

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА
И МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ© 2022 г. С. И. Зиенко^а, В. Л. Жбанова^{а, *}^аФилиал Национального исследовательского университета “МЭИ” в г. Смоленске,
Энергетический пр., 1, Смоленск, 214013 Российская Федерация

*E-mail: stanislav-zienko@rambler.ru

Поступила в редакцию 30.08.2021 г.

После доработки 22.09.2021 г.

Принята к публикации 23.09.2021 г.

Проведено количественное сравнение спектральных характеристик зрительной системы человека и матричных фотоприемников. Представлены критерии количественной оценки этих систем по следующим параметрам: быстродействие, число элементарных колебаний, величина показателя широкополосности, длительность импульсной характеристики, число периодов световых (оптических) колебаний. Получены простые соотношения для расчета длительности импульсной (временной) характеристики и числа световых колебаний n для элементарных составляющих спектров в форме кривых Гаусса. Использована переходная характеристика медленной компоненты для выявления отличий огибающих кривых сверхширокополосного сигнала по их форме.

DOI: 10.31857/S0033849422030214

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Особенностью видимого диапазона света, в котором работают зрительная система человека (ЗСЧ) и матричные фотоприемники (ФП), являются его малые временные процессы. Например, для длины волны 600 нм (оранжевый цвет) период колебаний соответствует фемтосекундному масштабу времени (~ 2 фс). Это означает фактически полную реализацию возможностей оптического сигнала. Один период оптического колебания – предельная длительность светового импульса, и одновременно предельная “скорость” оптического отклика материальной среды [1, 2]. Важным параметром ФП, является ширина полосы спектральной чувствительности Δf . Отношение Δf к пиковой частоте f_0 спектральной кривой называют показателем широкополосности ФП [3–5]:

$$\mu = \Delta f / f_0. \quad (1)$$

Когда выполняется условие $2 \geq \mu \geq 0.25$, то исследуемая структура проявляет сверхширокополосные (СШП) свойства.

Надо иметь в виду, что узкополосные – синусоидальные и квазисинусоидальные сигналы обладают уникальным свойством. При таких широко используемых преобразованиях, как сложение, вычитание, дифференцирование и интегрирование, их

форма остается прежней. Здесь и далее под формой понимается закон изменения сигналов во времени. Преобразованные сигналы могут различаться амплитудой и сдвигом во времени. Подобные свойства таких сигналов можно объяснить, если ввести понятие добротности спектральной линии $Q = f_0 / \Delta f = 1/\mu$. Из этого соотношения следует, что при $\mu \rightarrow 0$ добротность $Q \rightarrow \infty$ и, следовательно, потери энергии, например в LC-контуре, отсутствуют, а колебания имеют форму синусоиды с постоянной амплитудой. СШП-сигналы имеют конечное значение добротности, которая в лучшем случае достигает значения $Q = 4$. Здесь имеют место значительные потери энергии, вследствие чего СШП-сигнал имеет форму быстро осциллирующего затухающего во времени колебания. У СШП-сигнала при указанных (и других) преобразованиях изменяются не только параметры, но и форма. Для них понятие несущей частоты отсутствует, информация содержится в форме колебания. Для СШП-сигналов наиболее удобным является анализ задач распространения их во временной области [6].

В работе впервые приведены результаты исследования СШП-свойств ЗСЧ и матричных ФП цветного изображения. Данные вопросы в литературе практически не рассматривались. Между тем их решение имеет большое научное и практическое значение. В научных исследованиях, свя-

