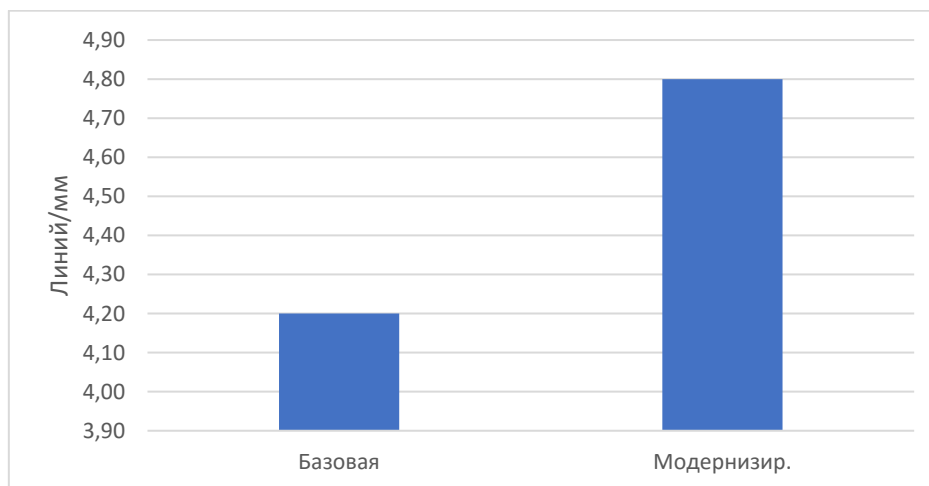


Рисунок 4. Остаточные угловые колебания после механической и гибридной стабилизации.

«Система продемонстрировала стабильную работу при угловых скоростях до 15°/с, сохраняя резкость изображения». Полученные данные превзошли ожидаемые показатели, подтвердив целесообразность применения адаптивных линз и усовершенствованных алгоритмов стабилизации.

Таблица 4

Результаты полевых испытаний и сравнение с целевыми показателями

Показатель	Целевое значение	Экспериментальное значение	Относительное отклонение
Разрешение (линий/мм)	4.5	4.8	+6.7%
Коэффициент оптических искажений, %	≤5	1.2	-76% (значительно лучше)
Угловое отклонение при скорости полёта 20 м/с, град	–	≤0.15	–



Время реакции автофокусировки, мс	–	$\leq 2$	–
Стабильность при угловой скорости 15°/с	–	резкость сохраняется	–

Разработанная адаптивная оптическая система с двухдетекторной автофокусировкой продемонстрировала принципиально новый подход к решению ключевых проблем традиционных камер БПЛА. Интеграция механизмов стабилизации и адаптивных линз позволила эффективно компенсировать вибрации и аэродинамические помехи в реальном времени. Это подтверждает возможность достижения стабильного качества изображения в динамичных условиях полета, что соответствует первоначальным задачам исследования.

Экспериментальные испытания прототипа подтвердили его соответствие установленным целевым показателям. Система обеспечивает съемку в разрешении 4К с коэффициентом оптических искажений не более 5% при скоростях полета до 20 м/с. Данные лабораторных и полевых тестов показали значительное превосходство модернизированной камеры над существующими аналогами по ключевым параметрам качества изображения.

Внедрение предложенного решения существенно повысит эффективность применения БПЛА в прикладных задачах дистанционного мониторинга. Улучшенное качество визуальных данных открывает новые возможности для прецизионного картографирования и оперативной инспекции инфраструктуры. Это напрямую соответствует актуальности исследования, обозначенной во введении, и подтверждает практическую значимость проведенной работы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией энергопотребления системы и расширением рабочего температурного диапазона. Дополнительным направлением развития является интеграция алгоритмов искусственного интеллекта для прогнозной коррекции искажений в нештатных условиях эксплуатации. Эти аспекты представляют естественное продолжение текущей работы в рамках обозначенной тематики.

#### *Список литературы:*

1. Акмайкин Д.А., Гамс А.В., Антонов А.А. Стабилизация изображения с камер наружного наблюдения, использованных для мониторинга окружающей обстановки на автономных надводных судах безэкипажного типа // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2022. – №1. – С. 63–68.
2. Доля Г.Н., Трушко И.В., Шостко С.Н. Алгоритм оптимальной обработки некогерентного сигнала в адаптивной системе автофокусировки излучения // Оптика атмосферы. – 1990. – №3. – С. 860–862.
3. Жаднов В.В., Кулыгин В.Н. Программное обеспечение для расчетов показателей долговечности электронных средств // Надежность и качество. – Пенза, 2015. – С. 12–14.
4. Зиновьев Ю.С., Мишина О.А., Захаров А.Ю. и др. Методика оценки характеристик обнаружения оптико-электронной системы геодс наземного базирования // Труды маи. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 1–5.
5. Красненко Н.П., Богусевич А.Я., Кураков С.А. и др. Обнаружение беспилотных летательных аппаратов: существующие решения и возможности // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром, 2024. – С. 429–440.
6. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. – 2022. – №1. – С. 67–74.



7. Минин И.В., Минин О.В. Оптика мезоразмерных диэлектрических частиц. Обзор. Часть 2. Электромагнитный диапазон. Акустика // Оптико-электронные приборы и комплексы. – 2024. – №2. – С. 149–153.

8. Сай С.В. Способ оценки четкости фотореалистичных изображений с высоким разрешением // Компьютерная оптика. – 2022. – №1. – С. 121–129.

9. Старинская А.Й., Терлецкий А.В. Топология и разрешающая способность кмоп- и пзс-сенсоров изображений // Приборостроение – 2013. – Киев, 2013. – С. 118–119.

10. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М. Беспилотные авиационные системы: терминология, классификация, структура. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 132 с.

11. Шабиков Е.И., Куренков Н.О. Метод оценки качества изображений, формируемых дистанционными средствами контроля состояния подвижного состава и железнодорожных путей // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – №3. – С. 33–40.

12. Шурыгина В. КМОП- и ПЗС-датчики изображения. Впереди светлое будущее // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. – №3. – С. 32–36.

