

УДК 621.397.46

МИНИМИЗАЦИЯ МЕРЦАНИЙ ИМПУЛЬСНО-МОДУЛИРОВАННОЙ ПОДСВЕТКИ В ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА МИКРОДИСПЛЕЯХ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА

Д.В. ЧИСТОБАЕВ¹, Е.А. КРАСНОБАЕВ², А.А. СТЕПАНОВ³

¹Открытое акционерное общество «Конструкторское бюро «Дисплей», Республика Беларусь

²Витебский государственный университет им. П.М. Машиерова, Республика Беларусь

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 7 июня 2018

Аннотация. Проведен анализ влияния мерцаний импульсных светодиодных источников света, широко применяемых для подсветки в проекционных оптических системах индикации на восприятие человеческим зрением. Проведен анализ импульсного сигнала подсветки микродисплеев отражательного типа. Осуществлено моделирование и анализ мерцаний бинарного импульсно-кодированного сигнала. Выданы рекомендации для сведения видимых мерцаний до минимального уровня.

Ключевые слова: проекционная система индикации, светодиодная подсветка, бинарная импульсно-кодированная модуляция.

Abstract. The effect of pulsed LED light sources, widely used for illumination in projection optical indicator systems on perception of human vision, is analyzed. An analysis of the impulse signal of reflectors illumination has been carried out. Modeling and analysis of flickerings of a binary pulse-code modulated signal has been performed. Recommendations for reducing of visible flickering of the LED backlight up to the minimum level have been given.

Keywords: projection display system, LED lights, binary-coded pulse modulation.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 77-84
**Minimization of flickering of impulse modulated illumination
in projection systems on microdisplays of reflective type**
D.V. Chistobaev, E.A. Krasnobaev, A.A. Stepanov

Введение

В современном мире растет количество визуальной информации, предназначенной для восприятия и анализа человеком. На сегодняшний день в технике существуют различные способы отображения графической информации. Для управления транспортными средствами и объектами, в которых требуется одновременное наблюдение за внешней обстановкой и информацией с различных приборов, наиболее актуальным является проекционный способ отображения графической информации. В проекционных системах индикации изображение отображается на полупрозрачном экране, который находится перед глазами пилота или оператора. Примером таких систем может служить индикатор на лобовом стекле, просветная наשלменная система индикации, просветная система индикации, выполненная в виде очков. Так как экран прозрачен, можно одновременно наблюдать внешнюю обстановку и индицируемую информацию. Изображение коллимируется в бесконечность, тем самым исключается необходимость аккомодации глаз, что повышает удобство восприятия информации.

В высококачественных проекционных системах индикации используются микродисплеи отражательного типа – FLCoS (Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon) или DLP (Digital Light Processing). Высокоскоростные ферроэлектрические жидкокристаллические FLCoS-микродисплеи не могут формировать градации серого путем изменения угла поворота ЖК-материала, что изменяет степень поляризации выходного пучка света. Микродисплеи на микромеханических зеркалах DLP также не могут отражать свет с промежуточными значениями яркости. Для получения шкалы оттенков серого используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) или бинарная импульсно-кодовая модуляция (БИКМ) источников света. Методы получения шкалы оттенков серого подробно описаны в [1]. Цветные изображения при использовании данных микродисплеев получают с помощью применения переключающейся трехцветной RGB светодиодной подсветки. Несмотря на то, что импульсы подсветки имеют высокую частоту, мерцание изображения может быть заметно глазом и влияет на комфортность работы с системой индикации.

Таким образом, возникает вопрос выбора оптимальной последовательности импульсов сигнала подсветки и влияния на восприятие мерцания импульсно-модулированных источников света зрением человека.