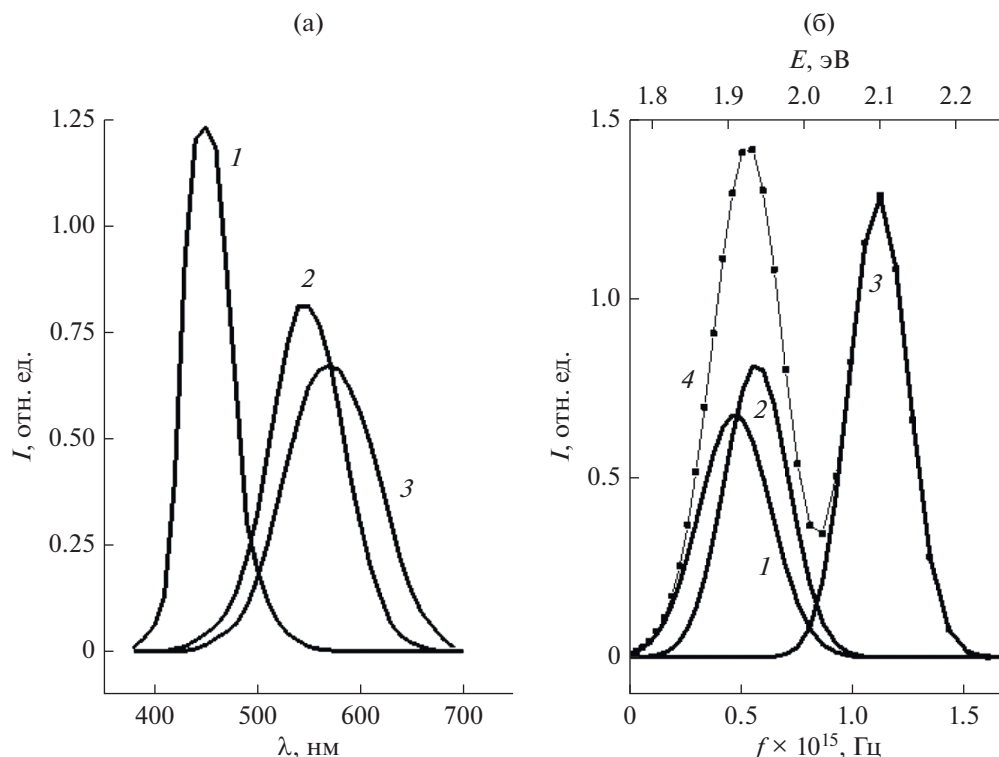


Рис. 1. Спектральные характеристики ЗСЧ по длине волн (а) и по частоте и энергии (б), представляющие собой элементарные полосы для R- (1), G- (2) и В-цвета (3) в форме кривой Гаусса, а также огибающую кривую (4) при $E_0 = 1.77$ эВ.

занных с колориметрией, необходимы цифровые устройства с точной передачей цвета. От регистратора изображения во многом зависит соответствие цифрового изображения реальной картине. Так как эталоном в таком сравнении является зрительный орган человека, то, соответственно, ориентироваться необходимо именно на его характеристики при построении новых типов матричных ФП. При рассмотрении спектральных характеристик приемника и ЗСЧ уже видны различия. Данное исследование может помочь ответить на вопрос, в чем отличие и схожесть этих характеристик на качественном уровне.

Целью статьи является использование параметров СШП-сигналов для сравнения ЗСЧ и матричных ФП по следующим параметрам: величина показателя широкополосности, длительность импульсной характеристики, число периодов световых колебаний и форме кривых СШП-сигналов. В качестве матричных ФП были выбраны матрицы четырех фирм: Sony, Foveon X3, Agilent, Kodak [7–13].

1. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Зависимость функции спектральной чувствительности ЗСЧ в основной физиологической системе красный–зеленый–синий (RGB) от длины

волны приведена на рис. 1а [14]. Анализ данных проводили по шкале энергии: $E = 1240/\lambda$ (λ в нм, E в эВ) и шкале частот. Спектральные кривые по шкале энергии и частот приведены на рис. 1б. Начальное значение шкалы энергии находили из соотношения $E_0 = (1240/700) = 1.77$ эВ. Частоту находили следующим образом: из шкалы энергии E вычитали энергию E_0 , в результате получали шкалу локальной энергии $E - E_0$, затем учитывали переход от энергии E к энергии $E - E_0$ с помощью коэффициента $m = E_n / (E_n - E_0)$, где E_n – энергия, соответствующая пику спектральной кривой. После этого находили соотношение для расчета частоты $f = mv$, где $v = (E - E_0)/h$, где $h = 4.1 \times 10^{-15}$ эВ с – постоянная Планка. Окончательно получаем $f = (m/4.1)(E - E_0)10^{15}$ Гц. В расчете за единицу частоты принимали величину, равную 10^{15} Гц. В нашем случае $m = 4.68$. Спектральные кривые R, G, В (см. рис. 1а) аппроксимировали с помощью программы Origin элементарными полосами в форме кривой Гаусса. Дифференциальная функция распределения ЗСЧ вычисляется по формуле

$$G_{\text{ЗСЧ}}(f) = A \exp\left(-2.8\left(\frac{f - f_0}{\Delta f}\right)^2\right), \quad (2)$$

где A – амплитуда кривой Гаусса, f_0 – частота пика, Δf – ширина на его полувысоте.

Таблица 1. Параметры полос спектральной чувствительности RGB-ЗСЧ

Пик	$f_0 \times 10^{15}$, Гц	$\Delta f \times 10^{15}$, Гц	C	H , отн. ед.	μ	$t_{0.5}$, фс	n
1	0.462	0.387	0.275	0.68	0.83	1.1	1.0
2	0.552	0.322	0.296	0.81	0.60	1.4	1.35
3	1.123	0.342	0.428	1.29	0.30	1.3	2.7

При этом площадь ограниченная спектральной кривой 4 (рис. 1б) по величине равна единице.

Параметры спектров приведены в табл. 1. Из данных табл. 1 следует, что элементарные составляющие спектральной чувствительности ЗСЧ RGB имеют $0.3 \leq \mu \leq 0.8$ и, следовательно, проявляют СШП-свойства.

2. СШП-СИГНАЛ СПЕКТРА В ФОРМЕ СИММЕТРИЧНОЙ КРИВОЙ ГАУССА

Комплексную импульсную (временную) характеристику находили по формуле обратного преобразования Фурье:

$$g^*(t) = \int_0^{\infty} G(f) \exp(-2\pi jft) df, \quad (3)$$

где $G(f)$ – дифференциальная функция распределения спектральной чувствительности ЗСЧ.

