

УДК 681.775, 628.946.2

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В РАСПРЕДЕЛЕННОМ ПРОЕКТОРЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЯРКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ШИРОКОФОРМАТНЫХ ЭКРАНАХ

*Торчигин А.В.*

Проблема формирования ярких изображений на экранах большого формата требует разрешения и поныне, поскольку яркость создаваемого кинопроектором изображения обратно пропорциональна его площади, что с неизбежностью вызывает необходимость увеличения мощности светового потока, проектируемого на экран. Эта мощность ограничена способностью киноплёнки пропускать интенсивный свет, так как значительная доля светового потока поглощается киноплёнкой, что приводит к ее разогреву.

Остается острой проблема получения мощного источника света с заданными спектральными и пространственными характеристиками. Срок службы таких источников составляет около 1000 часов, и при этом их характеристики изменяются во времени. Изменениям также подвержена сама киноплёнка, качество которой ухудшается с каждым показом, а также при длительном хранении.

Проблемы ухудшения качества изображения из-за деградации киноплёнки решены в современных цифровых LCD и DLP проекторах, в которых используется цифровой метод формирования изображений. Однако и в этих случаях сохраняется проблема ухудшения качества изображения во времени, так как изменяются характеристики формирующих изображение матриц, выходят из строя отдельные пикселы. Кроме того, в этих проекторах остаются проблемы, связанные с ограничениями на мощность светового потока.

В настоящее время источники света и средства для управления их яркостью достигли такого уровня, что целесообразно использовать принцип формирования изображения несколькими проекторами. При этом каждый проектор может быть предназначен для формирования определенного фрагмента общего изображения, и границы этих фрагментов перекрываются. В этом случае должна быть полностью решена проблема граничных областей, в которых изображение формируется двумя или большим количеством проекторов.

Для решения этой задачи в качестве источников света могут быть использованы яркие светодиоды, управляемые современными микропроцессорами.

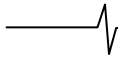
В настоящее время технология изготовления светодиодов не достигла еще такого уровня, при котором было бы возможно изготовление нескольких миллионов светодиодов, по одному на каждый пиксел высококачественного изображения.

В отличие от ламп накаливания, светодиоды способны к высокочастотной модуляции. Частота модуляции 25 МГц вполне доступна для современных ярких светодиодов. Если обеспечить перемещение изображения

*Анализируется возможность формирования яркого изображения на широкоформатном экране с помощью многих цифровых проекторов, каждый из которых формирует некоторый фрагмент изображения на основе синтеза в реальном масштабе времени воспроизведения информации, предварительно полученной при калибровке проектора. Показано, что использование проекторов, в которых лампа накаливания заменена на матрицу светодиодов, позволяет существенно увеличить яркость изображения и срок службы проектора.*

каждого светодиода по экрану, то светящиеся линии, формируемые светодиодами, можно рассматривать как некие аналоги строк телевизионного изображения. Нарботка на отказ у светодиодов на 2 порядка выше, чем у ламп накаливания. Что касается светового потока, то уже в течение нескольких лет коммерчески доступны светодиоды со световым потоком в 100 люмен [1]. Световой поток, создаваемый типичным проектором, составляет около 2000 люмен, а световой поток самого мощного в настоящее время проектора NEC STARUS NC2500S равен 20 000 люмен. Таким образом, требуется всего 20 и 200 светодиодов, чтобы создать соответственно типичный и рекордный световой поток современных проекторов. Количество используемых светодиодов в проекторе может быть значительно больше. Немаловажным является и то обстоятельство, что светоотдача светодиодов более чем в 10 раз выше, чем у ламп накаливания [2]. Это обстоятельство не только повышает КПД проектора, но и упрощает проблемы его охлаждения. Следует также заметить, что существуют светодиоды, излучающие свет в достаточно узком спектральном диапазоне, соответствующем красному, зеленому и синему спектральным компонентам. Эта особенность обеспечивает существенные преимущества светодиодам по сравнению с LCD и DLP проекторами, в которых из белого света, излучаемого лампой накаливания, с помощью светофильтров выделяются требуемые спектральные составляющие. Таким образом, использование светодиодов в качестве управляемых источников света позволяет снять многие ограничения, присущие современным проекторам.

