

УДК 621.391

В.В. МОРОЗ

Одесский национальный университет, Украина

ВРЕМЕННАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЕЙВЛЕТНЫХ ДОМЕНОВ

Предлагается метод временной интерполяции видеопоследовательностей для увеличения частоты кадров. Метод основан на кратно-масштабном анализе опорных кадров для оценки и компенсации движения. Используется полный поиск соответствия блоков в низкочастотном домене высоких уровней вейвлетного разложения для построения начального поля векторов. Анализ высокочастотных доменов и повышение дискретизации позволяют уточнять вектора движения. Данный метод дает возможность уменьшить ошибку предсказания интерполируемого кадра и значительно снизить вычислительную сложность по сравнению с методами, основанными на пиксельной компенсации движения в пространственной области.

вейвлетный домен, интерполяция, пиксельная компенсация

Введение

Большинство современных приложений, использующих обработку видеосигналов, сталкиваются с проблемой преобразования частоты кадров [1]. Например, данная проблема возникает при передаче и хранении видеоданных и затрагивает дискретизацию кадров (изображений) не только в пространстве, но и во времени. Поэтому распределение отсчетов кадра в пространстве и во времени не совпадает на входе и выходе системы обработки. Например, при передаче потокового видео или хранении видео на входе системы, с целью уменьшения объема передаваемой информации, используется временная децимация. На выходе системы необходимо воспроизвести кадры, пропущенные кадры, т.е. повысить частоту кадров. Изменение частоты кадров также производится при переходе от одного стандарта видео к другому, при восстановлении испорченных кадров во время передачи. Поэтому необходимо предсказывать информацию о пропущенном кадре в момент времени t на основе информации, содержащейся в соседних кадрах в моменты времени $t-1$ и $t+1$.

Поставленная проблема использует временную модель последовательности кадров и является типичной задачей интерполяции, в которой известна таблица значений функции при заданных значениях аргумента, а требуется вычислять значения функции в промежуточных точках.

Введение интерполяции на основе трехмерной пространственно-временной фильтрации телевизионного изображения в преобразователях стандартов привело к значительному улучшению характеристик преобразования в сравнении с простейшими алгоритмами, основанными на исключении или дублировании кадров. Однако, при использовании алгоритмов линейной интерполяции, заметны искажения при воспроизведении быстро движущихся объектов: размытие границ, дрожание, прерывистость изображения. Причина появления этих искажений в том, что применение прямой интерполяции не всегда допустимо.

Поэтому прямая интерполяция была заменена интерполяцией с компенсацией движения. Интерполяция с компенсацией движения основана на анализе изображения, выявлении движущихся объектов и оценке скорости их перемещения в кадре. Эта зада-

ча решается с помощью оценки движения объектов. Измеряется абсолютная величина скорости и направление перемещения объекта, то есть скорость определяется как векторная величина. На практике определяются значения горизонтального и вертикального смещений объекта за время между двумя кадрами. Полученные значения являются соответственно горизонтальной и вертикальной координатами вектора, пропорционального скорости, который называется вектором движения.

В простейшем случае все элементы кадра могут смещаться в одном направлении с одной скоростью. В общем случае необходимо определить объекты, или множества элементов изображения, характеризующиеся одним и тем же движением. Каждому такому объекту назначается свой вектор движения. Для лучшей компенсации движения в изображении необходимо большее число таких независимых областей с присвоенными векторами движения. В пределе количество независимых векторов может быть равно числу элементов изображения. Если известен вектор движения для всех элементов изображения, то можно переместить элементы в расчетные точки и создать промежуточное изображение, необходимое для решения задачи преобразования стандартов.

1. Анализ существующих методов

В настоящее время для временной интерполяции используется ряд методов, основанных на компенсации движения [1]. Основные отличия этих методов связаны с алгоритмами оценки вектора движения. Наиболее распространенными алгоритмами являются алгоритм согласования блоков ВМА (Block-Matching Algorithm) и иерархической пространственной. При сравнении различных методов необходимо принимать во внимание следующие основные параметры:

- диапазон измеряемых скоростей движения объектов в поле изображения;
- число векторов движения в одном кадре;

- точность оценки вектора движения;
- точность, с которой могут быть определены границы движущихся объектов;
- частоту ошибок в оценке вектора движения.

В методах, основанных на ВМА, изображение в кадре делится на большое число блоков (обычно — прямоугольных), называемых макроблоками. Каждый такой макроблок текущего кадра сравнивается с блоками следующего кадра и оценивается вероятность того, что они являются фрагментами одного и того же участка изображения. Если в следующем кадре находится блок, подобный блоку поискового кадра, то делается вывод, что блоки находятся в разных местах кадра вследствие движения. Критерием наилучшего согласования может быть минимизация некоторой меры подобия двух блоков: квадратичное отклонение, отклонение по абсолютной величине и другие. Затем вычисляются компоненты смещения блока из исходного положения до того, которое наилучшим образом согласуется с блоком поиска, что дает величину и направление вектора движения. Так как в пределах соседних кадров происходит незначительное движение объектов, то поиск подобных блоков выполняется в некоторой окрестности исходного блока, который должен быть найден.

