

T.C. Хуанг

Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 004
ББК 32.81
Т11

T11 **Т.С. Хуанг**
Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг – М.:
Книга по Требованию, 2012. – 222 с.

ISBN 978-5-458-31794-8

Изложены основы теории и применения новых эффективных в вычислительном отношении алгоритмов цифровой обработки изображений. Рассмотрены алгоритмы быстрого транспонирования двумерных массивов, хранящихся во внешних запоминающих устройствах, принципы организации вычислений при реализации алгоритма Винограда дискретного преобразования Фурье, позволяющего выполнить его с: уменьшенным, по сравнению с известными алгоритмами быстрого преобразования Фурье, числом умножений

ISBN 978-5-458-31794-8

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

разование Фурье и другие линейные ортогональные преобразования.

Хорошо известно, как стимулировало развитие цифровой обработки изображений изобретение алгоритма быстрого преобразования Фурье и других быстрых алгоритмов ортогональных преобразований. В последние годы в этом отношении наметился существенный прогресс, связанный с теоретико-числовыми преобразованиями, алгоритмом Винограда вычисления дискретного преобразования Фурье и, наконец, полиномиальными преобразованиями, где удается воспользоваться двумерностью данных для ускорения вычислений. Предлагаемая читателю книга поможет специалистам освоить эти достижения.

Но ДПФ и свертка — это только линейные преобразования. В арсенале средств обработки изображений необходимы и нелинейные преобразования. Конечно, произвольное преобразование цифрового сигнала можно реализовать из линейных и нелинейных преобразований отдельных отсчетов сигнала (поэлементных нелинейных преобразований). Однако все-таки желательно иметь более крупные блоки, чем поэлементные преобразования.

Особенность изображений как двумерных сигналов состоит в том, что отдельные элементы изображения меняются обычно не независимо друг от друга, а находятся в определенной связи с соседними элементами. Поэтому большинство алгоритмов преобразования изображений носит локальный характер, т. е. обрабатывают изображения сразу по группам элементов, располагающихся в некоторой окрестности вокруг данного. Линейные преобразования легко и естественно удовлетворяют такому свойству локальности и при этом допускают построение алгоритмов, вычислительная сложность которых мало зависит от размеров охватываемой окрестности. Такие же свойства требуются и от нелинейных преобразований изображений.

В настоящее время намечается формирование одного весьма полезного класса нелинейных преобразований, обладающего свойствами локальности и простоты вычислений. Его составляют алгоритмы, которые можно было бы назвать алгоритмами ранговой фильтрации, так как они основаны на измерении локальных ранговых статистик изображений. Поскольку любые ранговые статистики можно найти из локальных гистограмм, а локальные гистограммы можно вычислить рекурсивно, в принципе вычислительная сложность алгоритмов ранговой фильтрации почти не зависит от размеров окрестности. При вычислении конкретных ранговых статистик и производных от них возможны дальнейшие упрощения, связанные, в частности, с информационной избыточностью изображений.

Наиболее известный сейчас алгоритм этого класса — алгоритм медианной фильтрации. Ему посвящены две главы предлагаемой книги, которые, безусловно, привлекут внимание специалистов, так как в них впервые подробно и систематически разбираются

свойства медианных фильтров. Как известно, медиана является робастной (устойчивой к распределению) оценкой среднего значения выборки, и именно свойство робастности определяет преимущества медианного фильтра перед фильтрами, вычисляющими локальное среднее и использовавшимися до сих пор для сглаживания изображений. Эта связь медианной фильтрации с робастными алгоритмами оценки параметров, развивающимися в настоящее время в математической статистике, не показана в книге, и поэтому на нее целесообразно указать особо. Она дает повод для далеко идущих обобщений медианных фильтров, например, обобщений в сторону создания медианных согласованных двумерных фильтров как робастных аналогов хорошо известных линейных согласованных фильтров.

Другими примерами ранговых алгоритмов могут служить алгоритмы экстремальной фильтрации, которые заменяют анализируемый элемент изображения максимумом или минимумом по окрестности. А если заменять значение элемента изображения его рангом по окрестности, т. е. номером, который данный элемент займет в ряду расположенных по возрастанию значений элементов в заданной окрестности, очевидно, мы получим не что иное, как хорошо известный алгоритм скользящей эквализации. Таким образом, к ранговым алгоритмам можно отнести и скользящую эквализацию, и другие алгоритмы аддитивных амплитудных преобразований, основанные на анализе локальных гистограмм. Эта связь подчеркивает еще одно свойство ранговых алгоритмов, их локальную адаптацию к характеристикам обрабатываемого изображения и потенциальные возможности использования их не только для робастного сглаживания, но и для выделения признаков при препарировании и автоматическом распознавании изображений. Эти соображения также стоит учитывать при чтении последних двух глав книги.

