

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОДБОРА ВЕСОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕДИНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 24 апреля 2026

Аннотация. В работе решается задача ускорения подбора весового коэффициента при взвешенном сложении многоканальных изображений атомно-силовой микроскопии на основе локальной корреляционной метрики. Предложен алгоритм, исключающий этап сегментации за счёт прямого поиска оптимума от центра диапазона весов, что на выборке из 385 пар изображений обеспечило ускорение в 6 раз относительно глобального перебора при статистически незначимом отклонении коэффициента.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, взвешенное сложение каналов, локальная корреляционная метрика, ускоренная обработка изображений, бинаризация Оцу.

Введение

Многоканальная атомно-силовая микроскопия (АСМ) обеспечивает одновременную регистрацию нескольких физических характеристик поверхности, таких как топография, жёсткость и вязкость, формируя набор синхронизированных одноканальных изображений. Для повышения информативности визуального анализа применяется процедура взвешенного сложения каналов, позволяющая синтезировать единое комбинированное изображение с сохранением наиболее значимых локальных деталей каждого исходного канала [1,2]. Ключевым параметром данного преобразования выступает весовой коэффициент, определяющий относительный вклад каждого канала в итоговую интенсивность пикселей. Некорректный выбор веса приводит к потере контраста, сглаживанию микрорельефа или усилению шумовых артефактов, что снижает диагностическую ценность полученных данных. Оценка качества объединения осуществляется с помощью локальной корреляционной метрики [3], вычисляемой в скользящем квадратном окне. Данная метрика учитывает пространственные взаимосвязи между каналами и демонстрирует высокую чувствительность к сохранению локальных неоднородностей, в отличие от других известных метрик качества [4-7], однако её значения существенно зависят от размера анализирующего окна. Согласование размера окна с преобладающими масштабами структур на поверхности является необходимым условием корректной оценки, что в классических реализациях достигается путём полного перебора комбинаций весового коэффициента и размеров окна. Такой подход гарантирует нахождение глобального оптимума, но характеризуется высокой вычислительной сложностью, делающей его неприменимым для обработки больших массивов данных или систем реального времени. Необходимость оптимизации вычислительной нагрузки привела к разработке сегментных подходов, в которых размер окна определяется на основе предварительного анализа пространственной структуры изображений. В частности, применение бинаризации по методу Оцу с последующим построением гистограммы эффективных размеров выделенных областей позволяет зафиксировать размер окна по модальному значению распределения, существенно сокращая пространство поиска. Несмотря на доказанную эффективность, сегментная обработка вводит дополнительные этапы предобработки, увеличивает общую длительность вычислений и требует контроля параметров бинаризации для избежания артефактов на границах разнородных областей. Возникает научная и практическая необходимость в разработке алгоритма, способного

обеспечить сопоставимую точность подбора весового коэффициента без использования процедур сегментации и статистического анализа размеров областей. Целью настоящей работы является повышение точности и скорости подбора весового коэффициента сложения информационных каналов изображений АСМ.

Материалы и методы

Исследование проводилось на наборе данных, включающем 385 пар синхронизированных АСМ-изображений, полученных в различных режимах сканирования (пример на рисунке 1).

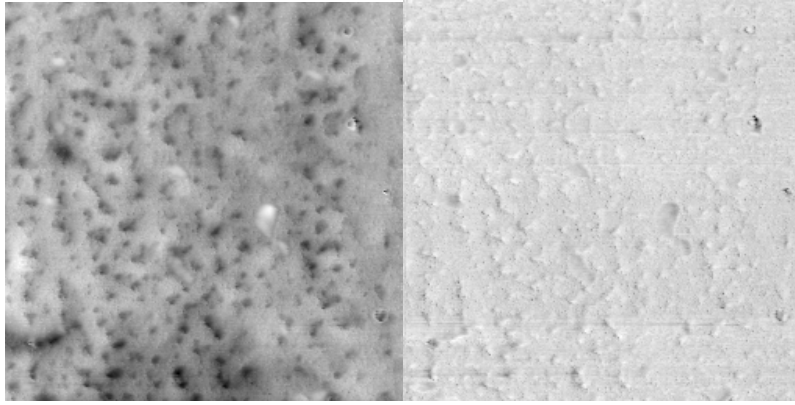


Рисунок 1. Пример двух каналов АСМ-изображений

Синтез комбинированного изображения осуществлялся посредством взвешенного сложения пиксельных значений двух исходных каналов в соответствии с выражением

$$m_c(y, x) = [k \cdot m_1(y, x) + (1 - k) \cdot m_2(y, x)], \quad (1)$$

где $m_1(y, x)$ и $m_2(y, x)$ представляют собой интенсивности пикселей первого и второго каналов соответственно, k является весовым коэффициентом, принимающим значения в интервале от нуля до единицы, $m_c(y, x)$ обозначает результирующую интенсивность комбинированного изображения.

