

УДК 621.391

ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА

И.И. ЛЕВОНЕНКО^{1,2}, А.Д. РОБАЧЕВСКИЙ¹, М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ¹, Е.Г. МАКЕЙЧИК¹*1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь,**2 – ОАО «Пеленг», Республика Беларусь**Поступила в редакцию 18 февраля 2025*

Аннотация. Рассматривается задача оценки вычислительной эффективности алгоритма локальной корреляции применительно к задачам обработки изображений на одноплатном компьютере Rockchip AIO-3588MQ. С целью выявления оптимальных стратегий ускорения и оптимизации, проведено сравнительное исследование производительности различных реализаций алгоритма, адаптированных к архитектурным особенностям процессора Rockchip RK3588.

Ключевые слова: одноплатный компьютер, оценка качества комбинирования изображений, корреляция изображений, взвешенное сложение изображений.

Введение

Формирование и анализ многоканальных изображений, полученных методами инфракрасной и видимой спектроскопии, играет ключевую роль в исследовании поверхности материалов. Каждый канал в таких изображениях соответствует определенному спектральному диапазону, кодируя интенсивность отраженного или поглощенного излучения в виде яркости пикселей двумерной матрицы. Особую информативность часто демонстрируют каналы ближнего (NIR), среднего (MIR) инфракрасного и видимого (VIS) диапазонов.

Визуализация многоканальных спектральных данных требует объединения нескольких каналов в единое представление, адаптированное для отображения на устройствах с ограниченным динамическим диапазоном. Визуализация данных может быть осуществлена посредством цветового кодирования, например, путем преобразования интенсивности сигнала в ближнем инфракрасном диапазоне в компоненты видимого спектра [1], или с использованием монохромного отображения. При этом критически важно минимизировать артефакты и сохранить важные детали, характеризующие спектральные особенности материала. В данной работе исследуется формирование комбинированных полутоновых изображений на основе двух спектральных каналов. Особое внимание уделяется анализу производительности алгоритма локальной корреляции применительно к оценке качества такого объединения, а также сравнению эффективности различных стратегий оптимизации его реализации на вычислительной платформе AIO-3588MQ.

Основной акцент сделан на сравнении производительности разработанного алгоритма локальной корреляции при различных стратегиях оптимизации, включая параллельные вычисления и использование аппаратного ускорения, предоставляемого платформой AIO-3588MQ.

Цель работы – определение наиболее эффективного способа обработки спектральных данных для задач визуализации и анализа, направленного не только на повышение точности оценки качества комбинированных изображений, но и на оптимизацию вычислительных процессов с целью обеспечения возможности обработки данных в режиме, близком к реальному времени.

Формирование комбинированных изображений

При обработке данных, полученных в различных спектральных диапазонах (например, инфракрасном (IR) и видимом (VIS)), ключевой задачей является формирование комбинированного изображения, сохраняющего наиболее информативные особенности каждого канала. Исходя из того, что эффективность методов объединения не влияет на объективные показатели качества результирующего изображения, был выбран простой и эффективный метод взвешенного сложения, изображенный на рис. 1.

Согласно данному методу значения пикселей $m_c(y, x)$ комбинированного изображения $M_c = m_c(y, x)_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ (где y и x обозначают координаты пикселя) вычисляются как взвешенная сумма значений пикселей исходных изображений $M_1 = m_1(y, x)_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ и $M_2 = m_2(y, x)_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$, полученных, соответственно, в первом и втором каналах, на основе следующего выражения

$$m_c(y, x) = \left[km_1(y, x) + (1-k)m_2(y, x) \right], \quad (1)$$

где $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$; k – коэффициент, определяющий вклад значений пикселей каждого компонентного изображения M_1 и M_2 в значения пикселей комбинированного изображения M_c , $0 < k < 1$; Y, X – размеры (в пикселях) компонентных и комбинированного изображений по вертикали и горизонтали; $[]$ – операция округления значений пикселей до ближайшего целого.

