

Оптимальная колоризация одноканальной стереопары для анаглифной визуализации

А. С. Большаков, А. В. Белокопытов, И. А. Коноваленко

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия
ООО Визилект Сервис, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 01.12.2023

Аннотация—В работе поставлена и решается задача оптимального выбора цветов, используемых при анаглифном предъявлении стереопары на дисплее. Для оптимизации выбора предложен и обосновывается многокомпонентный математический критерий. Для всевозможных комбинаций трех дисплеев и шести анаглифных очков с известными, но различными параметрами, методами численного моделирования проведена оптимизация цветов для анаглифного предъявления. Показано, что анаглифные очки и дисплей могут как подходить друг другу практически идеально, так и образовывать фактически неработоспособную пару. Также показано, что оптимальные решения в общем случае не являются тривиальными: вес цветовых компонент RGB в оптимальных цветах оказывается дробным, а один и тот же канал дисплея участвует в формировании обоих изображений стереопары одновременно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стереопара, стереопсис, анаглиф, колоризация, математическое моделирование, оптимальные методы.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_652

ВВЕДЕНИЕ

Стереоскопические технологии имеют давнюю историю развития как минимум в кинематографе [3]. На сегодняшний день они широко применяются в индустрии развлечений, медицине, образовании и спорте [5]. Целью применения стереоскопических технологий является создание у человека устойчивого восприятия трехмерного зрительного образа путем формирования двух разных изображений на сетчатке правого и левого глаза. Для достижения этой цели предложен целый ряд существенно различных подходов [5]. Для реализации многих из них требуется дополнительная аппаратура (например – шлем виртуальной реальности). Анаглифная технология выделяется среди прочих методов своей аппаратной простотой. При ее использовании фото- или видео-изображение может выводиться на стандартный дисплей, а для создания стерео-эффекта необходимо надеть недорогие очки со светофильтрами [5]. Известными проблемами анаглифного метода предъявления является невозможность формирования полноцветных трехмерных образов, а также дискомфорт, вызываемый существенным различием цветности изображений, наблюдаемых левым и правым глазом [5]. При этом степень дискомфорта зависит от выбранных для визуализации цветов. В частности, важно, чтобы яркости изображений на сетчатке правого и левого глаза были близки, а в среднем образ воспринимался как ахроматический [1]. Очевидной проблемой при неверном выборе цветов является плохая сепарация изображений (изображение для правого глаза не полностью подавляется фильтром левого и/или наоборот). При этом на сегодняшний день не известно математических моделей, позволяющих количественно оценить правильность подбора цветов для анаглифной технологии, а также решить задачу их оптимального подбора. В данной работе эти задачи успешно решаются.

Структура статьи

Далее статья организована следующим образом. В разделе 1 фиксируется базовая спектральная модель формирования анаглифного изображения на дисплее. С ее помощью в разделе 2 формализуются критерии, которые предъявляются к цветам, используемым при визуализации, и ставится оптимизационная задача. В разделе 3 приводится описание проведенных численных экспериментов по оптимизации цветов визуализации, а также результаты этих экспериментов. Статья завершается заключением.

1. ЛИНЕЙНАЯ ЦВЕТОВАЯ МОДЕЛЬ АНАГЛИФНОЙ СЕПАРАЦИИ СТЕРЕОПАРЫ

Анаглифная сепарация одноканальной стереопары при дисплейной визуализации осуществляется следующим образом. На дисплей выводится изображение, являющееся (в линейных цветовых координатах) суммой двух изображений – для левого и для правого глаза. Каждое из этих изображений имеет фиксированную цветность, а яркость модулируется интенсивностями соответствующего входного одноканального изображения. Пользователь наблюдает этот дисплей через анаглифные очки, в которых вместо линз используются светофильтры, причем параметры светофильтров существенно отличаются для левого и правого глаз. Светофильтр перед левым глазом должен хорошо пропускать предназначенное для него изображение стереопары и плохо пропускать второе изображение, предназначенное для правого глаза. Светофильтр перед правым глазом действует симметричным образом. В результате каждый глаз видит в основном только предназначенное для него изображение стереопары, за счёт чего (при условии корректности входных изображений) возникает стереоэффект. Далее в этом разделе опишем цветовую модель анаглифной сепарации математически.

Всевозможные порождаемые пикселем дисплея спектры излучения $S(\lambda)$ опишем взвешенной суммой:

$$S(\lambda) = \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda) \geq 0$ – базисные спектры излучения дисплея, а

$$R, G, B \in [0, 1] – \quad (2)$$

дисплейные цветовые координаты визуализируемого пикселя. Цвет излучения пикселя с известными дисплейными координатами имеет следующие колориметрические координаты в цветовом пространстве CIE 1931 XYZ:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = M_0 \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \text{где } M_0 \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^{+\infty} \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix}^T d\lambda \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \quad (3)$$

где $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda) \geq 0$ – функции цветового соответствия стандартного наблюдателя CIE 1931.