Когда функция $G(f)$ описывается кривой Гаусса (2), интеграл (3) имеет аналитическое решение [15]:

$$g^*(t) = \exp(-at^2 + j2\pi f_0 t), \quad (4)$$

СШП-сигнал (модуль функции $g^*(t)$) находится как

$$g(t) = C \exp(-\alpha t^2), \quad (5)$$

где коэффициент $C = 1$.

$$\alpha = 3.5\Delta f^2. \quad (6)$$

В соответствии с выражением (5) для пиков 1, 2 и 3 (см. рис. 1б) (соответственно) можно записать следующие соотношения для модулей:

$$\begin{aligned} g_1(t) &= C_1 \exp(-\alpha_1 t^2), \\ g_2(t) &= C_2 \exp(-\alpha_2 t^2), \\ g_3(t) &= C_3 \exp(-\alpha_3 t^2), \end{aligned} \quad (7)$$

и мнимой их компоненты согласно (4):

$$\begin{aligned} g_{M1}(t) &= g_1(t) \sin(\omega_1 t), \\ g_{M2}(t) &= g_2(t) \sin(\omega_2 t), \\ g_{M3}(t) &= g_3(t) \sin(\omega_3 t), \end{aligned} \quad (8a)$$

где коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – находят из соотношения (6), принимая ширину пика равной соот-

ветственно $\Delta f_1, \Delta f_2$ и Δf_3 ; параметры C_1, C_2 и C_3 – весовые коэффициенты, значения которых указаны в табл. 1, причем всегда $C = C_1 + C_2 + C_3 = 1$,

$$\omega_1 = 2\pi f_1, \quad \omega_2 = 2\pi f_2, \quad \omega_3 = 2\pi f_3. \quad (8б)$$

СШП-сигналы для R,G,B-цветов, построенные по формулам (7) и данным табл. 1, представлены на рис. 2а, а по формулам (8а), (8б) – на рис. 2б.

Ширина импульса $t_{0.5}$ на его полувысоте, и ширина Δf соответствующего спектра связаны соотношением неопределенности [15]:

$$t_{0.5}\Delta f = 0.445 = \text{const}. \quad (9)$$

Соотношение (9) не зависит от пиковой частоты f_0 . От этой частоты зависит сдвиг спектра по оси частот. Спектры системы R, G, B имеют форму колокола (рис. 1б), при этом в соответствии с (8) сигнал во времени также имеет форму колокола. Таким образом, если менять Δf , то один из колоколов становится уже, а другой соответственно шире. В расчетах используем правую половину колокола (см. рис. 2а).

Результаты расчета по формуле (9) приведены в табл. 1. Сопоставление их с результатами численных расчетов (см. рис. 2а) показывает хорошее совпадение. Из рис. 2а можно видеть, что зависимости $g(t)$ для R,G,B-цветов имеют монотонно спадающие во времени кривые и одновременно заканчивающиеся в точке “с”. При этом ширина R-импульса имеет наименьшее значение (1.1 фс) из трех цветов, тогда как G-, B-импульсы, примерно, равны по величине, 1.4 и 1.3 фс. Более того, из-за нелинейных свойств функций $g_2(t)$ и $g_3(t)$ кривые B и G (см. рис. 2а) пересекаются между собой. Из соотношений (7) несложно определить время t^* , соответствующее этому моменту $t^* = \ln(C_2/C_3)/(\alpha_2 - \alpha_3)$, где α_2 и α_3 зависят от частоты f_2 и f_3 по формуле (6). Расчет показывает: $t^* \approx 3.0$ фс, что по величине согласуется с экспериментом ~ 2.9 фс. При $t \geq t^*$ кривые B и G (см. рис. 2а) практически сливаются между собой.

Импульсы, изображенные на рис. 2б, в фемто-секундной оптике называют предельно короткими импульсами (ПКИ) [16]. Они содержат внутри себя всего несколько периодов электромагнитных колебаний, обычно два-три [2]. Их получают

