

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.932

Козак
Мария Викторовна

Сегментация и кодирование АСМ-изображений

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-45 80 01 Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Научный руководитель
Никульшин Б.В.
к.т.н., доцент

Минск 2019

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из современных методов исследования свойств поверхности объекта с высоким пространственным разрешением. Одним из видов СЗМ является атомно-силовая микроскопия, которая позволяет исследовать образцы объектов, с разрешением, вплоть до атомарного.

На основе сил межмолекулярного взаимодействия, атомно-силовой микроскоп сканирует образец, а затем преобразовывает его в цифровое изображение. К изображениям с атомно-силового микроскопа, представленным в цифровом виде, можно применять стандартные процедуры обработки изображений – сегментацию и кодирование.

Основная задача микроскопии – получение увеличенного изображения мелких объектов с требуемым разрешением (числом деталей), применяя различные физические характеристики деталей данного объекта.

Целью диссертации является исследование методов сегментации и кодирования изображений, полученных с атомно-силового микроскопа (АСМ).

Известные методы сегментации делятся на четыре группы: методы, основанные на пороговой обработке, методы, основанные на обработке областей, методы водоразделе и методы, основанные на выделении границ.

Исследуемые методы сегментации, такие как выращивания областей и разделения и слияния областей сравнивают разности значений соседних пикселей с заданным порогом при принятии решения о присоединении пикселя к сегменту. Самым быстродействующим является метод сегментации на основе выращивания областей, однако для сегментации изображений его скорости в реальном масштабе времени может быть недостаточно. В этой связи актуальной является задача ускорения сегментации изображений.

Также актуальна задача уменьшения требуемого объема памяти. Для этого используются методы кодирования. Выделяют пять видов методов кодирования изображений: статические методы, методы словарного сжатия, контекстные методы, методы нулевых деревьев, методы кодирования длин серий.

Кроме того, объем памяти изображений связан с числом сегментов, выделяемых на изображении. Снижение точности сегментации способствует уменьшению числа сегментов и сокращению объема памяти.

Цели, решаемые методом АСМ в широком диапазоне размеров, чрезвычайно разнообразны: идентификация микроорганизмов по их морфологии, исследование влияния различных веществ на жизнедеятельность клеток, визуализация и контроль образования фермент-субстратных комплексов, контроль размеров, структуры и стабильности различных наноструктур, использующихся для доставки лекарственных средств, визуализация единичных биомолекул и многое другое.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью диссертации является разработка алгоритма предварительной сегментации изображений с атомно-силового микроскопа для последующего кодирования.

Задачи магистерской диссертации:

- исследование методов кодирования, выбор оптимального метода кодирования АСМ-изображений;
- исследование методов сегментации, разработка критерия оптимального качества сегментации;
- разработка алгоритма сегментации АСМ-изображений;
- оценка эффективности разработанного алгоритма сегментации по сравнению с ранее известными алгоритмами.

В первой главе рассматривается атомно-силовая микроскопия. Описан принцип работы атомно-силового микроскопа и формирование изображения на нем. Рассмотрены основные характеристики режимов работы атомно-силового микроскопа и их отличия.

Во второй главе приведена общая характеристика методов кодирования. Описаны основные методы кодирования и их принцип работы. Выбран алгоритм сжатия изображений для дальнейшего применения в работе.

В третьей главе приведен обзор основных методов сегментации изображений, их общая характеристика. Описан принцип работы различных видов методов сегментации и их отличительные особенности.

В четвертой главе выполнено моделирование программных методов кодирования и сегментации. Разработан алгоритм сегментации изображений и произведено его сравнение с известными ранее методами сегментации по основным параметрам. Вычислена эффективность применения алгоритма сжатия для сегментированных изображений.

Тема диссертационной работы соответствует пункту 5 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12 марта 2015 г. «Информатика и космические исследования».

Диссертационная работа выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности соответствует норме, установленный кафедрой ИКТ. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке использованных источников».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Атомно-силовой микроскоп (англ. AFM – atomic-force microscope) – сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения. Используется для определения рельефа поверхности с разрешением от десятков ангстрем вплоть до атомарного.

Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации силового взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и зондом. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. При изменении рельефа поверхности под остриём изменяется сила, действующая на зонд, следовательно, изменяется величина изгиба зондового датчика. Таким образом, регистрируя величину изгиба, можно сделать вывод о рельефе поверхности.