Спектры пропускания левого и правого светофильтров анаглифных очков обозначим

$$T_1(\lambda) \in [0, 1] \text{ и } T_2(\lambda) \in [0, 1] \quad (4)$$

соответственно. Тогда после прохождения светофильтров в левый и правый глаз попадут излучения со спектрами $T_1(\lambda)S(\lambda)$ и $T_2(\lambda)S(\lambda)$ соответственно. Цвета этих излучений в координатах цветового пространства CIE 1931 XYZ описываются формулой

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \text{где } M_i \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^{+\infty} \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} T_i(\lambda) \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix}^T d\lambda \in \mathbb{R}^{3 \times 3}. \quad (5)$$

Для вторых строк матриц M_i введём обозначение $\mathbf{m}_i \stackrel{\text{def}}{=} [0 \ 1 \ 0] M_i$, что позволяет получить формулу для яркости излучений после прохождения светофильтров:

$$Y_i = \mathbf{m}_i \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (6)$$

При анаглифной сепарации на общий дисплей выводится сумма изображений, предназначенных для левого и для правого глаза:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 \in \mathbb{R}^3$ – заданные в дисплейных цветовых координатах цвета левого и правого изображений стереопары при максимальной интенсивности изображения, а

$$I_1, I_2 \in [0, 1] - \quad (8)$$

интенсивности левого и правого изображений стереопары. Цвета \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 должны быть такими, чтобы при любых интенсивностях изображений стереопары из единичного отрезка (8) были выполнены физические ограничения на дисплейные цветовые координатах (2), что приводит к следующим ограничениям:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 \geq \mathbf{0}, \\ \mathbf{u}_2 \geq \mathbf{0}, \\ \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 \leq \mathbf{1}. \end{cases} \quad (9)$$

Также заметим, что в соответствии с формулами (1) и (7) спектры $S_i(\lambda)$ визуализированных на дисплее изображений стереопары при максимальной интенсивности будут иметь вид

$$S_i(\lambda) = \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix}^T \mathbf{u}_i. \quad (10)$$

2. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОЛОРИЗАЦИИ СТЕРЕОПАРЫ

Воспользуемся введенными в предыдущем разделе обозначениями и соотношениями между ними, чтобы поставить задачу поиска оптимальных цветов $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ изображений стереопары при фиксированных спектрах $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda); T_1(\lambda), T_2(\lambda); \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$.

Предназначенное для левого глаза изображение стереопары должно как можно меньше терять в яркости, проходя через левый светофильтр анаглифных очков:

$$\mathbf{m}_1 \mathbf{u}_1 \rightarrow \max, \quad (11)$$

и как можно больше терять в яркости – проходя через правый:

$$\mathbf{m}_2 \mathbf{u}_1 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Касательно предназначенного для правого глаза изображения стереопары сформулируем аналогичные цели:

$$\mathbf{m}_2 \mathbf{u}_2 \rightarrow \max, \quad (13)$$

$$\mathbf{m}_1 \mathbf{u}_2 \rightarrow \min. \quad (14)$$

Кроме того, для зрителя дискомфортна ситуация, когда яркости одинаковых изображений стереопары после соответствующих им светофильтров сильно отличаются, поэтому потребуем ещё

$$|\mathbf{m}_1 \mathbf{u}_1 - \mathbf{m}_2 \mathbf{u}_2| \rightarrow \min. \quad (15)$$

Наконец, потребуем, чтобы при максимальной интенсивности обоих изображений стереопары цветность пикселя была как можно ближе к ахроматической:

$$|\sin(\mathbf{x}^*, M_0(\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2))| \rightarrow \min, \quad (16)$$

где $\sin(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ – синус угла между векторами \mathbf{a} и \mathbf{b} , а $\mathbf{x}^* \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} 0.9505 \\ 1 \\ 1.0888 \end{bmatrix}$ – цветовые координаты

стандартного источника цвета D65 [2] в цветовом пространстве CIE 1931 XYZ. Скаляризуем полученный векторный критерий следующим образом и тем самым поставим задачу:

$$(\mathbf{u}_1^*, \mathbf{u}_2^*) \stackrel{\text{def}}{=} \arg \min_{\begin{cases} \mathbf{u}_1 \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{u}_2 \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 \leq \mathbf{1} \end{cases}} (\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1) \mathbf{u}_1 + (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2) \mathbf{u}_2 + |\mathbf{m}_1 \mathbf{u}_1 - \mathbf{m}_2 \mathbf{u}_2| + 100 |\sin(\mathbf{x}^*, M_0(\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2))|, \quad (17)$$

где ограничения взяты в соответствии с формулой (9), а нормировочный коэффициент 100 указывает на то, что мы считаем цветовой баланс анаглифного изображения требованием, а остальные целевые компоненты подлежащими совместной балансировке. Согласно введенным обозначениям и в соответствии с формулой (10) спектры оптимально визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_i^*(\lambda)$ будут иметь вид

$$S_i^*(\lambda) = \begin{bmatrix} r(\lambda) \\ g(\lambda) \\ b(\lambda) \end{bmatrix}^T \mathbf{u}_i^*. \quad (18)$$

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для экспериментов были выбраны 3 различных дисплея (EIZO CS2420, Samsung Galaxy S6 [6] и Samsung Galaxy S8 [6]) с известными спектрами излучения цветовых каналов $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ и $b(\lambda)$ (1), и 6 различных анаглифных очков, для которых были измерены спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$ и $T_2(\lambda)$ (4).

Измерения всех спектральных характеристик проводились спектрофотометром IPro Rev.D фирмы X-Rite в режиме высокого разрешения (3.3 нм) с помощью утилиты spotread из пакета Argyll CMS¹. Утилита spotread позволяет измерять не только спектры излучений различных источников, в частности, дисплеев, но и спектральные коэффициенты пропускания светофильтров. При измерении спектральных коэффициентов пропускания светофильтров анаглифных очков в качестве источника излучения использовалась матовая лампа накаливания Philips Krytone 40W 230V L8.

Данные измерений доступны в репозитории https://github.com/abelokopytov/AnaglyphGlasses_Displays/tree/main.

