

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-44-53

УДК 621.396.624, 771.537

Функции распределения цвета многослойных мультиспектральных матричных фотоприемников при интерполировании

Вера Леонидовна Жбанова✉

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
Москва, Россия

vera-zhbanova@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

Аннотация

Предмет исследования. Разработанные шаблоны систем цветоделения на основе многослойных сенсоров для регистрации излучения видимого и инфракрасного диапазонов спектра. Представлены три системы, где лишь в половине сенсоров присутствует слой, чувствительный к инфракрасному излучению, и система, где в каждом сенсоре в наличии слой регистрации инфракрасного излучения. Шаблоны представляют различные комбинации из не более двух слоев R, G, B или IR в одной ячейке. **Цель работы.** Определение функции распределения цвета при интерполяции в разработанных шаблонах для различных комбинаций слоев. **Метод.** На основе алгоритма нахождения функций передачи модуляции предлагается определить функции распределения цвета по изображению методом интерполирования по «ближайшему соседу». В данном контексте необходимо сравнить полученные функции для стандартного шаблона Байера и разработанных многослойных шаблонов при одинаковых параметрах ячеек и их расположении в шахматном порядке. **Основные результаты.** Выявлено, что полученные функции закономерно имеют колебательный характер, наиболее стабильны системы, имеющие часто повторяющиеся слои одного участка спектра. Были получены функции распределения цвета лучше, чем у шаблонов Байера, при применении разработанных шаблонов в шахматном порядке для интерполяции цвета методом «ближайшего соседа». Применение другого порядка в шаблоне может привести к ухудшению функций распределения цвета. **Практическая значимость.** Функции распределения цвета удобно применять при выборе шаблона под конкретные цели, например, для лучшего цветового разрешения в области «зеленого» участка видимого диапазона спектра или инфракрасного. Создание мультиспектральных шаблонов на основе четырех сенсоров в рамках двуслойной системы неизбежно ведет к падению функций распределения некоторых цветов, что следует учитывать при производстве подобных систем цветоделения. Результаты исследования могут быть полезны специалистам в области цифровой техники, матричных фотоприемников и обработки изображений.

Ключевые слова: мультиспектральный, инфракрасное излучение, матричный фотоприемник, многослойный сенсор, функция передачи модуляции, интерполяция, оптическая передаточная функция

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта РНФ № 21-79-00012, <https://rscf.ru/project/21-79-00012/>

Ссылка для цитирования: Жбанова В.Л. Функции распределения цвета в многослойных мультиспектральных матричных фотоприемниках при интерполировании // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 11. С. 44–53. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-44-53

Коды OCIS: 110.4234, 110.4850

ВВЕДЕНИЕ

Функции интерполяции цвета могут описать разрешающую способность цифровой системы так же как и оптическая передаточная функция (ОПФ), или функция передачи модуляции (ФПМ) [1–5]. Однако выбор метода интерполяции влияет на итоговую цветовую разрешающую способность цифровой системы.

Для получения более резкого цветного изображения производители прибегают к различным технологиям.

Разработаны матричные фотоприемники с технологией попиксельного сдвига (например, сенсор *Sony ICX252AQ*), восьмигранные сенсоры с системой поворота и наложения изображений (*SuperCCD*), а также многослойные системы, регистрирующие в одной ячейке все основные цвета видимого спектра (*Foveon X3*), что сводит практически к единице все функции распределения цвета (ФРЦ).

Достоинство многослойной технологии — создание универсального датчика, который не нуждается в первичной интерполяции цветов. В каждой ячейке сенсора находятся слои, чувствительные к излучениям основных цветов. Слои создаются чередованием *p-n*- и *n-p*-переходов в глубину сенсора. Недостатки этой матрицы: перетекание заряда в соседние слои и даже ячейки, шумы из-за сложности обвязки ячеек, невозможность создания боковых дренажных систем [6].

Разработка *Thin Film on ASIC* — интеграция слоя детектора из аморфного гидрогенизированного кремния (*a-Si:H*) на кристалле ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) [4, 7] — мультиспектральный фотодиод. Основные цвета считываются последовательно, быстрым изменением напряжения. Основным недостатком технологии — высокая стоимость производства, поэтому разработка не получила широкого применения.

Исключить описанные недостатки современных систем возможно, объединив шаблоны Байера и многослойные сенсоры. В работе рассмотрены различные разработанные шаблоны многослойных сенсоров, а также описаны функции распределения интерполяции для этих шаблонов.

Функции передачи модуляции важны в таких дискретных системах как матричный фотоприемник. И если в монохромных системах этот показатель хорошего уровня, то в цве-

товых системах происходит падение в 4 и более раз в зависимости от шаблона светофильтров [2–5]. В работе [3] предполагается, что ФПМ можно представить в виде косинусной зависимости. Хотя по определению ФПМ это утверждение спорно. Представленные там выражения скорее являются ФРЦ по изображению предложенным методом интерполирования. В данном контексте интересно сравнить полученные ФРЦ для стандартного шаблона Байера и разработанных многослойных шаблонов при одинаковых параметрах ячеек и их расположении в шахматном порядке.