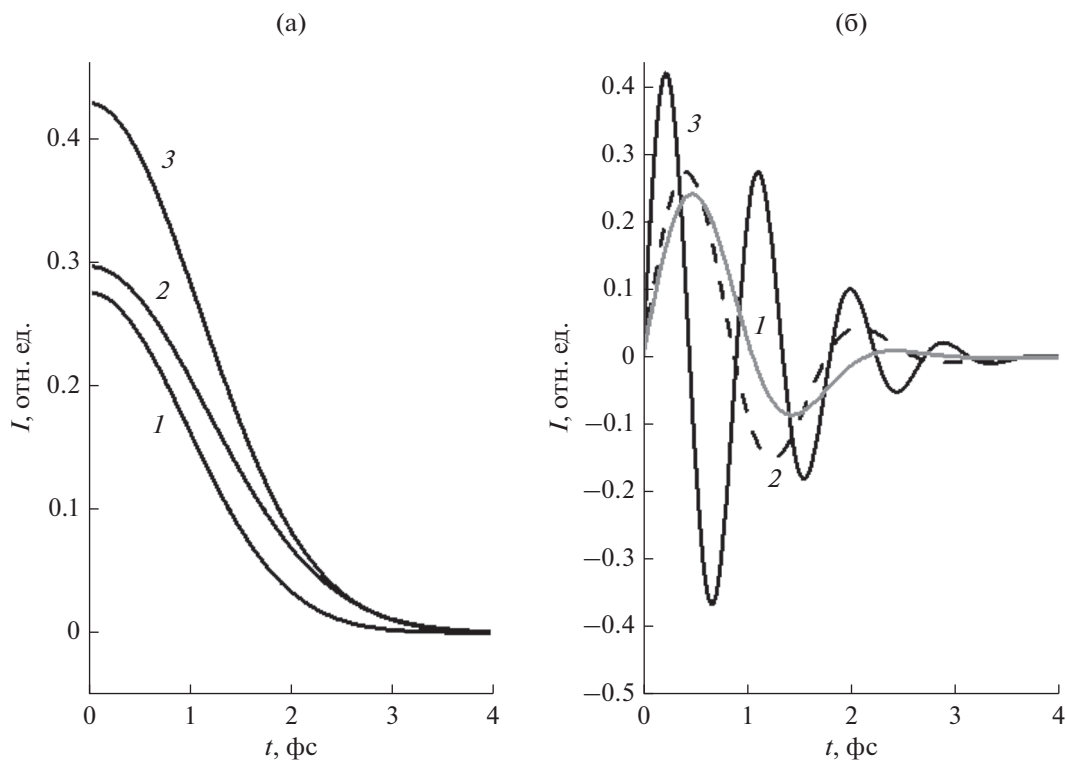


Рис. 2. Модуль СШП-сигналов системы ЗСЧ (а) и мнимые компоненты комплексной функции импульсных характеристик (б): R (1), G (2), B (3).

с помощью фемтосекундных лазеров. Оптика ПКИ имеет ряд особенностей по сравнению с оптикой более длинных импульсов. Во-первых, благодаря предельно малой длительности импульса при взаимодействии их с оптической средой не происходит разрушения вещества даже при достаточно высокой интенсивности излучения. Во-вторых, нелинейные эффекты, слабые в поле длинных импульсов, в данном случае становятся ярко выраженными и хорошо наблюдаемы. Импульсные характеристики, приведенные на рис. 2б, по физическому смыслу отражают нелинейные свойства процесса перехода из закрытого состояния глаза в открытое. Соотношение (5) с учетом (1) и (6) можно привести к виду

$$g(t) = \exp(-3.5\mu^2(t/T_0)^2), \quad (10)$$

где $T_0 = 1/f_0$ – период колебаний. Длительность переходного процесса t_n оценим на уровне 0.1, затем, полагая $t_n = nT_0$ (n – число периодов колебаний), находим связь числа колебаний с показателем широкополосности:

$$n = 0.81/\mu. \quad (11)$$

В соответствии с данными табл. 1 красный цвет имеет ~ 1.0 , зеленый ~ 1.35 , синий ~ 2.7 колебаний, что согласуются с расчетно-экспериментальными результатами, представленными на рис. 2б.

2. СШП-СИГНАЛ СПЕКТРА В ФОРМЕ ТРЕХ СИММЕТРИЧНЫХ КРИВЫХ ГАУССА

Вначале решение интеграла (3) выполнено численным методом (функция $G(f)$ описывается огибающей кривой 4 (см. рис. 1б)). Результаты расчета для модуля импульсной характеристики приведены на рис. 3а.

В данном случае СШП-сигнал ЗСЧ имеет сложную форму. Для выяснения механизма его возникновения выполним аналитический расчет импульсной характеристики на комплексной плоскости.

Представим комплексный спектр в следующем виде [17]:

$$g^*(t) = a + jb, \quad (12)$$

где

$$a = g_1(t) \cos(\omega_1 t) + g_2(t) \cos(\omega_2 t) + g_3(t) \cos(\omega_3 t), \quad (13)$$

$$b = g_1(t) \sin(\omega_1 t) + g_2(t) \sin(\omega_2 t) + g_3(t) \sin(\omega_3 t). \quad (14)$$

Модуль комплексной функции (индекс k) имеет вид

$$g_k(t) = (a^2 + b^2)^{1/2}. \quad (15)$$

С помощью соотношений (13)–(15) и данных табл. 1 получена расчетная зависимость $g_k(t)$ (см. рис. 3, штриховая кривая). Сопоставление данных численного метода и аналитического расчета показывает хорошее их совпадение.