Физический смысл коэффициента k заключается в балансировке вклада каналов таким образом, чтобы минимизировать искажения значимых локальных структур при слиянии. Оценка качества объединения выполнялась с использованием локальной корреляционной метрики $D_L(p)$, вычисляемой по формуле

$$D_L(p) = \left[\frac{r_L(M_c, M_1, p) + r_L(M_c, M_2, p)}{|r_L(M_c, M_1, p) - r_L(M_c, M_2, p)| \cdot r_L(M_1, M_2, 0.5)} \right] \quad (2)$$

где r_L обозначает коэффициент локальной корреляции между соответствующими изображениями в квадратном окне диаметром в p пикселей.

Метрика учитывает взаимную корреляцию комбинированного изображения с каждым исходным каналом, а также корреляцию между самими каналами, что обеспечивает комплексную оценку сохранности информации. Чем выше значение $D_L(p)$, тем лучше качество объединения. В работе сравнивались три алгоритмических подхода к определению оптимального значения k .

Эталонный метод реализует полный перебор коэффициента k в диапазоне от нуля до единицы и размера окна p в широком интервале возможных значений. Для каждой комбинации параметров вычисляется метрика $D_L(p)$, после чего выбирается пара, обеспечивающая

максимальное значение. Данный подход гарантирует нахождение глобального оптимума, однако его вычислительная сложность пропорциональна произведению количества шагов по k и p , что приводит к значительным временным затратам.

Сегментный метод снижает размерность задачи за счёт предварительного определения оптимального размера окна. На первом этапе выполняется бинаризация каждого компонентного изображения по алгоритму Оцу, разделяющая пиксели на объектную и фоновую области. Далее строится гистограмма эффективных размеров выделенных сегментов, и её модальное значение принимается за стартовый размер окна p , на основе которого осуществляется поиск методом золотого сечения размера окна p и весового коэффициента k с заданным шагом до достижения максимума $D_L(p)$.

Предлагается метод, полностью исключаящий этапы бинаризации, сегментации и построения гистограмм. Анализ зависимостей $D_L(p)$ для различных пар изображений показал, что функция метрики обладает гладким характером и содержит единственный ярко выраженный максимум в исследуемом диапазоне. Это свойство позволяет производить поиск оптимального веса непосредственно от центров диапазона $k = 0,5$; $p = 62$. Перебор осуществляется пошагово с фиксированным шагом $\Delta k = 0,033$; $\Delta p = 1$ в обе стороны от начальной точки до тех пор, пока значение метрики не начнёт убывать, что свидетельствует о прохождении экстремума. Шаги были выбраны исходя из баланса между точностью определения оптимума и доступными временными ресурсами. Статистическая значимость различий между методами оценивалась с применением парного t-критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Все вычисления выполнялись в идентичных программно-аппаратных условиях для обеспечения воспроизводимости результатов.

Результаты

После применения предложенного метода совмещения информационных каналов изображения, результирующее изображение несет в себе больше данных для дальнейшего анализа (пример комбинированного изображения приведен на рисунке 2).

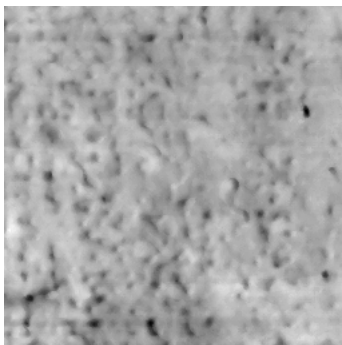


Рис 2. Пример объединения двух каналов изображения

Сравнительный анализ вычислительной эффективности трёх рассмотренных подходов выявил существенные различия во временных затратах на обработку одной пары изображений. Среднее время выполнения эталонного глобального перебора составило $2,80 \pm 0,05$ с, что отражает высокую стоимость полного сканирования пространства параметров. Применение сегментного метода на основе бинаризации Оцу и анализа моды гистограммы позволило сократить среднее время обработки до $0,47 \pm 0,01$ с. Предложенный алгоритм, исключая этап сегментации, продемонстрировал среднее время выполнения $0,46 \pm 0,01$ с. Относительно эталонного подхода ускорение обоих методов достигло 6 раз, что наглядно иллюстрируется на рисунке 3.

