

УДК 621.391

Д.Ф. ДЯДЫК

*Полтавский военный институт связи, Украина***МЕТОД ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ УХОДА АЛГОРИТМА RPM
ПРИ СЖАТИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Рассмотрены основные принципы алгоритма контекстно-зависимого моделирования RPM. Выделена проблема оценки вероятности ухода и практической реализации механизма ухода. Предложен метод априорной оценки вероятности ухода с постоянным значением символа ухода.

сжатие изображений, контекстное моделирование, вероятность ухода, кодирование**Введение**

Постановка задачи. Объёмы накапливаемой человечеством информации растут с каждым днём. Одним из путей снижения нагрузки на каналы передачи данных является повышения пропускной способности каналов, а также комплексное внедрение методов архивации всех типов данных. Методы построения алгоритмов сжатия различных типов данных существенно отличаются. Для сжатия текстов применяются словарные методы, контекстные предсказатели с вероятностными кодерами и др. Сжатие мультимедиа характеризуется устранением психо-визуальной избыточности и внесением потерь в данные. В таких алгоритмах используются методы преобразования, квантования, вероятностного кодирования, предсказание ошибки и др.

Широкое применение алгоритмов сжатия изображений привело к существованию множества различных алгоритмов и форматов, которые применяются к определённому классу изображений [1]. При этом существуют методы сжатия с потерями и без потерь. Ограниченное применение методов сжатия изображений без потерь обусловило недостаточное развитие данных методов. Вместе с этим, количество приложений, использующих данные методы сжатия, растёт с каждым днём. Следовательно, возникает актуальная задача в усовершенствовании существующих и разработке новых методов сжатия изображений без потерь информации.

Разрабатываемый метод сжатия, описанный в [2, 3], состоит из адаптивного алгоритма смены цветовой модели изображения [3], дискретного целочисленного вейвлет-преобразования с фильтрами (5, 3) [4], алгоритма контекстного моделирования RPM с максимальным порядком контекста равным 1 и алгоритма арифметического кодирования предсказанной вероятности символа [5, 6].

Обзор публикаций. Анализ процессов развития методов сжатия показывает, что в методах сжатия текстов на смену словарных алгоритмов кодирования всё чаще приходят алгоритмы контекстного предсказания символов потока, что обеспечивает более точное предсказание и повышает эффективность сжатия текстовых данных. Методы сжатия видеоданных для достижения высокой эффективности в большей степени используют квантование и внесение потерь (JPEG, MPEG) [6,8]. Контекстное предсказание нашло ограниченное применение в алгоритмах сжатия изображений без потерь информации (JPEG-LS, PNG) [1, 9].

Алгоритм контекстно-зависимого моделирования RPM является одним из самых перспективных для форматов сжатия текстов [10]. Использование контекстного моделирования в алгоритмах сжатия изображений не нашло широкого применения из-за ряда практических особенностей реализации.

1. Сложность мультиалфавитного кодирования. Выражается в том, что каждый цвет полноцветного изображения представлен алфавитом из 256 симво-

лов, что приводит к медленному накоплению статистики в контекстах больших порядков и значительным затратам памяти для хранения модели.

2. Хранение вероятностей для всех возможных контекстов даже из 3 пикселей невозможно, т.к. в реальных изображениях могут встретиться все их сочетания, и потребуется слишком много памяти.

3. Плохое сжатие файлов с нестабильными контекстами, из-за того, что априорные знания о статистике входного потока пикселей изображения не могут быть определены с достаточной точностью, в связи с этим невозможно построить изначально определённую структуру контекста. Для изображений (и других оцифрованных аналоговых данных) незначительные изменения в контексте приводят к незначительным изменениям в распределении рассматриваемого элемента.

4. Построение распределений для различных контекстов во время обработки изображения даст не очень точный результат, т.к. их число слишком велико по сравнению с объемом статистических данных, которые можно получить из одного изображения и таких данных не хватает для достаточно точного прогнозирования вероятностей.

5. Провалами в степени сжатия на данных, имеющих длинные повторы блоков символов, так как изначально определённая структура контекста не может учесть все локальные особенности областей изображения.

Несмотря на то, что алгоритм PPM в классическом виде показывает хорошие результаты на определённом типе данных, по сравнению с существующими алгоритмами, его практическое применение ограничено из-за большой вычислительной сложности [10]. Поэтому разрабатывается множество модифицированных схем реализации PPM, которые сохраняют положительные качества PPM, а по сложности сопоставимы со словарными методами, основанными на алгоритмах LZ77, LZ78, BWT.