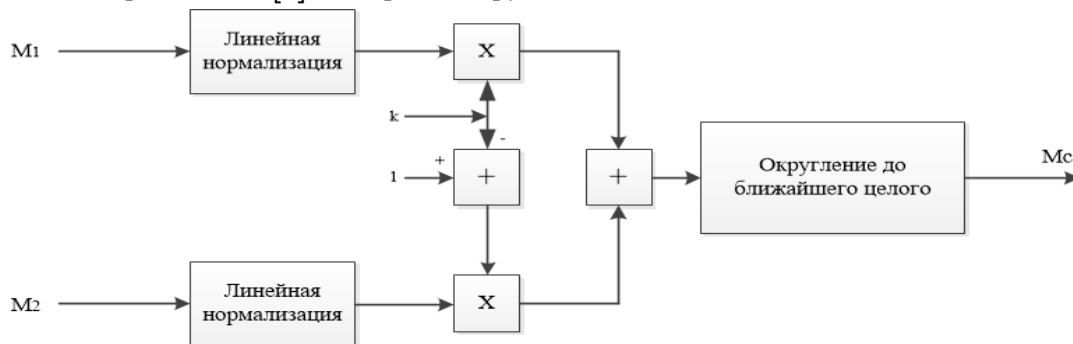


Рис. 1. Схема формирования комбинированного изображения на основе взвешенного сложения компонентных изображений

Меньшие значения коэффициента k на рис. 1 указывают на снижение относительного вклада значений пикселей исходного изображения M_1 в формирование комбинированного изображения M_c , по сравнению с вкладом исходного изображения M_2 . Таким образом, варьируя значение k , можно контролировать баланс между информацией, представленной в каждом из исходных каналов, в результирующем комбинированном изображении.

Оценка качества комбинирования изображений на основе коэффициента локальной корреляции

Повышение точности корреляционной оценки качества комбинирования изображений достигается за счет учета локальных особенностей распределений значений пикселей в компонентных и комбинированном изображениях. Для этого используется коэффициент $r_L(A, B)$ локальной корреляции двух изображений $A = a(y, x)$ и $B = b(y, x)$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$, вычисляемый с помощью выражения

$$r_L(A, B, p) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - a_L(y, x, p)| |b(y, x) - b_L(y, x, p)|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - a_L(y, x, p))^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - b_L(y, x, p))^2}}, \quad (2)$$

где $a_L(y, x, p)$, $b_L(y, x, p)$ – средние значения яркостей пикселей изображений A и B в окрестности пикселя с координатами (y, x) размером $p \times p$ пикселей.

Для комплексной оценки качества комбинирования изображений, учитывающей взаимосвязь между результирующим комбинированным изображением, каждым из его компонент, а также между самими компонентами, в работе [1] предложена локальная корреляционная метрика $D_L(k)$, вычисляемая с помощью выражения (большее значение соответствуют более высокому качеству комбинирования и лучшему сохранению информации из исходных каналов)

$$D_L(k) = \frac{r_L(M_C, M_1, k) + r_L(M_C, M_2, k)}{|r_L(M_C, M_1, k) - r_L(M_C, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0.5)}. \quad (3)$$

В отличие от глобальных корреляционных метрик, локальная корреляционная метрика $D_L(k)$ обеспечивает возможность определения оптимального значения коэффициента k , которое позволяет достичь наилучшего баланса между вкладами исходных изображений в результирующее комбинированное изображение, максимизируя сохранение полезной информации из каждого канала.

Вычислительные возможности одноплатной системы Rockchip AIO-3588MQ для работы с мультиспектральными данными

Платформа Rockchip AIO-3588MQ представляет собой высокопроизводительный одноплатный компьютер, предназначенный для обработки видеопотоков в реальном времени. В рамках данного исследования она была выбрана в качестве аппаратной основы благодаря своей вычислительной универсальности, поддержке различных операционных систем и широким возможностям подключения периферийных устройств.

Архитектура платформы включает набор интерфейсов, обеспечивающих гибкость подключения внешних устройств изображены на рис. 2.