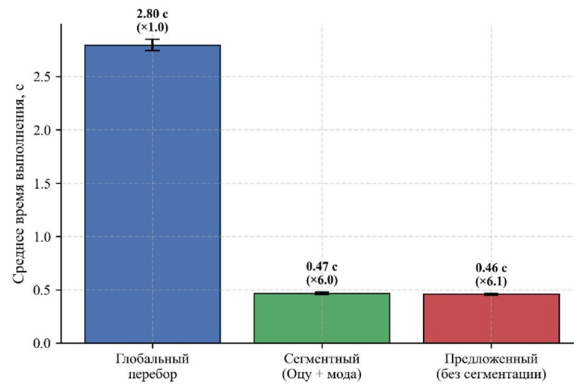


Рис. 3. Сравнение среднего времени выполнения методов подбора весового коэффициента

Разница во времени выполнения между сегментным и предложенным методами составила $1,63\% \pm 3,21\%$, что по результатам парного t-критерия Стьюдента является статистически незначимым.

Точность определения весового коэффициента оценивалась по величине отклонения найденного значения k от эталонного оптимума, полученного глобальным перебором. Для предложенного метода среднее отклонение составило $0,037 \pm 0,076$, тогда как для сегментного подхода данный показатель равен $0,040 \pm 0,075$. Распределение отклонений для обоих ускоренных методов демонстрирует близкие статистические характеристики и представлено на рисунке 4.

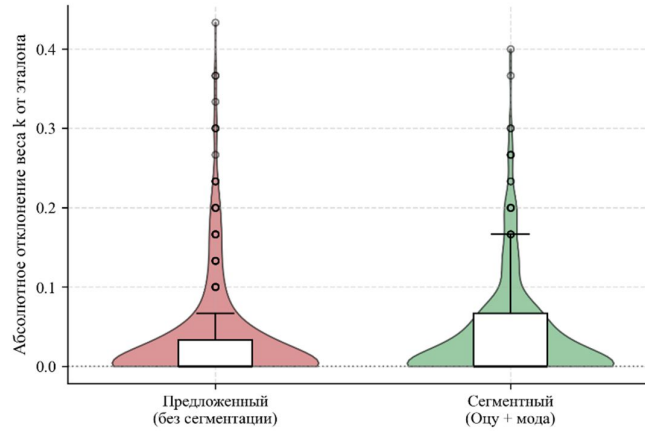


Рис. 4. Распределение отклонений найденного весового коэффициента k от эталонного значения

Статистический анализ подтвердил отсутствие значимых различий в точности подбора веса между ускоренными подходами ($p > 0,05$). Дополнительный анализ форм зависимостей $D_L(p)$ для всех 385 пар изображений показал, что кривые метрики характеризуются высокой гладкостью и наличием единственного глобального максимума при любых допустимых значениях p . Типичный пример зависимостей представлен на рисунке 5.

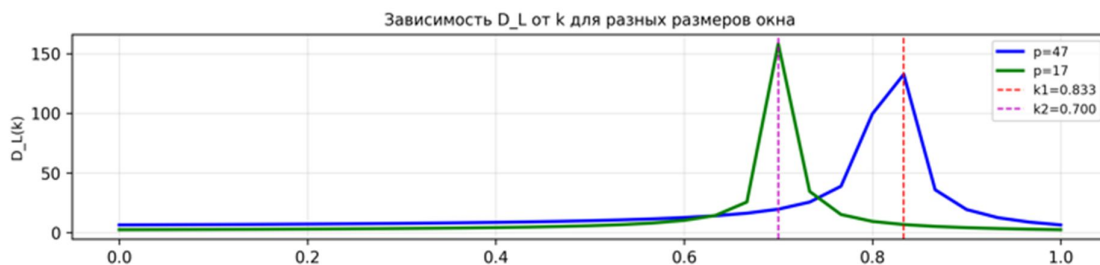


Рис. 5. Типичные зависимости локальной корреляционной метрики $D_L(p)$ от весового коэффициента k

Отсутствие локальных экстремумов и монотонное поведение функции в окрестностях оптимума объясняют устойчивость результатов предложенного метода к выбору начальной точки поиска и подтверждают корректность стратегии централизованного перебора.

