

УДК 629.787
Код ГРНТИ 55.49.07

doi 10.54708/19926502_2025_29310950

Алгоритмическая компенсация дисторсии объективов оптико-электронных измерительных и навигационных систем с оценкой влияния температуры

Д.С. Монгуш^{1*}, И.Р. Кабиров¹, А.А. Полукаров¹, И.Р. Кабиров²

¹ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия

²Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

Аннотация. Решение задачи компенсации дисторсии объективов цифровых фотокамер направлено на улучшение их измерительных свойств. Использование оптико-электронных систем в качестве прецизионного измерителя навигационных параметров на беспилотных летательных аппаратах требует разработки более совершенных методов учета влияния дисторсии, поскольку известные алгоритмические методы не обеспечивают достижение требуемой субпиксельной точности измерений.

Ключевые слова: система технического зрения, фотокамера, оптические aberrации, дисторсия, испытательный полигон.

*denzin.mongush@mail.ru

Введение

Современные системы технического зрения (СТЗ) находят широкое применение в различных областях, включая экологический мониторинг, управление инфраструктурой, безопасность и навигацию подвижных объектов. Например, такие системы используются для анализа состояния полярных льдов, оценки последствий стихийных бедствий, контроля дорожного движения, наблюдения за водными ресурсами и агропромышленными территориями, а также для проведения аэрофотосъемки и создания картографических данных [1, 2]. Особое значение техническое зрение имеет в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), где точность измерений критически важна для выполнения различного рода задач.

Однако эффективность таких систем ограничена наличием оптических искажений (аберраций), среди которых наибольшее влияние оказывает дисторсия. Дисторсия возникает из-за нелинейности увеличения изображения по мере удаления от центра оптической оси объектива. Это приводит к деформации формы объектов на изображении, что особенно заметно при больших углах между лучами и оптической осью оптической системы. Типичные виды дисторсии – подушкообразная и бочкообразная – иллюстрируют эту проблему (Рис. 1).

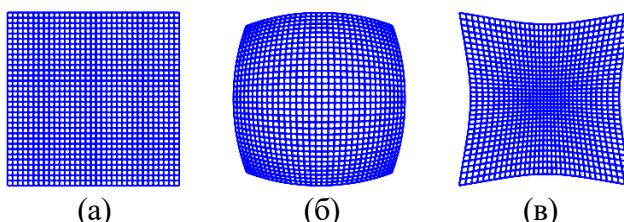


Рисунок 1. Виды дисторсии изображения:

- (а) – неискаженное изображение; (б) – бочкообразная (отрицательная) дисторсия;
(в) – подушкообразная (положительная) дисторсия.

Представленные на рисунке 1 примеры иллюстрируют радиальную дисторсию, обусловленную несовершенством оптической системы, вызванную трудностью изготовления и подбора линз нужной формы. Радиальная дисторсия зависит от расстояния до оптического центра и является центрированной. Наряду с радиальной обнаруживается и тангенциальная

дисторсия, вызванная угловым и линейным смещением фотоматрицы и отдельных линз объектива относительно оптической оси и поэтому являющаяся децентрированной.

Для использования оптико-электронных систем в качестве высокоточных измерителей навигационных параметров необходимо минимизировать влияние дисторсии объектива. Современные методы коррекции дисторсии включают как конструктивные решения (например, использование высокоточных и сложных многолинзовых систем), так и алгоритмические подходы. Однако конструктивные методы часто приводят к значительному удорожанию и утяжелению объективов, что делает их менее доступными для массового применения на БПЛА.

Алгоритмическая компенсация дисторсии представляет собой альтернативный подход, который позволяет корректировать искажения на этапе обработки изображений. Этот метод особенно актуален для систем, работающих в условиях изменяющихся внешних факторов, таких как температура. Температурные колебания могут влиять на материалы объектива и фотоматрицы, изменяя параметры дисторсии. Таким образом, разработка алгоритмов, учитывающих температурные эффекты, становится ключевым направлением повышения точности оптических измерений.

Модель «камера-обскура», традиционно используемая для описания процесса проецирования трехмерного пространства на плоскость фотоматрицы, не позволяет использовать ее для описания получения изображений посредством реальных оптико-электронных систем (ОЭС). Для достижения высокой точности необходимы более сложные модели, учитывающие не только геометрические искажения, но и влияние внешних факторов, таких как температура [3, 4].

В рамках данной статьи рассматриваются современные подходы к алгоритмической компенсации дисторсии, выявляются их недостатки, а также предлагается метод алгоритмической компенсации дисторсии объективов с учетом температурных эффектов для повышения точности измерений в ОЭС для создания более надежных и экономически эффективных СТЗ. Также проведены экспериментальные исследования для оценки работоспособности алгоритма компенсации дисторсии.

Цель работы – повышение измерительной точности ОЭС путем алгоритмической компенсации дисторсии объективов с оценкой влияния температуры на основе данных, полученных при экспозиции испытательного полигона, и вычисления соответствующих коэффициентов для математической модели.