Особенности восприятия человеком импульсно-модулированных источников света

Как известно, если сетчатка глаза человека освещается световыми импульсами, то мерцания перестают восприниматься при некоторой их частоте. Эта частота называется «критическая частота слияния мерцаний» (КЧСМ) «critical fusion frequency» (CFF). Это такая частота ν_k , при которой мерцания перестают быть заметными как по яркости, так и по цвету [2]. КЧСМ описывается следующим уравнением (1) и зависит от скважности импульсов, их формы, яркости, угловых размеров освещенного объекта, места проекции на сетчатку, уровня адаптации, функционального состояния зрительного анализатора [3]:

$$\nu_k = a \lg L + b, \quad (1)$$

где L – яркость в кд/м^2 , a и b – константы.

Когда источник работает в импульсном режиме на частотах, превышающих ν_k , человек не воспринимает мерцания. В [2] приводится формула (2) для частоты с определенными параметрами:

$$\nu_k = 12 \lg L + 35, \quad (2)$$

применяемая для $L \leq 500 - 1000 \text{кд/м}^2$ и углового размера источника $\omega \geq 0,01 \text{ ср}$. Для 103кд/м^2 КЧСМ у здорового человека достигает величины 59–60 Гц при скважности 0,5, что экспериментально подтверждается учеными-офтальмологами [4].

Существенным вопросом остается выбор значения параметров a и b в зависимости от конкретных условий наблюдения. Необходимо также учитывать, что человеческий глаз более чувствителен к мерцанию и движениям в периферических углах, чем в центральных углах поля зрения. Легко определить такие a и b , при которых $\nu_k > 60 \text{ Гц}$.

Известен также закон Тальбота, который описывает зрительные ощущения, возникающие под действием мерцаний. Если некоторая площадь сетчатки возбуждается световым импульсом, яркость которого периодически меняется с частотой, превышающей критическую частоту слияния мерцаний, то вызываемое зрительное ощущение тождественно тому, которое создается постоянной яркостью, равной средней яркости за период [2].

Для серии проблесков с постоянной яркостью L при частоте проблесков $\nu > \nu_k$ эффективная яркость равна

$$L_{\text{эф}} = L \frac{t_1}{t_1 + t_2}, \quad (3)$$

где t_1 – время проблеска, t_2 – время темного промежутка между смежными проблесками [2].

Для ШИМ-сигналов подсветки проекционных систем данная формула примет вид

$$L_{\text{эф}} = LS, \quad (4)$$

где S – скважность импульсов или коэффициент заполнения. В соответствии с законом Гальбота воспринимаемая яркость импульсной и постоянной подсветки идентична [5].

В исследованиях [6] показано, что ожидаемое отношение 0,5 при проведении опытов с отдельными RGB цветами может нарушаться, что необходимо учитывать при использовании трехцветной светодиодной подсветки.

Существует понятие «временной контрастной чувствительности» – это способность человека видеть объекты, слабо отличающиеся по яркости от фона в процессе их смены по времени. Это понятие также отражает способность различать глазом человека световые мерцания.

Таким образом, общеизвестно, что люди не способны различать мерцания с КЧСМ выше 50–60 Гц. Эта величина играет важную роль в устройствах отображения информации. Например, частота обновления визуальных дисплеев должна быть выше КЧСМ и составляет сейчас 60–75 Гц.

Однако в последних исследованиях в данной области [7, 8] утверждается, что человек не может отличить два импульса – непрерывный и мерцающий с частотой выше КЧСМ с одинаковой эффективной яркостью, если они пространственно разделены (представлены одновременно в разных местах при наблюдении). Когда импульсы сформированы последовательно (мерцающий и непрерывный) в одном и том же месте, переходное мерцание может восприниматься в момент их переключения. Такое явление называют «временное восприятие мерцания» (ВВМ) «transient twinkle perception» (ТТР) [7]. Это явление заключается в том, что зрение человека может воспринимать мерцания с частотой выше КЧСМ. Проведенные эксперименты в [7] подтвердили восприятие человеком мерцаний с частотами до 200 Гц при последовательной смене непрерывного и мерцающего импульсов (при заданных уровнях яркости), см. рис. 1.