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что исключение этапа сегментации и анализа гистограмм размеров областей не приводит к ухудшению точности подбора весового коэффициента при взвешенном сложении АСМ-изображений. Теоретическое обоснование данного факта заключается в специфических свойствах локальной корреляционной метрики $D_L(p)$. Как показано в разделе результатов, зависимость метрики от весового коэффициента имеет гладкий, унимодальный характер на всём исследуемом интервале. Это означает, что функция не содержит локальных экстремумов, способных нарушить работу алгоритмов локального поиска, а её градиент устойчиво направлен в сторону глобального оптимума. В таких условиях стратегия инициирования перебора от центра диапазонов $k = 0,5, p = 62$ оказывается математически обоснованной, поскольку начальная точка с высокой вероятностью попадает в область монотонного роста метрики, обеспечивая быструю сходимость к максимуму. Стойкость метрики к вариациям начальных условий дополнительно усиливается за счёт усредняющего эффекта локального корреляционного окна, которое сглаживает высокочастотные шумы и стабилизирует оценку качества объединения. Практическая ценность предложенного подхода определяется существенным упрощением вычислительного процесса. Отказ от бинаризации по Оцу, построения гистограмм и вычисления модальных значений устраняет накладные расходы на предварительную обработку, которые в сегментном методе могут достигать 15–20% от общего времени выполнения. На больших выборках данных или в системах, требующих обработки изображений в режиме реального времени, такое упрощение напрямую транслируется в повышение пропускной способности и снижение задержек. Кроме того, устранение этапа сегментации снимает проблему чувствительности алгоритма к параметрам бинаризации и артефактам на границах неоднородных областей, что повышает стабильность работы на изображениях со сложной текстурой или низким контрастом. Тем не менее, предложенный метод имеет определённые ограничения. В случаях, когда распределение размеров структур на поверхности носит резко многомодальный характер, фиксированный шаг перебора $\Delta k = 0,033$ может оказаться недостаточно адаптивным, а расположение начальной точки поиска потребует дополнительных итераций для достижения оптимума. Для таких сценариев перспективным направлением является внедрение адаптивного шага, динамически изменяющегося в зависимости от локального градиента метрики, либо гибридная стратегия, комбинирующая быстрый централизованный поиск с выборочной проверкой границ диапазона. Перспективы дальнейшего развития алгоритма связаны с его интеграцией в специализированное программное обеспечение для автоматизированной обработки многоканальных АСМ-данных. Расширение метода на случай слияния более двух каналов потребует модификации метрики $D_L(p)$ и перехода к многомерной оптимизации весовых коэффициентов, однако свойство гладкости целевой функции, вероятно, сохранится, что позволит применить аналогичные стратегии ускоренного поиска. Дополнительно представляет интерес тестирование алгоритма на данных других видов сканирующей зондовой микроскопии, где задачи взвешенного объединения каналов также являются актуальными.

Заключение

В работе проведено сравнительное исследование трёх алгоритмов подбора весового коэффициента для взвешенного сложения многоканальных АСМ-изображений. Предложенный метод, исключаящий этап сегментации и анализа гистограмм размеров областей за счёт прямого поиска оптимума от центра диапазона весов, обеспечивает ускорение вычислений в 6 раз относительно эталонного глобального перебора. Отклонения найденных весовых коэффициентов и значения локальной корреляционной метрики статистически незначимо отличаются от результатов сегментного подхода, что подтверждает сохранение точности при

упрощении вычислительного процесса. Гладкий характер зависимостей метрики от веса и наличие единственного максимума обосновывают устойчивость центрированной стратегии поиска. Алгоритм демонстрирует высокую практическую применимость и готов к внедрению в системы автоматизированной обработки многоканальных данных атомно-силовой микроскопии.

COMPARISON OF WEIGHT COEFFICIENT SELECTION ALGORITHMS FOR FUSION OF ATOMIC FORCE MICROSCOPY IMAGES

M.YU LAVETSKI

Abstract. This study addresses the acceleration of weight coefficient selection for weighted fusion of multichannel atomic force microscopy images using a local correlation metric. A segmentation-free algorithm is proposed, which initiates direct optimization from the center of the weight range, achieving a 6.1-fold speedup over exhaustive search on 385 image pairs with statistically insignificant weight deviation.

Keywords: atomic force microscopy, weighted channel combination, local correlation metric, accelerated image processing, Otsu binarization.

Список литературы

1. Jifeng S., Yuanjiao J., Shaoyong Z. // Proceedings of the SPIE International Conference on Space Information Technology. 2008. Vol. S98S. P. 739-744.
2. Zhang A.K., Dare Y.P. // ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing. 2007. Vol.62, No. 4. P.249-263.
3. Ловецкий М.Ю., Цветков В.Ю., Борискевич А.А., Лапицкая В.А., Чижик С.А. // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 78-86.
4. Petrovic V., Xydeas C. // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '05). 2005. Vol. 1, P. 1866-1871.
5. Piella G., Heijmans H. // Proceedings International Conference on Image Processing (Cat. No.03 CH37429). 2003. P. 111-173.
6. Qu G., Zhang D., Yan P. // Opt. Express. 2001. Vol. 9. P. 184-190.
7. Aslantas V., Bendes E. // AEU - International Journal of Electronics and Communications. 2015. P. 1890-1896.