Цель работы — определение ФРЦ при интерполяции в разработанных шаблонах. В рамках поставленной цели были выделены следующие задачи: описание предложенных шаблонов, определение ФРЦ при интерполяции, анализ результатов.

Следует уточнить: при регистрации излучения на матричном фотоприемнике сенсорная область указана как «ячейка», а уже после интерполяции на изображении — как «пиксел»: так будет технически верно.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ШАБЛОНОВ

В предлагаемом способе шаблоны имеют не более двух слоев в ячейке. Толщина и материал слоев подбираются для разделения проникающих фотонов по участкам спектра: синий (B), зеленый (G), красный (R), инфракрасный (IR). Каждый слой регистрирует фотоны определенного участка спектра и накапливает заряд в своей потенциальной яме. Между слоями предусмотрены *p-n*- или *n-p*-переходы. Тогда каждая ячейка имеет информацию по двум определенным участкам спектра [8].

Предложено применять не более двух слоев в одной ячейке, что позволит снизить уровень шума за счет уменьшения электронной обвязки и использовать вертикальные и боковые дренажные системы для вывода избыточного заряда. Предложенные комбинации светочувствительных слоев позволяют

- уменьшить уровень шумов за счет меньшего количества слоев в сенсоре,

- применять различные дренажные системы ко всем слоям матрицы для исключения трехмерного блюминга,

– получить различные варианты комбинаций основных цветов, что расширяет диапазон применения разработанных матричных фотоприемников,

– упростить математический аппарат (алгоритм) вычисления цветов (интерполяция, антиалиасинг и др.).

В настоящее время ведется активная работа по технологии объединения ячеек со слоями, чувствительными к видимому и инфра-

красному (ИК) диапазонам спектра, на одном фотоприемнике для получения мультиспектрального изображения различными способами [9–12]. Предлагаемые способы основаны либо на совмещении нескольких устройств с разными функциями, либо на использовании различных алгоритмов интерполяции изображения [13–17].

В модификации поддерживается идея применения только двух слоев на основе кремния,