При переводе книги и переводчики, и редактор столкнулись с рядом трудностей, притом не только терминологического порядка. Книга невелика по объему, но очень насыщена новыми фактами, излагаемыми, особенно в гл. 2—4, в достаточно, а иногда, может быть, чрезмерно общей форме. Поэтому мы постарались по возможности облегчить ее чтение с помощью примечаний. Надеемся, что читателю окажется полезным также предлагаемый редактором дополнительный список литературы на русском языке по вопросам цифровой обработки изображений и быстрым алгоритмам обработки.

Перевод книги выполнен В. Б. Макуловым (предисловие, гл. 1, 2, 4), А. А. Гуровым (гл. 3) и С. Л. Ярославским (гл. 5, 6).

Д-р физ.-мат. наук
Л. П. Ярославский

Предисловие

В последнее десятилетие размах исследований в области цифровой обработки изображений стремительно возрос. И это не удивительно, если учесть, что в широком смысле обработка изображений — это обработка многомерных сигналов, а большинство сигналов в реальном мире является многомерными. Фактически и одномерные сигналы, с которыми мы работаем, часто представляют собой упрощенную копию многомерных сигналов. Например, речь часто рассматривают как одномерный сигнал, т. е. функцию одной переменной (времени). Однако в действительности речевой сигнал существует в пространстве и поэтому является функцией четырех переменных (трех пространственных переменных и времени).

Существуют аналоговые (оптические и электронно-оптические) и цифровые методы обработки изображений. Из-за присущих цифровым методам преимуществ (гибкости, точности), быстрого развития вычислительной техники и таких связанных с ней отраслей техники, как производство схем высокой и сверхвысокой степени интеграции, можно смело сказать, что, за исключением некоторых специальных задач, предпочтение отдается обычно цифровым методам.

Цель данной книги, как и предыдущего тома (*Two-Dimensional Digital Signal Processing I: Linear Filters*), — дать глубокий анализ трех важнейших классов цифровых методов решения задач обработки изображений: линейной фильтрации, преобразований и медианной фильтрации. Эти книги взаимосвязаны, но пользоваться ими можно и независимо друг от друга.

В шестом томе серии *Picture Processing and Digital Filtering* (первое издание, 1975)¹ были подробно рассмотрены избранные задачи цифровой обработки двумерных сигналов, включая преобразования, проектирование фильтров и реставрацию изображений. С тех пор в этих направлениях был достигнут значительный прогресс. В 1978 г., когда планировалось второе издание этого тома (опубликовано в 1979 г.), мы решили не вносить существенных изменений, а лишь добавить новую главу, содержащую краткий обзор наиболее современных достижений. Мы рассчитывали, что подробное рассмотрение некоторых важных новых результатов

¹ Имеется перевод: *Обработка изображений и цифровая фильтрация/Под ред. Т. Хуанга: Пер. с англ.—М.: Мир, 1979.—318 с.—Прим. ред.*

появится в последующих томах физической серии издательства Шпрингер.

Две книги, о которых здесь идет речь, стали первыми из задуманных томов. Материал в них разделен на три части. В первой, посвященной линейным фильтрам, представлены полученные недавно основные результаты в области синтеза рекурсивных и нерекурсивных фильтров, исследования их устойчивости, калманновской фильтрации (с приложением к улучшению визуального качества и реставрации изображений). Среди наиболее важных вопросов здесь рассмотрены вопросы проектирования и исследования устойчивости рекурсивных по полуплоскости фильтров, представляющих в настоящее время большой интерес.

Вторая и третья части вошли в настоящий том. В разделах, посвященных преобразованиям, обсуждаются две задачи: алгоритмы транспонирования больших матриц и теоретико-числовые методы вычисления преобразований и свертки. Приведен детальный вывод алгоритма преобразования Фурье.

В первой и второй частях основное внимание уделено линейной обработке. В третьей части, посвященной медианной фильтрации, изучается особый метод нелинейной обработки. Медианская фильтрация стала довольно популярной в обработке изображений и речевых сигналов. Однако по этим вопросам опубликованы лишь скучные материалы. Две главы третьей части содержат новые результаты, большинство из которых приводятся здесь впервые.