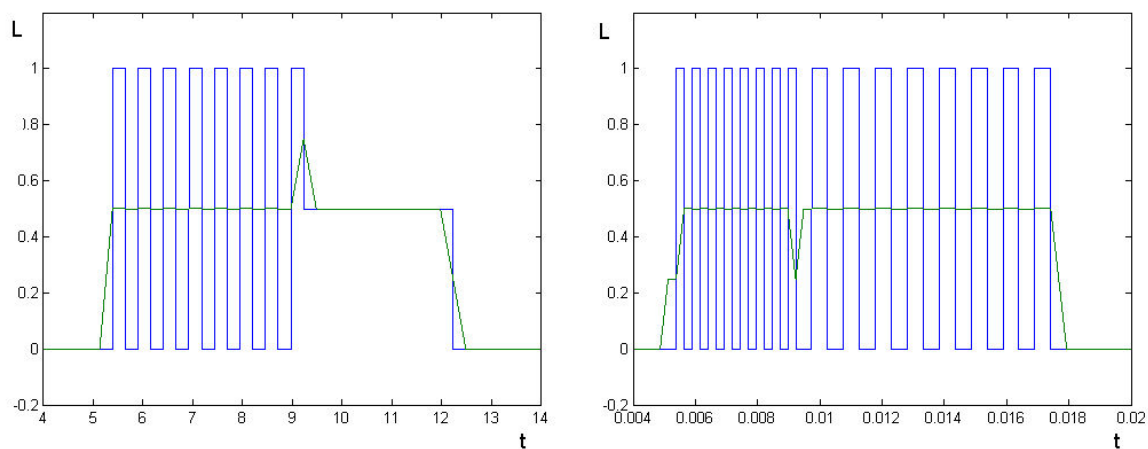


Рис. 1. Проявления мерцаний при смене последовательности импульсов

Объяснить это явление можно быстрым изменением скользящего среднего значения яркости в момент перехода между импульсной и постоянной последовательностью или импульсами разной ширины (рис. 2). Восприятие переходных мерцаний определяется тем, превышает ли усредненная яркость около перехода некоторое пороговое значение (в соответствии с логикой закона Гальбота). Другими словами, воспринимается мерцание усредненной яркости относительно постоянного ее значения.

Импульсный сигнал подсветки микродисплеев является модулированным по типу ШИМ или БИКМ, и в нем возможны переходы, аналогичные изображенным на рис. 2. Исследуем сигналы подсветки более детально на предмет наличия частотных составляющих и явления «временного восприятия мерцания» (ВВМ).

Моделирование и анализ характеристик сигнала подсветки FLCoS-микродисплея

Для подсветки FLCoS-микродисплеев используют бинарную импульсно-кодовую модуляцию (временной метод синтеза изображения с оттенками серого). Промежуточные градации удается получить за счет разной ширины подсвечивающих импульсов для каждого битового поля изображения. Цветное изображение получается последовательной подсветкой микродисплея светодиодами трех основных цветов RGB.

На рис. 2 приведен пример использования 4-х битной бинарной импульсно-кодовой модуляции. С помощью 4-х разрядов можно получить $2^4 = 16$ градаций оттенка серого.