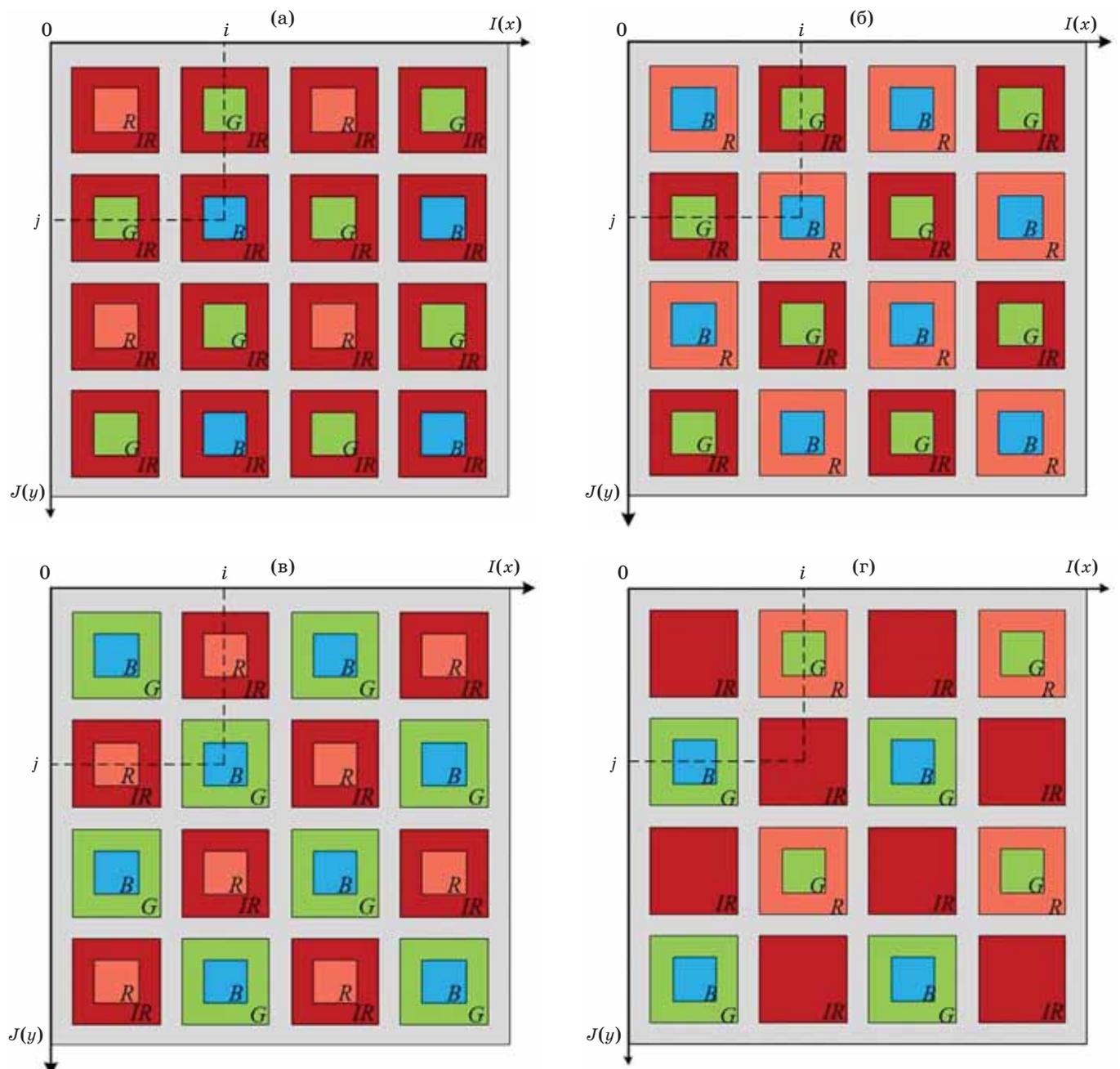


Рис. 1. Разработанные шаблоны матричных фотоприемников. а — шаблон-1, б — шаблон-2, в — шаблон-3, г — шаблон-4

что позволит снизить стоимость производства и улучшить соотношение сигнал/шум. На рис. 1 представлены шаблоны четырех видов. На рисунках соотношение размеров слоев приведено только для иллюстрации слоев каждой ячейки.

В статье рассмотрена интерполяция по схеме «ближайшего соседа», когда недостающие цвета находятся по усреднению значений определенного цвета с близлежащих ячеек.

Шаблон-1 (рис. 1а) позволяет не использовать интерполяцию для снимков в ИК диапазоне спектра. При этом основные видимые цвета занимают 50% зеленого цвета, 25% синего и 25% красного.

Шаблон-2 (рис. 1б) является сбалансированным, так как на всю поверхность матрицы будет приходиться 50% каждого основного цвета и излучения ИК диапазона.

Шаблон-3 (рис. 1в) аналогичен по содержанию шаблону-2, но более верен в технологии исполнения: в одной ячейке располагаются слои, поглощающие в близком диапазоне спектра.

Шаблон-4 (рис. 1г) создан для минимизации шумов при регистрации излучений ИК диапазона спектра, поэтому имеет единичное исполнение в одной ячейке. В этом случае ИК область будет основной, а видимый диапазон — вспомогательным. На половину всех слоев приходятся слои, чувствительные к зеленому и ИК диапазонам спектра, оставшаяся часть делит между собой слои, чувствительные к синему и красному участкам спектра.

Разработанные шаблоны позволяют получать мультиспектральное изображение на одном снимке. Тогда снимок в ИК диапазоне спектра может также применяться для избавления от дефектов в изображении, например, при сканировании от загрязнений, неровностей и др.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА ПРИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Первичная интерполяция необходима при получении основных цветов для каждого пиксела изображения. Такая процедура обязательна для пространственных шаблонов цветоделения по типу Байера RGBG, где

каждая ячейка регистрирует только один цвет. Недостающие цвета получают за счет усреднения необходимого цвета с соседних ячеек. Таким образом, цвет пиксела образуется объединением одного истинного цвета (зарегистрированного в ячейке) и двух вычисленных. Способов усреднения и поиска основных цветов достаточно, чтобы получить качественное изображение, однако показательным является линейная интерполяция с усреднением сигналов с соседних ячеек. Рассмотрим этот алгоритм на примере приведенных шаблонов.

Функции распределения цвета для шаблона-1

В шаблоне-1 интерполяция цвета будет проводиться методом «ближайшего соседа» для каждой ячейки по четырем пикселям с координатами (i, j) , $(i + 1, j)$, $(i, j + 1)$ и $(i + 1, j + 1)$, где составляющая IR известна для каждой ячейки, а две компоненты из трех RGB подлежат вычислению.

Выходной сигнал элемента приемника излучения с координатами (i, j)

$$R'(i; j) = \frac{1}{4} [R(i-1; j-1) + R(i+1; j-1) + R(i+1; j+1) + R(i-1; j+1)],$$

$$G'(i; j) = \frac{1}{4} [G(i-1; j) + G(i+1; j) + G(i; j-1) + G(i; j+1)],$$

$$B'(i; j) = B(i; j),$$

$$IR'(i; j) = IR(i; j).$$

В результате для ячейки с координатами $(i + 1, j)$ будет получен следующий выходной сигнал:

$$R'(i+1; j) = \frac{1}{2} [R(i+1; j-1) + R(i+1; j+1)],$$

$$G'(i+1; j) = G(i+1; j),$$

$$B'(i+1; j) = \frac{1}{2} [B(i; j) + B(i+2; j)],$$

$$IR'(i+1; j) = IR(i+1; j).$$

Для ячейки с координатами $(i + 1, j + 1)$ будет получен следующий выходной сигнал:

$$R'(i + 1; j + 1) = R(i + 1; j + 1),$$

$$G'(i + 1; j + 1) = \frac{1}{4}[G(i + 1; j) + G(i + 2; j + 1) + G(i + 1; j + 2) + G(i; j + 1)],$$

$$B'(i + 1; j + 1) = \frac{1}{4}[B(i; j) + B(i + 2; j) + B(i + 2; j + 2) + B(i; j + 2)],$$