Далее возведем в квадрат соотношения (13) и (14) и подставим полученные результаты в (15), в результате получим другое выражение $g_k(t)$:

$$g_k(t) = (D^2 + E^2)^{1/2}, \quad (16)$$

где

$$D^2 = g_1^2(t) + g_2^2(t) + g_3^2(t) \quad (17)$$

– мгновенная мощность спектральных составляющих ЗСЧ,

$$E^2 = E_1 + E_2 + E_3, \quad (18)$$

$$E_1 = 2g_1(t)g_2(t)\cos(2\pi(f_1 - f_2)t), \quad (19a)$$

$$E_2 = 2g_1(t)g_3(t)\cos(2\pi(f_1 - f_3)t), \quad (19б)$$

$$E_3 = 2g_2(t)g_3(t)\cos(2\pi(f_2 - f_3)t), \quad (19в)$$

где E_1, E_2, E_3 – значения мгновенной мощности взаимодействия спектров между собой. Последнее следует из того, что спектральные кривые 1, 2 и 3 (см. рис. 1б) перекрываются между собой.

При этом в отличие от D^2 взаимная мгновенная мощность E^2 в определенные моменты времени может принимать отрицательные значения (рис. 4а). Таким образом, в случае многокомпонентного спектра ЗСЧ форма СШП-сигнала зависит как от ширины каждой элементарной составляющей, так и от разности их пиковых частот. При этом активное взаимодействие между R, G, B-цветами имеет место в начальные моменты времени (0, ..., t_1). Когда $t \geq t_2$, компоненты сигнала D^2 и E^2 изменяются во времени синхронно (см. рис. 4а).

Влияние степени взаимодействия спектров R, G, B-цветов между собой проявляется в том, что форма мнимой компоненты комплексной функции импульсной характеристики (рис. 4б) заметно отличается от формы мнимой компоненты для каждого цвета в отдельности (см. рис. 2б). При этом пики 1 и 2, изображенные на рис. 4б, относятся к кривой 1, рис. 3а, а пики 3 и 4 к кривой 2.

С целью получения наглядного представления о свойствах СШП-сигнала преобразуем его в виде двух импульсов. Для этого часть кривой 1 (рис. 3а) до точки ее минимума “а” аппроксимировали полиномом третьей степени:

$$y = 0.993 + 0.113t - 2.958t^2 + 1.828t^3. \quad (20)$$

После этого строили кривую “b–c” (точка “c” – проекция точки “а” на ось абсцисс, см. рис. 3б). Численные значения импульсной (временной) характеристики быстрой компоненты $g_6(t)$ нахо-

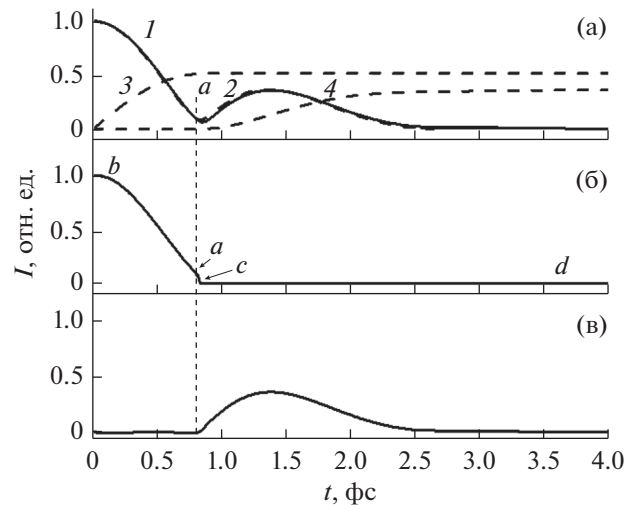


Рис. 3. Временные характеристики спектральной чувствительности ЗСЧ: импульсная характеристика $g(t)$ (а), быстрая $g_6(t)$ (б) и медленная $g_m(t)$ (в) компоненты импульсной характеристики.

дили путем интерполяции кривой линии “a–b–c–d”, а медленной (индекс “м”) компоненты $g_m(t)$ – путем вычитания из исходной кривой $g(t)$ (кривая 1, рис. 3а) кривой быстрой компоненты $g_6(t)$ (см. рис. 3б). Форма этой компоненты показана на рис. 3в. Для лучшего представления о СШП-свойствах ЗСЧ используем понятие переходной характеристики:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt = \int_0^t (g_6(t) + g_m(t)) dt,$$

откуда следует, что

$$h(t) = h_6(t) + h_m(t),$$

где

$$h_6(t) = \int_0^t g_6(t) dt; \quad h_m(t) = \int_0^t g_m(t) dt \quad (21)$$

– это переходные характеристики быстрой и медленной компоненты СШП-сигнала соответственно. Результаты численного интегрирования соотношений (21) представлены на рис. 3а. Можно видеть, что использование переходной характеристики ЗСЧ позволяет наглядно представить переходной процесс в виде двух компонент. При этом их амплитудные значения 0.51 и 0.36 сопоставимы по величине.