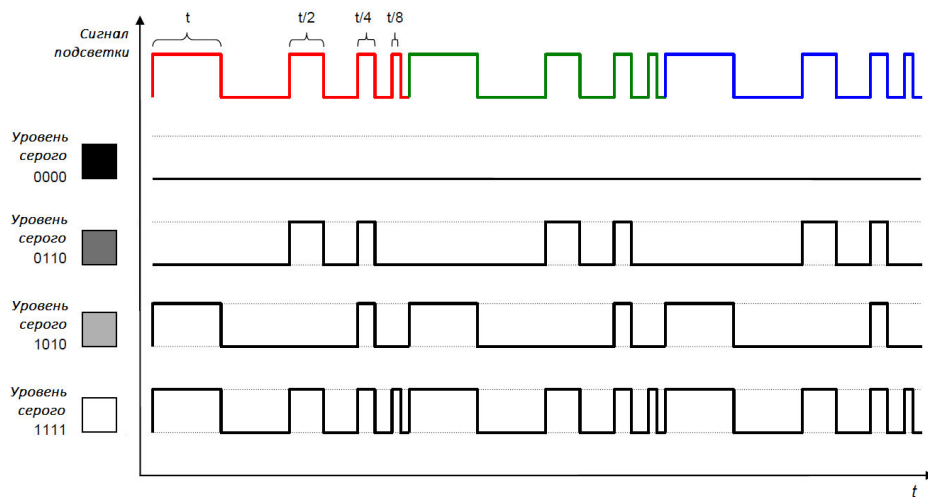


Рис. 2. Пример использования временного метода синтеза изображения с оттенками серого

В видеоинтерфейсах цифрового стандарта HDMI/DVI передается 8 бит информации на каждый цвет RGB. В разрабатываемом проекционном устройстве используется 8-битный сигнал подсветки, который имеет бинарную импульсно-кодовую модуляцию. При формировании изображений с помощью FLCoS-микродисплея импульсы подсветки имеют ширину от 8 до 1024 мкс, что превышает частоту КЧСМ, равную 60 Гц.

С целью выявления ВВМ в соответствии с [7] исследуем предполагаемый сигнал подсветки микродисплея. Сигнал подсветки FLCoS-микродисплея является более сложным: импульсы имеют разную длину и формируются пакетами. На рис. 3 продемонстрировано три пакета импульсов подсветки (8 бит на каждый цвет), соответствующих белому цвету, смоделированных в среде MATLAB.

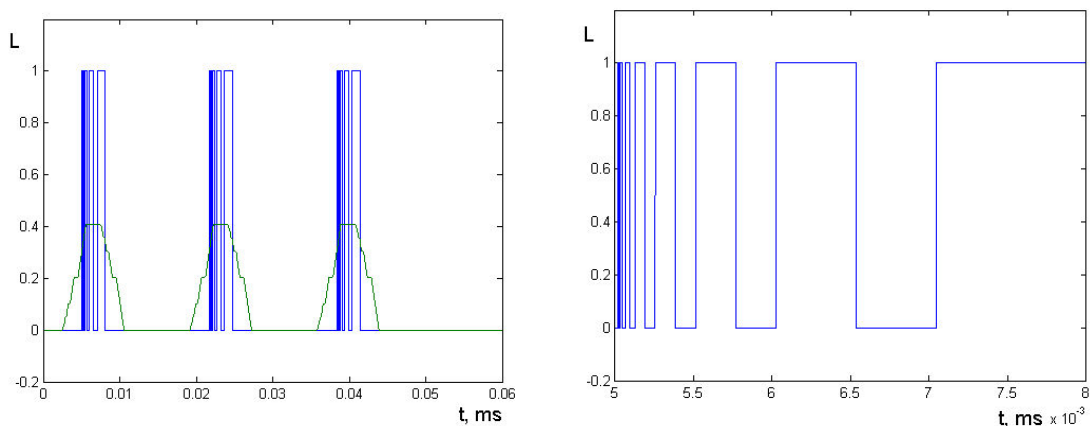


Рис. 3. Три пакета сигнала подсветки FLCoS-микродисплея, отдельный пакет сигнала подсветки FLCoS-микродисплея

На последовательность вывода битовых полей наложен ряд ограничений, связанных с отрицательной фазой работы микродисплея и скоростью считывания информации

из оперативной памяти контроллера управления микродисплеем. Отрицательная фаза работы микродисплея исключает деградацию жидкокристаллического материала.

Алгоритм разбиения сигнала на битовые поля заключается в буферизации кадра изображения в оперативной памяти контроллера микродисплея и затем считывании отдельно 8 битовых полей. Соответственно, светодиод осветителя подсвечивает каждое битовое поле импульсами шириной t , $t/2$, $t/4$, $t/8$, $t/16$, $t/32$, $t/64$, $t/128$. Также старший бит подсветки, из-за большой длительности, можно разбить на две части, для того чтобы уменьшить длительное статическое положение ЖК-материала.