Для каждой пары дисплей + очки методом Хука – Дживса (pattern search) была решена задача оптимизации (17), в результате чего для каждого из $3 \times 6 = 18$ случаев были получены оптимальные цвета \mathbf{u}_1^* , \mathbf{u}_2^* (17) изображений стереопары на дисплее при их максимальной

¹ <http://argyllcms.com/>

интенсивности, а также соответствующие им спектры $S_1^*(\lambda), S_2^*(\lambda)$ (18) (см. рисунки 1, 2, ..., 18).

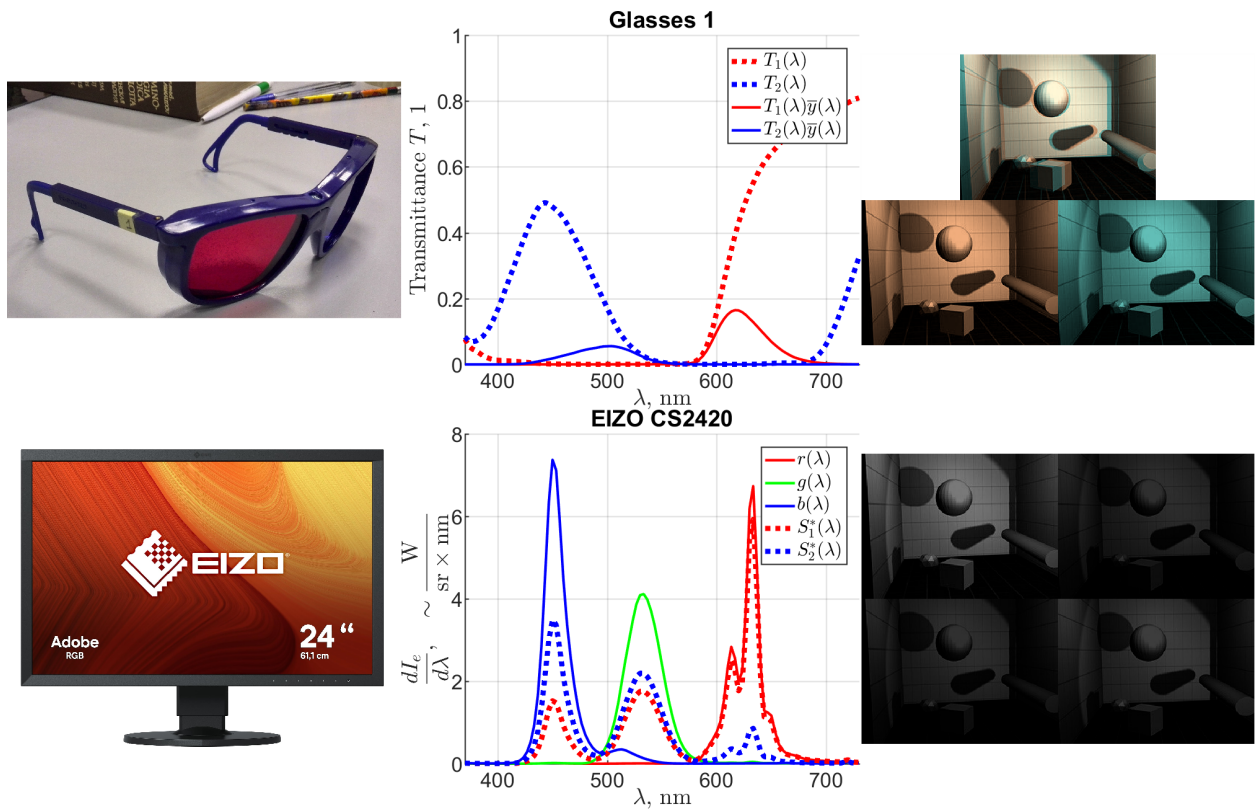


Рис. 1. Иллюстрации по паре EIZO CS2420 + очки 1. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda), T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda), T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda), S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

