

туры, содержащих электрически заряженные центры. Уменьшение величины напряжения пробоя, а также снижение предпробойного напряжения может быть связано с уменьшением значения электрического поля, необходимого для формирования лавинного пробоя, вследствие формирования при ИИ и последующих термообработках крупномасштабных нарушений кристаллической структуры.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, договор № Ф25УЗБ-067 от 05.03.2025.

Литература

1. Фотодиод: пат. 7483 U Респ. Беларусь / В. И. Блынский, Е. С. Голуб, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал; заявл. опубл. 25.04.2011 // Афіцыйны бюлетэнь. – 2011. – № 4. – С. 225.

УДК 621.384.3

АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛА МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Свибович И. В.¹, Шкадаревич А. П.¹, Сафонов В. В.¹, Радченко И. М.¹, Кисель В. Э.²

¹Унитарное предприятие «НТИЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются методы решения ряда ключевых проблем неохлаждаемых микроболлометрических матриц: фиксированного пространственного шума, неоднородности откликов, температурных дрейфов и дефектных пикселей. Представлены алгоритмы двухточечной калибровки, статистического детектирования дефектных пикселей с интерполяционным замещением, адаптивной фильтрации и температурной компенсации. Результаты показывают снижение пространственного шума в 2,9 раза, остаточную неоднородность 0,12 %, улучшение сигнал/шум в 2,7 раза и достижение доли исправленных пикселей матрицы в количестве более 98,5 %. Эффективность подтверждена сравнением изображений до и после обработки.

Ключевые слова: микроболлометр, коррекция неоднородности, фиксированный пространственный шум, тепловизионная обработка, дефектные пиксели.

MICROBOLOMETRIC ARRAY SIGNAL CORRECTION ALGORITHMS FOR THERMAL IMAGE QUALITY ENHANCEMENT

Svibovich I. V.¹, Shkadarevich A. P.¹, Safonau U. V.¹, Radchenko I. M.¹, Kisel V. E.²

¹Unitary Enterprise «STC «LEMT» BelOMO»

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Methods for solving key problems of uncooled microbolometric arrays are examined: fixed pattern noise, response non-uniformity, temperature drifts, and defective pixels. Algorithms for two-point calibration, statistical defective pixel detection with interpolation replacement, adaptive filtering, and temperature compensation are presented. Results demonstrate $2.9 \times$ spatial noise reduction, 0.12 % residual non-uniformity, $2.7 \times$ signal-to-noise improvement, and matrix operability exceeding 98.5 %. Effectiveness is confirmed by comparing images before and after processing.

Keywords: microbolometer, non-uniformity correction, fixed pattern noise, thermal imaging processing, defective pixels.

Адрес для переписки: Свибович И. В., ул. Макаенка, д. 23, корп. 1, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: svibovich@lemt.by

Неохлаждаемые микроболлометрические матрицы, несмотря на свои преимущества, характеризуются рядом проблем, снижающих качество тепловизионных изображений.

Основной проблемой является фиксированный пространственный шум (Fixed Pattern Noise, FPN), возникающий из-за неоднородности откликов отдельных пикселей матрицы. FPN представляет собой временно устойчивый шум, обусловленный неоднородностью характеристик сенсора, что особенно критично для инфракрасных датчиков из-за их температурной зависимости.

Вторая критическая проблема – неоднородность отклика детекторов. Различия в чувстви-

тельности между пикселями и смещения индуцируют пространственный шум в изображении, требующий снижения на порядок величины ниже временного шума пикселей для достижения высокого температурного разрешения.

Третья проблема – температурные дрейфы характеристик. Характеристики микроболлометров сильно зависят от температуры, что требует дополнительной компенсации из-за временного дрейфа детекторных характеристик и влияния изменений температуры корпуса на отклик матрицы.

Четвертая проблема – наличие дефектных пикселей с аномальными характеристиками, включающих «горячие» пиксели с чрезмерно

высокой чувствительностью и «холодные» пиксели с низкой чувствительностью.

Для решения проблемы коррекции неоднородности была реализована модифицированная двухточечная калибровка (NUC). Получен алгоритм линейной коррекции вида:

$$y_i(\varphi) = [x_i(\varphi) - s_i(\varphi)]/g_i + o_i + s(\varphi), (1)$$

где $x_i(\varphi)$ – исходный сигнал пикселя, g_i и o_i – коэффициенты усиления и смещения, $s_i(\varphi)$ – отклик при закрытом затворе.