Однако все перечисленные возможности остались бы нереализованными, если бы в настоящее время не было средств, позволяющих оперативно определять и управлять в реальном масштабе времени яркостью светодиодов для получения изображения. Применение современных микропроцессоров позволяет достаточно просто решить возникающие при этом проблемы.



Пусть некоторая матрица светодиодов проектируется на светоотражающий экран с помощью обычного объектива, используемого в проекторах. Если сдвинуть матрицу светодиодов относительно объектива таким образом, что плоскость, в которой расположена матрица, осталась неизменной, то изображение светодиодов на экране также будет также сдвинуто. При этом фокусировка изображения не нарушится. В том случае, когда матрица светодиодов перемещается в своей плоскости по некоторой замкнутой траектории, изображение каждого светодиода на экране будет описывать некоторую замкнутую линию.

При модуляции параметров светодиода яркость различных участков этой линии будет различна. Для современных светодиодов и микроконтроллеров, позволяющих производить модуляцию яркости с частотой 25 МГц, обеспечивается скорость перемещения элемента изображения светодиода на экране 100 м/с, а яркость может изменяться при смещении этого элемента на расстояние, равное 4мм. Это существенно меньше, чем требуется. Если допустить, что смена кадров должна происходить с частотой 100 Гц, то за время показа одного кадра имеется возможность 250 000 раз изменить яркость излучения светодиода. Из этого не следует, что один светодиод может участвовать в формировании 250 000 пикселей, так как при модуляции с такой частотой пиксели не полностью разделены в пространстве. Количество пикселей  $N$ , которое может формироваться одним светодиодом, зависит количества светодиодов в проектируемой матрице и от соотношения длины и ширины замкнутой линии, засвечиваемой одним светодиодом. При этом вполне достижимы значения  $N=10^4-10^5$ .

Пусть в формировании общего изображения на экране 1 участвуют несколько проекторов с регулируемыми светодиодами 2, как показано на Рис.1. Пусть период движения светодиодов во всех проекторах одинаков и состоит из  $N$  временных интервалов. Допустим, что на короткое время в начале каждого временного интервала поочередно включается первый светодиод на первом устройстве. После этого в следующем периоде включается второй светодиод на первом устройстве и т.д. Затем такая же процедура повторяется со светодиодами на втором устройстве, на третьем устройстве и т.д.

Формируемое светодиодом изображение с помощью цифровой видеокамеры 3 с максимально высоким пространственным и спектральным разрешением передается в персональный компьютер 4, который в рассматриваемом случае выступает в качестве HOST машины многопроцессорной вычислительной системы, включающей в себя микропроцессоры, управляющие яркостью светодиодов в каждом проекторе. В HOST машине полученное с видеокамеры изображение анализируется и составляется таблица, содержащая координаты создаваемого светодиодом пятна на экране в каждый  $q$ -ый момент времени ( $q=0, 1, \dots, N-1$ ). Кроме того, таблица содержит такие параметры пятна, как его интенсивность и цвет.

Пусть теперь требуется с помощью указанных устройств создать изображение прямоугольной картины, имеющей  $w$  пикселей по ширине и  $h$  пикселей по высоте. Пусть картина представлена в BMP формате, где каж-

дый пиксел характеризуется 3 байтами, определяющими интенсивность соответственно красного, зеленого и синего цветов.

Центр картины разместим в центре области, засвечиваемой всеми включенными светодиодами во всех проекторах. Выберем масштаб картины таким, чтобы она полностью попадала в область, засвечиваемую всеми проекторами, когда в каждом из них включены все имеющиеся светодиоды. Пусть суммарное количество светодиодов во всех проекторах равно  $K$ . Пронумеруем последовательно эти светодиоды от 0 до  $K-1$ .

