

УДК 004.33.07/.08; 004.33; 004.08

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМАТОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

П.С. Скаков

Рассматривается выбор оптимального формата представления изображений, получаемых методами оптической когерентной томографии при исследованиях микроструктуры случайно-неоднородных сред. Проведен анализ форматов, удовлетворяющих требованиям предметной области, и рассмотрены результаты экспериментальной проверки эффективности представления изображений в различных форматах. Приводятся рекомендации по использованию форматов и выбору их параметров.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, обмен данными, кодирование, представление изображений.

Введение

При использовании методов оптической когерентной томографии (ОКТ) обеспечивается получение информации о внутренней микроструктуре исследуемых объектов с высокой разрешающей способностью. В системах широкопольной ОКТ, когда регистрация излучения, отраженного от объекта, осуществляется при помощи видеокамеры, требуется обрабатывать и хранить сотни видеок кадров, при этом объем данных может достигать сотен мегабайт и более. При получении информации о трехмерной микроструктуре объектов необходимо обеспечивать эффективное сжатие при хранении таких данных. С другой стороны, применение в медицинской диагностике накладывает существенные ограничения на возможные методы сжатия томограмм, так как алгоритмы сжатия с потерями приводят к искажению изображения и появлению различного вида артефактов, которые могут быть ошибочно интерпретированы как наличие или отсутствие каких-либо существенных признаков проводимого медицинского исследования. Таким образом, до проведения подробного изучения предметной области на допустимые искажения изображений в качестве возможных форматов хранения следует рассматривать только форматы сжатия без потерь.

Необходимо отметить, что внутренний формат хранения изображений в системе может отличаться от предоставляемого пользователям формата. Это связано с различиями в требованиях к внутреннему хранению данных и обмену данными с другими системами. При внутреннем хранении решающее значение имеют степень сжатия для максимального уменьшения объема данных и скорость обработки, обеспечиваемая, в частности, при использовании специализированных аппаратных блоков. При обмене с другими системами уровень сжатия и скорость обработки остаются важными, но на первый план выходит требование обеспечения совместимости при переносе данных. Для медицинских исследований это особенно важно, так как может потребоваться доступ к данным с самого разнообразного и заранее неизвестного оборудования, причем возможность легкой и правильной интерпретации представления должна обеспечиваться в течение длительного периода до нескольких десятков лет.

Далее будем рассматривать форматы представления изображений для обмена данными с другими системами.

Описание рассматриваемых форматов файлов

Из стандартных форматов хранения изображений без потерь были рассмотрены широко распространенные форматы PNG, TIFF (со сжатием packbits, lzw, deflate), несколько менее известные JPEG 2000, JPEG LS, а также вариант сжатия последовательности кадров как видеоданных с использованием формата H.264.

Формат PNG [1] является в настоящее время одним из самых распространенных форматов представления изображений без потерь. Поддерживаются изображения с числом каналов от 1 до 4 (предполагается модель RGB) и точностью от 1 до 16 бит на компонент каждого из каналов. Данные сжимаются по алгоритму Deflate, представляющим собой комбинацию LZ77 и кодирования Хаффмана. Перед сжатием есть возможность проведения предварительной фильтрации с целью улучшения сжимаемости. В качестве вычисляемого предиктора можно выбрать один из пяти вариантов: 0 – нет фильтрации, 1 – сосед слева, 2 – сосед сверху, 3 – среднее арифметическое соседей слева и сверху, 4 – фильтр Paeth: сосед слева (A), сверху (B) или слева-сверху (C) в зависимости от того, какое значение ближе к $A+B-C$. Фильтрацию можно выбирать независимо по каждой линии изображения, что породило различные эвристики, называемые в программах вариантами фильтрации 5, 6 и т.д. Кроме хранения информации непосредственно об изображении, возможно внедрение в файл дополнительной метаинформации, в том числе текстовой, что, тем не менее, поддерживается конкретными реализациями весьма редко.

Формат TIFF [2] следует скорее считать контейнером, чем некоторым конкретным форматом представления, так как формат хорошо расширяем, спецификация описывает большое число поддерживаемых цветовых пространств, форматов значений, вариантов сжатия и представления метаинформации. Кроме того, на практике часто можно встретить специфические форматы изображений, построенные на

основе TIFF, но использующие собственные нестандартные методы сжатия – например, многие RAW-файлы цифровой фотографии. Из описанных в спецификации TIFF 6.0 нас будут интересовать форматы сжатия packbits, LZW, а также Deflate из TIFF Specification Supplement 2. Перед сжатием перечисленными универсальными алгоритмами есть возможность провести один из видов фильтрации: 1 – нет фильтрации, 2 – горизонтальное предсказание (подобно методу 1 в PNG), 3 – предсказание для данных в формате с плавающей точкой (Specification Supplement 3).