Так как глаз усредняет импульсный световой сигнал, мы можем применить к входящему сигналу функцию скользящего среднего, см. рис. 4. Выполним быстрое преобразование Фурье для получения графика спектральной плотности сигнала, см. рис. 4.

Переходных мерцаний, аналогичных изображенным на рис. 1, здесь не наблюдается, так как усредненная яркость постоянно меняется по амплитуде и не является постоянной. Тем не менее, усредненный сигнал яркости на рис. 4 может трактоваться как периодическое мерцание. На полученном его спектре, как и следовало ожидать, можно увидеть основную гармонику 60 Гц – это частота смены полей. В спектре также присутствуют высшие и низшие гармоники, наличие которых определяется неправильной трапецевидной формой усредненных импульсов.

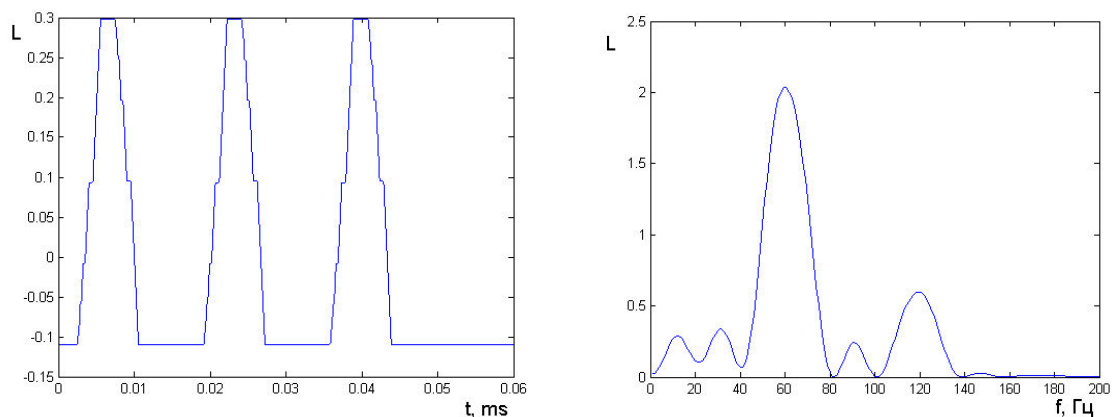


Рис. 4. Усредненный сигнал подсветки после обработки функцией скользящего среднего и его спектральная плотность

Следует отметить, что на спектр сигнала повлияет также конкретное значение яркости, которое формирует микродисплей при отображении реального изображения. Некоторые элементы изображения могут иметь значения, которые преобразуют сигнал подсветки в обычный сигнал ШИМ определенной скважности. Например, последовательности (1 1 1 1 1 0 0), (1 1 1 0 0 0 0 0), (0 0 1 0 0 0 0 0) или аналогичные. Проанализируем спектр сигнала подсветки для значений (1 1 1 1 1 1 0 1), (1 1 1 1 1 1 0 0), (0 0 0 0 0 0 0 1) соответственно. На рис. 5 приведены: один пакет импульсов, усредненная яркость трех пакетов импульсов и спектральная плотность усредненного сигнала. Как видно, спектры идентичны, только появляются слабые составляющие на частотах 200–300 Гц.

Таким образом, видим, что изменение сигнала подсветки в пакете из 8-ми импульсов не влияет на восприятие зрением, так как отражается в спектре в диапазоне высоких частот 200–300 Гц и даже выше. Очевидно, что для зрения человека, этот пакет импульсов будет восприниматься как единый блок. Но период следования данных пакетов импульсов и их ширина могут оказать влияние на восприятие мерцаний человеком.