Далее, на основе собранной в HOST машине информации поочередно для каждого пиксела картины на экране составляется таблица, содержащая следующую информацию:

- координаты пиксела (номер пиксела в строке  $0 \leq i \leq w-1$ , номер строки в формируемом изображении  $0 \leq j \leq h-1$ );

- номер светодиода  $0 \leq p \leq K-1$  и номер временного интервала  $0 \leq q \leq N-1$ , когда пятно, создаваемое этим светодиодом, попадает на рассматриваемый пиксел;

- яркость и цвет этого пятна.

В том случае, если используются светодиоды, цвет которых не в точности совпадает с красным, зеленым и синим цветом, эта информация содержится в 3 байтах, в которых указывается интенсивность каждого из 3 цветов точно так же, как в 3 байтах BMP файла.

Далее необходимо провести проверку того, что у каждого пиксела может быть обеспечена необходимая яркость каждого их трех цветов. С этой целью по полученной для каждого пиксела информации составляются три матрицы  $R_{ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$ , элементы которых равны суммарной интенсивности, создаваемой всеми проекторами соответственно красными, зелеными и синими светодиодами в пикселе с координатами  $i, j$ . После этого определяются минимальные  $r_{min}$ ,  $g_{min}$ ,  $b_{min}$  и максимальные элементы  $r_{max}$ ,  $g_{max}$ ,  $b_{max}$  в каждой из указанных матриц. Ситуация, при которой хотя одно из отношений  $r_{min}/r_{max}$ ,  $g_{min}/g_{max}$ ,  $b_{min}/b_{max}$  близко к нулю, свидетельствует о том, что при заданном расположении проекторов для некоторых пикселей не может быть обеспечена необходимая яркость.

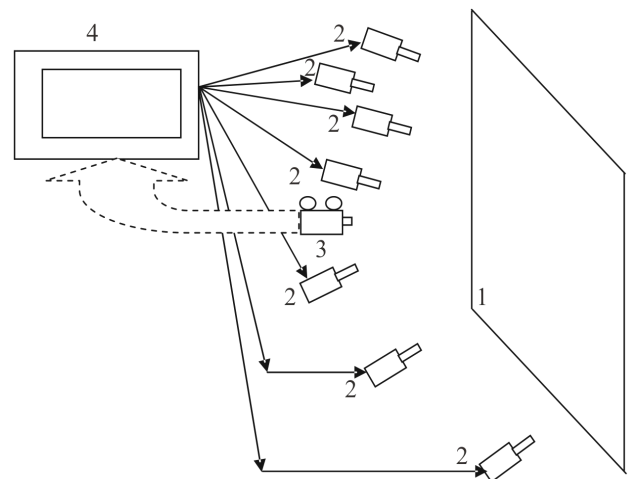


Рис.1. Схема формирования на экране одного изображения многими проекторами

В этом случае требуется скорректировать расположение проекторов и добиться ситуации, при которой минимальное из указанных соотношений больше некоторого предела  $L$ . Этот предел характеризует степень равномерности засветки экрана всеми проекторами и определяет результирующую яркость создаваемого изображения.

Действительно, при формировании произвольного изображения может оказаться, что пиксел, для которого проекторы обеспечивают минимальную интенсивность, должен иметь максимальную яркость. В этом случае в формируемом изображении наиболее яркий пиксел будет иметь интенсивность, ослабленную в  $L$  раз по сравнению с максимально возможной. Таким образом, как и следовало ожидать, равномерность засветки экрана всеми проекторами весьма важна, так как непосредственно влияет на яркость изображения. Заметим, что в отличие от обычных проекторов, где неравномерность засветки экрана приводит к нарушению пропорциональности в интенсивности отдельных фрагментов картины, в рассматриваемом случае такая пропорциональность сохраняется. Уменьшается лишь яркость картины. Для сохранения пропорций между яркостью различных пикселов достаточно допустить, что яркость найденного пиксела с минимальной освещенностью характеризуется 3 байтами с значениями 255, 255, 255. В этом случае может быть реализована соответствующая яркость любого пиксела изображения, характеризуемого байтами со значениями  $r, g, b$  ( $0 \leq r \leq 255, 0 \leq g \leq 255, 0 \leq b \leq 255$ ). Действительно, для этого достаточно лишь выбрать соответствующим образом доли временных интервалов, в течение которой должны быть включены соответствующие светодиоды.