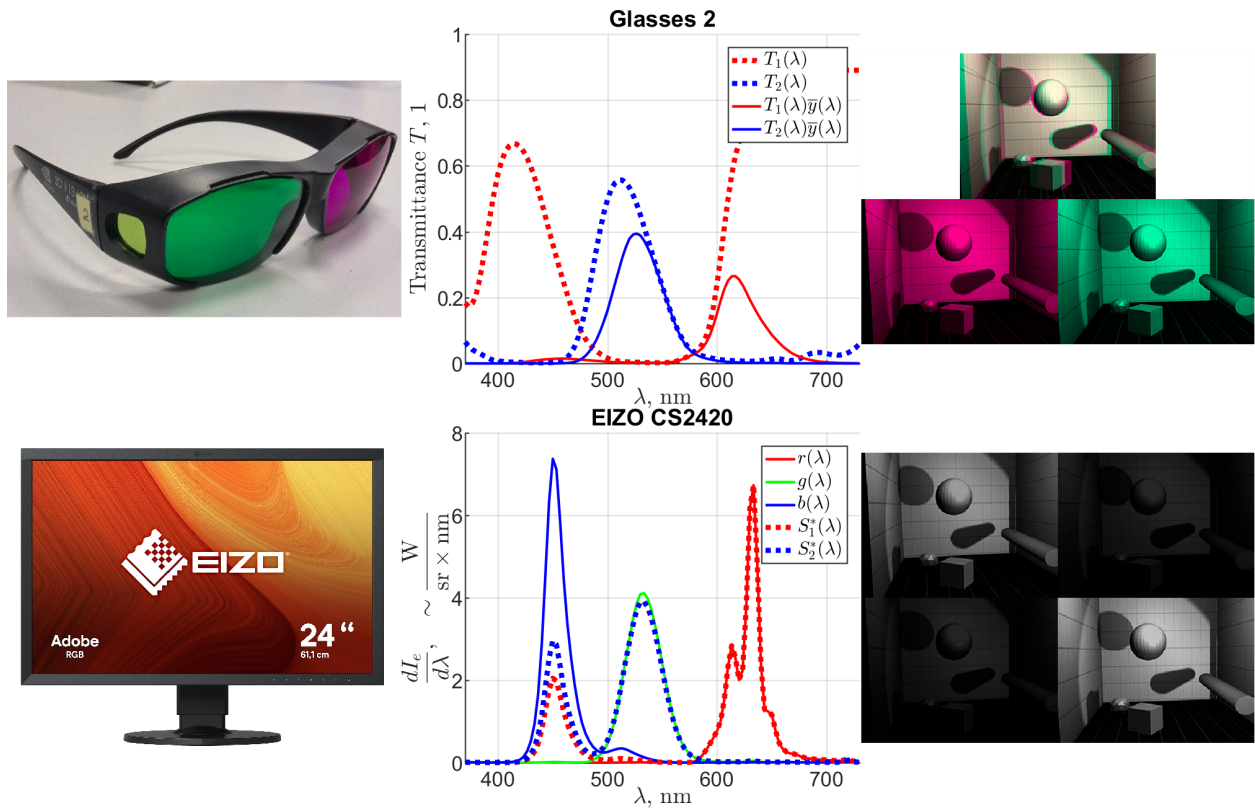


Рис. 2. Иллюстрации по паре EIZO CS2420 + очки 2. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

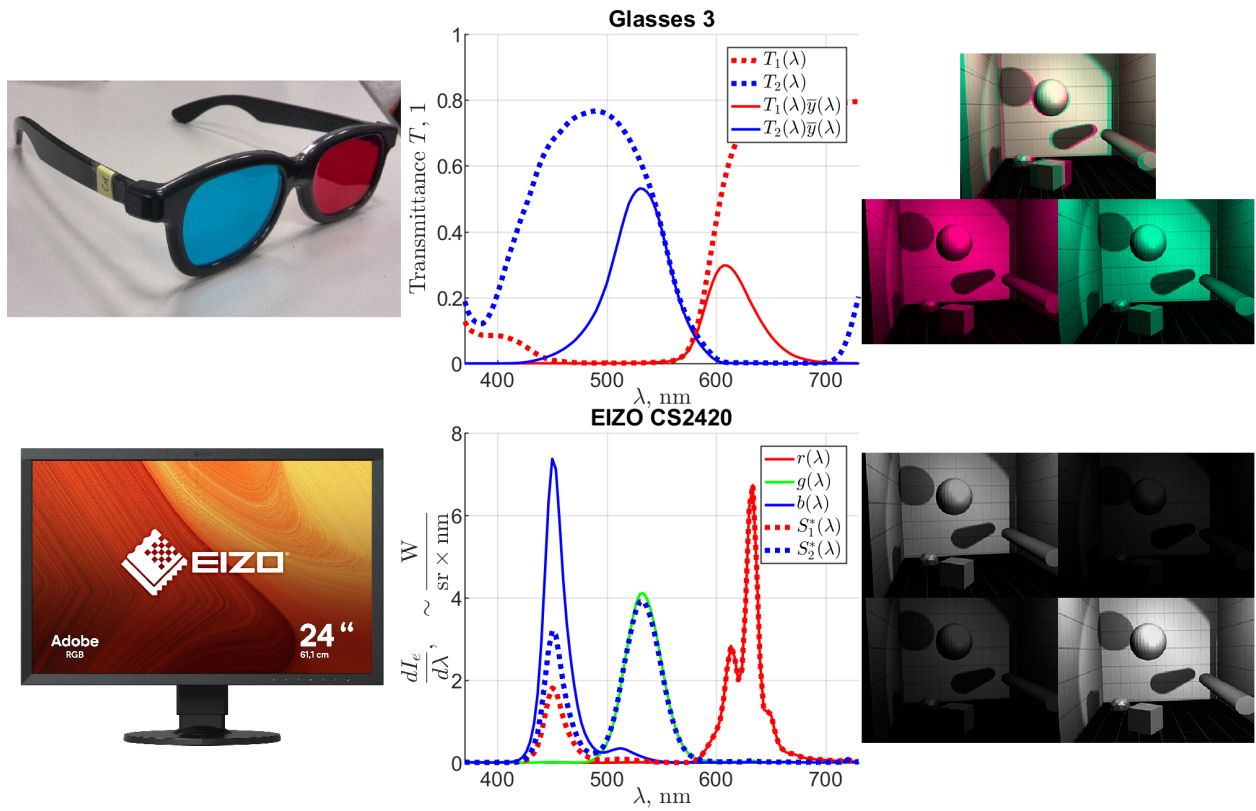


Рис. 3. Иллюстрации по паре EIZO CS2420 + очки 3. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