4. СШП-СИГНАЛЫ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Параметры матричных ФП, полученные по данным работы [13] в виде элементарных полос, представлены в табл. 2, там же приведены значе-

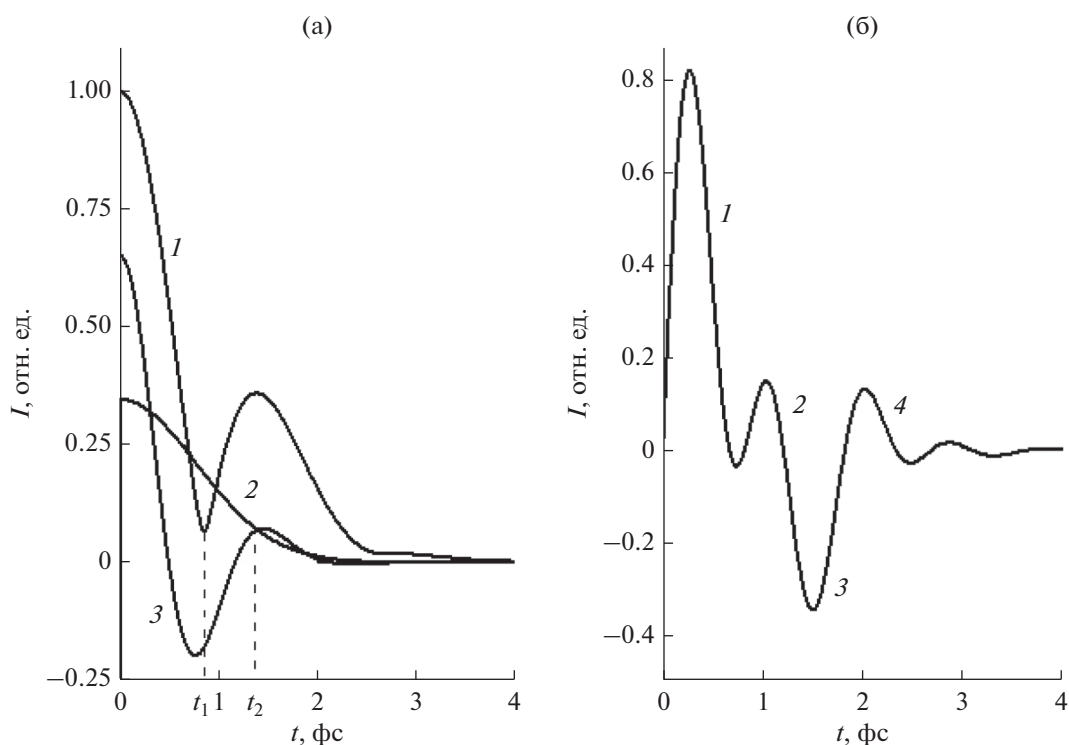


Рис. 4. Влияние взаимодействия R,G,B-спектров между собой на форму СШП-сигнала (а): 1 – комплексная импульсная характеристика $g_k(t)$, 2 – мгновенная мощность спектральных составляющих ЗСЧ – D^2 , 3 – мгновенная мощность взаимодействия E^2 , где $t_1 = 0.85$ фс, $t_2 = 1.35$ фс; мнимая компонента комплексной функции импульсной характеристики (б), где 1, 2, 3, 4 – рабочие отрезки этой кривой.

ния параметров μ , n , $t_{0.5}$, рассчитанные по формулам (1), (9) и (11). Сравнение характеристик ЗСЧ и матричных ФП по этим параметрам (см. табл. 1) показывает заметное расхождение между ними. ЗСЧ имеет определенные закономерности в свойствах СШП-сигналов от частоты. Так, с увеличением частоты пика (см. табл. 1) наблюдается плавное уменьшение μ от 0.8 до 0.3, а также плав-

ный рост величины n от 1 до 2.7. Общим свойством матричных ФП и ЗСЧ является только то, что они являются СШП-сигналами, значение которых для матричных ФП находится в диапазоне $0.33 \leq \mu \leq 0.66$.

Компоненты 1–3 каждого из ФП, параметры которых приведены в табл. 2, имеют форму кри-

Таблица 2. Параметры спектральных компонент ФП различного типа

Тип приемника	Пик	$f \times 10^{15}$, Гц	$\Delta f \times 10^{15}$, Гц	C	μ	n	$t_{0.5}$, фс
Agilent	1	0.242	0.161	0.200	0.66	1.2	2.8
	2	0.464	0.242	0.352	0.52	1.5	1.8
	3	0.686	0.302	0.448	0.44	1.8	1.5
Sony	1	0.467	0.175	0.259	0.37	2.2	2.5
	2	0.818	0.467	0.336	0.57	1.4	0.9
	3	1.139	0.555	0.410	0.48	1.7	0.3
Foveon X3	1	0.454	0.277	0.267	0.61	1.3	1.6
	2	0.655	0.403	0.390	0.61	1.3	1.1
	3	1.03	0.554	0.342	0.53	1.5	0.8
Kodak	1	0.488	0.150	0.214	0.30	2.7	3.0
	2	0.826	0.412	0.522	0.50	1.6	1.1
	3	1.351	0.450	0.263	0.33	2.4	1.0

