

Т. М. СУХОВ

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ПОСТОЯННОЙ ЦВЕТОВОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются вещественная и целочисленная реализации принципа постоянной цветовой яркости для различных платформ кодирования видеoinформации. Приведены результаты сравнительного анализа целочисленных вариантов реализации принципа постоянной цветовой яркости.

Ключевые слова: принцип постоянной цветовой яркости, кодирование цветовой информации, цифровое телевидение.

Введение. Одна из проблем современных цифровых систем обработки видеoinформации — повышение четкости при передаче цветowych сигналов. В таких системах для формирования яркостных и цветоразностных компонентов используется принцип постоянной яркости. Этот принцип, однако, имеет такие недостатки, как неточное воспроизведение яркости насыщенных цветов и ухудшение четкости воспроизведения ахроматических деталей и изображений по мере увеличения насыщенности цветов [1]. Указанные недостатки обусловлены, с одной стороны, формированием яркостного компонента $E'_Y = 0,299E'_R + 0,587E'_G + 0,114E'_B$ [2], а с другой — фактором формирования информации о цветовой четкости цветоразностными компонентами $E'_{R-Y} = 0,701E'_R - 0,587E'_G - 0,114E'_B$ и $E'_{B-Y} = 0,886E'_B - 0,299E'_R - 0,587E'_G$, где E'_R, E'_G, E'_B — сигналы, определяющие основные первичные цвета [3], регулируемые телевизионной камерой (видеосенсором).

Эти недостатки могут быть устранены при использовании принципа постоянной цветовой яркости [1]. Согласно данному принципу яркостные и цветоразностные компоненты могут быть получены в результате следующих преобразований: $E'_C = \sqrt{E'^2_R + E'^2_G + E'^2_B}$, $E'_1 = E'_R / E'_C$, $E'_2 = E'_B / E'_C$, где E'_C — цветовая амплитуда передаваемого цвета; E'_1, E'_2 — сигналы, определяющие насыщенность данного цвета красным и синим основными первичными цветами.

Ахроматические изображения и детали изображений при реализации принципа постоянной цветовой яркости передаются с полной четкостью, так как для таких изображений сигналы E'_1 и E'_2 постоянны и все изменения цветовой яркости передаются по широкополосному каналу [4].

Следует отметить, однако, что применение принципа постоянной цветовой яркости в различных системах обработки видеoinформации ограничивается наличием большого количества сложных в вычислительном отношении операций при обработке одного пиксела изображения, к которым относятся операция извлечения квадратного корня при вычислении цветовой амплитуды E'_C и операция деления при определении сигналов E'_1, E'_2 .

Реализация рассматриваемого принципа в системах обработки видеoinформации предусматривает возможность их разделения на вещественные и целочисленные системы. Выбор конкретной вещественной или целочисленной реализации зависит от параметров аппаратной платформы кодирования видеoinформации.

Вещественная реализация принципа постоянной цветовой яркости. При рассмотрении вещественной реализации данного принципа примем разрядность входных и выходных

отсчетов цифровых систем обработки равной восьми. Иными словами, входные R , G , B и выходные W , U , V отсчеты представляют собой беззнаковые целочисленные значения в диапазоне от 0 до 255 ($R, G, B, W, U, V \in [0; 255]$). Пусть R , G , B — оцифрованные отсчеты, соответствующие основным первичным цветам, W — отсчет, соответствующий цветовой амплитуде передаваемого цвета; U — отсчет, определяющий насыщенность цвета красным основным первичным цветом; V — отсчет, определяющий насыщенность цвета синим основным первичным цветом.

При вычислениях требуется привести (нормализовать) каждый из входных отсчетов к уровню от 0 до 1 путем деления на константу 256. После нормализации вычисления производятся с вещественными числами. Промежуточные значения отсчетов вычисляются по следующим формулам: $w = \sqrt{r^2 + g^2 + b^2}$, $u = r/w$, $v = b/w$, где w — вещественное значение цветовой амплитуды; u , v — вещественные значения, определяющие насыщенность цвета красным и синим основными первичными цветами соответственно; r , g , b — нормализованные вещественные значения основных первичных цветов. При $w=0$ значения $u = v = 1/\sqrt{3}$.

Для получения выходных 8-разрядных значений W , U , V требуется произвести следующие вычисления: $W = \text{int}(w/\sqrt{3})$, $U = \text{int}(256u)$, $V = \text{int}(256v)$, где int — операция приведения вещественного числа к целому в диапазоне от 0 до 255.