Необходимо отметить, что TIFF является единственным из рассмотренных форматов представления изображений, который поддерживает многостраничные изображения и был протестирован как в варианте отдельного файла на каждый кадр, аналогично другим форматам, так и в виде одного многостраничного файла на все изображение (обозначенного как TIFF-M). Однако крайне обширная спецификация формата привела на практике к тому, что полностью весь стандарт практически никем не реализуется, и заранее трудно оценить, какой процент реализаций поддерживает выбранные возможности.

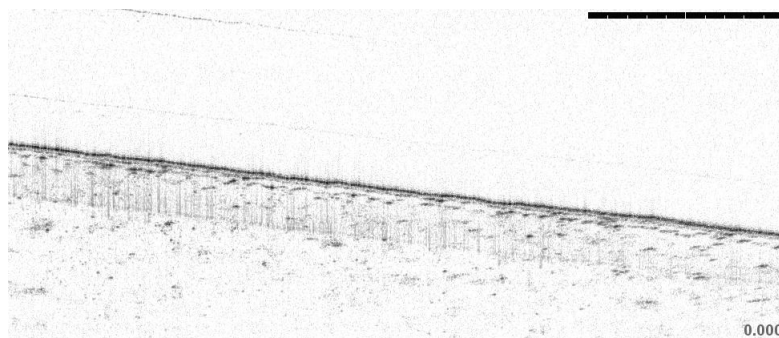
Формат JPEG 2000 [3] был разработан Joint Photographic Experts Group в 2000 г. в качестве замены JPEG, но до сих пор не получил широкого распространения и практически неизвестен на фоне своего крайне популярного предшественника, разработанного той же группой в 1992 г. По своему внутреннему формату JPEG 2000 отличается от JPEG весьма радикально: используется вейвлет-преобразование вместо дискретного косинусного преобразования, контекстное арифметическое сжатие вместо кодирования Хаффмана, поддерживается режим без потерь и множество дополнительных возможностей, таких как масштабируемость (возможность представления изображения в разных разрешениях), произвольный доступ к кодовому потоку и т.д. Необходимо отметить, что, несмотря на добавление в стандарт JPEG режима без потерь и арифметического сжатия, эти возможности не получили распространения и практически никем не поддерживаются в настоящее время, что исключает его из кандидатов для формата обмена изображениями.

Формат JPEG LS [4] был разработан в 1999 г. для кодирования изображений без потерь в качестве замены неудачного режима без потерь стандарта JPEG. Формат не получил широкого распространения, но заслуживает рассмотрения как имеющий несколько аппаратных и открытых программных реализаций и используемый в отдельных разработках медицинской техники. Кодирование состоит из декорреляции на основе LOCO-I предсказания, контекстного моделирования и финального кодирования комбинацией кодов Голломба и RLE.

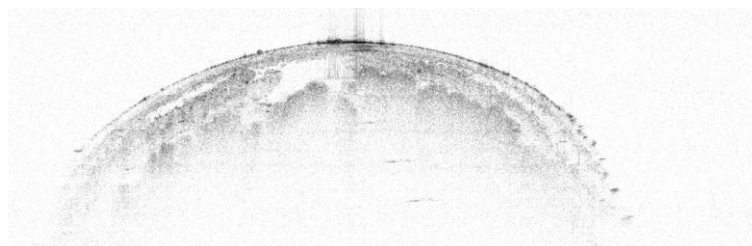
Кроме форматов представления непосредственно изображений, была также проверена возможность кодирования изображений как видеоданных в формате H.264 [5]. Стандарт H.264 представляет собой способ кодирования видео, использующий современные технологии для повышения степени и качества сжатия; хорошо поддерживается как программно, так и аппаратно; имеет варианты сжатия без потерь и точность более 8 бит на компонент, но поддерживаются такие возможности существенно реже, особенно если рассматривать аппаратные реализации. Отличительной особенностью данного представления является возможность кодировщика не просто обрабатывать каждое изображение отдельно, но еще и ссылаться на информацию в соседних кадрах. Данный подход заметно замедляет не только кодирование, но и декодирование, так как для получения данных некоторого кадра может потребоваться также декодировать еще и десятки других кадров, но, как правило, позволяет получить существенно лучшее сжатие.

Экспериментальные результаты

В качестве тестовых изображений были выбраны несколько изображений, полученных различными методами. На рис. 1 представлены кадры изображений «Лист» и «Личинка», полученных при использовании метода спектральной ОКТ.