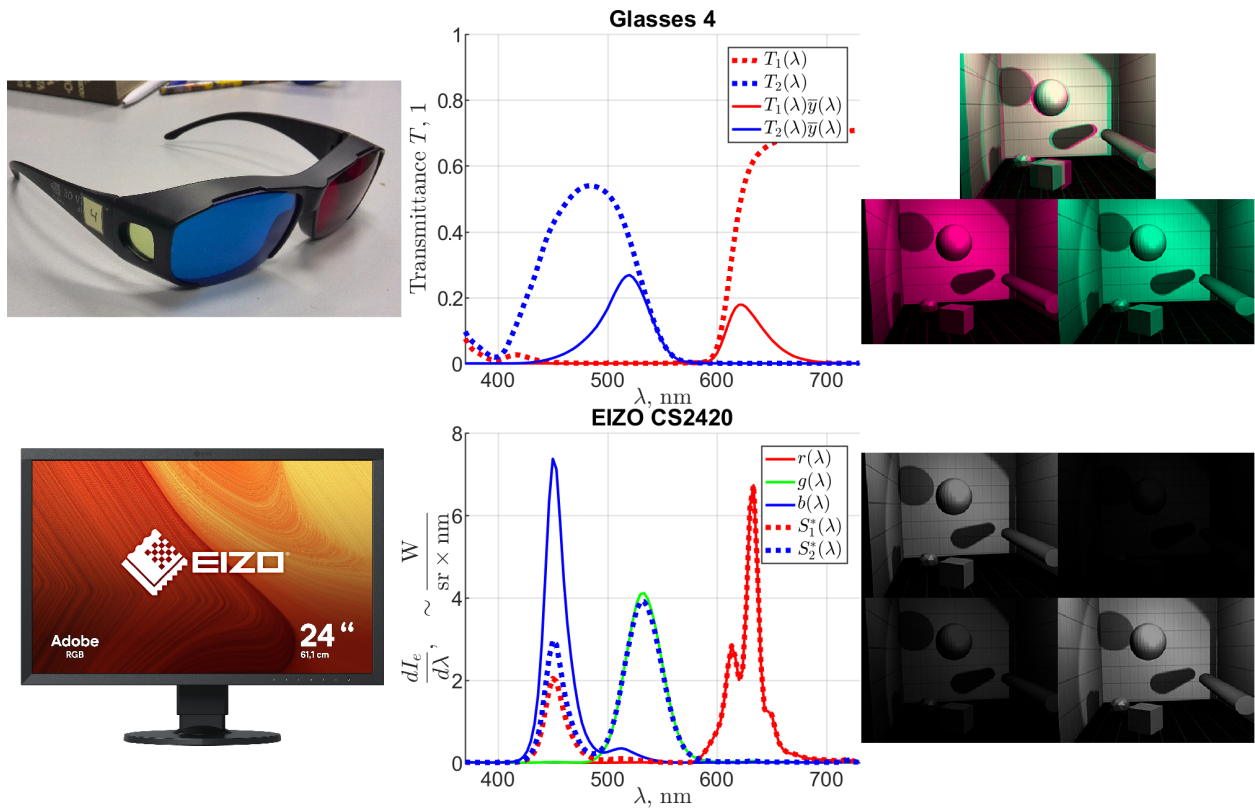


Рис. 4. Иллюстрации по паре EIZO CS2420 + очки 4. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

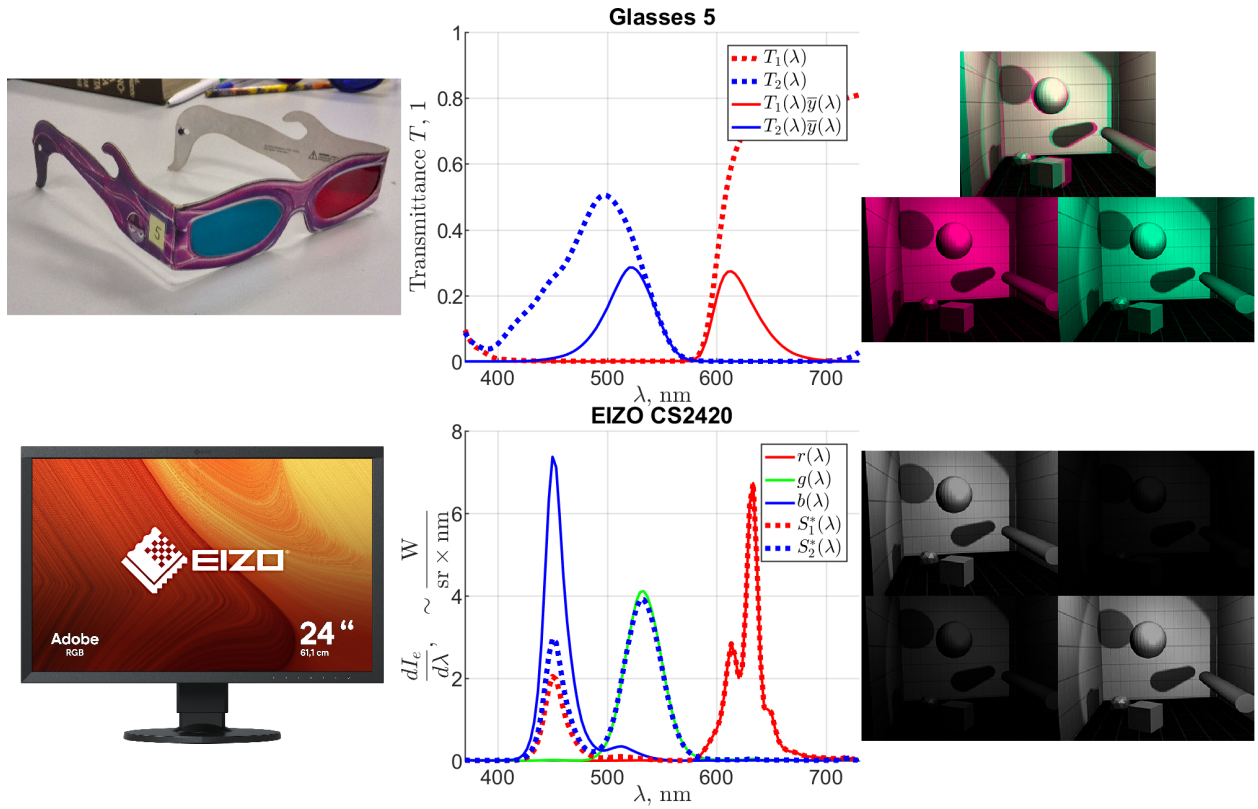


Рис. 5. Иллюстрации по паре EIZO CS2420 + очки 5. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