Произвести обратное преобразование можно следующим образом. Требуется получить из отсчетов W , U , V нормализованные (от 0 до 1) промежуточные вещественные отсчеты $w = W\sqrt{3}/256$, $u = U/256$, $v = V/256$; затем вычислить $r_r = uw$, $b_r = vw$ и промежуточное значение $g' = w^2 - (r_r^2 + b_r^2)$, где r_r , b_r — восстановленные нормализованные вещественные значения выходных отсчетов, соответствующие основным первичным цветам. Восстановленное нормализованное значение выходного отсчета для зеленого цвета вычисляется следующим образом:

$g_r = \begin{cases} 0 & \text{при } g' < 0, \\ \sqrt{g'} & \text{при } g' \geq 0. \end{cases}$ Далее, произведя следующие вычисления: $R_r = \text{int}(256r_r)$,

$G_r = \text{int}(256g_r)$, $B_r = \text{int}(256b_r)$, можно получить R_r , G_r , B_r — восстановленные 8-разрядные беззнаковые целочисленные значения цветовых компонентов основных первичных цветов.

Целочисленная реализация принципа постоянной цветовой яркости. Наиболее быстродействующей реализацией данного принципа является табличное кодирование и декодирование. Рассмотрим метод кодирования.

Алгоритм кодирования видеокладов при реализации принципа постоянной цветовой яркости на аппаратной платформе, не оснащенной модулем вещественных вычислений (сопроцессор, производящий вычисления над числами с плавающей точкой), предполагает первичную инициализацию массива всех значений отсчетов, вычисленных при цветовом преобразовании.

Объем памяти, требуемой для хранения отсчетов W , U , V , составляет $C = 256^3 = 16\,777\,216$ байт (16 Мбайт) для каждого из массивов. Однако большинство вычислительных модулей оперируют типами данных с размерностью 8, 16, 32 или 64 разряда. Для уменьшения количества обращений к памяти целесообразно использовать целочисленный беззнаковый 32-разрядный тип (unsigned integer). В этом случае потребуется $C \cdot 4 = 67\,108\,864$ байта (64 Мбайта) памяти для хранения отсчетов. Тогда табличное кодирование представляется как получение одного беззнакового 32-разрядного числа из таблицы по координатам R , G , B :

$$WUY = wuv[R][G][B].$$

Восстановление отсчетов производится по аналогичному алгоритму с тем исключением, что при инициализации таблицы вычисляются значения R , G , B в зависимости от полученных значений W , U , V :

$$\text{RGB} = \text{rgb}[W][U][V].$$

Рассмотренный целочисленный метод кодирования и декодирования является наиболее быстрым для целочисленных процессоров при условии быстрой работы оперативной памяти устройства и ее большом объеме. Для сокращения количества хранимых в памяти отсчетов рассмотрим метод кодирования и декодирования, оптимальный с точки зрения вычислительных затрат и объема оперативной памяти.

Для оптимизации табличного метода создадим таблицу значений W и обратных им 24-разрядных значений $\text{inv}W = 16\,777\,216/W$ (умножение на число 16 777 216 требуется для сохранения точности вычислений). При этом для сокращения количества хранимых отсчетов следует значения W и $\text{inv}W$ сохранить в одном 32-разрядном беззнаковом числе: $w = ((W \cdot 2^{24}) \vee \text{inv}W)$, где \vee — операция побитового „или“; операцию умножения на 2^{24} можно реализовать как логический сдвиг влево на 24 разряда. В этом случае кодирование осуществляется следующим образом. Значения W и $\text{inv}W$ извлекаются из таблиц согласно координатам R , G , B : $W = (WW[R^2 + G^2 + B^2]) / 2^{24}$, $\text{inv}W = (WW[R^2 + G^2 + B^2] \cdot 2^8) / 2^8$, где WW — массив заранее вычисленных значений w для всех R , G и B ; операции умножения и деления на 2^8 можно представить в виде логических сдвигов влево и вправо на 8 разрядов соответственно. Полученное значение W непосредственно сохраняется в выходном потоке видеоданных. Значение $\text{inv}W$ используется для расчета 8-разрядных значений $U = (R \text{ inv}W) / 2^{24}$ и $V = (B \text{ inv}W) / 2^{24}$.

Восстановление отсчетов осуществляется аналогичным образом.

Преимущество использования оптимизированного подхода состоит в том, что для хранения массива WW требуется $256^2 \cdot 3 \cdot 4 = 786\,432$ байта (768 Кбайт), однако для проведения расчетов необходимы операции умножения и логического сдвига. Тем не менее, для систем обработки видеoinформации с малым объемом оперативной памяти, и обладающих достаточными вычислительными ресурсами для проведения операций умножения и логического сдвига, оптимизированный способ преобразования согласно принципу постоянной цветовой яркости является более предпочтительным.