1. Анализ существующих методов алгоритмического исправления дисторсии

Существуют различные методики алгоритмической компенсации дисторсии, которые основаны на использовании математических моделей, описывающих характер искажений при многократном фотоэкспонировании калибровочного шаблона. Традиционно в качестве такого шаблона используется квадратная сетка типа шахматная доска с большим количеством ячеек или шаблон с равномерно распределенными симметрично или ассиметрично кругами [5, 6].

Этот подход требует хранения значительного объема калибровочной информации в постоянном запоминающем устройстве вычислителя и выполнения сложных вычислений. Кроме того, недостатком таких методов можно считать и то, что результат компенсации дисторсии сильно зависит от условий съемки (равномерности освещения калибровочного шаблона и достаточности количества полученных изображений под разными углами и на разном расстоянии), что требует значительных трудозатрат в подготовке к такой калибровке.

Для математического описания дисторсии чаще всего используют полиномы различных видов. Выбор используемого полинома зависит от типа объектива и фокусного расстояния, но все они основаны на описании полиномами интегральной систематической ошибки dx , dy .

Одной из наиболее распространенных моделей дисторсии является модель Брауна-Конради [7]. Она описывает преобразование координат точки на неискаженном изображении (x_u , y_u) в координаты на искаженном изображении (x_d , y_d) следующим образом:

$$\begin{cases} x_d = x_u(1+k_1r^2+k_2r^4+\dots)+(p_2(r^2+2x_u^2)+2p_1x_uy_u)(1+p_3r^2+p_4r^4+\dots) \\ y_d = y_u(1+k_1r^2+k_2r^4+\dots)+(p_1(r^2+2y_u^2)+2p_2x_uy_u)(1+p_3r^2+p_4r^4+\dots) \end{cases}, \quad (1)$$

где $r = \sqrt{(x_u + c_x)^2 + (y_u + c_y)^2}$ — расстояние от оптического центра до точки (x_u, y_u) ; k_i — коэффициенты радиальной дисторсии; p_j — коэффициенты тангенциальной дисторсии.

В библиотеке OpenCV, которая является стандартом для обработки изображений и видео в сфере свободно распространяемого программного обеспечения, используется несколько иная модель дисторсии. Она представлена выражениями:

$$\begin{cases} x = \frac{x_u - c_x}{f_x}, \\ y = \frac{y_u - c_y}{f_y}, \end{cases} \quad \begin{cases} x' = \Delta_r x + \Delta x_t, \\ y' = \Delta_r y + \Delta y_t, \end{cases} \quad \begin{cases} x_d = x' f_x + c_x, \\ y_d = y' f_y + c_y, \end{cases}, \quad (2)$$

где f_x и f_y — функции, учитывающие радиальные и тангенциальные искажения.

Радиальная дисторсия описывается как

$$\Delta_r = \frac{1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6}{1+k_4r^2+k_5r^4+k_6r^6},$$

а тангенциальная дисторсия — как

$$\Delta x_t = p_2(r^2 + 2x^2) + 2p_1xy,$$

$$\Delta y_t = p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy.$$

Отметим, что в OpenCV коэффициенты k_4-k_6 используются не в качестве коэффициентов при высших степенях полинома, а в знаменателе, что позволяет уменьшить вероятность превышения максимально возможного значения переменной при расчете высоких степеней числа r .

Использование OpenCV для устранения этих искажений не всегда обеспечивает достаточную точность. Размеры «исправленных» изображений равных отрезков на изображениях калибровочного шаблона могут иметь разброс порядка 1%.

2. Алгоритм компенсации дисторсии объективов оптико-электронных измерительных и навигационных систем с оценкой влияния температуры

Общим недостатком существующих методик является использование калибровочного шаблона в виде квадратной сетки при том, что оптическая система фотокамеры состоит из линз в форме тел вращения с общей осью, и в идеальном случае дисторсия проявляется преимущественно в виде радиальных смещений. Поэтому калибровочный шаблон (испытательный полигон) в виде концентрических окружностей и радиальных линий лучше соответствует характеру искажений, а полярная система координат оказывается наиболее удобной для описания этих искажений. На основе подобного полигона описан способ алгоритмической компенсации дисторсии объектива, изложенный в патенте на изобретение № 2780055, опубликованном 16.12.2022 г. [8].

Способ заключается в фотографировании посредством исследуемой фотокамеры полигона, узловые точки которого расположены на пересечениях концентрических окружностей ($i = 1, 2, 3\dots8$) и радиальных линий ($j = 0, 1, 2, 3\dots31$) (Рис. 2), считывании декартовых координат центров узловых точек на полученном изображении и преобразовании их в полярные, вычислении с помощью метода наименьших квадратов (МНК) коэффициентов математической модели составляющих дисторсии и последовательном выполнении компенсации дисторсии.