Главы в этом volume носят дидактический характер. В то же время они выводят читателя на самый передний край современных исследований. Книга будет полезна как справочник научным работникам и инженерам, может служить дополнительным учебным пособием при чтении курсов различной сложности по цифровой обработке сигналов, обработке изображений и цифровой фильтрации.

Урбана, Иллинойс, сентябрь 1980 Томас С. Хуанг

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

(T. C. Хуанг)¹

Цель этого тома заключается в подробном рассмотрении двумерных цифровых преобразований и медианной фильтрации. Такой выбор продиктован приложениями этих математических операций к обработке изображений.

Существуют три основные области обработки изображений [1.1]: эффективное кодирование, реставрация и улучшение визуального качества изображений, распознавание образов. Многие методы реставрации и улучшения визуального качества изображений основаны на использовании линейных пространственно-инвариантных (ЛПИ) фильтров. Такие фильтры подробно рассмотрены в [1.1, 1.2]. Преобразования и связанные с ними методы позволяют построить эффективную с вычислительной точки зрения реализацию ЛПИ-фильтров. Многие преобразования полезны также при эффективном кодировании и выделении признаков в распознавании образов.

Для успешной реставрации изображений и улучшения их визуального качества часто требуются нелинейные методы. Одним из таких методов, популярных в последнее время не только в обработке изображений, но и вообще в обработке сигналов, является медианская фильтрация. Этот метод может применяться также при решении некоторых задач, связанных с распознаванием, например, уточнения линий и выделения небольших изолированных объектов на изображении.

В следующих разделах более подробно обсуждается содержание глав этой книги.

1.1. Преобразования

Различные двумерные преобразования рассматривались с единых позиций (на основе понятия внешнего произведения) в [1.2, гл. 2]. Более детальное обсуждение некоторых из них можно найти в [1.3]. Среди этих преобразований наиболее широко применяется, несомненно, преобразование Фурье. Другие полезны главным образом в кодировании изображений и отчасти — в задачах распознавания. Опыт последних лет показал, что среди независимых от изображений преобразований (в эту категорию не входит преобразование Карунена — Лоэва) наилучшие результаты в ко-

¹ Department of Electrical Engineering and Coordinated Science Lab., University of Illinois, Urbana, IL61801, USA.

дировании изображений дают дискретное косинусное преобразование (ДКП) и слэнт-преобразование¹. Как показано в [1.4], с теоретической точки зрения ДКП асимптотически оптимально для всех марковских сигналов конечного порядка². Джейн недавно ввел новое семейство унитарных преобразований, которое включает многие известные преобразования, такие, как ДКП [1.5].

Разложение по сингулярным значениям (РСЗ) и его приложения достаточно глубоко рассмотрены в [1.2, гл. 1, 2]. Недавно было проведено сопоставление поведения сингулярных значений с автокорреляционной функцией изображения [1.6]. Разработан новый метод подавления шума при реставрации изображений посредством РСЗ [1.7].

Обычный метод вычисления ДКП состоит в использовании быстрого преобразования Фурье [1.8, 1.9]. Однако новейшие быстрые алгоритмы обещают увеличение скорости в шесть раз [1.10].

Для выполнения двумерных преобразований, таких, как преобразование Фурье или Адамара, на ЭВМ, чья память на магнитных сердечниках не позволяет хранить изображение целиком, необходима дополнительная память. При этом обычно используется транспонирование матриц. Эффективный алгоритм транспонирования матриц был предложен в 1972 г. Эклундом [1.11]. Несколько позже он разработал два новых алгоритма и получил некоторые результаты по оптимальной стратегии [1.12] (см. также [1.13]). С другой стороны, двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и аналогичные ему преобразования можно выполнять и без транспонирования матриц [1.14—1.18].

Интересной новой областью исследований является использование теоретико-числовых методов в обработке сигналов. Первым, кто предложил применить теоретико-числовые преобразования (ТЧП) (например, преобразования по числам Ферма) для вычисления быстрой двумерной свертки, был Рейдер. Блестящим введением в эту идею является раздел, написанный им в [1.24]. Детальное изложение можно найти в [1.25, 1.26].

Используя ТЧП, заметную экономию вычислений можно получить в тех случаях, когда: 1) одномерные последовательности, подлежащие обработке, относительно коротки; 2) необходима значительная точность и 3) операции умножения дороже операций сложения.