Размеры области поиска определяют максимальную величину вектора движения, которая может быть измерена, поскольку этот параметр ограничивает максимальную скорость перемещения объекта, которую возможно зафиксировать. Так в [2] для интерполяции на невысоких битрейтах используется сужение области поиска на основе корреляции последовательных кадров, выбора размера области поиска в зависимости от смещения разницы блоков и информации о классификации блоков по предыдущим кадрам.

Размер области поиска и размер блока оказывают влияние, как на качество интерполяции, так и на вычислительную сложность таких методов. В рабо-

тах [3] и [4] предлагаются алгоритмы, позволяющие снизить вычислительную сложность с помощью различных подходов. При оценке движения блока большое влияние на поиск скоростей и качество прогнозирования кадров оказывают форма блока, его размеры и распределения векторов движения с несимметричными характеристиками. Для быстрой оценки движения блока предлагается новый алгоритм [3], который в качестве начального шага использует перекрестный поиск шаблона блока и большие/малые ромбовидные шаблоны на последующих шагах. В [4] используется адаптивный выбор порогового значения для согласования блоков в зависимости от общего числа макроблоков. Однако, снижение вычислительной сложности таким образом приводит все же к нежелательным визуальным артефактам, особенно при сложном движении.

Одним из вариантов усовершенствования метода на основе ВМА является иерархическая пространственная корреляция. Поиск выполняется последовательно на нескольких уровнях с разными размерами блоков, а значения векторов движения, найденные на некотором уровне, используются в качестве вероятных и исходных для получения более точного результата на следующем уровне. Согласование блоков большого размера, с которых начинается поиск, выполняется за сравнительно небольшое количество вычислительных операций. Однако разрешение первого уровня невелико. Найденный вектор используется в качестве предсказания при поиске на следующем уровне с меньшим размером блоков, полученных делением блока первого уровня. Процесс повторяется несколько раз. На каждом последующем уровне увеличивается разрешение. Такой подход сочетает низкую частоту ошибок, характерную для блоков большого размера, и высокое разрешение, которое появляется при использовании малых блоков. Он позволяет находить большое количество векторов с высокой точностью и разрешением, причем для сложного движения. На первом

этапе изображение может подвергаться низкочастотной фильтрации и передискретизации с целью уменьшения числа отсчетов и сокращения объема вычислений. Низкочастотная фильтрация и передискретизация может быть заменена путем перехода к анализу информации в частотных доменах вейвлетного преобразования [5]. Первый из представленных в этой работе алгоритмов использует поиск ошибки согласования блоков в низкочастотном вейвлетном домене в меньшем масштабе, что позволяет повысить вычислительную эффективность алгоритма, а второй использует неоднородный двойной перекрестный поиск с использованием кратномасштабного анализа пространственно-временного контекста. Главный недостаток такого подхода заключается в том, что маленькие и быстро движущиеся объекты могут быть потеряны на первом этапе, когда используются блоки большого размера в сочетании с фильтрацией.

2. Временная интерполяция и вейвлетный анализ изображений

Предлагаемый метод повышения частоты кадров позволяет предсказывать недостающие кадры на основании двух (или в отдельных случаях более двух) ссылочных кадров. Основным моментом в предлагаемом методе является алгоритм правильного определения векторов движения блоков. Размеры блока поиска прямо влияют на разрешение и вероятность ложного согласования. Когда блок поиска представляет собой квадрат 16×16 пикселей, он содержит довольно значительную часть изображения. Если блоки согласуются, то есть, похожи друг на друга в принятой метрике, то это с высокой долей вероятности говорит о том, что результат оценки правильно отражает смещение объекта. Возможность ложного согласования мала. Но для каждого блока из 256 пикселей находится всего один вектор, то есть разрешение невелико. Для малых блоков с размерами 2×2 пикселей достигается

высокое разрешение, но частота ошибок становится недопустимо большой, поскольку для блоков такого размера велика вероятность ложных согласований. В задачах сжатия оптимальным блоком, при котором достигается компромисс между разрешением и частотой ошибок, является блок размером 8×8 пикселей. Но, для задачи временной интерполяции, ни разрешение, ни частота ошибок, соответствующие такому блоку, не являются приемлемыми.

Используя такие свойства вейвлетного анализа, как локализация частот и масштабируемость, можно варьировать размер блока в зависимости от масштаба изображения. Это, в свою очередь, позволяет на основе информации, находящейся в вейвлетных коэффициентах последовательных кадров, возмещать увеличение количества векторов движения.

Предлагается использовать два уровня вейвлетного преобразования последовательных кадров (рис. 1).

LL ₂	HL ₂	HL ₁
LH ₂	HH ₂	
LH ₁		HH ₁

Рис. 1. Частотные диапазоны двухуровневого вейвлетного преобразования

Для начальной оценки движения используется низкочастотный домен второго уровня LL₂. Далее, векторы движения на нижних уровнях уточняются с использованием информации о движении, полученной на высоких уровнях разложения. При этом возможно ложное предсказание из-за свойства сдвига вейвлетного преобразования, которое является результатом процесса децимации [6]. Чтобы устранить

присущие данному подходу недостатки, предлагается новый метод, основанный на алгоритме оценки движения, который использует особенности вейвлетных коэффициентов в каждом частотном поддиапазоне.