Рассмотрим более подробно алгоритм формирования управляющих последовательностей для каждого светодиода в проекторе. Пусть требуется сформировать изображение, задаваемое матрицей  $A_{ij}$  ( $i=0, 1..w-1; j=0, 1..h-1$ ), где  $w$  и  $h$  количество пикселов в изображении соответственно по горизонтали и вертикали.

$$\sum_{p=0}^{K-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_{pq} I_{ij}^{pq} = A_{ij} \quad (i=0, 1..w-1; j=0, 1..h-1)$$

Элемент матрицы  $A_{ij}$  представляет собой 24-разрядное целое, определяющее интенсивность красного, зеленого и синего цветов. Эта информация может быть получена из файла типа BMP, задающего формируемое изображение. На основе этой информации должно быть получено  $K$  последовательностей  $T_q$ , определяющих время, на которое включается светодиод с номером  $p$  ( $p=0, 1..K-1$ ) во временном интервале с номером  $q$  ( $q=0, 1..N-1$ ). Эти  $K$  последовательностей могут быть представлены в виде матрицы  $T_{pq}$ . Значение элемента матрицы  $T_{pq}$  может изменяться в пределах от 0 до 1 и определяет долю временного интервала, в течение которой должен быть включен светодиод с номером  $p$  во временном интервале с номером  $q$ .

В том случае, когда изображение формируется с помощью красных, зеленых и голубых светодиодов, задача упрощается и сводится к трем одинаковым более простым задачам по формированию красной, зеленой и голубой составляющих общего изображения. В этом

случае 3 байта элемента матрицы  $A_{ij}$  содержат лишь один отличный от нуля байт. Заметим, что в рассматриваемом случае формирование заданного цветного изображения возможно и при использовании не совсем чистых цветов, то есть при использовании светодиодов, спектр излучения которых характеризуется 3-мя отличными от нуля байтами.

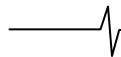
Рассмотрим частный случай, при котором  $K \cdot N \gg w \cdot h$ . Это условие означает, что количество потенциально возможных пикселов, которые могут быть сформированы распределенным проектором, существенно больше количества пикселов, заданных в BMP файле.

При калибровке проектора для каждого  $p$ -го светодиода и  $q$ -го временного интервала на основе измерений интенсивности пятна в различных участках экрана в этом временном интервале составляется матрица  $I_{ij}^{pq}$ , которая задает интенсивность света в квадрате на экране с координатами  $i, j$  (квадрат с номером  $i$  в  $j$ -ой строке), создаваемого светодиодом с номером  $p$  во временном интервале с номером  $q$ . Сторона квадрата  $e$  определяется соотношением  $e=W/w$ , где  $W$  – ширина изображения на экране. При калибровке проектора создается  $K \cdot N$  таких матриц. В рассматриваемом частном случае размеры пятна, создаваемого одним светодиодом на экране, существенно меньше размеров квадрата. Поэтому не вызовет большой погрешности предположение, что пятно полностью находится в некотором квадрате. Из этого предположения следует, что в матрице  $I_{ij}^{pq}$  лишь один элемент отличен от нуля и равен 1. Таким образом, задача сводится к нахождению линейной комбинации матриц  $I_{ij}^{pq}$ , которая дает матрицу  $A_{ij}$ . Иными словами, задача сводится к решению следующей системы из  $w \cdot h$  линейных уравнений, содержащей  $K \cdot N$  неизвестных.