Зондирование поверхности в атомно-силовом микроскопе производится с помощью специальных зондовых датчиков, представляющих собой упругую консоль – кантилевер (cantilever) с острием на конце.

На выступающем конце кантилевера (над шипом) расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Когда зонд опускается и поднимается на неровностях поверхности, отраженный луч отклоняется, и это отклонение регистрируется фотодетектором, а сила, с которой шип притягивается к близлежащим атомам – пьезодатчиком. Данные фотодетектора и пьезодатчика используются в системе обратной связи, которая может обеспечивать, например, постоянную величину силу взаимодействия между микрозондом и поверхностью образца. В результате атомно-силовой микроскопии, можно строить рельеф поверхности образца в режиме реального времени (см. рисунок 1).

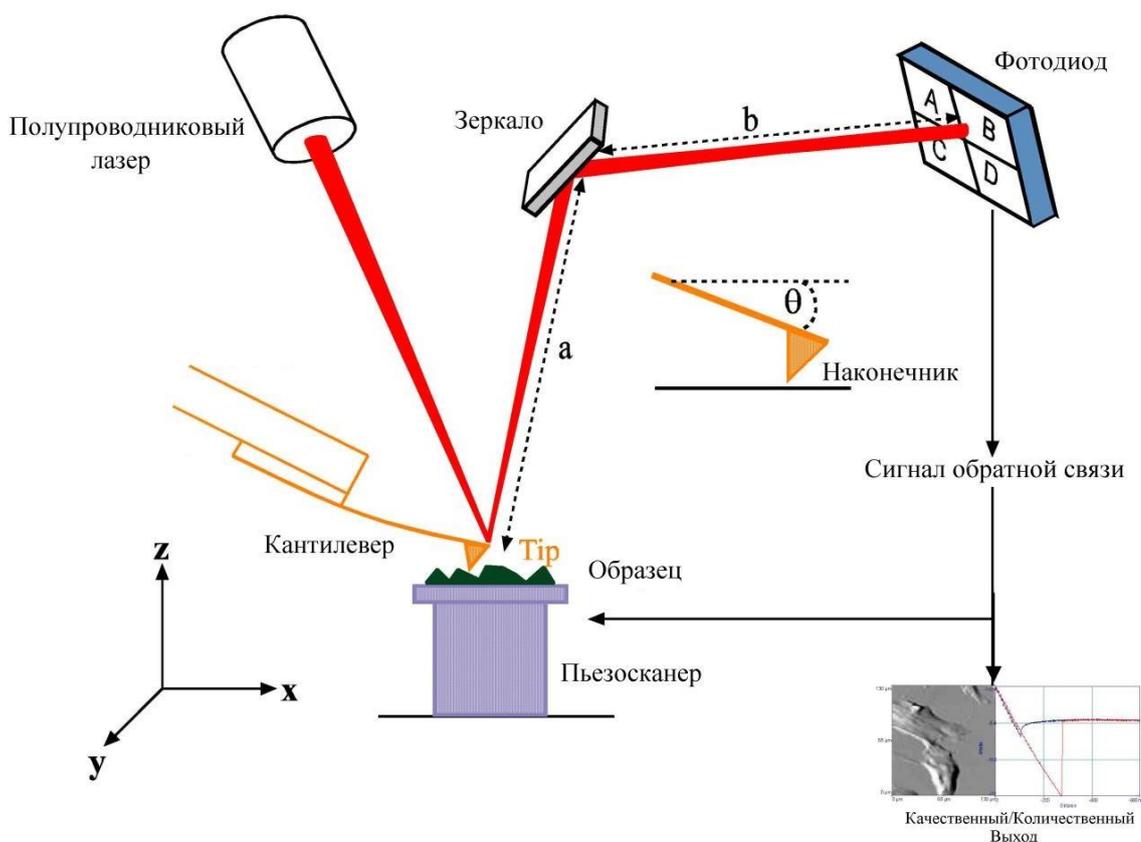


Рисунок 1 – Принцип работы атомно-силовой микроскопии

Выделяют 3 режима работы атомно-силового микроскопа:

- контактный (contact mode),
- полуконтактный (semi-contact mode или tapping mode),
- бесконтактный (non-contact mode).