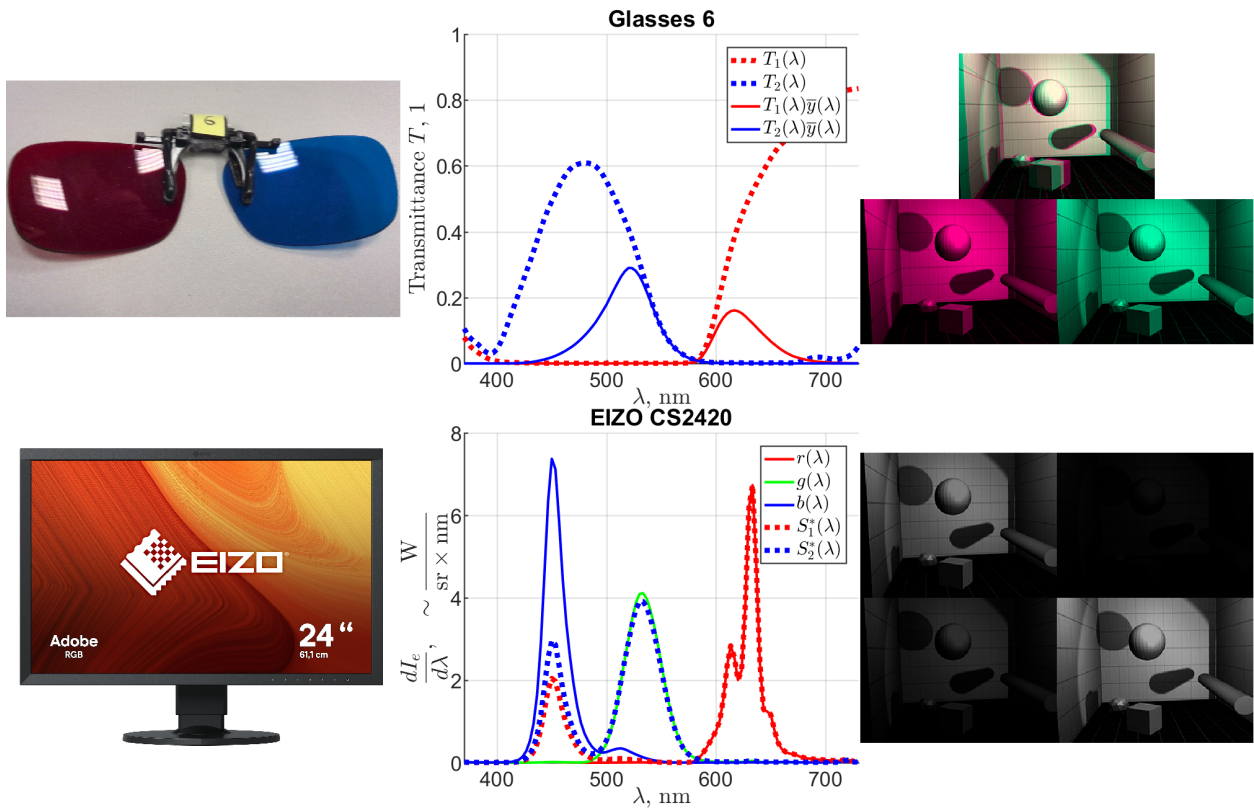


Рис. 6. Иллюстрации по паре EIZO CS2420 + очки 6. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