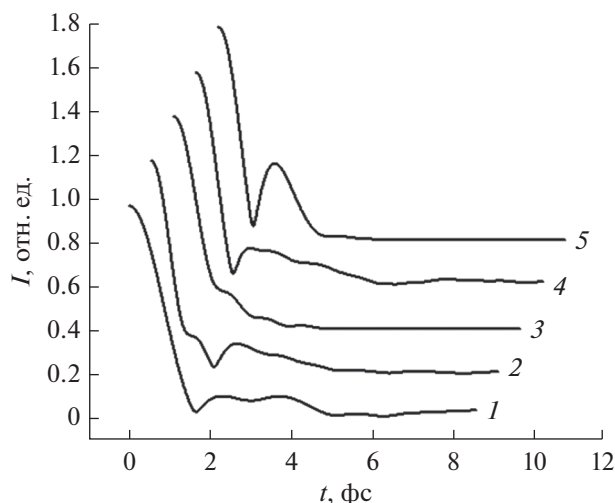


Рис. 5. СШП-сигналы различных матричных ФП: Agilent (1), Kodak (2), Foveon X3 (3), Sony (4) и ЗСЧ (5), кривые смещены по осям абсцисс и ординат.

вой Гаусса (2). При этом амплитуда A равна весовым коэффициентам C_1 , C_2 и C_3 соответственно. Элементарные полосы описываются уравнениями

$$G_1(f) = C_1 \exp(-2.8((f - f_1)/\Delta f_1)^2), \quad (22a)$$

$$G_2(f) = C_2 \exp(-2.8((f - f_2)/\Delta f_2)^2), \quad (22б)$$

$$G_3(f) = C_3 \exp(-2.8((f - f_3)/\Delta f_3)^2). \quad (22в)$$

Огибающую линию контура спектра ФП находили из соотношения:

$$G_m(f) = G_1(f) + G_2(f) + G_3(f). \quad (23)$$

Соотношение (23) для каждого из ФП с данными, указанными в табл. 2, подставляли в формулу (3), полагая в нем $G(f) = G_m(f)$.

В результате численного интегрирования получены графические зависимости (рис. 5) для СШП-сигналов (модуля импульсной характеристики) матричных ФП и ЗСЧ. Из рисунка видно, что кривые заметно отличаются. Данное явление связано с различными свойствами материала среды, через которую проходят СШП-сигналы.

Для выявления признаков, отличающих матричные ФП друг от друга, использовали метод, описанный выше и позволяющий выделить быструю и медленную компоненты в функции $g(t)$. Переходные характеристики для быстрой компоненты приведены на рис. 6.

По своей форме переходные характеристики, изображенные на рис. 6, демонстрируют подобие рассмотренных ФП. Что касается переходной характеристики медленной компоненты $g(t)$, то здесь

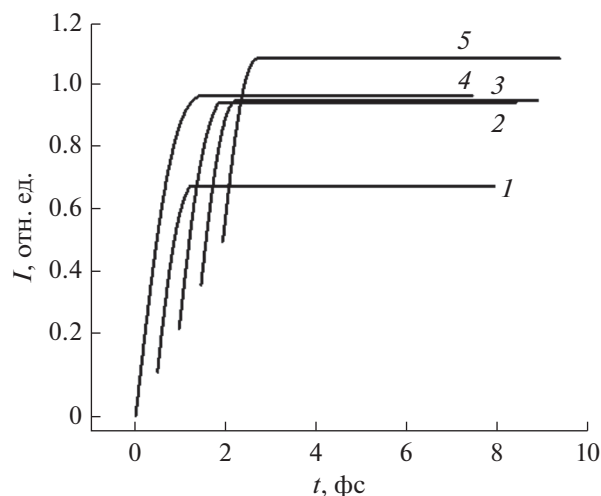


Рис. 6. Переходные характеристики быстрой компоненты $h_g(t)$ для матричных ФП Kodak (1), Foveon X3 (2), Sony (3), Agilent (4) и ЗСЧ (5), кривые смещены по осям абсцисс и ординат.

ситуация другая. Графики этой функции для разных приемников приведены на рис. 7.

Сопоставление сигналов, изображенных на рис. 7 (по форме), показывает: ЗСЧ имеет переходную характеристику, которая монотонно нарастает во времени и достигает установившегося (стационарного) значения. По форме переходной характеристики к ЗСЧ приближается фотоприемник Foveon X3. Остальные ФП (см. рис. 7) по этому параметру заметно отличаются от ЗСЧ. Одной из причин этого явления является то, что длительность импульса R-цвета по величине у них

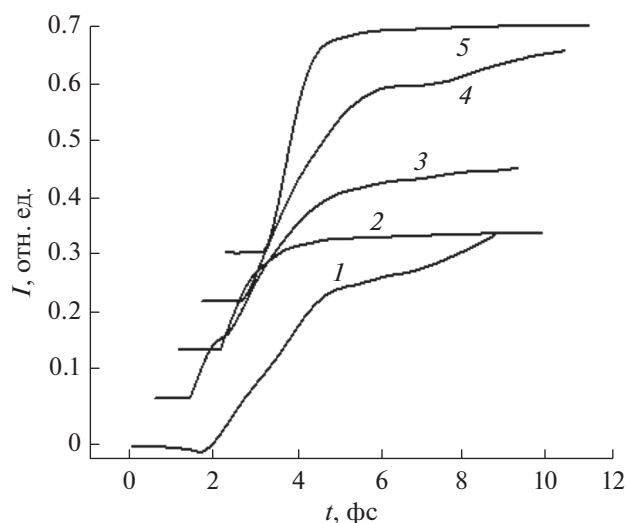


Рис. 7. Переходные характеристики медленной компоненты $h_m(t)$ для матричных ФП Agilent (1), Foveon X3 (2), Kodak (3), Sony (4) и ЗСЧ (5), кривые смещены по осям абсцисс и ординат.