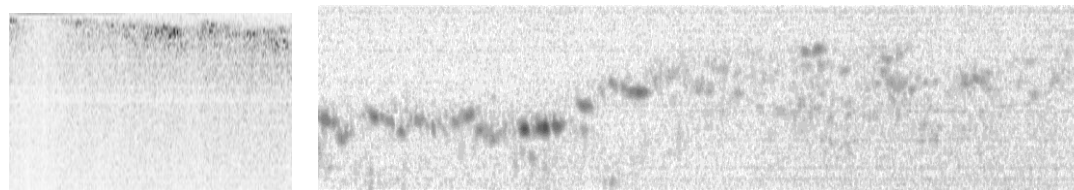
а



б

Рис. 1. Первый кадр изображения «Лист», 971x416 пикселей, 400 кадров, 8 бит (а); пятисотый кадр изображения «Личинка», 1300x416 пикселей, 1069 кадров, 8 бит (б)

На рис. 2 представлены кадры из изображений, полученных методом корреляционной ОКТ для различных видов бумаги.



а

б

Рис. 2. Первые кадры изображений «Бумага 1», 640x1000 пикселей, 1069 кадров, 8 бит (а), и «Бумага 2» 1280x277 пикселей, 640 кадров, 8 бит (б)

Результаты кодирования тестовых изображений в соответствии с рассматриваемыми форматами приведены в табл. 1. Необходимо учитывать, что большинство современных форматов сжатия стандартизированы через спецификацию алгоритма декодирования, что означает возможность изменения алгоритма сжатия и получаемой степени сжатия при одинаковом соответствии некоторому стандарту. В случаях, когда формат поддерживал несколько видов фильтрации или реализация предоставляла расширенные возможности по настройке алгоритма сжатия, выбирался наилучший результат.

По полученным данным можно сделать вывод, что самое компактное представление в большинстве случаев обеспечивает формат PNG, однако в зависимости от используемой реализации размер результата может отличаться до 17% даже при оптимальном выборе всех параметров. Формат стандартизирован и широко распространен, что означает хорошую совместимость и простоту реализации преобразований при работе с этим форматом.

Из остальных форматов необходимо выделить многостраничный TIFF со сжатием Deflate, как обеспечивающий представление в виде одного файла в сочетании с довольно компактным представлением и невысокой вычислительной сложностью. Кроме этого, в связи с использованием алгоритма, подобного применяемому в PNG, можно ожидать уменьшения размера еще до нескольких десятков процентов при более точной настройке параметров алгоритма сжатия.

Из недостатков TIFF Deflate следует отметить описание Deflate лишь в расширенном стандарте формата, что может привести к несовместимости с оборудованием, реализующем только базовую спецификацию TIFF 6.0. К недостаткам TIFF следует отнести также недостаточный выбор вариантов предварительной фильтрации, что обусловило большой проигрыш формату PNG на изображениях корреляционной ОКТ: на рассмотренных изображениях оптимальной фильтрацией является, как будет показано далее, предсказание на основе соседа сверху – режим, присутствующий в PNG, но не в TIFF. При повороте изображений на 90° появляется возможность использовать оптимальный предиктор слева, и TIFF Deflate дает близкую к PNG степень сжатия аналогично изображениям спектральной ОКТ.

	«Лист»	«Личинка»	«Бумага 1»	«Бумага 2»
Без сжатия TIFF-M	157 863	565 420	319 451	221 749
TIFF-M packbits	126 497	435 663	321 503	180 810
TIFF packbits	126 352	435 671	321 525	180 585
TIFF-M lzw	85 564	285 524	268 369	58 221
TIFF lzw	101 349	285 532	268 391	66 050
TIFF-M deflate	77 324	259 050	210 450	58 270
TIFF deflate	84 845	259 059	210 472	63 062
PNG 7zip	70 006	231 997	86 632	43 054

PNG kzip	67 643	224 685	86 494	42 877
PNG zlib	68 044	225 109	88 576	50 140
JPEG-LS	88 691	298 756	80 842	107 104
JPEG 2000	104 626	360 432	57 387	145 007
H.264	78 134	269 537	84 212	65 339

Таблица 1. Размер файлов для различных форматов сжатия, КБ

Неожиданно плохо показало себя сжатие последовательности кадров как видеоданных в формате H.264. Несмотря на межкадровое сжатие и более сложные алгоритмы по сравнению с другими рассмотренными форматами, на проанализированных образцах значительного выигрыша в степени сжатия обнаружено не было.

Оптимизация параметров формата PNG

Формат PNG показал в среднем наилучшие результаты, и целесообразно более подробно остановиться на его параметрах. Как уже упоминалось, формат поддерживает различные варианты предварительной фильтрации, кроме того, реализации часто предоставляют возможность настроить отдельные параметры алгоритма Deflate. В зависимости от выбранных значений разница в размерах получаемых файлов может достигать нескольких раз, превышая разницу между различными форматами с оптимальным выбором параметров.