Для решения проблемы обновления коэффициентов коррекции было разработано использование изменения отклика пикселя при текущих рабочих условиях относительно эталонных посредством затвора. Получено снижение пространственного шума в 2,9 раза и достижение остаточной неоднородности 0,12 % (σ/m).

Для решения вопроса детектирования дефектных пикселей был реализован статистический критерий с тройным стандартным отклонением. Получена операбельность (количество работающих пикселей) матрицы более 98,5 % при количестве дефектных пикселей менее 1,5 %. Для решения проблемы замещения дефектных пикселей была применена интерполяция по исправным соседним элементам с учетом локальной структуры изображения. Получено восстановление пространственного разрешения без видимых артефактов.

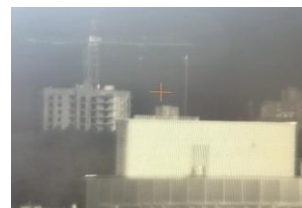
Для решения проблемы временных дрейфов параметров микроболометров, возникающих из-за изменения температуры корпуса и старения детекторов, была реализована система адаптивного обновления калибровочных коэффициентов. При периодическом закрытии затвора система усредняет сигналы от 50 до 100 кадров для получения актуальных значений темнового тока каждого пикселя, что позволяет корректировать коэффициенты коррекции в соответствии с текущими условиями работы. Экспериментально установлено, что оптимальным является 64-кадровое усреднение, обеспечивающее стабильную работу алгоритмов коррекции на протяжении 12 минут непрерывной работы. При этом уровень фиксированного пространственного шума поддерживается ниже уровня случайного временного шума, что гарантирует высокое качество изображения без необходимости частых перекалибровок.

Для решения вопроса пространственной фильтрации были применены адаптивные алгоритмы с изменяющимися параметрами в зависимости от локальных характеристик изображения. Получено эффективное подавление случайных шумов с сохранением мелких деталей.

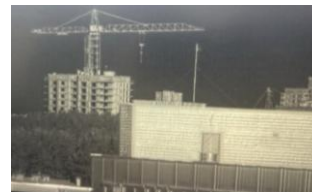
Дополнительной проблемой микроболометрических систем является влияние паразитных тепловых излучений от корпуса, объектива и внутренних элементов камеры. Эти сигналы накладываются на полезный сигнал и создают искажения изображения при изменении температуры окружающей среды.

Для решения проблемы паразитных тепловых излучений была реализована система компенсации собственного излучения оптико-электронного тракта. Метод основан на измерении температуры ключевых узлов камеры встроенными датчиками и математической коррекции сигнала с использованием калибровочных зависимостей паразитного излучения от температуры компонентов. Получено снижение влияния температурных дрейфов корпуса на качество изображения и повышение точности измерений в широком диапазоне рабочих температур.

На рисунке 1, а представлено исходное тепловизионное изображение без обработки, характеризующееся выраженным пространственным шумом, неоднородностью откликов пикселей и дефектными элементами. В результате проведенной работы и применения всех разработанных алгоритмов получено обработанное изображение (рисунок 1, б) с подавленным FPN, скорректированной неоднородностью и замещенными дефектными пикселями. Возросла детализация и контрастность, что влияет на дистанцию распознавания объектов. Количественные результаты показывают снижение общего шума с 14,2 ADU до 5,2 ADU при температуре 28,5 °С, что соответствует улучшению отношения сигнал/шум в 2,7 раза. Временной шум остался на уровне 1,8 ADU, подтверждая эффективность алгоритмов для подавления пространственных искажений.



а



б

Рисунок 1 – Тепловизионные изображения до (а) и после (б) обработки

Представленные методы обработки сырого тепловизионного сигнала обеспечивают комплексное решение основных проблем микроболометрических неохлаждаемых матриц. Работы по дальнейшему улучшению качества изображения продолжают в направлении создания адаптивных алгоритмов машинного обучения, разработки беззатворных методов калибровки и оптимизации вычислительной эффективности для встраиваемых систем реального времени.