В [2, 3] описан процесс разработки метода сжатия изображений без потерь качества на основе алгоритма PPM. Выбран наиболее эффективный порядок контекста для кодирования трансформант вейв-

лет-преобразования. Экспериментально определены значения основных параметров алгоритма PPM и способ построения входного потока символов.

Рассмотрим практическую реализацию теории контекстного моделирования, используя метод контекстно-зависимого моделирования ограниченного порядка PPM (Prediction by Partial Matching) [10]. Под порядком контекстной модели понимается максимальный размер учитываемого контекста D . Основная особенность метода – кодирование нового (в текущем контексте c_d , размера $d \leq D$) символа s_i в одном из внутренних узлов контекстного дерева. При этом для описания этого узла используются специальные символы ухода esc . Условные вероятности, используемые для кодирования в узле с символом $s \in S$ и символа ухода esc , представляют в виде:

$$p_n(s | c_d) = \frac{t_n(s|c_d)}{T_n(c_d)}, \forall s \in S_n(c_d); \quad (1)$$

$$p_n(esc | c_d) = \frac{t_n(esc|c_d)}{T_n(c_d)}, \quad (2)$$

где $t_n(s|c_d)$ – накопленная частота символа s в контексте c_d ; $t_n(esc|c_d)$ – накопленная частота esc в контексте c_d ; $T_n(c_d)$ – частота появления контекста.

Целью статьи является разработка метода априорной оценки значения символа ухода алгоритма PPM.

Результаты исследований

Основная проблема алгоритма PPM – оценка вероятности ухода. Вероятность ухода – это вероятность, которую имеют ещё не появившиеся в контексте символы [10, 11]. Любая контекстная модель, кроме модели, где определены все символы, должна давать ненулевую оценку вероятности ухода.

Особенно важную роль оценка вероятности ухода играет при моделировании потока текстовых данных, с максимальным порядком контекста более 4. В этом случае доля символов ухода составляет около 30 % всех оценок, что в значительной степени влияет на степень сжатия данных. Существует два основных механизма оценки вероятности ухода: априорные, основанные на предположении о природе сжимаемых данных, и адаптивные, которые приспособливают оценку к данным.

Адаптивные методы позволяют улучшить оценку вероятности ухода, за счёт дополнительного усложнения алгоритма. Использование адаптивных методов, также предусматривает априорных знаний о характере сжимаемых данных, на основе которых выбирается алгоритм адаптации.

Определим выражение, позволяющее по статистике сжимаемых данных найти долю символов ухода, для выбранной контекстной модели. Статистика сжимаемых данных представляется в виде $D+1$ -мерной матрицы вероятностей.

Пусть $t(esc|c_d)$ – частота появления символа ухода esc в контексте c_d порядка d . Тогда частота уходов с контекстной модели порядка d равна

$$N_d = \sum_{c_d=0}^{255} t(esc | c_d). \quad (3)$$

Для всей контекстной модели, с максимальным порядком D частота уходов равна

$$N_D = \sum_{d=0}^D \sum_{c=0}^{255} t(esc | c_d). \quad (4)$$

Анализ статистических свойств трансформант вейвлет-преобразования, на контекстной модели с максимальным порядком контекста равным 1, показал, что средняя доля частоты уходов для изображений с вероятностью цветового перепада $P_{nep}=0,7$ составляет 1,4%. Для $P_{nep}=0,8$ частота уходов составляет в среднем 1,56%, для $P_{nep}=0,9$ это значение равняется 2,03%. Низкая доля появления символов ухода связана с малым порядком выбранного максимального контекста.

Низкая частота ухода на контекст меньшего порядка (для выбранной контекстной модели это уход на контекстную модель 0-го порядка) свидетельствует о нецелесообразности применения адаптивных механизмов оценки вероятности ухода, так как это приведёт к увеличению вычислительной сложности и необходимых ресурсов памяти алгоритма, а результат при этом будет незначителен.

Для разрабатываемого метода сжатия выбран априорный классический механизм оценки вероятности ухода по методу РРМА, оценивающий вероятность появления символа ухода выражением [10]:

$$p(esc)_A = 1/(1+t(c)), \quad (5)$$

где $t(c)$ – частота появления контекста c .