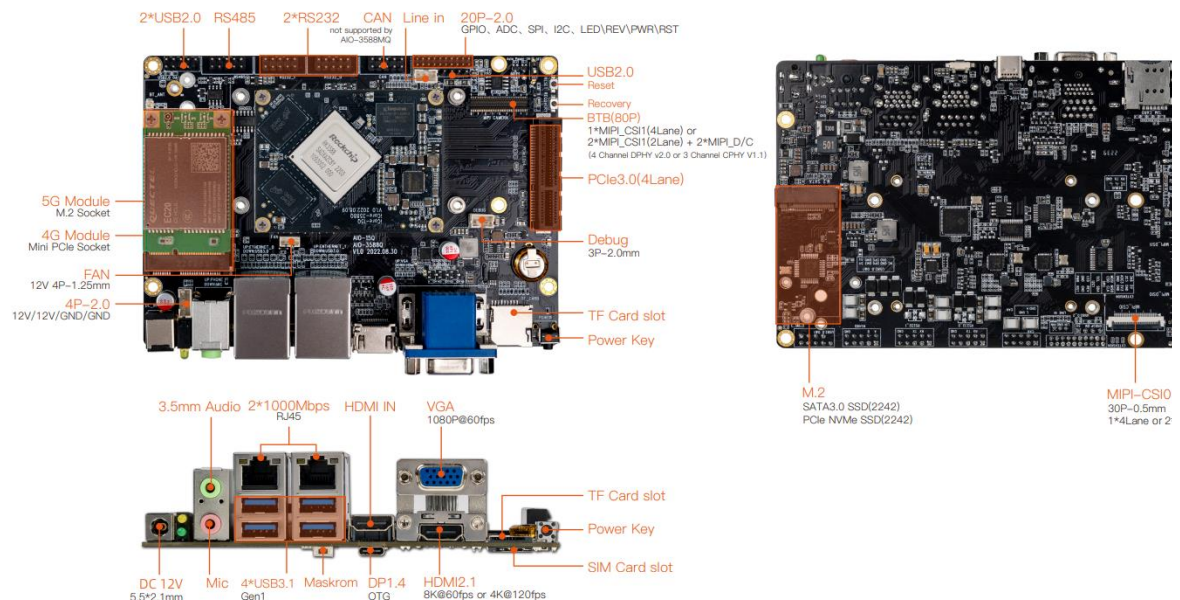


Рис. 2. Интерфейсы Rockchip AIO-3588MQ

Видеовходы и выходы представлены интерфейсом HDMI 2.1 с поддержкой разрешения 8K при 60 кадрах в секунду или 4K при 120 кадрах в секунду, HDMI-IN 2.0 для приема внешних сигналов, а также DisplayPort 1.4 в качестве альтернативного решения для вывода изображения. Для подключения периферийных устройств предусмотрены интерфейсы USB 3.0 OTG и Type-C, а также специализированные MIPI-разъемы. MIPI-CSI предназначен для подключения камер и поддерживает до 4 линий передачи данных со скоростью до 4 Гбит/с на основе стандартов D-PHY или C-PHY. MIPI-DSI обеспечивает высокоскоростную передачу данных для дисплеев с минимальными задержками.

Вычислительная архитектура Rockchip AIO-3588MQ основана на гетерогенной вычислительной системе, интегрирующей центральный процессор, графический ускоритель и нейропроцессор в единую вычислительную платформу. Центральный процессор реализован по гибридной архитектуре ARM DynamIQ big.LITTLE, сочетающей кластер высокой производительности с четырьмя ядрами Cortex-A76, работающими на частоте до 2.4 ГГц с поддержкой одновременной многопоточности, и энергоэффективный кластер из четырех ядер Cortex-A55 с тактовой частотой 1.8 ГГц. Система кэширования включает выделенный L2-кэш объемом 512 КБ для каждого процессорного комплекса и общий L3-кэш объемом 3 МБ, реализующий сквозную модель согласованности между всеми вычислительными ядрами.

Графическая подсистема построена на базе процессора Mali-G610 MP4, использующего микроархитектуру Valhall третьего поколения. Подсистема содержит четыре унифицированных шейдерных ядра с тактовой частотой до 800 МГц и поддерживает современные графические API, включая OpenGL ES 3.2 с расширениями для вычислений в фрагментных шейдерах, Vulkan 1.2 с аппаратной акселерацией трассировки лучей и OpenCL 2.2 с полной поддержкой общей виртуальной памяти. Аппаратный видеокodeк обеспечивает обработку видеопотоков формата H.265/HEVC Main10 10-bit с разрешением до 8K@60fps, включая поддержку HDR10+ и динамических метаданных Dolby Vision. Применение технологии AFBC (Arm Frame Buffer Compression) версии 1.3 позволяет реализовать адаптивное сжатие с потерями, снижая требования к пропускной способности памяти на 50–70 % для типичных сценариев работы с изображениями.

Нейронный процессор платформы обеспечивает пиковую производительность 6 TOPS при выполнении 8-битных целочисленных операций. Его архитектура включает блок предварительной загрузки весовых коэффициентов с поддержкой работы с разреженными нейронными сетями, матричный вычислительный массив с аппаратной акселерацией операций и модуль постобработки с поддержкой различных активационных функций. Особое внимание уделено поддержке основных фреймворков машинного обучения, включая TensorFlow Lite с оптимизированными операторами для сверточных нейронных сетей, Quantized PyTorch с автоматическим распределением вычислительной нагрузки между CPU и NPU, а также ONNX Runtime с возможностью использования специализированных операторов для задач спектрального анализа. Такая архитектура обеспечивает детерминированное выполнение нейросетевых моделей с задержкой менее 2 мс при обработке мультиспектральных изображений высокого разрешения.