Сжатие информации можно классифицировать следующим образом:

- необратимые методы сжатия (с регулируемыми потерями) – методы, при которых для обеспечения максимальной степени сжатия исходного массива часть содержащихся в нем данных отбрасывается;
- обратимые методы (без потерь) – методы сжатия, при которых ранее закодированная порция данных восстанавливается после их распаковки полностью без внесения изменений.

Сжатие с потерями основано на выборе баланса между точностью восстановления изображения и степенью его сжимаемости. Если можно допустить появление некоторого искажения в конечном результате кодирования, то возможно значительное увеличение коэффициента сжатия. Для обработки изображений применяются методы сжатия с потерей информации, так и методы сжатия без потерь.

При кодировании без потерь сохраняются все детали изображения, в том числе и шум, но коэффициент сжатия получается значительно меньше, чем у методов сжатия с потерями.

По способу уменьшения избыточности выделяют следующие виды кодирования:

- статические методы – предсказывают вероятность появления следующего символа на основе анализа частоты появления различных последовательностей символов в ранее закодированной части сообщения;
- методы словарного сжатия – заменяют подстроки кодируемой последовательности символов ссылками в словарь на идентичные подстроки;
- контекстные методы – вероятность появления символа (элемента, пиксела, отсчета или набора качественно разных объектов) в зависимости от непосредственно ему предшествующих, или контекста;
- метод нулевых деревьев – используется древовидная структура вейвлет-разложения;
- метод кодирования длин серий – алгоритм, заменяющий повторяющиеся символы (серии) на один символ и число его повторов.

Цель кодирования максимально компактное хранение данных при сохранении допустимого качества изображения.

Критериями оценки методов сжатия являются:

- коэффициент (степень) сжатия;
- скорость кодирования/декодирования;
- объем занимаемой памяти.

Метод статического кодирования источников без памяти предполагает, что модель источника информации не изменяется. К такому методу относятся арифметического и префиксное (методы Шеннона-Фано, Хаффмана и другие) кодирование.

Методы словарного сжатия используют словарные модели (словари), которые формируются в процессе кодирования. Символьная последовательность на входе кодируется, ссылаясь на идентичные элементы из словаря.

В зависимости от организации словаря, схемы разбиения исходной последовательности и поиска совпадений, структурой ссылки на найденное совпадение выделяют различные методы кодирования: LZ77, LZ78, LZW, LZRW, LZSS, LZR и другие.

Кодирование нулевых деревьев широко используется в сжатии изображений. Отличительной особенностью данного подхода является обработка коэффициентов вейвлет-преобразования. К методам кодирования нулевых деревьев относятся EZW, SPECK и SPIHT методы сжатия.

Кодирование длин серий (RLE – Run-Length Encoding) – простой алгоритм сжатия, который работает с сериями данных. Данный алгоритм является самым производительным, но и наименее эффективным методом.

Сегментация является одной из базовых процедур цифровой обработки изображений, обеспечивающих решение задач анализа, описания и распознавания их элементов, визуализации и объектно-ориентированного кодирования. Сегментация изображения означает присвоение метки каждому его пикселю таким образом, что пиксели с одинаковыми метками имеют общие визуальные характеристики. Сегментацию изображения можно определить, как разделение изображения на области или категории, которые соответствуют различным объектам или частям объектов. Каждый пиксель изображения назначается одной из этих категорий, или может быть представлен как подразделение изображения на составляющие его области или объекты.

Цель сегментации заключается в упрощении и/или изменении представления изображения во что-то более содержательное и легкое для анализа.

Подход на основе сходства использует разбиение изображения на области, которые отвечают одинаковым критериям. К таким методам относятся

- пороговая обработка;
- выращивание областей (сегментация, ориентированная на области);
- разделение и слияние областей;
- морфологический метод (на основе водораздела).

Пороговая обработка – популярный метод сегментации изображений благодаря простоте реализации. Для определения значения порога часто используется гистограмма.

Способы пороговой обработки можно разделить на двухуровневые и многоуровневые. В двухуровневой пороговой обработке изображение сегментируется при помощи порогового значения на два уровня яркости: один уровень яркости соответствует фону и другой уровень отображает объекты. В случае многоуровневой пороговой обработки изображение сегментируется более чем одним пороговым значением. Изображение сегментируется,

используя многоуровневые методы пороговой обработки, отражая один фон и несколько объектов изображения.

Методы сегментации на основе областей (на основе однородности) разделяют изображения на области, объединяющими пиксели с аналогичными свойствами.