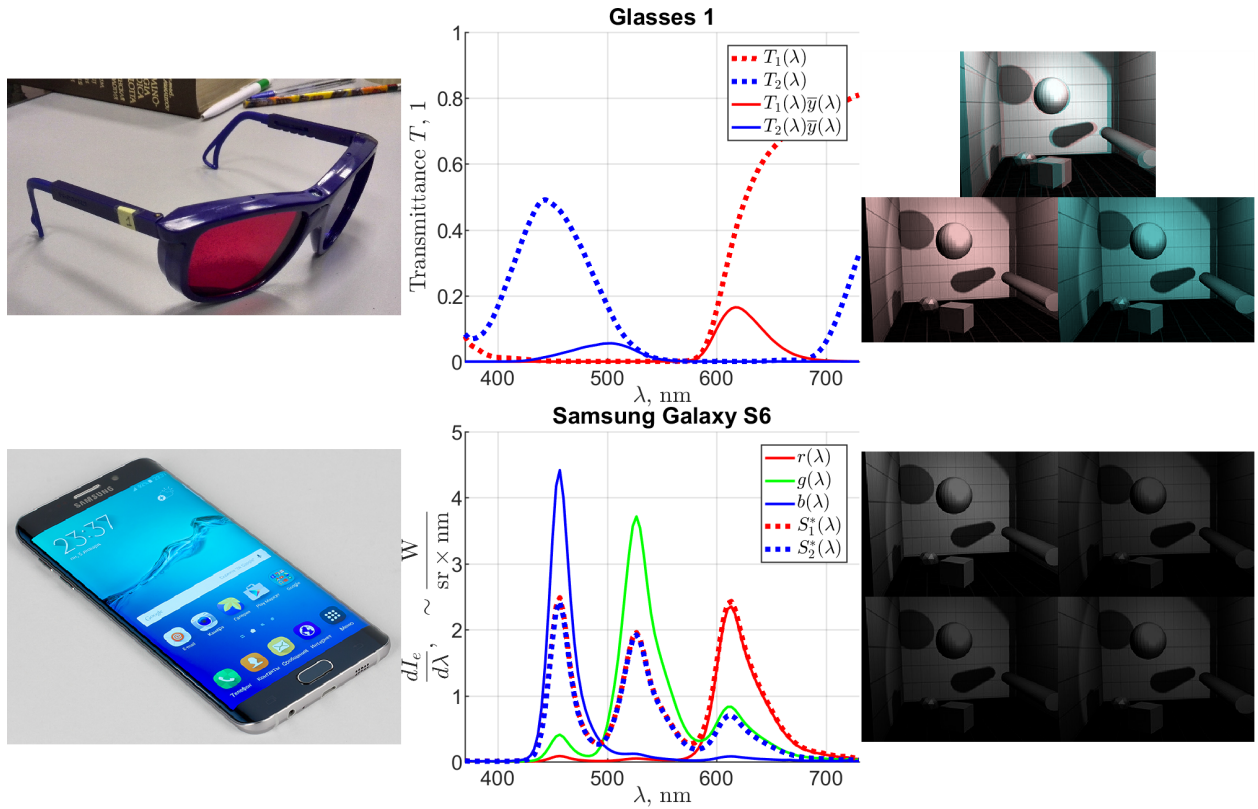


Рис. 7. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S6 + очки 1. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

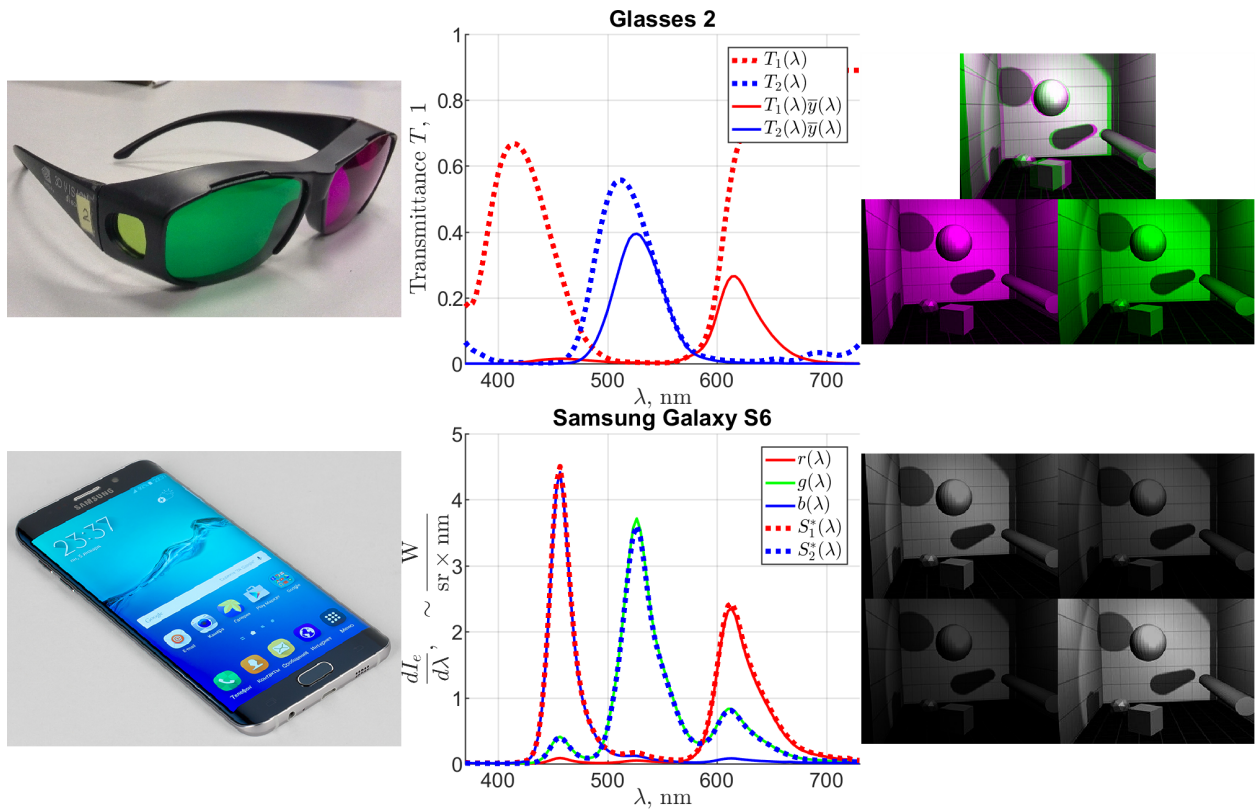


Рис. 8. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S6 + очки 2. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплеев + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