$$IR'(i + 1; j + 1) = IR(i + 1; j + 1).$$

Для ячейки с координатами $(i, j + 1)$ будет получен следующий выходной сигнал:

$$R'(i; j + 1) = \frac{1}{2}[R(i + 1; j + 1) + R(i - 1; j + 1)],$$

$$G'(i; j + 1) = G(i; j + 1),$$

$$B'(i; j + 1) = \frac{1}{2}[B(i; j) + B(i; j + 2)],$$

$$IR'(i; j + 1) = IR(i; j + 1).$$

Для определения ОПФ примем, что изображения однородны и при интерполяции создается изображение, каждый элемент которого является результатом интерполяции. Переход от такого искусственного изображения к изображению, полученному как результат интерполяции, в пространственно-частотной области представляется ОПФ, которую в данном случае опишем сдвигами сигнала по элементам приемника излучения [3].

Оптические передаточные функции компоненты R примут вид

$$\begin{aligned} W_{i,j}^R(\Omega_x; \Omega_y) &= \frac{1}{4}[\exp(-i(p_x\Omega_x + p_y\Omega_y)) + \\ &+ \exp(-i(p_x\Omega_x - p_y\Omega_y)) + \\ &+ \exp(-i(-p_x\Omega_x + p_y\Omega_y)) + \\ &+ \exp(i(p_x\Omega_x + p_y\Omega_y))] = \\ &= \cos(p_x\Omega_x)\cos(p_y\Omega_y), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{i+1,j}^R(\Omega_x; \Omega_y) &= \\ &= \frac{1}{2}[\exp[-i(p_y\Omega_y)] + \exp[i(p_y\Omega_y)]] = \cos(p_y\Omega_y), \end{aligned}$$

$$W_{i+1,j+1}^R(\Omega_x; \Omega_y) = 1,$$

$$\begin{aligned} W_{i,j+1}^R(\Omega_x; \Omega_y) &= \\ &= \frac{1}{2}[\exp[-i(p_x\Omega_x)] + \exp[i(p_x\Omega_x)]] = \cos(p_x\Omega_x), \end{aligned}$$

где p — размер ячейки, Ω — пространственная частота.

Оптические передаточные функции компоненты G примут вид

$$\begin{aligned} W_{i,j}^G(\Omega_x; \Omega_y) &= \frac{1}{4}[\exp[-i(-p_x\Omega_x)] + \\ &+ \exp[-i(-p_x\Omega_y)] + \exp[-i(p_y\Omega_y)] + \\ &+ \exp[-i(p_y\Omega_x)]] = \\ &= \frac{1}{2}(\cos(p_x\Omega_x) + \cos(p_y\Omega_y)), \end{aligned}$$

$$W_{i+1,j}^G(\Omega_x; \Omega_y) = 1,$$

$$\begin{aligned} W_{i+1,j+1}^G(\Omega_x; \Omega_y) &= \\ &= \frac{1}{4}[\exp[-i(p_x\Omega_x)] + \exp[-i(p_y\Omega_y)] + \\ &+ \exp[i(p_y\Omega_y)] + \exp[i(p_x\Omega_x)]] = \\ &= \frac{1}{2}(\cos(p_x\Omega_x) + \cos(p_y\Omega_y)), \end{aligned}$$

$$W_{i,j+1}^G(\Omega_x; \Omega_y) = 1.$$

Оптические передаточные функции компоненты B примут вид

$$W_{i,j}^B(\Omega_x; \Omega_y) = 1,$$

$$\begin{aligned} W_{i+1,j}^B(\Omega_x; \Omega_y) &= \frac{1}{2}[\exp[-i(p_x\Omega_x)] + \\ &+ \exp[i(p_x\Omega_x)]] = \cos(p_x\Omega_x), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{i+1,j+1}^B(\Omega_x; \Omega_y) &= \frac{1}{4}[\exp[-i(p_x\Omega_x + p_y\Omega_y)] + \\ &+ \exp[-i(p_x\Omega_x - p_y\Omega_y)] + \exp[-i(-p_x\Omega_x + p_y\Omega_y)] + \\ &+ \exp[i(p_x\Omega_x + p_y\Omega_y)]] = \cos(p_x\Omega_x)\cos(p_y\Omega_y), \end{aligned}$$

$$W_{i,j+1}^B(\Omega_x; \Omega_y) = \cos(p_y\Omega_y).$$

Оптические передаточные функции компоненты IR примут вид

$$W_{i,j}^{\text{IR}}(\Omega_x; \Omega_y) = 1, \quad W_{i+1,j}^{\text{IR}}(\Omega_x; \Omega_y) = 1,$$

$$W_{i+1,j+1}^{\text{IR}}(\Omega_x; \Omega_y) = 1, \quad W_{i,j+1}^{\text{IR}}(\Omega_x; \Omega_y) = 1.$$