Благодаря сочетанию высокой пропускной способности интерфейсов, параллельных вычислительных ресурсов и аппаратного ускорения ИИ, платформа Rockchip AIO-3588MQ является оптимальным решением для задач формирования комбинированных мультиспектральных изображений в режиме реального времени.

Оптимизация алгоритма локальной корреляции для обработки изображений в реальном времени на платформе AIO-3588MQ

При анализе алгоритма локальной корреляции выделяются ключевые этапы обработки изображений. На начальном этапе реализуется поэлементное умножение пикселей соответствующих изображений, за которым следует суммирование полученных значений в пределах окна корреляции фиксированного размера. Эта вычислительная операция имеет квадратичную сложность $O(N^2)$, где N – линейный размер изображения. Завершающий этап

включает вычисление среднего значения в пределах окна и сохранение результата в результирующую матрицу, что также требует $O(N^2)$ операций.

Производительность алгоритма существенно ограничена несколькими критическими факторами. Архитектура вложенных циклов (по координатам изображения и радиусу окна) обуславливает квадратичную сложность относительно радиуса окна и квадратичную относительно размера изображения, что даёт общую сложность $O(N^2 \cdot r^2)$, где r – радиус окна корреляции. Значительное влияние оказывает неэффективное использование кэш-памяти, вследствие пространственной некогерентности доступа к данным при обработке скользящим окном. При работе с изображениями высокого разрешения пропускная способность подсистемы памяти становится узким местом, ограничивающим скорость доступа к пиксельным данным при их многократном использовании.

С целью преодоления выявленных ограничений реализован комплекс оптимизаций, направленных на повышение утилизации ресурсов процессорной платформы. В частности, рассматривались различные подходы к оптимизации, включая стандартную реализацию на C++ с использованием библиотеки OpenCV, а также оптимизации с применением набора инструкций NEON, библиотеки OpenMP и их комбинации. Сравнение производительности этих подходов представлено в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение производительности оптимизаций алгоритма локальной корреляции

Методы	Время обработки, мс	Ускорение, разы
Базовая реализация (CPU)	300	1.0
+ Параллелизм (8 ядер)	120	2.5
+ Векторизация (NEON)	40	7.5

Параллельная обработка достигается посредством декомпозиции входного изображения на независимые горизонтальные полосы, которые распределяются между доступными вычислительными ядрами многоядерного процессора. Реализация, базирующаяся на стандарте OpenMP [3], обеспечивает динамическое распределение нагрузки между ядрами, учитывая их текущую загрузку и архитектурные особенности (тактовую частоту), для достижения оптимального соотношения между производительностью и энергопотреблением.

Дополнительное повышение производительности обеспечивается использованием векторных вычислений на основе набора инструкций NEON, доступного на платформах с архитектурой ARM [4]. Ключевые операции алгоритма переписаны с применением SIMD-примитивов (Single Instruction, Multiple Data), обеспечивающих параллельную обработку до четырех пикселей за одну инструкцию. В частности, инструкции VMULL.u8 (умножение с накоплением для 8-битных беззнаковых целых) и VPADD.s32 (горизонтальное суммирование для 32-битных целых) позволяют существенно ускорить базовые вычислительные операции корреляции. Оптимизация доступа к памяти включает применение механизмов предвыборки данных и организацию последовательного чтения данных, что снижает задержки и максимизирует эффективность кэш-памяти при работе с большими массивами изображений. Как видно из таблицы, комбинированная оптимизация NEON + OpenMP демонстрирует наилучшие показатели производительности, однако выбор оптимального подхода определяется конкретными требованиями к проекту и доступными ресурсами, включая квалификацию разработчиков и целевую платформу. В результате применения оптимизаций достигнуто семикратное увеличение производительности по сравнению с исходной, скалярной реализацией алгоритма.

Дальнейшее повышение эффективности алгоритма локальной корреляции требует комплексного подхода, учитывающего архитектурные особенности современных процессоров и специфику обработки изображений. Проведенные исследования демонстрируют значительный потенциал оптимизации, однако существуют дополнительные возможности для улучшения производительности.

Особого внимания заслуживает анализ поведения алгоритма при различных параметрах обработки. Экспериментальные данные показывают нелинейную зависимость времени выполнения от размера окна корреляции. При малых радиусах окна (менее 16 пикселей)

доминирующим фактором становятся накладные расходы на организацию параллельной обработки, тогда как для больших окон основным ограничением выступает пропускная способность памяти. Это обуславливает необходимость адаптивного выбора стратегии оптимизации в зависимости от рабочих параметров алгоритма.