Исходя из этого, можно определить рекомендации по уменьшению мерцаний:

- увеличить частоту смены полей – соответственно, все гармоники также увеличат частоты и станут менее заметны глазом. Можно выбрать стандартную частоту 75 Гц или 85 Гц;
- расположить импульсы подсветки битовых полей равномерно в пакете, заполняя ими весь кадровый интервал, увеличивая частоту усредненного сигнала, как показано на рис. 6;
- ввести случайный шум в младших разрядах, что будет слабо заметно на полезном изображении, но сгладит спектр сигнала подсветки.

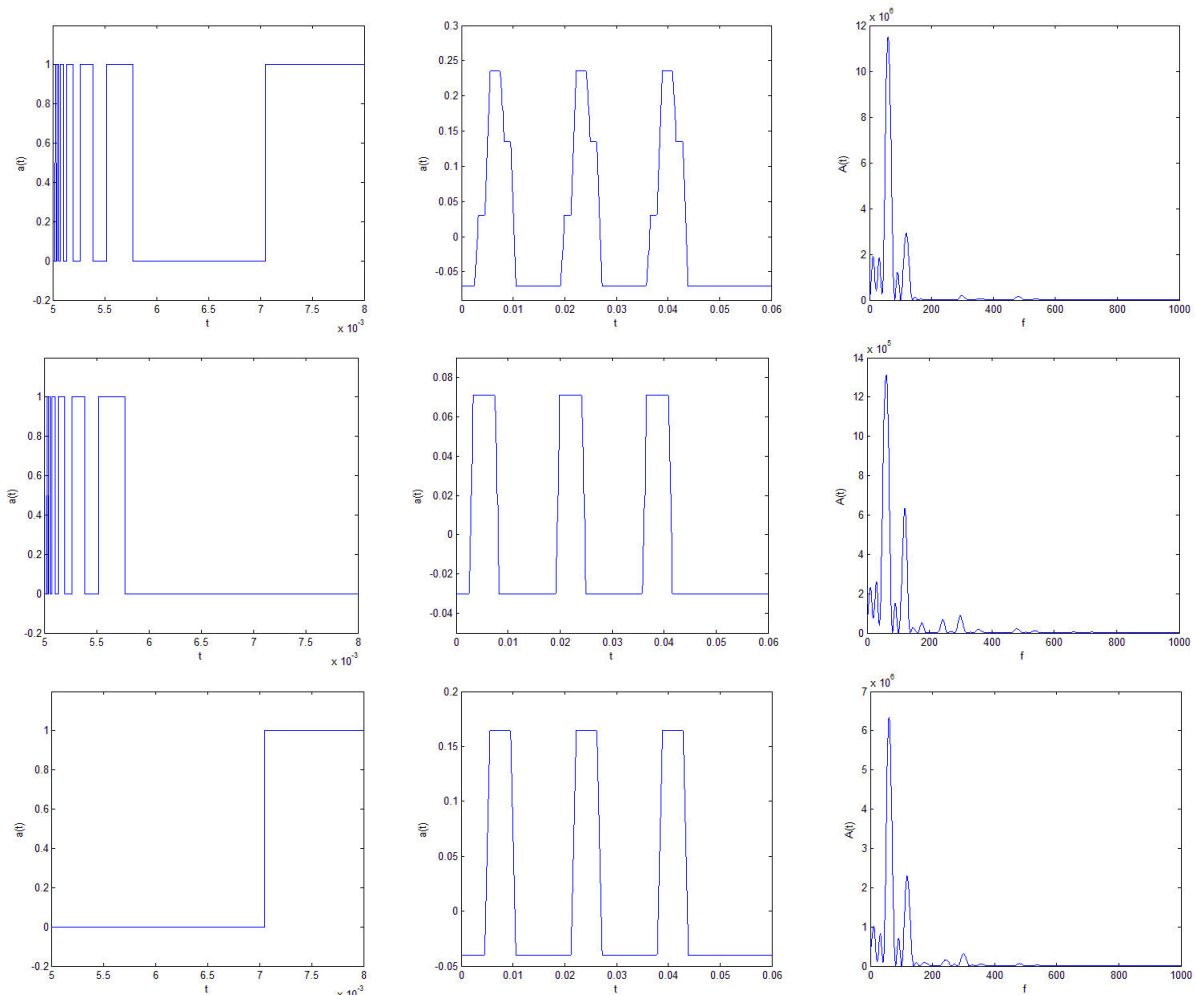


Рис. 5. Спектральный анализ сигналов подсветки для различных последовательностей импульсов подсветки