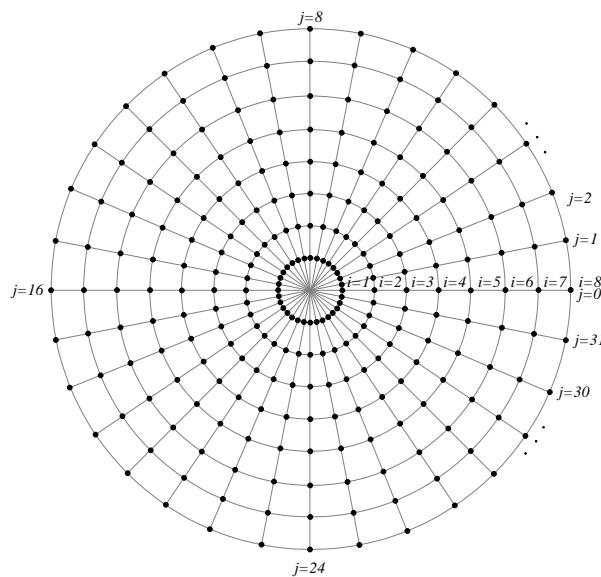


Рисунок 2. Калибровочный шаблон (испытательный полигон) размерностью 8×32.

Численные исследования показали, что радиальные искажения в полярных координатах содержат две составляющие: радиальную круговую и радиальную периодическую. Первая хорошо описывается полиномиальным разложением в степенной ряд, а вторая – в ряд Фурье. Тангенциальные искажения также имеют вид периодических функций.

Таким образом, в полярных координатах дисторсия может быть представлена как

$$\begin{cases} r' = f_1(r) + f_2(\varphi), \\ \varphi' = f_3(\varphi) \end{cases}, \quad (3)$$

где r' – функция, описывающая радиальную дисторсию; φ' – функция, описывающая тангенциальную дисторсию; $f_1(r)$ – степенной ряд, а $f_2(\varphi)$ и $f_3(\varphi)$ – ряды Фурье.

Однако описанный способ не учитывает температурные эффекты. Кроме того, при фотоэкспонировании полигона сложно достичь такого взаимного расположения камеры и полигона, когда полигон образует равнобедренную пирамиду с центром объектива в ее вершине.

Для исправления этих технологических трудностей в методику включены дополнительные процедуры, технологически и методически реализуемые при помощи разработанной для этих целей экспериментальной установки (Рис. 3 (а)), построенной на базе конструкции FDM 3D-принтера, в котором вместо печатающей головы на управляемой подвижной каретке установлена исследуемая фотокамера с регулировочными элементами. Состав экспериментальной установки представлен на Рис. 3 (б). На фотокамеру дополнительно монтируется система тепловой регулировки на основе элементов Пельтье, имеющих общую контактную площадку с корпусом фотокамеры (Рис. 3 (в)). Температура объектива, имеющего в свою очередь тепловой контакт с корпусом фотокамеры, контролировалась по датчику температуры, установленном на боковую поверхность объектива. Для получения равномерно освещенных кадров и уменьшения времени фотоэкспозиции установка оснащается кольцевым светодиодным светильником.

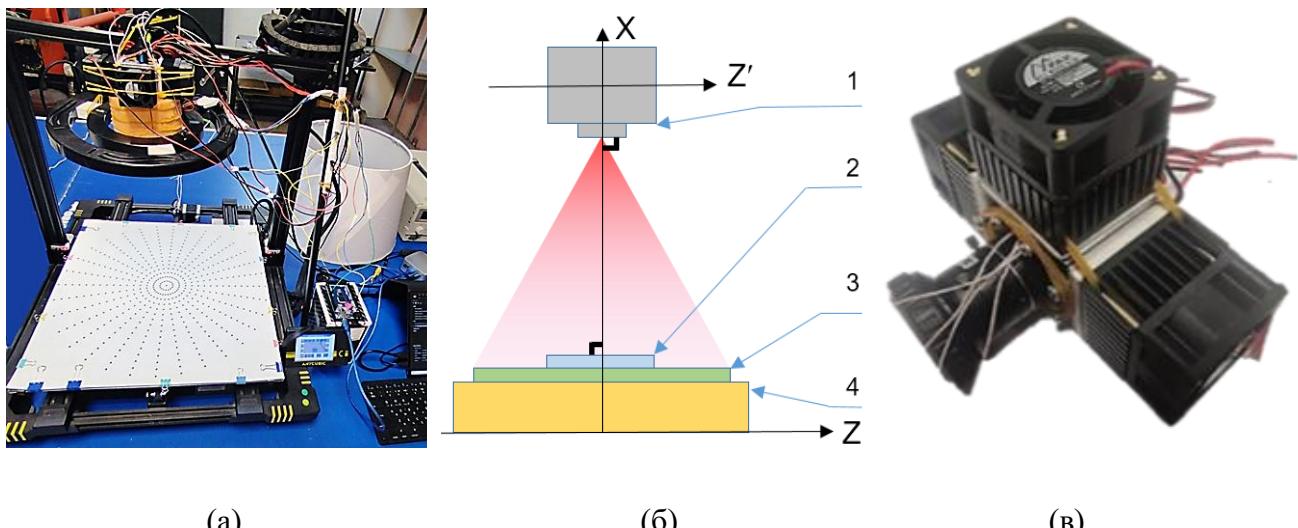


Рисунок 3. Экспериментальная установка:

(а) – экспериментальная установка; (б) – состав экспериментальной установки:
1 – фотокамера с датчиком температуры и системой тепловой регулировки, 2 – зеркало с внешним отражающим покрытием, 3 – калибровочный полигон, 4 – подвижная платформа;
(в) – фотокамера с системой тепловой регулировки и датчиком температуры.

Таким образом, на основе экспериментальной установки была разработана следующая методика для компенсации дисторсии объектива с учетом температурного влияния, которая состоит в следующей последовательности действий:

1. Обеспечивается ортогональность оптической оси объектива фотокамеры и плоскости полигона и выполняется центрирование ее расположения относительно центра полигона.

Для этого центрировано относительно полигона размещается зеркало с внешним отражающим слоем и нанесенным на него перекрестием. Оптическая ось объектива будет перпендикулярна полигону, если совпадают оба перекрестья (нанесенное на зеркало и наложенное программным способом на центр изображения), а их центры совпадают с центром изображения отражения входного зрачка объектива (Рис. 4).

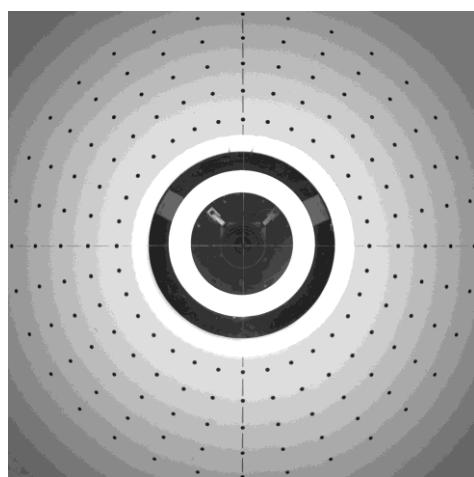


Рисунок 4. Обеспечение перпендикулярности оптической оси объектива плоскости полигона.

2. Производится стократная фотоэкспозиция испытательного полигона с использованием исследуемой фотокамеры. Количество выполненных фотоэкспозиций обусловлено необходимостью исключения влияния случайных шумов фотоматрицы.

3. С помощью программы обработки изображения распознаются и нумеруются изображения узловых точек полигона (Рис. 5), считываются их координаты, которые представляются в виде двух матриц $(x_{ij})_{8 \times 32}$ и $(y_{ij})_{8 \times 32}$.

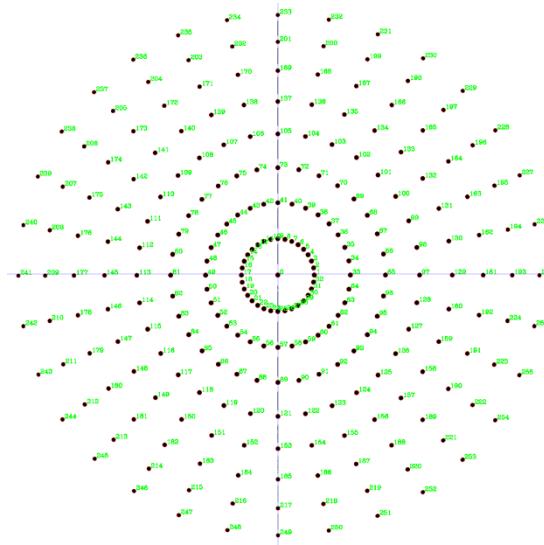


Рисунок 5. Распознанные узловые точки полигона.

4. Посредством преобразования декартовых координат изображения обеспечивается точное совпадение центра фотоматрицы с центром изображения полигона в соответствии с выражениями

$$\begin{cases} x''_{ij} = x'''_{ij} - x_{00}, \\ y''_{ij} = y'''_{ij} - y_{00}, \end{cases} \quad (4)$$

где x_{00} , y_{00} – координаты центра изображения полигона, x''_{ij} , y''_{ij} – первичные координаты узлов полигона.

5. Осуществляется переход от декартовых координат изображений узлов испытательного полигона на фотоматрице к координатам в полярной с помощью выражений

$$r'''_{ij} = \sqrt{x'''_{ij}^2 + y'''_{ij}^2}, \quad \varphi'''_{ij} = \text{angle}(x'''_{ij}, y'''_{ij}), \quad (5)$$

где r'''_{ij} – полярный радиус координат изображения узла с номером, φ'''_{ij} – полярный угол изображения узла.