Согласно данному методу частота символа ухода на оси частот арифметического кодирования равна 1. Это приводит к неоптимальному кодированию символа ухода. Для более эффективного кодирования символа ухода необходимо на основе статистики появления данного символа и символов алфавита распределить ось частот пропорционально. Поэтому, имея априорные знания о сжимаемых данных, можно изначально выделить отрезок на оси частот для символа ухода, чем обеспечить повышение степени сжатия данных.

Определим выражение, которое позволит, на основе статистических знаний о сжимаемых данных, найти оптимальное значение частоты символа ухода. Пусть $T(S)$ – общее количество закодированных символов входного потока данных. Тогда

$$T(S1) = T(S) - N_D - \quad (6)$$

количество символов, закодированных в контекстной модели 1-го порядка. Поскольку символ ухода не используется в контекстной модели 0-го порядка, то будем рассматривать только символы контекста 1-го порядка. Количество контекстов в данной модели равно количеству символов S сжимаемого алфавита. Среднее количество символов в одном контексте

$$nc = T(S1)/S. \quad (7)$$

Кроме этого, при распределении частоты появления каждого символа при арифметическом кодировании необходимо учитывать проблему переполнения счётчика накопленных частот, так как при реализации арифметического кодера накопленные частоты не могут превышать заданного их максимального значения mf . Для алфавита сжимаемых данных, состоящего из 256 символов ($S=256$) максимальное значение накопленных частот не могут превышать 16383 (для защиты от переполнения при целочисленном умножении mf на кодовый диапазон rg). Для предотвращения переполнения применяется механизм масштабирования счётчиков, обеспечивающий деления счётчика частоты появления символов в заданном контексте и счётчиков каждого

символа на 2 (наименьший целочисленный делитель). Это изменяет статистику частот символов, что необходимо учитывать. Введём счётчик количества произведённых операций масштабирования rq .

$$rq = \sum_{c=0}^{255} \left\lfloor \frac{t(c)}{mf} \right\rfloor, \quad (8)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ - операция выделения целой части числа.

Учитывая масштабирования счётчиков среднее количество символов в одном контексте, при кодировании равно

$$nc = \frac{T(S1) - rq \times mf / 2}{S} = \frac{2 \times T(S1) - rq \times mf}{2 \times S}. \quad (9)$$

Определим общую часть закодированных символов, приходящуюся на символ ухода

$$H_{esc} = 1 - \frac{T(S1)}{T(S)} = \frac{T(S) - T(S1)}{T(S)}. \quad (10)$$

Определение эффективной максимальной частоты символа ухода производится согласно выражению

$$t_{\max}(esc) = nc \times H_{esc}. \quad (11)$$

Таким образом, имея значение общего количества закодированных символов, символов ухода (число состояний контекста 1-го порядка, либо число различных сочетаний двух соседних символов входного потока) и количество операций масштабирования (определяется выражением (6), имея частоты появления отдельных символов входного потока) можно определить максимальное значение эффективной частоты символа ухода. Итоговое выражение

$$t_{\max}(esc) = \frac{(2 \times T(S) - rq \times mf) \times (T(S) - T(S1))}{2 \times S \times T(S)}. \quad (12)$$

Данное значение частоты символа ухода является максимальным, так как соответствует полностью набранной статистике входного потока. Но в начале кодирования и кодеру и декодеру ставится в соответствие одинаково пустые контекстные модели, без набранной статистики. Поэтому начальное значение частоты символа ухода (минимальное значение частоты) равняется 0 ($t_{\min}=0$). Взяв среднюю величину для минимального и максимального значения частоты, получим наиболее эффективное значение частоты символа ухода для кодирования его арифметическим кодером, при использовании контекстного

предсказания, с максимальным порядком контекста, равным 1:

$$t(esc) = (t_{\max}(esc) - t_{\min}(esc)) / 2. \quad (13)$$

Практическое подтверждение результатов проведём путём исследования эффективности выбора значения частоты символа ухода для пакета изображений с вероятностью цветового перепада от 0,9 до 0,99 (фотореалистические высоконасыщенные изображения).

Для данного набора изображений были получены средние значения частоты ухода $H_D = 3816$ и количества операций масштабирования $r_q = 109$. Размер изображений 600 на 800 пикселей. Кодирование каждой из цветовых составляющих происходит отдельно, поэтому количество закодированных символов будет равно

$$T(S) = 800 \times 600 \times 3 = 1440000.$$

Для реализации арифметического кодирования максимальная частота накопленных символов для контекстов равна $mf = 2^{14} - 1 = 16383$ (максимально возможное значение произведения $rg \cdot mf < 2^{30}$, то есть может вместиться в 32-х битную переменную, где rg – максимальная длина частотного интервала).