¹ В оригинале *s'ant transform*. Этот термин иногда переходится как преобразование по наклонному базису или преобразование по пилообразному базису; смысл состоит в том, что базисные функции имеют кусочно-пилообразную форму. — Прим. ред.

² Преимущество дискретного косинусного преобразования связано с более фундаментальным фактом — ДКП соответствует преобразованию Фурье четным образом продолженных последовательностей. Благодаря четному продолжению устраняются разрывы на краях последовательности и ее ряд Фурье сходится намного быстрее [1]. — Прим. ред.

Виноград применил теоретико-числовые методы к вычислению ДПФ [1.27—1.30]. При этом число умножений значительно снижается по сравнению с БПФ, а число сложений почти не меняется. Например, для 1024-точечной последовательности БПФ требует 12 288 умножений и 26 624 сложений, тогда как алгоритм Винограда преобразования Фурье (АВПФ) для 1008 точек требует 4212 умножений и 25 224 сложений. Дополнительные сведения и соображения по программной реализации можно найти в [1.31—1.34].

АВПФ реализован в быстродействующем процессоре обработки сигналов [1.35]. Ошибки квантования (обусловленные округлением и квантованием коэффициентов) при АВПФ для случая вычислений с фиксированной запятой изучались в [1.36]. Было обнаружено, что в общем случае при той же ошибке вычислений АВПФ требует для представления данных на 1—2 бита больше, чем алгоритм БПФ.

Материал по преобразованиям в книге разделен на две части: алгоритмы транспонирования матриц и теоретико-числовые методы. В гл. 2 обсуждаются некоторые эффективные алгоритмы транспонирования матриц, а также прямой метод преобразования Андерсона [1.14]. В гл. 3 описываются быстрые алгоритмы цифровой свертки и преобразования Фурье, основанные на полиномиальных преобразованиях. В некоторых алгоритмах используется комбинация полиномиальных преобразований и алгоритма Винограда. Подробный вывод АВПФ приведен в гл. 4.

1.2. Медианные фильтры

Линейные пространственно-инвариантные (ЛПИ) фильтры полезны для реставрации и улучшения визуального качества изображений. Их можно применять, например, при реализации винеровских фильтров для снижения уровня шума на изображениях. Однако, чтобы подавить шум и при этом сохранить контурную часть изображений, приходится применять нелинейные или линейные пространственно-неинвариантные (ЛПНИ) фильтры. Ограничения на использование ЛПИ-фильтров в задачах реставрации изображений обсуждаются в [1.2, гл. 1, 5].

Многие нелинейные и ЛПНИ-фильтры для реставрации изображений описаны в [1.2, гл. 1, 5]. В гл. 5 предыдущего тома, посвященного линейным фильтрам [1.1], были описаны калмановские ЛПНИ-фильтры, используемые для подавления шума при реставрации изображений. В гл. 5 и 6 этого тома рассмотрена особая нелинейная процедура — медианная фильтрация. Обнаружено, что применение медианных фильтров эффективно для подавления некоторых видов шума и периодических помех без одновременного искажения сигнала [1.37—1.39]. Такие фильтры стали весьма популярны в обработке изображений и речевых сигналов.

Поскольку теоретический анализ поведения медианных фильтров очень труден, опубликовано очень мало результатов по этому вопросу. Две главы нашей книги содержат в основном новые результаты, не освещенные до сих пор в открытой литературе. В гл. 5 рассматриваются статистические свойства медианных фильтров. В частности, излагаются различные свойства выходного сигнала медианного фильтра при гауссовском шуме или сумме ступенчатой функции и гауссовского шума на входе.

Глава 6 посвящена детерминированным свойствам медианных фильтров. Особенно интересными представляются результаты, относящиеся к так называемым стабильным точкам медианных фильтров. Стабильной точкой является последовательность (в одномерном случае) или массив (в двумерном случае), которые не изменяются при медианной фильтрации. В гл. 6 Тян показал, что в одномерном случае стабильными точками медианных фильтров являются «локально-монотонные» последовательности. Исключение составляют некоторые периодические двоичные последовательности. В последнее время Галлагер и Вайс [1.40] сумели устраниТЬ это исключение, ограничив длину последовательностей.