6. Выполняется малый поворот изображения полигона в соответствии с соотношениями $\varphi'_{ij} = \varphi'''_{ij} - \frac{1}{8} \sum_{i=0}^7 \varphi'''_{i0}$ и $r'_{ij} = r''_{ij}$, позволяющий совместить нулевую строку фотоматрицы с изображением горизонтальной оси полигона. При этом использование среднего значения полярных углов для узлов этой оси полигона позволяет уменьшить влияние как погрешностей обработки изображения полигона, так и погрешностей его изготовления.

Экспериментальное исследование изображений полигона показало, что имеют место три характерных вида искажений: радиальная круговая дисторсия, радиальная периодическая дисторсия и тангенциальная периодическая дисторсия (Рис. 6).

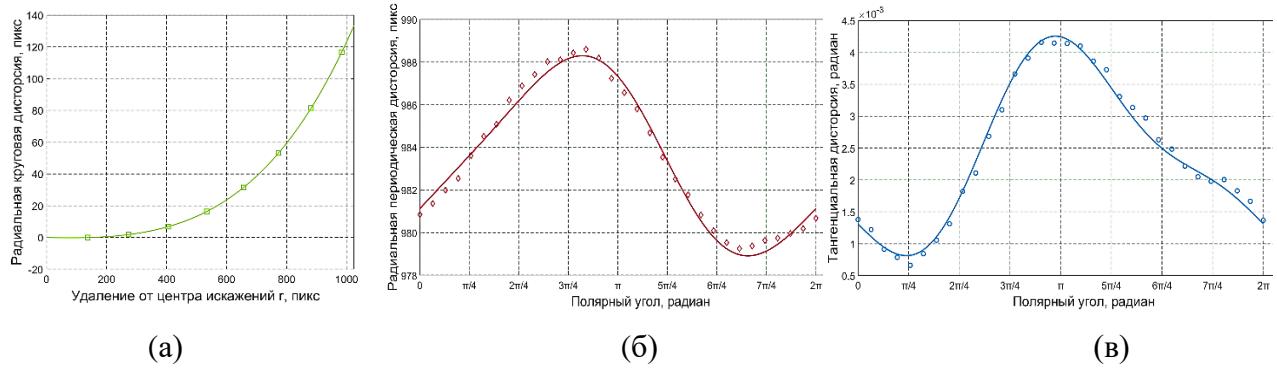


Рисунок 6. Виды оптических искажений фотокамеры:

- (а) – радиальная круговая дисторсия; (б) – радиальная периодическая дисторсия;
- (в) – тангенциальная периодическая дисторсия.

Влияние температуры на параметры, описывающие искажения изображения, исследовано путем применения рассмотренного алгоритма для ряда значений температуры: 0, 10, 20, 30 °C.

Из анализа полученных графиков был сделан вывод, что температура оказывает влияние на все составляющие дисторсии нелинейно, что обусловлено тепловым расширением элементов конструкции фотокамеры. В связи с этим процедуры, согласно методике, выполняются для всей совокупности параметров модели дисторсии объектива в виде функций температуры. Полученные графики аппроксимируются следующим образом:

а) радиальная круговая дисторсия с применением ряда Тейлора:

$$R(r_i) = \sum_{k=2}^4 A_k(T) \cdot r_i^k, \quad (6)$$

где $A_k(T) = a_{0k} + a_{1k}T + a_{2k}T^2 + a_{3k}T^3$ – коэффициенты аппроксимирующей функции; $T = 0, 10, 20, 30$ °C – значения температуры; $r_i = \frac{1}{32} \sum_{j=0}^{31} r_{ij}$ – статистическое среднее радиуса i -й окружности ($i = 0 \dots 7, j = 0 \dots 31$); a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты ряда; r'_{ij} – радиусы узлов изображения полигона с искажениями;

б) радиальная периодическая дисторсия с использованием ряда Фурье:

$$\rho(\varphi_i) = \sum_{k=1}^4 B_k(T) \sin(k \cdot \varphi_i + \Gamma_k(T)), \quad (7)$$

где $B_k(T) = b_{0k} + b_{1k}T + b_{2k}T^2 + b_{3k}T^3$ – коэффициенты аппроксимирующей функции; b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты ряда; $\varphi_i = \frac{1}{8} \sum_{j=0}^7 \varphi_{ij}$ – статистическое среднее угловых координат узлов i -го радиуса на изображении полигона; $\Gamma_k(T) = \gamma_{0k} + \gamma_{1k}T + \gamma_{2k}T^2 + \gamma_{3k}T^3$ – фазовый сдвиг графика; $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – коэффициенты ряда;

в) тангенциальная периодическая дисторсия с применением ряда Фурье:

$$\alpha(\varphi_j) = \sum_{k=1}^4 C_k(T) \sin(k \cdot \varphi_j + \Psi_k(T)), \quad (8)$$

где $C_k(T) = c_{0k} + c_{1k}T + c_{2k}T^2 + c_{3k}T^3$ – коэффициенты аппроксимирующей функции; c_0, c_1, c_2, c_3 – коэффициенты ряда; φ_j – измеренные значения углового положения узлов полигона; $\Psi_k(T) = \psi_{0k} + \psi_{1k}T + \psi_{2k}T^2 + \psi_{3k}T^3$ – фазовый сдвиг графика; $j = 0, 1 \dots 31$.