Вообще говоря, эта система имеет множество решений, так как количество неизвестных  $\alpha_{pq}$  больше количества уравнений. Однако на решения накладываются условия  $0 \leq \alpha_{pq} \leq 1$ . Для рассматриваемого частного случая эти условия выполнимы и решение этой системы находится простым перебором. Для каждого элемента матрицы  $A_{ij}$  просматриваем аналогичные элементы во всех  $K \cdot N$  матрицах  $I_{ij}^{pq}$  и выбираем матрицы, в которых эти элементы отличны от нуля. В предположении, что изображение хотя бы одного светодиода на экране в некоторый временной интервал находится в квадрате с координатами  $i, j$ , получим, что такие матрицы существуют. В том случае, если найдена лишь одна матрица, коэффициент  $\alpha_{pq}$  определяется соотношением

$$\alpha_{pq} = A_{ij} / 255.$$

Если найдено несколько матриц, то существует множество решений. Простейшим из них является решение, при котором коэффициенты  $\alpha_{pq}$  у всех матриц, кроме первой, равны нулю. Коэффициент у первой матрицы определяется указанным соотношением. Найденные коэффициенты  $\alpha_{pq}$  являются соответствующими элементами искомого матрицы  $T_{pq}$ . Значения элементов матрицы находятся в интервале от 0 до 1 и определяют долю  $q$ -го временного интервала, в течение которого должен быть включен  $p$ -ый светодиод. Заметим, что степень соответствия полученной информации реально определяется параметрами ви-



деокамеры, используемой для сбора исходной информации. По этой причине необходимо использовать высококачественную видеокамеру.

Строки матрицы  $T_{pq}$  рассылаются в микропроцессоры проекторов. При этом в каждый микропроцессор рассылаются лишь строки с номерами, соответствующими номерам светодиодов, управляемых этим микропроцессором. Алгоритм работы микропроцессора реализует включение на полную яркость светодиод с номером  $p$  во временной интервал с номером  $q$  на время, определяемое значением элемента  $T_{pq}$ . Современные 32-разрядные весьма дешевые микропроцессоры [4] в состоянии одновременно управлять яркостью около сотни светодиодов. При необходимости в одном проекторе может быть использовано несколько микропроцессоров, каждый из которых управляет отведенной для него группой светодиодов. Проблема управления яркостью светодиодов полностью решена в обычных крупноформатных экранах. В настоящее время несколькими фирмами выпускаются микросхемы, предназначенные значительно упростить управление яркостью светодиодов [5].

Заметим, что добавление новых проекторов сводится только к изменению параметра  $K$ . Это обстоятельство позволяет рассматривать множество проекторов как один распределенный проектор, автоматически настраиваемый на показ общего изображения в зависимости от характеристик и взаимного расположения компонентов такого проектора. Так как в описанном алгоритме отсутствует понятие отдельного проектора и все проекторы рассматриваются в рамках одного распределенного проектора, имеющего  $K$  светодиодов, то исчезает понятие границы между отдельными проекторами. Изображение в областях, засвечиваемых несколькими проекторами, формируется этими проекторами совместно.

Разумеется, описанный алгоритм может быть оптимизирован по многим направлениям. Однако и без оптимизации он вполне работоспособен. Как и в традиционных проекторах, перед показом изображений проекторы должны быть настроены. Настройка традиционных проекторов сводится к ориентации проектора в пространстве и фокусировке изображения. Дальнейшая настройка всей системы производится в автоматическом режиме при выполнении соответствующей программы один раз перед началом показа.