3. Вейвлетные коэффициенты и оценка движения

Для двух ссылочных кадров выполняется двухуровневое прямое дискретное вейвлетное преобразование. Низкочастотные поддиапазоны LL₂ разбиваются на блоки размером $(N/2^i \cdot N/2^i)$ пикселей, где N – размер блока в кадре, а i – число уровней вейвлетного разложения. После этого производится классификация блоков на основе одной из метрик. С целью уменьшения вычислительной сложности использовалась средняя абсолютная разность:

$$MAD = \frac{1}{(N/2^i)^2} \sum_{i=1}^{N/2^i} \sum_{j=1}^{N/2^i} |I_{LL}^1(i, j) - I_{LL}^2(i, j)|,$$

где $I_{LL}^1(i, j)$ и $I_{LL}^2(i, j)$ — значение вейвлетного коэффициента в положении (i, j) низкочастотного поддиапазона для первого и второго ссылочных кадров.

В зависимости от значения MAD для блоков, делается вывод о целесообразности уточнения их векторов движения. Т.е., если MAD меньше некоторого порогового значения, то данный блок имеет нулевой вектор движения и на нижних уровнях вейвлетного разложения может быть исключен из процедуры уточнения.

В виду того, что ошибки при определении векторов движения на высоких уровнях разложения могут быть распространены на остальные частотные поддиапазоны и, следовательно, будут накапливаться, оценка движения на высоких уровнях должна быть более точной. Поэтому для поддиапазона LL₂ производится полный перебор блоков размера в восьмисвязной зоне поиска $[-4; 4]$. Впоследствии,

оцененный вектор движения используется как начальный для высокочастотных поддиапазонов этого же уровня в зоне поиска [-2; 2].

Как уже отмечалось выше, блоки классифицируются в зависимости от того, какой вектор движения они имеют: нулевой или ненулевой. Блоки с нулевым вектором движения могут не уточняться на последующих уровнях, а соответствующие им вейвлетные коэффициенты заменяются соответствующими коэффициентами первого ссылочного кадра.

Результаты

Анализ эффективности предложенного метода производился на шести оригинальных тестовых последовательностях с разрешением 320x240 пикселей. Последовательности были подобраны таким образом, что в них задействованы различные модели движения на основе движения камеры. Три из них имели частоту 25 кадров/с, три других – 30 кадров/с. Сначала производилась временная децимация каждого второго кадра. Полученные последовательности использовались для временной интерполяции. После интерполяции предсказанные кадры сравнивались с соответствующими кадрами оригинальных последовательностей. Расхождение оригинальных кадров и предсказанных для различных последовательностей отличается и показано в таблице:

Таблица 1

Сравнение предсказанных кадров с кадрами оригинальных последовательностей

№	Последовательность	Частота кадров	Ошибка предсказания
1	Cars	12.5	31
2	Skaters	12.5	27
3	Crs2	12.5	42
4	Highway	15	32
5	Sanflower	15	31
6	Zoomin	15	35

Ошибка предсказания производилась по метрике Y-PSNR и указана в среднем в децибелах на кадр.

Результаты показывают, что количественная оценка временной интерполяции предложенного метода соответствует хорошему визуальному качеству. Некоторые недостатки предложенного метода связаны с векторами движения для последовательности 2. Это объясняется интенсивностью и неравномерностью (случайностью) движения. Для устранения подобных артефактов необходимо более точное определение границ объектов за счет более глубокого анализа вейвлетных коэффициентов низкочастотного домена и их уточнения.

Литература

1. Гласман К. Преобразователи стандартов // 625. – М.: Издательство 625. – 2005. – № 6. – С. 5-11.
2. Oh H.-S., Lee H.-K. Block-matching algorithm based on an adaptive reduction of the search area for motion estimation // Real-Time Imaging. – vol. 6. – Issue 5. – October 2000. – P. 407-414.
3. Cheung C.-H., Po L.-M. A Novel Cross-Diamond Search Algorithm for Fast Block Motion Estimation // IEEE Trans. Circuits And Systems For Video Technology. – vol 12. – December 2002. – P. 1168-1177.
4. Tseng S.-Y. Motion estimation using a frame-based adaptive thresholding approach // Real-Time Imaging. – vol. 10. – Issue 1. – February 2004. – P. 1-7.
5. Liu Y., Ngi Ngan K. Fast multiresolution motion estimation algorithms for wavelet-based scalable video coding // Signal Processing: Image Communication. – Volume 22. – Issue 5. – June 2007. – P. 448-456.
6. Park H.-W., Kim H.-S. Motion estimation using low-band-shift method for wavelet based moving-picture coding // IEEE Trans. Image Process. – vol.9. – no.4. – April 2000. – P.577–587.

Поступила в редакцию 6.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.