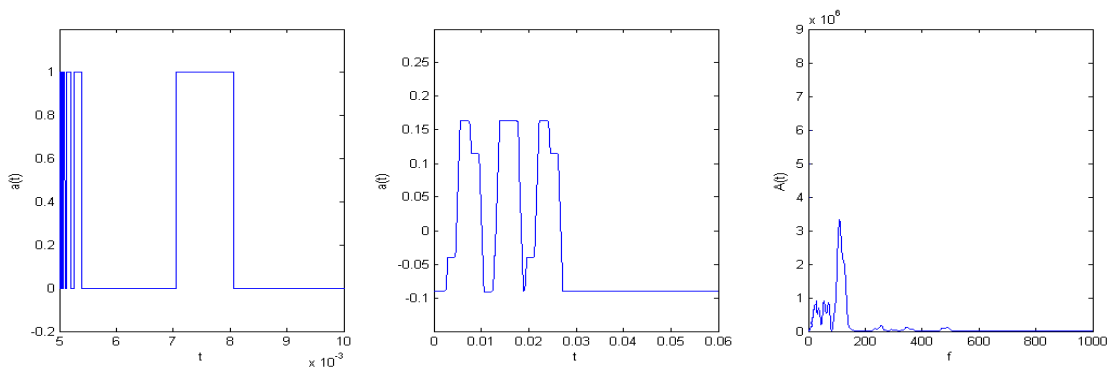


Рис. 6. Спектральный анализ сигналов подсветки с увеличенной частотой за счет равномерного расположения импульсов в пакете

При этом остаются нерешенными вопросы:

- выбора окна усреднения при обработке последовательности импульсов подсветки; например, для последовательности импульсов одинаковой ширины окно усреднения выбирается равным периоду следования импульсов, это позволяет получить усредненную яркость постоянной амплитуды в отсутствие мельканий;
- влияния гармоник, кратных основной, в спектре на наличие мельканий;
- определения порогового значения усредненной яркости, выше которого мелькания не будут восприниматься.

Заключение

В работе дан анализ восприятия импульсных источников света человеческим зрением. Отмечено, что существует «критическая частота слияния мельканий» (КЧСМ) «critical fusion frequency» (CFF). КЧСМ характеризует скорость реакции глаза на световое раздражение. Также известен закон Тальбота, который описывает зрительные ощущения, возникающие под действием мерцаний.

В современных проекционных системах индикации сигналы управления светодиодной подсветкой имеют сложную импульсную форму, в результате чего могут возникать явления мерцания, ухудшающие восприятие человеком изображения. Явление «временного восприятия мерцания» проявляется в сигнале подсветки в также в более сложной форме, нежели в [7]. Эти сигналы могут содержать различные частотные составляющие как ниже, так и выше КЧСМ, что может быть заметно глазом. Проанализирован спектр сигнала, который используется для управления светодиодом подсветки. Для комфортного восприятия изображения даны рекомендации выбора частоты и расположения импульсов светодиодной подсветки, учитывая особенности работы микродисплеев.