Перспективным направлением развития является создание гибридной реализации, сочетающей преимущества различных подходов. Для малых окон оптимальной оказывается векторная обработка с использованием NEON-инструкций, в то время как средний диапазон размеров окна наиболее эффективно обрабатывается при параллельном выполнении на нескольких ядрах. Большие окна требуют принципиально иного подхода с применением частотных методов обработки, что открывает новые возможности для оптимизации.

Дополнительный резерв производительности кроется в оптимизации работы с памятью. Практические измерения показывают, что организация данных по принципу SOA (Structure of Arrays) обеспечивает прирост производительности на 12–15 % по сравнению с традиционным подходом AOS [5]. Использование 64-байтового выравнивания для векторных операций становится критически важным для полного раскрытия потенциала SIMD-инструкций, а предварительная загрузка данных в кэш позволяет сократить время выполнения на 15–20 %.

Критически важным аспектом в контексте агрессивной оптимизации алгоритмов обработки изображений является сохранение приемлемой точности вычислений. Проведенный сравнительный анализ показал, что использование 16-битных целочисленных представлений данных с аккумуляцией промежуточных результатов в 32-битных регистрах обеспечивает достаточную точность для широкого спектра приложений, при этом агрессивная оптимизация оказывает незначительное влияние на конечную точность. Для задач, требующих повышенной точности, необходимо применение 32-битных вычислений с плавающей точкой. Применение аппроксимационных методов, при условии сохранения допустимой погрешности в диапазоне 2–3 %, позволяет достичь небольшого дополнительного ускорения.

Перспективные направления развития включают интеграцию с специализированными аппаратными ускорителями, такими как GPU (Graphics Processing Units) и NPU (Neural Processing Units), разработку адаптивных алгоритмов, реализующих автоматическую конфигурацию параметров обработки в зависимости от характеристик входных данных и целевой платформы, создание специализированных расширений набора инструкций для процессоров ARM и применение методов машинного обучения для предиктивного выбора оптимальных стратегий обработки. Реализация указанных подходов позволит приблизиться к достижению производительности, необходимой для обработки видео в режиме реального времени для изображений высокого разрешения, даже на платформах с ограниченными вычислительными ресурсами, что откроет новые возможности для разработки и внедрения мобильных и встраиваемых систем компьютерного зрения.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан оптимизированный алгоритм локальной корреляции, предназначенный для эффективной работы на платформе AIO-3588MQ. Применение комплекса современных техник оптимизации, включая использование SIMD-инструкций NEON, распараллеливание посредством API OpenMP и усовершенствованные методы управления памятью, позволило достичь значительного семикратного ускорения обработки данных по сравнению с исходной, последовательной реализацией.

Ключевым результатом является успешная адаптация алгоритма к архитектуре Rockchip RK3588, что позволило максимально эффективно использовать доступные вычислительные ресурсы. Разработанная гибридная вычислительная схема обеспечивает динамическую адаптацию к изменяющимся условиям обработки за счет выбора оптимальной стратегии, в зависимости от размера окна корреляции.

Практическая значимость разработки заключается в значительном повышении скорости обработки изображений и видео на встраиваемых системах. Это открывает перспективы для использования в широком спектре приложений, таких как системы машинного зрения, автономная навигация и обработка мультимедийных данных на мобильных устройствах.

FORMATION OF COMBINED MULTISPECTRAL IMAGES BASED ON A SINGLE-BOARD COMPUTER

I.I. LIAVONENKA, A.D. ROBACHEVSKIY, M.YU. LAVETSKI, E.G. MAKEICHIK

Abstract. This paper investigates the computational efficiency of a local correlation algorithm for image processing tasks on the AIO-3588MQ single-board computer. A comparative performance analysis of different algorithm implementations was conducted, specifically adapted to the architectural features of the Rockchip RK3588 processor, to identify optimal acceleration and optimization strategies.

Keywords: embedded computing system, image combination quality assessment, image correlation, weighted image summation.

Список литературы

1. Gao Y., Gu L., Liu Q., Fu Y. // Computer Vision – ECCV 2024. Lecture Notes in Computer Science. 2024. Vol. 15081. P. 6.
2. Ловецкий М.Ю. [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 78–86.
3. Mattson T.G., He Y., Koniges A.E. The OpenMP Common Core: Making OpenMP Simple Again. Cambridge, MIT Press, 2019.
4. Hohl W., Hinds C. ARM Assembly Language: Fundamentals and Techniques. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2015.
5. Carlson T.E. // Handbook of Computer Architecture / Ed. by Chattopadhyay A. Singapore, 2025. Ch. 68.