Теперь для нахождения одномерных ФРЦ примем среднее значение ОПФ для каждого основного цвета. Таким образом, для шаблона-1 будут получены следующие выражения:

$$T_{\text{RGB+IR}}^{\text{R}}(N) = T_{\text{RGB+IR}}^{\text{G}}(N) = T_{\text{RGB+IR}}^{\text{B}}(N) = 0,75 + 0,25 \cos(2\pi p N),$$

$$T_{\text{RGB+IR}}^{\text{IR}}(N) = 1,$$

где $T_{\text{RGB+IR}}^{\text{R}}(N)$ — ФРЦ интерполяции компоненты R, $T_{\text{RGB+IR}}^{\text{G}}(N)$ — ФРЦ интерполяции

компоненты G, $T_{\text{RGB+IR}}^{\text{B}}(N)$ — ФРЦ интерполяции компоненты B, $T_{\text{RGB+IR}}^{\text{IR}}(N)$ — ФРЦ интерполяции компоненты IR, N — пространственная частота, мм^{-1} , p — размер ячейки, мм (6,424 мкм).

Функция распределения цвета, равная единице, означает, что рассчитываемый элемент расположен в каждой ячейке матричного фотоприемника. Таким образом, цвет в этой ячейке действительный и не является результатом интерполяции.

Графики ФРЦ для шаблона-1 представлены на рис. 2а.

Функции распределения цвета для шаблона-2

В шаблоне-2 для ячейки с координатами (i, j) необходимо определить зеленую G и инфракрасную IR составляющие, а для ячейки $(i + 1, j)$ — синюю B и красную R составляющие.

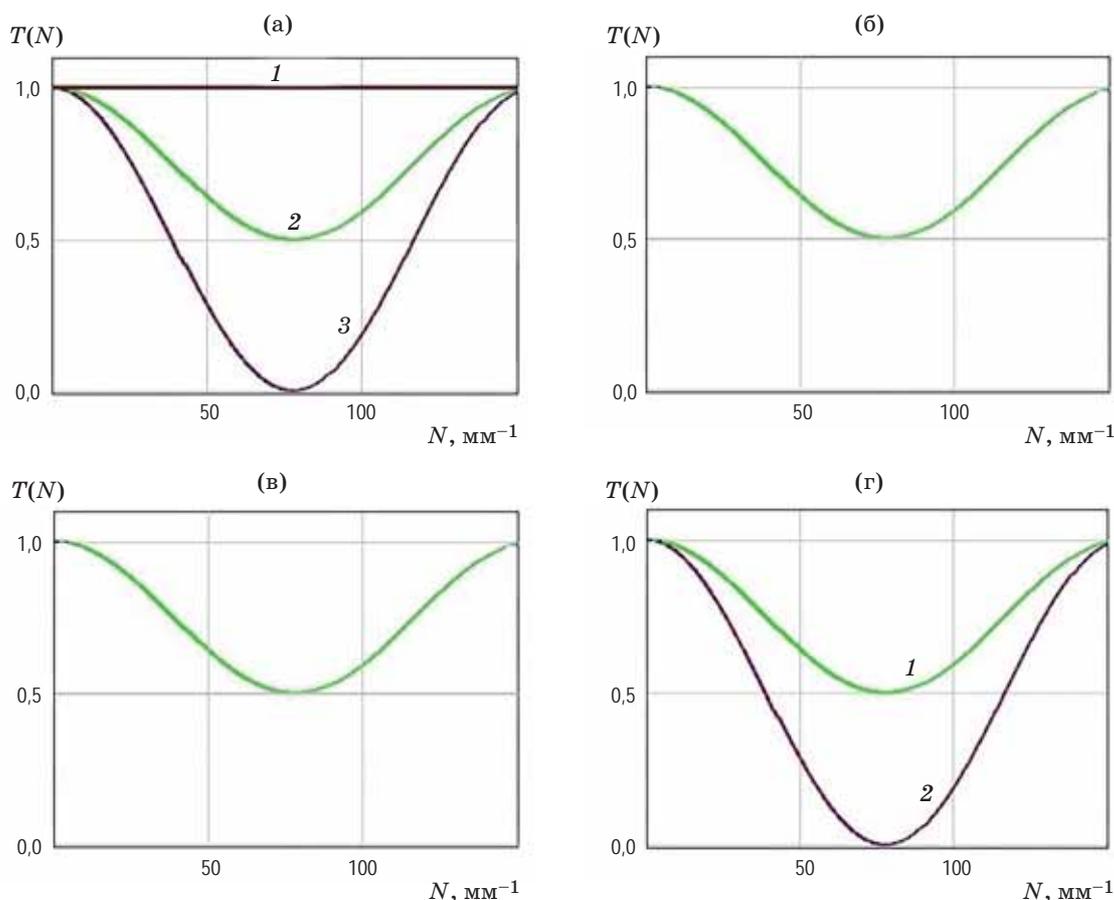


Рис. 2. Графики ФРЦ четырех разработанных шаблонов. Шаблон-1 (а), 1 — функция $T^{\text{IR}}(N)$, 2 — функция $T^{\text{G}}(N)$, 3 — функции $T^{\text{B}}(N)$ и $T^{\text{R}}(N)$. Шаблон-2 (б), функции $T^{\text{IR}}(N)$, $T^{\text{G}}(N)$, $T^{\text{B}}(N)$, $T^{\text{R}}(N)$. Шаблон-3 (в), функции $T^{\text{IR}}(N)$, $T^{\text{G}}(N)$, $T^{\text{B}}(N)$, $T^{\text{R}}(N)$. Шаблон-4 (г), 1 — функции $T^{\text{IR}}(N)$ и $T^{\text{G}}(N)$, 2 — функции $T^{\text{B}}(N)$ и $T^{\text{R}}(N)$