превышает длительность этого цвета ЗСЧ (рис. 2а). Здесь отсутствует синхронное изменение сигналов во времени, которое имеет место в ЗСЧ (рис. 2а).

Количественная оценка времени нарастания t_h переходной характеристики на ее полувысоте показывает, что ЗСЧ имеет наименьшее значение $t_h = 1.5$ фс. У фотоприемника Foveon X3 величина $t_h = 1.6$ фс. Остальные ФП имеют время $t_h = 2.2...3.7$ фс, т.е. заметно уступают ЗСЧ по временным характеристикам.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Представлены параметры R,G,B-цветов в частотной области для ЗСЧ и матричных ФП фирм Sony, Foveon X3, Agilent, Kodak.

2. Установлено: ЗСЧ ($0.3 \leq \mu \leq 0.8$) и матричные ФП ($0.33 \leq \mu \leq 0.66$) по величине показателя μ по определению удовлетворяют условиям сверхширокополосности.

3. Показано, что показатель широкополосности μ определяет число периодов колебаний n импульсной характеристики на комплексной плоскости: $n = 0.81/\mu$.

4. Получены простые соотношения для расчета длительности импульсной (временной) характеристики для элементарных составляющих спектров. Установлено, что по этим параметрам матричные ФП заметно отличаются от ЗСЧ.

5. В случае совместного действия R, G, B-кривых ЗСЧ и матричных фотоприемников форма СШП-сигнала зависит как от ширины элементарных составляющих спектральных кривых, так и от разности их пиковых частот.

6. Огибающая кривая СШП-сигнала многокомпонентного спектра содержит быструю и медленную составляющие. Для выявления отличий формы огибающих кривых спектра ЗСЧ и матричных ФП использовали переходную характеристику медленной компоненты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы спектральные характеристики современных матричных фотоприемников и зрительной системы человека. Обнаруженные СШП-свойства у исследуемых объектов могут помочь математически оценить полученную чувствительность того или иного приемника, несмотря на качественное их отличие зрительной системы человека. Исследование позволило сопоставить современные ФП и зрительную систему человека по следующим параметрам: быстродействие, число элементарных колебаний, величина показателя широкополосности, длительность импульсной характеристики,

число периодов оптических (световых) колебаний. Данный способ исследования позволяет ввести новые критерии количественной оценки качества приемников в видимом диапазоне.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Петров А.Н. и др. Фемтосекундная оптика и фемтотехнология. СПб.: Университет ИТМО, 2018.
2. Шполянский Ю.А. Спектрально-временная эволюция предельно коротких импульсов света в прозрачных средах и оптических волноводах с дисперсией и кубической нелинейностью. Автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук. СПб: Университет ИТМО, 2010. 35 с.
3. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. // Радиофизика и радиоастрономия, 2008. Т. 13. № 2. С. 166.
4. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. // Радиофизика и радиоастрономия, 2008. Т. 13. № 4. С. 270.
5. Зиенко С.И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 297.
6. Ultra-wideband Radar Technology / Ed. James D. Taylor, Boca Raton: CRC Press, 2000.
7. Горбачев В.А., Криворотов И.А., Маркелов А.О., Котлярова Е.В. // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 4. С. 636. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-636>
8. Zhabanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatina V.A. // J. Physics: Conf. Ser. 2020. V. 1679. № 2. P. 022039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022039>
9. Зиенко С.И., Жбанова // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 39. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-3-39-46>
10. Ning Lu, Zhiwu Lu. Method and System for Interpolating Missing Picture Elements in a Single Color Component Array Obtained from a Single Color Sensor. US Pat. № 5805217 A. Publ. Sept. 8, 1998.
11. Hoshuyama H. Color Separation Device of Solid-state Image Sensor. US Pat. № 7138663 B2. Publ. Nov. 21, 2006.
12. Merrill R.B. Color Separation in an Active Pixel Pit Imaging Array Using a Triple-Well Structure. US Pat. № 5, 965, 875. Publ. Oct. 12, 1999.
13. Lyon R., Hubel P.M. // The Tenth Color Imaging Conf.: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications (CIC 2002). Scottsdale. Nov. 12–14. Springfield: The Soc. for Imaging Sci. and Technology, 2002. P. 349.
14. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. М.: Энергоатомиздат, 1989.
15. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Л. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1972.
16. Сазонов С.В. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2011. Т. 75. № 2. С. 172.
17. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.