В гл. 6 кратко описан эффективный алгоритм [1.39] медианной фильтрации, основанный на модификации гистограмм. В [1.41, 1.42] обсуждается аппаратурная реализация медианной фильтрации в реальном масштабе времени на основе цифровых избирательных схем. Метод нахождения медианы, основанный на двоичном представлении элементов изображения в апертуре фильтра, предложен в [1.43], где сравниваются аппаратурная реализация этого метода, алгоритм преобразования гистограмм и метод цифровых избирательных схем по сложности и скорости. Реализация медианных фильтров на двоичном матричном процессоре рассмотрена в [1.41]. Разработан метод реализации медианных фильтров в конвейерном процессоре, работающем синхронно с видеосигналом [1.45].

В гл. 5 и 6 изложен материал главным образом теоретического характера. В качестве дополнения представим здесь некоторые экспериментальные результаты. На рис. 1.1 показаны примеры стабильных точек медианных фильтров. Даны исходное изображение (а) и результаты шестикратного применения трех различных медианных фильтров (б). Дальнейшее применение фильтров не вносит существенных изменений в результаты. Таким образом, изображения на рис. 1.1, б—г являются стабильными точками трех медианных фильтров.

Медианные фильтры особенно удобны для борьбы с импульсным (точечным) шумом. Этот факт иллюстрируется на рис. 1.2. На рис. 1.2, а показан результат передачи изображения 1.1, а по двоичному симметричному каналу с шумом при использовании импульсно-кодовой модуляции. В этом случае на изображении появляется импульсный шум. Применение медианного фильтра позволяет подавить большую часть шумовых выбросов (рис. 1.2, б),

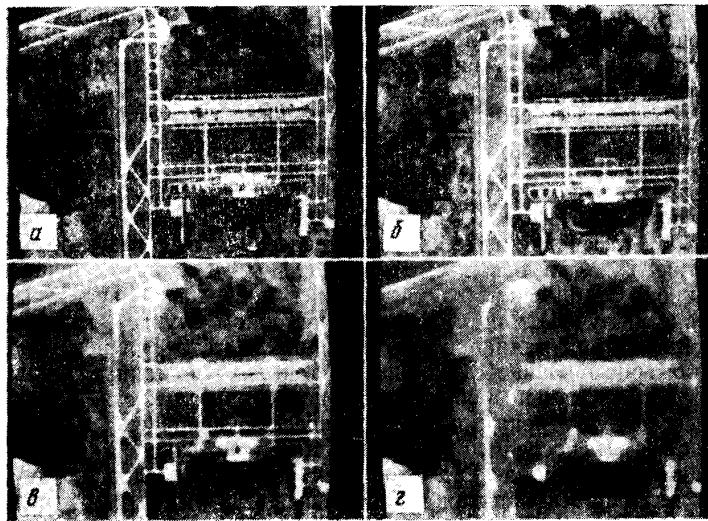


Рис. 1.1. Стабильные точки медианных фильтров:
а — аэрофотоснимок части аэропорта, дискретизированный на 256×256 элементов по 8 бит/отсчет; *б* — изображение, подвергнутое шестикратной медианной фильтрации с крестообразной апертурой 3×3 ; *в* — то же, при квадратной апертуре 3×3 ; *г* — то же, при квадратной апертуре 5×5

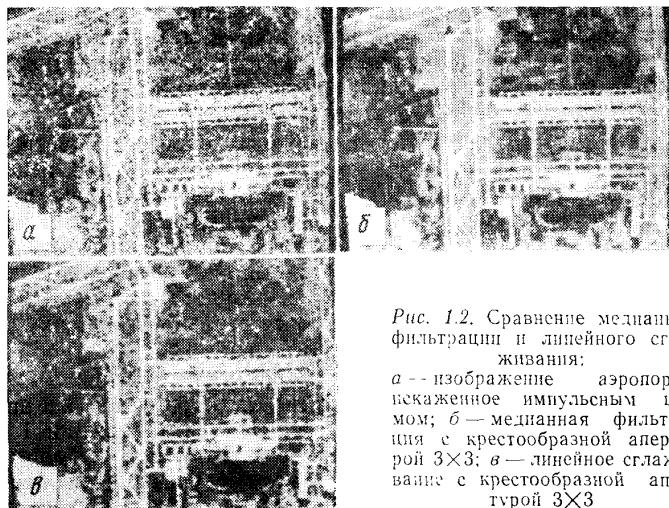


Рис. 1.2. Сравнение медианной фильтрации и линейного сглаживания:
а — изображение аэропорта, покрытое импульсным шумом; *б* — медианская фильтрация с крестообразной апертурой 3×3 ; *в* — линейное сглаживание с крестообразной апертурой 3×3