Сегментация на основе выращивания областей представляет собой процедуру, которая группирует пиксели или подобласти в более крупные области на основе заданных критериев. Метод выращивания областей дает надежное решение по сравнению с некоторыми другими методами. Алгоритм увеличения области является процессом присоединения соседних пикселей со сходными интенсивностями и является широко используемым способом сегментации. Основной подход заключается в использовании множества точек роста, из которых растут области в результате присоединения новых пикселей со схожими свойствами к каждой точке роста (пиксели, имеющие уровни яркости или цвета в заданных диапазонах) – выбор точек роста основан на некотором критерии (например, пиксели в определенном диапазоне уровней яркости, пиксели равномерно распределенные по сетке, и т.д.). Начальная область определяется как точное местоположение этих точек роста. Затем области наращиваются из этих точек до соседних точек в зависимости от критерия роста области.

В методе сегментации на основе разделения и слияния областей используется разделение изображения на набор разъединенных областей, которые затем сливаются и/или разделяются в зависимости от заданных условий. Этот метод разделяет изображения на области путем слияния или разделения соседних пикселей с однородными признаками.

Наиболее распространенная разновидность метода разделения и слияния областей основана на концепции квадродерева. Всё изображение рассматривается как одна область, а затем делится на четыре квадранта по заранее определенным критериям. Далее делится каждый квадрант еще на четыре квадранта с теми же критериями. Процесс продолжается до тех пор, пока это возможно.

Одним из распространенных методов сегментации изображений является кластеризация. Кластеризация относится к процессу группирования данных таким образом, что они становятся подобны в пределах каждой группы. Эти группы называются кластерами. Кластеризация представляет собой метод интеллектуального анализа данных, который используется при статистической обработке, распознавании образов, анализе изображений и т.д. Различные методы кластеризации включают в себя иерархическую кластеризацию, которая строит иерархию кластеров из отдельных элементов. Из-за своей простоты и эффективности, кластерные подходы являются одними из первых методов, используемых для сегментации изображений, в том числе текстурных.

Сегментация на основе водораздела (сегментация с использованием водораздела) является морфологической. Ее задача состоит в нахождении на изображении линии водораздела. Использование водораздела, как правило,

приводит к более сильной сегментации изображений из-за шумов и других локальных особенностей. Для устранения данного недостатка предложено множество алгоритмов, использующих маркеры, иерархическую и многомасштабную сегментацию. Благодаря ряду преимуществ, водораздел широко используется во многих задачах обработки изображений. Этот метод производит полное разделение изображения на отдельные области, даже если контраст имеет малое значение, что позволяет избежать необходимости выделения контуров.

Для сегментации АСМ-изображений был разработан алгоритм сегментации, который составляет матрицу сегментации, на основе значений высоты точек в пространстве. Разработанный алгоритм состоит из следующих шагов:

1 Чтение входного изображения и получение его размера $I(X, Y)$.

2 Инициализация новой матрицы $SM(X, Y)$, имеющей одинаковый размер с входным изображением. Значение элементов матрицы определяется высотой соответствующей точки на поверхности образца.

3 Установка исходных значений: для счетчика сегментов (NS) и счетчика циклов (C) устанавливается нулевое значение, а для указателя массива (SP) – верхнее значение уровня квантования.

4 Запуск цикла на входной матрице и формирование матрицы для уровней квантования.

5. Проверка количества сегментов, если $NS=0$, то осуществляется переход к следующим шагам для поиска новых областей.

6 Начало цикла сегментации: выращивание существующих областей.

7 Проверка условия выхода из цикла: если новых присоединяемых к выращиваемой области элементов нет, то осуществляется выход из цикла.

8 Обновление матрицы сегментации SM за счет новых значимых элементов.

9 Окончание цикла сегментации: значение счетчика циклов C увеличивается на единицу, работа алгоритма снова переходит к шагу 6.

10 Формирование новых областей и дополнение матрицы сегментации (SM) значениями новых областей.

11 Окончание цикла сегментации. Значение указателя массива SP уменьшается на единицу. Если $SP \geq 0$, то осуществляется переход к шагу 4 алгоритма; если $SP < 0$ – работа алгоритма завершена.

В качестве метода кодирования был выбран адаптированный метод Хаффмана, так как данный метод характеризуется минимальной избыточностью при условии кодирования каждого символа сообщения кодовой комбинацией из алфавита $\{0, 1\}$ и обеспечивает достаточно высокое качество сжатия информации.