В табл. 2 приведены результаты выбора различных видов фильтрации при оптимальном выборе стратегии Deflate из библиотеки zlib. Хорошо видно, что оптимальный тип фильтрации связан с видом метода ОКТ: для изображений, полученных в результате спектральной ОКТ, наилучшим вариантом является отсутствие предварительной фильтрации (тип 0), тогда как для корреляционной ОКТ наилучшим получилось предсказание на основе соседа сверху (тип 2), что при другой ориентации изображения будет соответствовать соседу слева (тип 1).

	«Лист»	«Личинка»	«Бумага 1»	«Бумага 2»
0 (нет)	68 044	225 109	215 094	53 718
1 (слева)	90 990	311 511	206 048	61 252
2 (сверху)	88 581	299 784	88 576	50 140
3 (слева и сверху)	94 041	322 788	168 349	89 613
4 (Paeth)	94 355	326 124	88 758	51 804

Таблица 2. Размер файлов в зависимости от типа фильтрации PNG, КБ

Влияние стратегии сжатия Deflate на размер приведено в табл. 3, тип фильтрации был выбран оптимальным. Библиотека zlib в качестве реализации Deflate была выбрана по причине ее популярности в практических применениях. Наилучшее сжатие достигалось при выборе стратегии Huffman only, причем для всех изображений. Необходимо отметить, что стратегия Huffman only превзошла остальные варианты не только по степени сжатия, но по скорости: в 3 раза быстрее обычно используемых стратегий Default/Filtered и Fixed на минимальном сжатии, в 6,5 раз – на максимальном, незначительно быстрее RLE.

Из различных реализаций Deflate наилучшее сжатие было получено при использовании варианта kzip, но из-за закрытости и недоступности данной реализации даже в виде отдельной библиотеки полученные результаты представляют лишь общий интерес с малой вероятностью встретить их на практике.

	«Лист»	«Личинка»	«Бумага 1»	«Бумага 2»
Default, min	75 595	252 459	96 068	54 585
Default, max	74 507	248 084	92 923	51 290
Filtered, min	72 849	243 696	94 711	54 771
Filtered, max	72 243	240 877	91 698	51 549
Huffman only	68 044	225 109	88 576	50 140
RLE	71 068	238 102	92 257	53 507
Fixed, min	87 471	293 115	125 103	66 236
Fixed, max	86 166	288 037	120 685	63 174

Таблица 3. Размер файлов в зависимости от стратегии алгоритма Deflate, КБ

Заключение

На основании полученных результатов можно рекомендовать в качестве формата обмена данными для медицинских систем ОКТ следующие форматы:

1. PNG – самое компактное представление, очень хорошая совместимость, простота реализации;
2. многостраничный TIFF со сжатием Deflate – по степени сжатия и совместимости несколько проигрывает PNG, но дает возможность хранения изображения в одном файле вместо нескольких сотен для варианта 1;
3. PNG-файлы, упакованные в ZIP-архив без сжатия – альтернативный вариант для представления изображения одним файлом с сохранением всех достоинств варианта 1 и лишь незначительным усложнением реализации.

При выборе формата PNG для изображений, полученных в результате спектральной ОКТ, не следует использовать фильтрацию (тип 0), для корреляционной ОКТ – использовать фильтрацию с предсказанием соседом слева (тип 1) или сверху (тип 2) в зависимости от ориентации изображения. Если реализация Deflate позволяет выбрать стратегию, следует выбирать Huffman only, что даст выигрыш как в степени сжатия, так и в скорости.

При выборе формата TIFF Deflate для изображений корреляционной ОКТ поворот изображения на 90° может дать выигрыш или проигрыш в сжатии в несколько раз.

И PNG, и TIFF поддерживают внедрение произвольных метаданных, но для хранения дополнительной информации (о пациенте, условиях проводимого исследования, и т.д.) в целях совместимости все же не рекомендуется использовать данную возможность как редко реализуемую на практике. Представление такой информации в простом текстовом виде обеспечит наилучшую переносимость, доступность и понятность для пользователей системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. World Wide Web Consortium (W3C). PNG Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/PNG/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
2. Adobe TIFF Resources page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://partners.adobe.com/public/developer/tiff/index.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
3. JPEG Committee. Final JPEG 2000 ISO/IEC 15444 drafts page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jpeg.org/jpeg2000/CDs15444.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
4. JPEG Committee. JPEG-LS home page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jpeg.org/jpeg/jpegls.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).
5. ITU-T publication page: H.264: Advanced video coding for generic audiovisual services [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.264>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 02.04.2012).

Скаков Павел Сергеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, pavelstx@gmail.com