Сравнительный анализ целочисленных реализаций. Для сравнения табличной и оптимизированной реализаций рассмотрим основные функциональные блоки вычислительных модулей системы обработки. Показателем оценки производительности вычислительного устройства будем считать временные задержки, требуемые каждому модулю для совершения вычислений: MEM — задержка, порождаемая модулем обращения к внешней памяти устройства (контроллер памяти); CACHE — задержка, порождаемая обращением к быстрой памяти, расположенной в чипе процессора (кэш); ADD — задержка, порождаемая модулем вычисления операций сложения; SHIFT — задержка, порождаемая операцией логического сдвига; MULTIPLY — задержка, порождаемая модулем вычисления операций умножения.

При кодировании согласно табличной реализации (TBL) необходимо произвести одно обращение к памяти по координатам R , G , B для получения отсчетов W , U , V , что потребует трех операций сложения и двух логических сдвигов: TBL=2 SHIFT+3 ADD+MEM операций.

Оценим количество операций для формирования отсчетов W , U , V при использовании оптимизированной реализации (OPT). Для формирования отсчета W требуется вычислить индекс $i = R^2 + G^2 + B^2$, который используется для обращения к таблице ($w = WW[i]$), и выполнить логический сдвиг на 24 разряда вправо извлеченного из таблицы значения ($W = w \gg 24$).

Таким образом, оценка задержки составляет $(3 \text{ MULTIPLY} + 2 \text{ ADD}) + \text{MEM} + \text{SHIFT}$ тактов. Вычисление отсчетов U и V осуществляется посредством двух логических сдвигов для нормализации значения $\text{inv}W$, одной операции умножения и одного логического сдвига для каждого из отсчетов, что составляет $2 \text{ SHIFT} + 2 (\text{MULTIPLY} + \text{SHIFT})$ тактов. В результате для вычисления отсчетов W , U , V потребуется $(5 \text{ MULTIPLY} + 2 \text{ ADD}) + \text{MEM} + 5 \text{ SHIFT}$ тактов, что существенно превышает количество тактов, необходимых при использовании табличного метода. Если объем быстрой памяти процессора позволяет разместить всю таблицу WW , то требуется $\text{OPT} = (5 \text{ MULTIPLY} + 2 \text{ ADD}) + \text{CACHE} + 5 \text{ SHIFT}$ тактов, что обеспечивает уменьшение задержки вычисления.

Как правило, в вычислительных системах задержка MEM в 10 (и более) раз превышает задержку CACHE.

Применение оптимизированной реализации целесообразно использовать при наличии требуемого объема быстрой памяти процессора и выполнении соотношения $\text{MEM} \leq \text{OPT}$.

Например, для процессора Intel Atom 330 [5] при операции умножения требуется 3 такта: сложение — 1 такт, чтение из быстрой памяти — 1 такт, логический сдвиг — 1 такт. Значение $\text{OPT} = (5 \cdot 3 + 2 \cdot 1) + 1 + 5 \cdot 1 = 23$ такта. Обращение к внешней памяти определяется аппаратной реализацией системы и может составлять от 12 и более тактов ($\text{MEM} = 2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 12 = 17$). Оптимальной для данной системы при $\text{MEM} = 17$ служит табличная реализация, в случае $\text{MEM} \geq 23$ целесообразно применить оптимизированную реализацию.

Заключение. На основе представленных вариантов реализации принципа постоянной цветовой яркости для вещественных и целочисленных платформ обработки данных, рассмотрения наиболее быстродействующего метода табличного кодирования и декодирования согласно принципу постоянной цветовой яркости, а также способа сокращения количества хранимых данных установлено, что при использовании оптимизированного метода табличного кодирования требуется в 85,33 раза меньший объем памяти, чем при табличной реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полосин Л. Л. Принцип постоянной цветовой яркости в телевидении // Телевизионная техника и связь. 1995. Спец. вып. С. 28—37.
2. Джакония В. Е., Гоголь А. А., Друзин Я. В. и др. Телевидение: Учебник для вузов / Под ред. В. Е. Джаконии. М.: Радио и связь, 2004. 616 с.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
4. Сухов Т. М., Беляев Е. А. Использование принципа постоянной цветовой яркости для передачи видеoinформации // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 55—59.
5. Электронный ресурс: <http://www.agner.org/optimize/instruction_tables.pdf>.

Сведения об авторе

Тимофей Михайлович Сухов — ЗАО «Научно-производственная фирма „ТИРС“», отдел телевизионной техники, Санкт-Петербург; начальник сектора; E-mail: tsuhov@mail.ru

Рекомендована отделом
телевизионной техники ЗАО «НПФ „ТИРС“»

Поступила в редакцию
17.01.14 г.