Определение коэффициентов модели производится по методу наименьших квадратов. Минимумы среднего квадрата отклонений искомых кривых от узлов изображения полигона определяются выражениями:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^7 [R(r_i) - f_1(r_i, a_2, a_3, a_4)]^2 \rightarrow \min; \\ \sum_{j=0}^{31} [\rho(\varphi_j) - f_2(\varphi_j, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2)]^2 \rightarrow \min; \\ \sum_{j=0}^{31} [\alpha(\varphi_j) - f_3(\varphi_j, c_1, c_2, \psi_1, \psi_2)]^2 \rightarrow \min, \end{cases} \quad (9)$$

где $R(r_i), \rho(\varphi_i), \alpha(\varphi_j)$ – результаты проведенного эксперимента; $f_1(r_i, a_2, a_3, a_4), f_2(\varphi_j, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2), f_3(\varphi_j, c_1, c_2, \psi_1, \psi_2)$ – оцениваемые аналитически зависимости составляющих дисторсии; $a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2, c_1, c_2, \psi_1, \psi_2$ – оцениваемые параметры составляющих дисторсии.

Компенсация радиальной круговой дисторсии выполняется посредством следующего соотношения:

$$R_R(r) = r - R(r), \quad (10)$$

где r – радиальная полярная координата точки на фотоматрице; $R_R(r)$ – соотношение (6), где параметры определены с первого равенства системы (9).

Компенсация радиальной периодической дисторсии выполняется посредством следующего соотношения

$$R_{R\rho}(r, \varphi) = R_R(r) - \frac{\rho(\varphi) \cdot r_i}{r_7}, \quad (11)$$

где r – радиальная полярная координата точки на фотоматрице; $R_{R\rho}(r, \varphi)$ – исправленное значение радиуса текущей точки; $\rho(\varphi)$ – соотношение (7), где параметры определены со второго равенства системы (9).

Компенсация тангенциальной периодической дисторсии выполняется посредством следующего соотношения

$$\varphi_\alpha(\varphi) = \varphi - \alpha(\varphi), \quad (12)$$

где $\alpha(\varphi)$ – соотношение (10), где параметры определены с третьего равенства системы (12).

3. Экспериментальные исследования на основе предложенного алгоритма

Для исследуемого объектива ZLKC VM0420MP5 с фиксированным фокусным расстоянием 4 мм совместно с фотокамерой машинного зрения hikrobot MV-CS060-10UM-PRO при температуре 20 °C были получены следующие выражения (13), описывающие составляющие дисторсии, визуализация компенсации которых представлена на Рис. 7:

$$\begin{aligned} R(r) &= 9.4388 \cdot 10^{-6} \cdot r^2 - 5.4097 \cdot 10^{-8} \cdot r^3 + 2.1773 \cdot 10^{-11} \cdot r^4 \\ \rho(\varphi) &= 6.0074 \sin(\varphi - 0.5127) + 1.103 \sin(2\varphi + 1.4799) \\ \alpha(\varphi) &= -5.6874 \cdot 10^{-4} \sin(\varphi + 0.6608) - 5.8541 \cdot 10^{-4} \sin(2\varphi - 1.0407) \end{aligned} \quad (13)$$