Заметим, что для точного отображения цветов, указанных в BMP-файле, не обязательно использовать светодиоды чисто красного, зеленого и синего цветов. Возможны небольшие отклонения цвета светодиодов от стандарта, которые могут быть учтены в процессе формирования изображений. Действительно, пусть требуется сформировать пиксел, в котором интенсивность красного, зеленого и синего цветов определяется соответственно параметрами  $\{r, g, b\}$ . Пусть для формирования заданной палитры используются красные, зеленые и синие светодиоды, спектр излучения которых определяется соответственно следующими выражениями  $\{R, \Delta R_G, \Delta R_B\}$ ,  $\{G, \Delta G_R, \Delta G_B\}$ ,  $\{B, \Delta B_R, \Delta B_G\}$ , где  $R + \Delta R_G + \Delta R_B = 1$ ,  $G + \Delta G_R + \Delta G_B = 1$ ,  $B + \Delta B_R + \Delta B_G = 1$ ,  $\Delta R_G \ll 1$ ,  $\Delta R_B \ll 1$ ,  $\Delta G_R \ll 1$ ,  $\Delta G_B \ll 1$ ,  $\Delta B_R \ll 1$ ,

$\Delta B_G \ll 1$ . Интенсивности указанных светодиодов  $\{r', g', b'\}$ , необходимые для получения заданной палитры, могут быть определены из следующей системы уравнений

$$\begin{aligned} r'R + g'\Delta R_G + b'\Delta R_B &= r \\ r'\Delta R_G + g'G + b'\Delta B_G &= g \\ r'\Delta R_B + g'\Delta G_B + b'B &= b \end{aligned}$$

Решая эту систему уравнений с учетом указанных ограничений, получим следующие выражения для интенсивности светодиодов

$$\begin{aligned} r' &= r(1 + \Delta R_G + \Delta R_B) - g\Delta G_R - b\Delta B_R \\ g' &= g(1 + \Delta G_R + \Delta G_B) - r\Delta R_G - b\Delta B_G \\ b' &= b(1 + \Delta B_R + \Delta B_G) - r\Delta R_B - g\Delta G_B \end{aligned}$$

Таким образом, при рассматриваемом подходе цветопередача может быть настроена программно.

Дополнительно к привлекательным свойствам проекторов на основе светодиодов можно добавить следующие моменты:

- отсутствует необходимость в точной ориентации проекторов;
  - для получения необходимой яркости изображения количество проекторов может, как увеличиваться, так и уменьшаться;
  - исключаются проблемы традиционных проекторов, связанные с искажениями, вносимыми оптикой, такие как астигматизм, кома, сферическая и хроматическая аберрации, бочкообразные и подушкообразные искажения и т. п. [6];
  - устраняются эффекты, связанные со старением оборудования, так как при настройке проекторов эти обстоятельства автоматически принимаются во внимание;
  - возможно точное воспроизведение цветов в изображении;
  - настройка проекторов с помощью программного обеспечения гораздо быстрее, дешевле, точнее, гибче и оперативнее, чем настройка аппаратуры с помощью механических регуляторов.
- Таким образом, появление ярких светодиодов и дешевых микропроцессоров, обеспечивающих в реальном времени модуляцию яркости многих светодиодов, позволяет по-новому подойти к решению вековой проблемы – увеличению яркости изображений на широкоформатных экранах.

#### Литература

1. Кононов В. Рекордно яркие LED от Nichia [http://www.3dnews.ru/news/rekordno\\_yarkie\\_led\\_ot\\_nichia/](http://www.3dnews.ru/news/rekordno_yarkie_led_ot_nichia/)
2. Бурняшев А.. Современные мощные светодиоды и их оптика // Современная электроника. – 2006.-№1.- С. 24-27.
3. Мощные светодиоды различных производителей: [www.leds.ru](http://www.leds.ru)  
[www.lumileds.com/products](http://www.lumileds.com/products)  
[www.osram-os.com/goldendragon](http://www.osram-os.com/goldendragon)  
[www.osram.ru/index.php](http://www.osram.ru/index.php)  
[www.upec.com](http://www.upec.com)  
[www.laminaceramics.com](http://www.laminaceramics.com)
4. Редькин П. Микроконтроллеры ARM7 семейства LPC2000. – М.: Додэка-XXI, 2007 450 с.
5. Драйверы для светодиодов [www.mblock.com](http://www.mblock.com)
6. Ландсберг Г.С.. Оптика. М.: Наука, 1976.