Определим выходной сигнал элемента приемника излучения с координатами (i, j)

$$R'(i; j) = R(i; j),$$

$$G'(i; j) = \frac{1}{4}[G(i-1; j) + G(i+1; j) + G(i; j-1) + G(i; j+1)],$$

$$B'(i; j) = B(i; j),$$

$$IR'(i; j) = \frac{1}{4}[IR(i-1; j) + IR(i+1; j) + IR(i; j-1) + IR(i; j+1)].$$

Для ячейки с координатами $(i+1, j)$ получен следующий выходной сигнал:

$$R'(i+1; j) = \frac{1}{4}[R(i; j) + R(i+2; j) + R(i+1; j-1) + R(i+1; j+1)],$$

$$G'(i+1; j) = G(i+1; j),$$

$$B'(i+1; j) = \frac{1}{4}[B(i; j) + B(i+2; j) + B(i+1; j-1) + B(i+1; j+1)],$$

$$IR'(i+1; j) = IR(i+1; j).$$

Так же как и в предыдущем случае прием, что изображения однородны и при интерполяции создается изображение, каждый элемент которого является результатом интерполяции.

Оптические передаточные функции компоненты R примут вид

$$W_{i,j}^R(\Omega_x; \Omega_y) = 1,$$

$$W_{i+1,j}^R(\Omega_x; \Omega_y) = \frac{1}{2}(\cos(p_x \Omega_x) + \cos(p_y \Omega_y)).$$

Оптические передаточные функции компоненты G примут вид

$$W_{i,j}^G(\Omega_x; \Omega_y) = \frac{1}{2}(\cos(p_x \Omega_x) + \cos(p_y \Omega_y)),$$

$$W_{i+1,j}^G(\Omega_x; \Omega_y) = 1.$$

Оптические передаточные функции компоненты B примут вид

$$W_{i,j}^B(\Omega_x; \Omega_y) = 1,$$

$$W_{i+1,j}^B(\Omega_x; \Omega_y) = \frac{1}{2}(\cos(p_x \Omega_x) + \cos(p_y \Omega_y)).$$

Оптические передаточные функции компоненты IR примут вид

$$W_{i,j}^{IR}(\Omega_x; \Omega_y) = \frac{1}{2}(\cos(p_x \Omega_x) + \cos(p_y \Omega_y)),$$

$$W_{i+1,j}^{IR}(\Omega_x; \Omega_y) = 1.$$

Аналогично предыдущим расчетам найдем среднее значение ОПФ для каждого основного цвета, тогда одномерные ФРЦ для шаблона-2 примут следующий вид:

$$T_{RGB+IR}^R(N) = T_{RGB+IR}^G(N) = T_{RGB+IR}^B(N) = T_{RGB+IR}^{IR}(N) = 0,5 + 0,5 \cos(2\pi pN).$$

График ФРЦ для шаблона-2 представлен на рис. 2б.

Функции распределения цвета для шаблона-3

Для шаблона-3 алгоритм поиска ФРЦ аналогичен шаблону-2, с той лишь разницей, что для пиксела с координатами (i, j) необходимо определить R и IR , а для пиксела $(i+1, j)$ — B и G (рис. 1в). Соответственно, кривые одномерных ФРЦ будут аналогичными шаблону-2 (рис. 2в).

Функции распределения цвета для шаблона-4

Соблюдая тот же алгоритм поиска ФРЦ для шаблона-4, можно прийти к выражениям

$$T_{RGB+IR}^R(N) = T_{RGB+IR}^B(N) = 0,75 + 0,25 \cos(2\pi pN),$$

$$T_{RGB+IR}^G(N) = T_{RGB+IR}^{IR}(N) = 0,5 + 0,5 \cos(2\pi pN).$$

Графики ФРЦ разработанного шаблона-4 представлены на рис. 2г.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Если оставить трехслойные системы, но с чувствительным к ИК излучению слоем, можно добиться повышения ФРЦ, однако шумы также возрастут (рис. 3а). Здесь уже необходимо проводить анализ пользы, полученной от повышения ФРЦ (рис. 3в, г), над шумами трехслойной системы, а тем более четырехслойной и более.

Для сравнения полученных результатов представлен шаблон Байера RGBG и его ФРЦ на рис. 3б, г.

Полученные ФРЦ закономерно имеют колебательный характер, так как представляют

систему пространственного деления и состоят из дискретных ячеек двух типов. Наиболее стабильны системы, имеющие часто повторяющиеся слои, чувствительные к одному участку спектра, что ожидаемо.