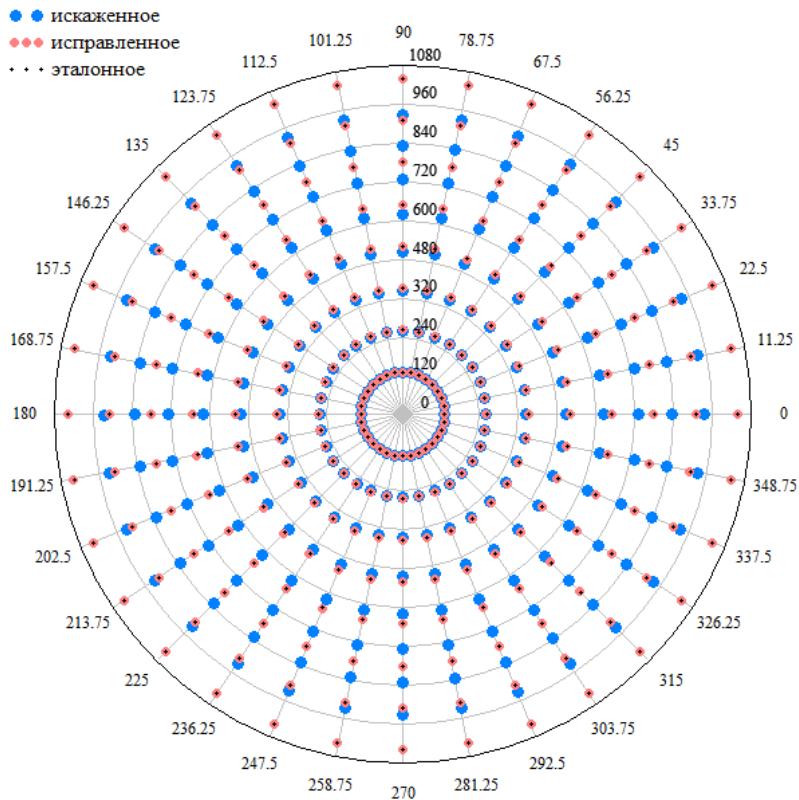


Рисунок 7. Визуализация компенсации всех составляющих дисторсии.

На Рис. 8 представлено сравнение результатов компенсации дисторсии с помощью метода, реализованного в библиотеке OpenCV (а) и предложенной методикой (б) на основе определения расстояния равных отрезков полигона.

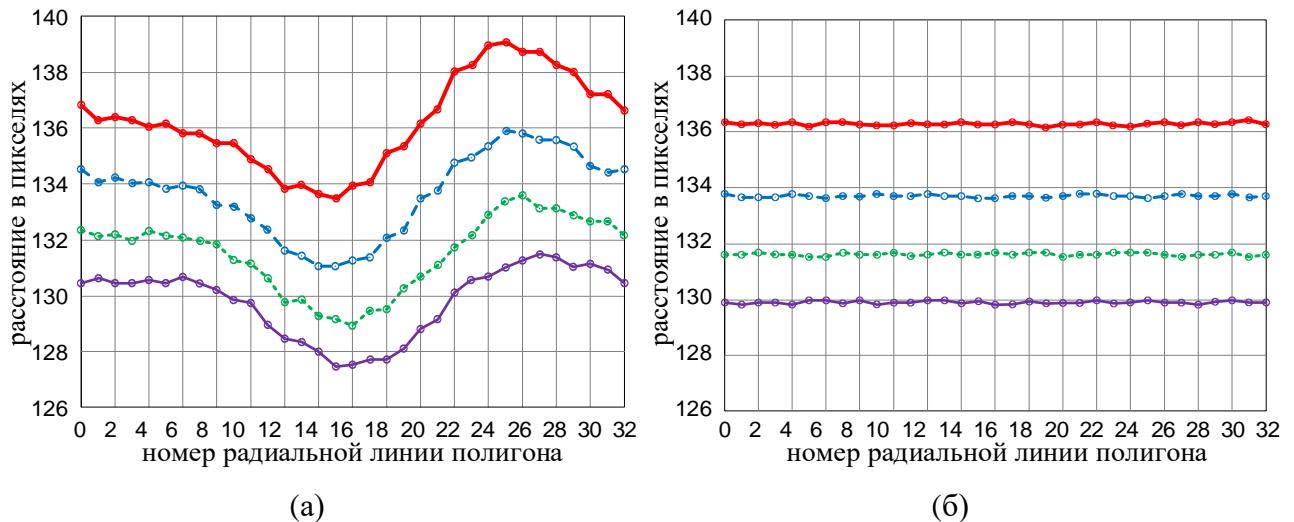


Рисунок 8. Расстояния равных отрезков при калибровке:

(а) – на основе шаблона в виде шахматной доски; (б) – с применением предлагаемой методики.

Для объектива, используемого в эксперименте, дефекты неисправленного изображения имели разброс размеров равных отрезков строк и столбцов 35...50 пикс. Из Рис. 8 (а) видно, что с помощью известной методики удалось уменьшить влияние радиальной составляющей дисторсии, но периодическая составляющая радиальной дисторсии фактически не была устранена поскольку не предусмотрена математической моделью, при этом отклонения размеров равных отрезков для изображения, исправленного посредством методики с использованием полигона в виде шахматной доски, составили 2–3 пикс.

Расчет показал, что отклонения размеров равных отрезков для изображения, исправленного посредством разработанной методики, составили 0,2–0,25 пикс. для всех четырех значений температуры (Рис. 8 (б)).

Заключение

Таким образом, в статье решена задача повышения измерительной точности ОЭС путем алгоритмической компенсации дисторсии объективов с оценкой влияния температуры на основе данных, полученных при экспозиции испытательного полигона, и вычисления соответствующих коэффициентов для математической модели. Предложенный алгоритмический подход позволяет обеспечить снижение влияния дисторсии на изображения в 10...12 раз по сравнению с программными средствами OpenCV, а также учесть и устранить влияние температурных деформаций на метрические характеристики фотокамер, используемых для измерительных и навигационных задач. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного алгоритмического подхода в области оптического приборостроения и возможности использования его для коррекции радиальной и тангенциальной дисторсии, полученной фотокамерами СТЗ, использующимися в качестве приемников изображения на БПЛА.