Список литературы

1. Смирнов А.Г., Мохаммед А.С. Электронная архитектура LCOS микродисплея для видеопроекционных устройств персонального типа // Докл. БГУИР. 2014. № 7 (85). С. 96–100.
2. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Знак. 2006. 972 с.
3. Ashdown I.E. Extended parallel pulse code modulation of LEDs // Sixth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of the SPIE. 2006. Vol. 6337. P. 1–11.
4. Исследование критической частоты слияния мельканий [Электронный ресурс]. URL: <http://glazamed.ru/baza-znaniy/oftalmologiya/issledovaniya/3.4.3-issledovanie-kriticheskoy-chastoty-sliyaniya-melkanij/> (дата обращения: 29.12.2017).
5. Pulse Width Modulation [Electronic resource]. URL: http://www.tftcentral.co.uk/articles/pulse_width_modulation.htm (access date: 5.10.2017).
6. Сыромьясов Д.О. Особенности цветового зрения при восприятии модулированного светового потока // Полупроводниковая светотехника. 2017. № 6. С. 64–67.
7. Nishida T. Human Perception for high-speed visual presentation // Human-Harmonized Information Technology. 2016. Vol. 1. P. 122–124.
8. Yutaka N. Sakaguchi Y. Transient twinkle perception is induced by sequential presentation of stimuli that flicker at frequencies above the critical fusion frequency // Attention, Perception & Psychophysics. 2015. Vol. 77, iss. 8. P. 2711–2727.

References

1. Smirnov A.G., Mohammed A.S. Jelektronnaja arhitektura LCOS mikrod displeja dlja videoproekcionnyh ustrojstv personal'nogo tipa // Dokl. BGUIR. 2014. № 7 (85). S. 96–100. (in Russ.)
2. Spravochnaja kniga po svetotehnike / Pod red. Ju.B. Ajzenberga. M.: Znak. 2006. 972 s. (in Russ.)
3. Ashdown I.E. Extended parallel pulse code modulation of LEDs // Sixth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of the SPIE. 2006. Vol. 6337. P. 1–11.
4. Issledovanie kriticheskoy chastoty slijaniya mel'kanij [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://glazamed.ru/baza-znaniy/oftalmologiya/issledovaniya/3.4.3-issledovanie-kriticheskoy-chastoty-sliyaniya-melkanij/> (access date: 29.12.2017). (in Russ.)
5. Pulse Width Modulation [Electronic resource]. URL: http://www.tftcentral.co.uk/articles/pulse_width_modulation.htm (access date: 5.10.2017).
6. Syromjasov D.O. Osobennosti cvetovogo zrenija pri vosprijatii modulirovannogo svetovogo potoka // Poluprovodnikovaja svetotehnika. 2017. № 6. S. 64–67. (in Russ.)
7. Nishida T. Human Perception for high-speed visual presentation // Human-Harmonized Information Technology. 2016. Vol. 1. P. 122–124.
8. Yutaka N. Sakaguchi Y. Transient twinkle perception is induced by sequential presentation of stimuli that flicker at frequencies above the critical fusion frequency // Attention, Perception & Psychophysics. 2015. Vol. 77, iss. 8. P. 2711–2727.

Сведения об авторах

Чистобаев Д.В., м.т.н., инженер-конструктор
ОАО «КБ«Дисплей».

Краснобаев Е.А., к.т.н., доцент, заведующий
кафедрой инженерной физики Витебского
государственного университета им. П.М. Машерова.

Степанов А.А., к.т.н., доцент кафедры микро-
и нанoeлектроники Белорусского государственного
университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

210605, Республика Беларусь,
г. Витебск, ул. П. Бровки, 13а,
ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей»
тел. +375-212-58-85-72;
e-mail: chistobaevdm@mail.ru
Чистобаев Дмитрий Викторович

Information about the authors

Chistobaev D.V., M. Sci., design engineer of OJSC
Design office «Display».

Krasnobaev E.A., PhD, associate professor, head
of department of engineering physics of Vitebsk
state university named after P.M. Masherov.

Stepanov A.A., PhD., associate professor of micro-
and nanoelectronics department of Belarusian state
university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

210605, Republic of Belarus,
Vitebsk, P. Brovka st., 13a,
OJSC Design office «Display»
tel. +375-212-58-85-72;
e-mail: chistobaevdm@mail.ru
Chistobaev Dmitry Victorovich