При сравнении полученных результатов с ФРЦ (рис. 3г) шаблона Байера (рис. 3б) становится очевидным улучшение ФРЦ (рис. 2б, в): спад для красного и синего участков спектра не ниже 0,5, т.е. можно говорить об улучшении в 2 раза. Если сравнивать полученные результаты с трехслойной матрицей, где ФРЦ основных цветов стремятся к единице (рис. 3в),

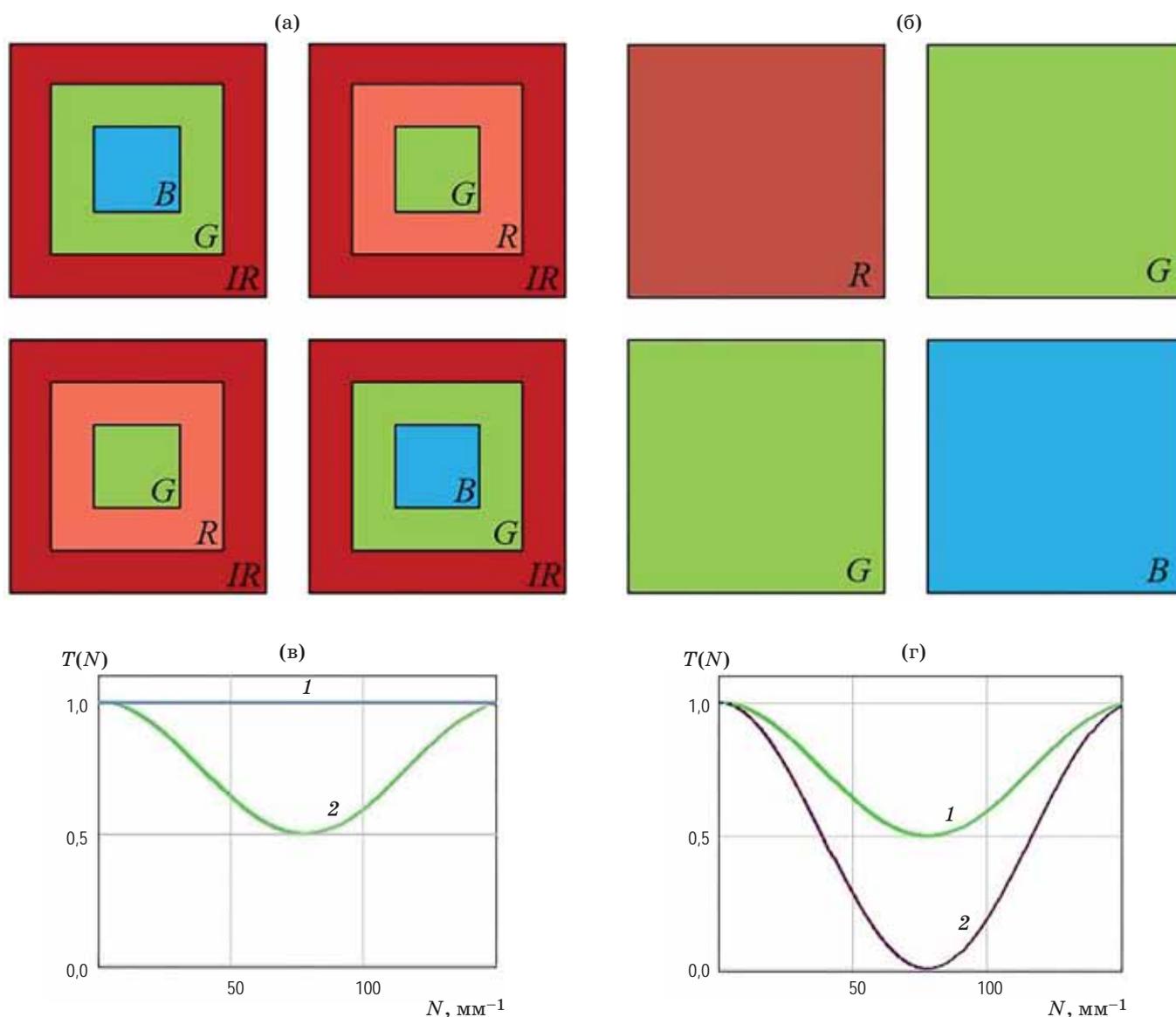


Рис. 3. Шаблоны трехслойный (а) и Байера RGBG (б), их ФРЦ (трехслойного (в) — функции $T^{IR}(N)$ и $T^G(N)$ (1), функции $T^B(N)$ и $T^R(N)$ (2), шаблона Байера RGBG (г) — функция $T^G(N)$ (1), функции $T^B(N)$ и $T^R(N)$ (2))

то можно наблюдать понижение (спад) только некоторых цветов на 50%.

Единственным исключением является шаблон-4 (рис. 2г), в котором отдано предпочтение однослойной ИР ячейке для снижения шумов в этой области. Проведено сознательное снижение характеристик ФРЦ в пользу соотношения сигнал/шум.

При этом следует учесть, что исследованные шаблоны включают слои, чувствительные не только к видимому, но и инфракрасному диапазону спектра. При этом для регулирования уровня шумов необходимо придерживаться двух слоев в каждой ячейке шаблона, в крайнем случае — трех. Шаблоны с различным количеством слоев менее стабильны, что может приводить к шумам и искаженной пространственно-частотной характеристике, особенно если учесть тот факт, что каждый слой имеет размер, немного отличный от предыдущего [2].