Литература:

1. Сташкевич С.П., Кабанов В.А., Хуснутдинов Т.Д. Использование беспилотных летательных аппаратов в военных и гражданских целях // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Красноярск: СОЛОН-Пресс, 2023. [Stashkevich S.P., Kabanov V.A., Khusnudinov T.D. The use of unmanned aerial vehicles for military and civilian purposes // Aktualnye problem aviatsii i kosmonavtiki. Krasnoyarsk: SOLON-Press, 2023(in Russian)].
2. Молчанов А.С., Коломоец В.А. Цифровые портреты типовых объектов воздушной разведки. Москва: Перо, 2025. 194 с. [Molchanov A.S., Kolomoets V.A. Digital portraits of typical aerial reconnaissance objects. Moscow: Pero, 2025. 194 p. (in Russian)].
3. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с. [Landsberg G.S. Optics: textbook for universities. 6th ed., ster. Moscow: FIZMATLIT, 2003. 848 p. (in Russian)].
4. Глаголев В.М. Описание и программное устранение дисторсии объективов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 9. Ч. 2. С. 188–194. [Glagolev V.M. Description and software elimination of lens distortion // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki. 2017. No. 9. Pt 2. P. 188–194. (in Russian)].
5. Бондарев В.Г., Проценко В.В., Пикалов А.С. Сравнительный анализ влияния дисторсии объектива на параметры системы технического зрения. В сб.: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению “Техническое зрение и распознавание образов”: сб. тезисов докл. науч.-техн. конф. Анапа: Военный инновационный технополис «Эра», 2019. С. 66–73. [Bondarev V.G., Protsenko V.V., Pikalov A.S. Comparative analysis of the influence of lens distortion on the parameters of a computer vision system. In: State and prospects of modern science in the field of “Computer vision and pattern recognition”: Collection of the abstracts of the scientific and technical conference. Anapa: Military Innovative Technopolis “Era”, 2019. P. 66–73 (in Russian)].
6. Технология фотограмметрической калибровки цифровых камер [электронный ресурс]. [Technology of photogrammetric calibration of digital cameras [webpage] (in Russian; accessed: 15.04.2025)]. URL: <http://photogrammetria.ru/old/services> (дата обращения: 15.04.2025).
7. Conrady A.E. Decentred lens-systems // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1919. Vol. 79. No. 5. P. 384.
8. Пат. 2790055 РФ, МПК51 G 01M 11/02. Способ компенсации дисторсии объектива / Батуков А.В., Бондарев В.Г., Ипполитов С.В., Лопаткин Д.В., Проценко В.В., Роговенко О.Н.; заявитель и патентообладатель ВУНЦ ВВС «ВВА». № 2022113770; заявл. 23.05.2022. 13 с. [Pat.

2790055 RF, IPC51 G 01M 11/02. Method for compensating lens distortion / Batukov A.V., Bondarev V.G., Ippolitov S.V., Lopatkin D.V., Protsenko V.V., Rogovenko O.N.; applicant and patent holder Military Educational-Scientific Center of Air Force “Air Force Research University”. No. 2022113770; appl. 05/23/2022. 13 p (in Russian).

Об авторах:

МОНГУШ Дензин Сергеевич, аспирант кафедры эксплуатации авиационного оборудования, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

КАБИРОВ Ильсур Равилевич, аспирант кафедры эксплуатации авиационного оборудования, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

ПОЛУКАРОВ Анатолий Анатольевич, старший научный сотрудник НИИ РЭБ, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

КАБИРОВ Ильнур Равилевич, преподаватель кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования Военного учебного центра при Уфимском университете науки и технологий.

Metadata:

Title: Algorithmic Compensation of Lens Distortion in Optoelectronic Measuring and Navigation Systems with Temperature Influence Assessment.

Authors 1: Denzin Sergeevich Mongush, postgraduate student at the Department of Operation of Aircraft Equipment, Air Force Research University (Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy), 54A Starykh Bolshevikov st., 394064 Voronezh, Russia. denzin.mongush@mail.ru.

Authors 2: Ilsur Ravilevich Kabirov, postgraduate student at the Department of Operation of Aircraft Equipment, Air Force Research University (Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy), 54A Starykh Bolshevikov st., 394064 Voronezh, Russia.

Authors 3: Anatoliy Anatolievich Polukarov, senior research scientist at the Research Institute of EW, Air Force Research University (Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy), 54A Starykh Bolshevikov st., 394064 Voronezh, Russia.

Authors 4: Ilnur Ravilevich Kabirov, instructor at the Department of Aircraft and Avionics Equipment of the Military Training Center at the Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

Abstract: The solution of the problem of compensation of distortion of digital camera lenses is aimed at improving their measuring properties. The use of optoelectronic systems as a precision meter of navigation parameters on unmanned aerial vehicles requires the development of more advanced methods for accounting for the effect of distortion, since known algorithmic methods do not ensure the achievement of the required subpixel measurement accuracy.

Keywords: technical vision system, camera, optical aberration, distortion, testing polygon.