Для тестовых АСМ-изображений были применены различные виды сегментации: метод выращивания областей (RG), метод волнового выращивания областей (VRG) и разработанный метод сегментации.

Алгоритм сегментации походит для АСМ-изображений, так как учитывает информацию о высоте точек в пространстве, т. е. чем ярче точка на изображении, тем выше она находится, аналогично, самым тусклым точкам соответствуют элементы на подложке. Данный алгоритм объединяет точки в сегменты на основе их уровней квантования. Основное отличие разработанного алгоритма от метода выращивания областей, заключается квазипараллельном выращивании областей, что повышает точность сегментации с плавными перепадами яркости. Рассматриваемый алгоритм, в отличии от метода волнового выращивания областей, выбирает начальные точки роста на основе уровней квантования, начиная с наибольшего, и присоединяет к ним соседние пиксели из смежных уровней квантования.

Разработанный алгоритм уступает по времени сегментации ранее известным методам выращивания областей. В случае ограничения алгоритма по времени, алгоритм будет остановлен и часть изображения останется несегментированной. Для тестовых изображений и большинства алгоритмов увеличение времени сегментации приводит к росту числа сегментов и уменьшению ошибки сегментации.

По сравнению с методами RG и VRG, представленный алгоритм сегментации имеет большее количество сегментов (NS), а, следовательно, снижается среднеквадратическая ошибка сегментации (MSE). Для тестовых изображений значение ошибки сегментации снижено на 13%, по сравнению с методов выращивания областей (RG), и на 5% в сравнении с методов волнового выращивания областей (VRG).

Результаты основных характеристик алгоритма Хаффмана для тестовых сегментированных изображений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты применения алгоритма Хаффмана для тестовых сегментированных изображений

Изображение	Время кодирования	Коэффициент сжатия	Время декодирования
Cardiomyocytes	2,95 с	1,93	102,89 с
Butterfly wings	2,71 с	1,78	119 с
Graphene	2,45 с	2,08	94,06
Nanosphere Lithography	2,71 с	1,89	102,88 с
Ruled Grating Irregularities	2,8 с	1,6	121 с
Three component polymer	2,62 с	1,89	106 с
Graphite	2,7 с	1,72	118 с

Использование адаптивного метода кодирования Хаффмана в основном выигрывает в уменьшении количества закодированных данных. Он обеспечивает лучший коэффициент сжатия, чем классический алгоритм сжатия Хаффмана. Адаптивный динамический алгоритм сжатия Хаффмана уступает более скоростным алгоритмам сжатия изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные с атомно-силового микроскопа имеют значительные объемы. Для сокращения объемов памяти и упрощения дальнейшей обработки применяются методы сегментации и кодирования. Однако, сегментация является наиболее вычислительно сложной операцией, требующей значительного времени и оперативной памяти для вычислений и хранения сегментированных изображений (время вычислений и емкость памяти растут с увеличением числа сегментов). Изображения с атомно-силового микроскопа имеют высокое пространственное разрешение с множеством детализованных объектов. Изображения с атомно-силового микроскопа являются текстурными (учитывается расстояние от зонда до исследуемой поверхности), следовательно, возрастает число выделяемых сегментов.

В диссертации были исследованы методы сегментации и кодирования изображений. Выполнено моделирование программного алгоритма сжатия изображений методом Хаффмана. Разработан алгоритм сегментации изображений с атомно-силового микроскопа, учитывающий расстояние от зонда АСМ до исследуемой поверхности. Данный алгоритм был сравнен со стандартными методами сегментации.

Была произведена оценка эффективности разработанного алгоритма сегментации в сравнении с методами сегментации выращивания областей и волнового выращивания областей по основным параметрам: время обработки, количество сегментов и среднеквадратическая ошибка сегментации. Вычислена эффективность применения алгоритма Хаффмана для тестовых изображений с атомно-силового микроскопа.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 – А. Козак, М. В. Выбор начальных точек волнового выращивания областей по гистограмме яркости изображения / М. В. Козак // Инфокоммуникации: материалы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. – Минск: БГУИР, 2018. – С. 22.

2 – А. Козак, М. В. Предварительная обработка АСМ-изображений / М. В. Козак // Инфокоммуникации: материалы 55-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2018 г. – Минск: БГУИР, 2019. – С. 56.