Мощность алфавита равна $S=256$. Количество символов, кодируемых в контекстной модели 1-го порядка равно $T(S1) = 1440000 - 33816 = 1406184$.

Подставляя значения в выражение (10), получаем

$$t_{\max}(esc) = 50.$$

Приняв $t_{\min} = 0$, найдём эффективное значение частоты символа ухода для данной контекстной модели

$$t(esc) = (50 - 0) / 2 = 25.$$

Приняв частоту символа ухода равной 25, получаем выражение, для оценки вероятности появления символа ухода

$$p(esc) = 25 / (25 + t(c)). \quad (15)$$

Применяя данный метод оценки вероятности ухода, сравним на тестовом пакете изображений эффективность по отношению к классическому методу РРМА. Все параметры разработанного метода сжатия одинаковы для обоих случаев, изменяются только методы оценки $p(esc)$. Результаты сравнения приведены на рис. 1.



Рис. 1. Сравнение коэффициентов сжатия для двух методов оценки вероятности символа ухода

В результате применения разработанного метода оценки вероятности ухода повышена степень сжатия исходного пакета изображений на 1 – 3 %. Повышение точности оценки вероятности ухода в комплексе с методами подбора параметров алгоритма PPM обеспечит существенное повышение эффективности сжатия разрабатываемого метода.

Выводы

Использование алгоритмов контекстного моделирования в методах сжатия изображений может существенно повысить эффективность сжатия, за счёт более точного предсказания символов. Для разработки метода сжатия был выбран алгоритм контекстно-зависимого моделирования PPM и кодирование предсказанной вероятности символа арифметическим кодером. Входной поток представлял собой трансформанты вейвлет-преобразования, разделённые на два потока (высокочастотные и низкочастотные коэффициенты).

Порядок максимального контекста выбран равный 1. Путём анализа статистических свойств трансформант вейвлет-преобразования, разработаны аналитические выражения, позволяющие определить постоянное значение частоты ухода на контекстную модель 0-го порядка. Это позволит повысить степень сжатия изображений, за счёт более точной оценки частоты символа ухода, что в особенной мере сказывается на начальном этапе кодирования, когда статистика в контекстных моделях недостаточна. Постоянное значение частоты символа ухода,

в отличие от существующих методов, не требует повышения вычислительной сложности алгоритма и может применяться для сжатия данных априорно определённой статистики.

Литература

1. Міано Д. Формати й алгоритми стиску зображень у дії – М.: Тріумф, 2003.
2. Дядик Д.Ф., Стрюк О.Ю. Підвищення ступеня стиску зображень за рахунок оптимальної стратегії моделювання // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2005. – Вип. 12 (40). – С. 133-136.
3. Дядик Д.Ф., Стрюк О.Ю., Гаркуша С.В. Адаптивний метод перетворення кольорових координат відеоданих // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – Вип. 6 (18). – С. 56-59.
4. Стрюк А.Ю., Резуненко А.А. Метод сжатия видеоданных с использованием вейвлет-преобразования // Мат. 3 МНТК. «Проблемы информатики и моделирования». – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – С. 24.
5. Претт Э. Цифровая обработка изображений, т. 1, 2. – М.: Мир, 1985. – 736 с.
6. Ватолин Д., Ратушняк А. и др. Методы сжатия данных. – М.: Диалог – Мифи, 2002. – 384 с.
7. ISO/IEC 15444-1, JPEG2000 image coding system. – IS, 2000.
8. ISO / IEC 10918-1,2,3, JPEG (Digital compression and coding of continuous-tone still images).
9. ISO / IEC 14495-1,2, JPEG-LS Lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images. – IS, 1999.
10. Шкарин Д. Повышение эффективности алгоритма PPM // Проблемы передачи информации. – 2001. – 34 (3). – С. 2-54.
11. Aberg J., Shtarkov Yu. M., Smeets B. J. Multialphabet coding with separate alphabet description, // Proc. of Compression and Complexity of Sequences 97, Positano, Salerno, Italy, IEEE Comp. Soc. Press, 1998. – P. 56-65.

Поступила в редакцию 22.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.А. Жуков, Национальный авиационный университет, Киев.