Создание мультиспектральных шаблонов на основе четырехкомпонентного сенсора в рамках двухслойной системы неизбежно ведет к ухудшению ФРЦ лишь для некоторых цветов. Включение в шаблон большого числа слоев (доминирующих), чувствительных к одному участку спектра, будет неизбежно приводить к ухудшению ФРЦ других цветов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке шаблонов главным было добиться равнозначности количества слоев, чувствительных к видимому и инфракрасному диапазонам спектра. В видимом диапазоне зрительная система человека наиболее чувствительна к желто-зеленым цветам, на которые приходится максимум относительной спектральной световой эффективности стандартного фотометрического наблюдателя. Поэтому главный упор был сделан на повышение ФРЦ зеленого и инфракрасного участков спектра. В результате были получены ФРЦ с кривыми на 50% выше (ближе к единице) при применении разработанных шаблонов в шахматном порядке для интерполяции цвета методом «ближайшего соседа» по сравнению с шаблоном Байера. Применение другого порядка в шаблоне может привести к падению ФРЦ. Однако другой порядок может понадобиться для избавления от муара при регистрации изображений с большим количеством диагональных линий.

Результаты исследования могут быть полезны специалистам в области цифровой техники, матричных фотоприемников и обработки изображений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сорока Н.И., Кривинченко Г.А. Телемеханика. Минск: изд. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, 2005. 126 с.
2. Соломатин В.А., Жбанова В.Л. Влияние шаблонов матричных фотоприёмников на пространственно-частотные характеристики // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 12. С. 59–67. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-12-59-67
Solomatin V.A., Zhdanova V.L. Influence of photodetector-array patterns on spatial-frequency response // JOT. 2021. V. 88. № 12. P. 722–728. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000722>
3. Тихоночев В.В., Данилин А.А. Влияние интерполяции цвета на пространственно-частотные свойства матричного приемника оптического излучения [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/101.pdf>, свободный. Яз. Рус. (дата обращения 12.01.2022).
4. Franco A., Riesen Ya., Despeisse M., Wyrsh N. High spatial resolution of Thin-Film-on-ASIC particle detectors // IEEE Trans. Nuclear Science. 2012. V. 59(5). P. 2614–2621.
5. Hubel P.M., Liu J., Guttosch R.J. Spatial frequency response of color image sensors: Bayer color filters and Foveon X3 // Proc. SPIE — The Internat. Soc. Opt. Eng. 2004. V. 5301. <https://doi.org/10.1117/12.561568>
6. Merrill R.B. Color separation in an active pixel pit imaging array using a triple-well structure // Patent US № 5965875. 1999.
7. Rieve P., Walder M., Seibel K., et al. TFA image sensor with stability-optimized photodiode // Patent US № 7701023. 2010.
8. Жбанова В.Л. Разработка и исследование оптико-электронных систем цветоделения для матричных фотоприёмников // Дисс. канд. техн. наук. МИИГАиК, Москва. 2016. 124 с.

9. Stotko P., Weinmann M., Klein R. Albedo estimation for real-time 3D reconstruction using RGB-D and IR data // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. V. 150. P. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.018>
10. Nonaka Y., Yoshida D., Kitamura S., Yokota T., Hasegawa M., Ootsu K. Monocular color-IR imaging system applicable for various light environments // *2018 IEEE Internat. Conf. Consumer Electronics (ICCE)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326238>
11. Solomatin V.A., Parvulyusov Yu.B., Zhbanova V.L. Spatial-frequency characteristics of photo matrices for colour image // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1679. P. 022038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022038>
12. Zhbanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatin V.A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1679. P. 022039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022039>
13. Adams Jr., Hamilton J.E., O'Brien M. Interpolation of panchromatic and color pixels // Patent US № 7830430. 2010.
14. Gashnikov M.V. Adaptive interpolation based on optimization of a decision rule in a multidimensional feature space // *Computer Optics*. 2020. V. 44. Iss. 1. P. 101–108. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-661>
15. Zapryanov G., Nikolova I. Comparative study of demosaicing algorithms for Bayer and pseudo-random Bayer color filter arrays // *Internat. Scientific Conf. Computer Science'2008*. 2008. P. 133–139.
16. Li J. A solution method for image distortion correction model based on bilinear interpolation // *Computer Optics*. 2019. V. 43. Iss. 1. P. 99–104. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-1-99-104>
17. Парвүлюсов Ю.Б., Жбанова В.Л. Анализ влияния интерполяции цвета на пространственно-частотные свойства матричного фотоприемника // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2016. № 3. С. 135–140.

АВТОР

Вера Леонидовна Жбанова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроники и микропроцессорной техники, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, 111250, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>; Scopus ID 57190029669, vera-zhbanova@yandex.ru

AUTHOR

Vera L. Zhbanova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronics and Microprocessor Engineering, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>; Scopus ID 57190029669, vera-zhbanova@yandex.ru