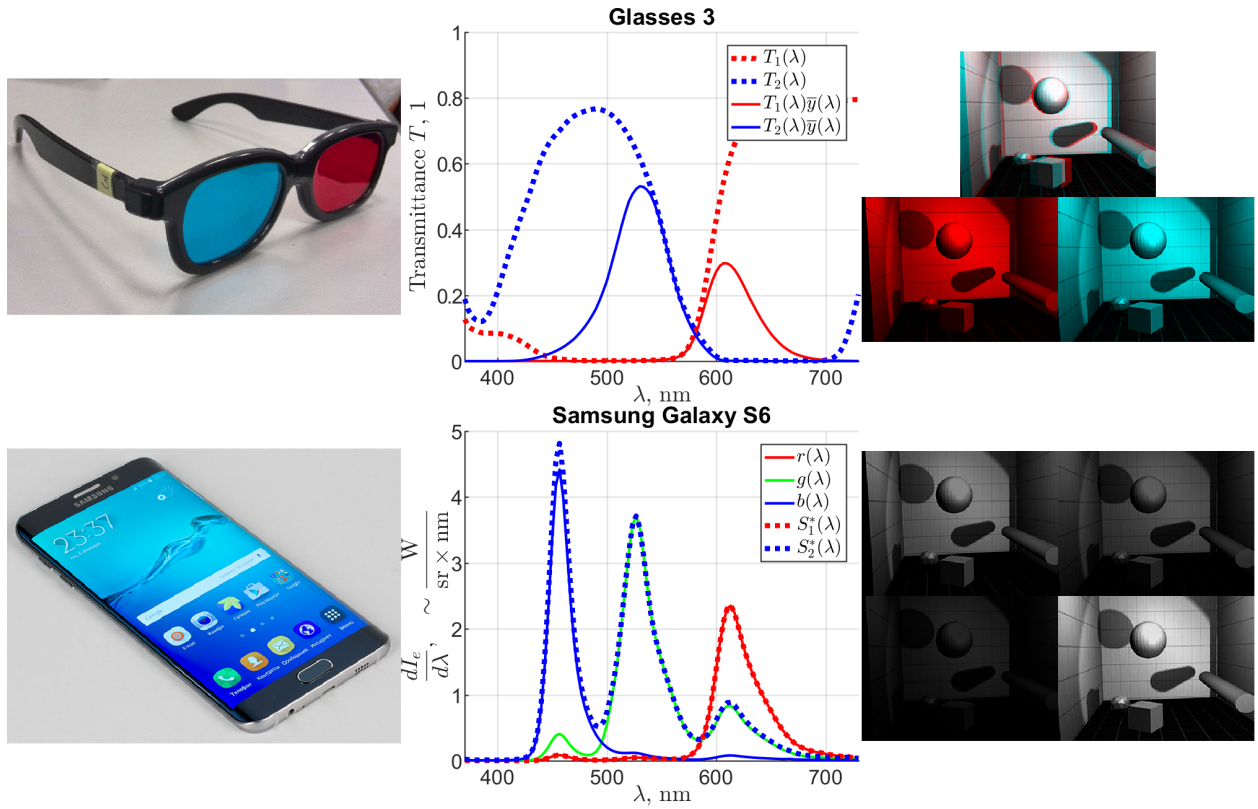


Рис. 9. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S6 + очки 3. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

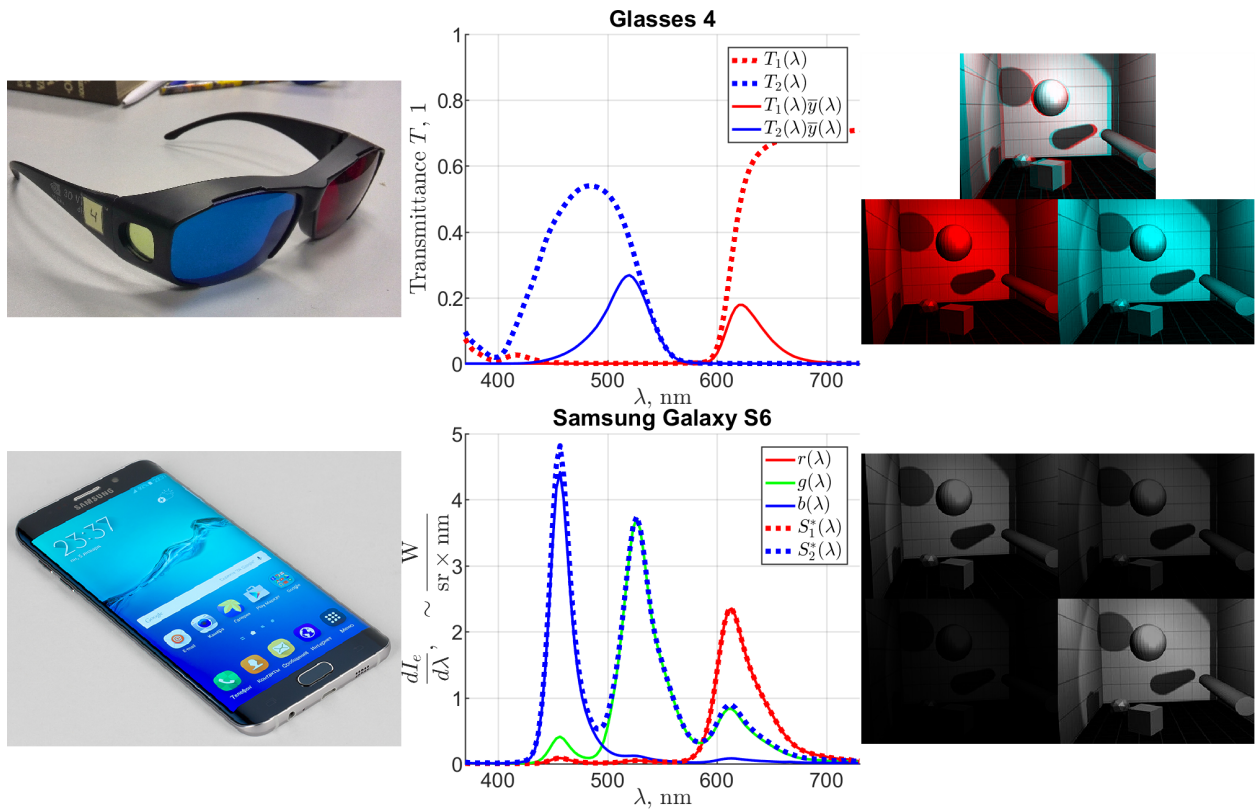


Рис. 10. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S6 + очки 4. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

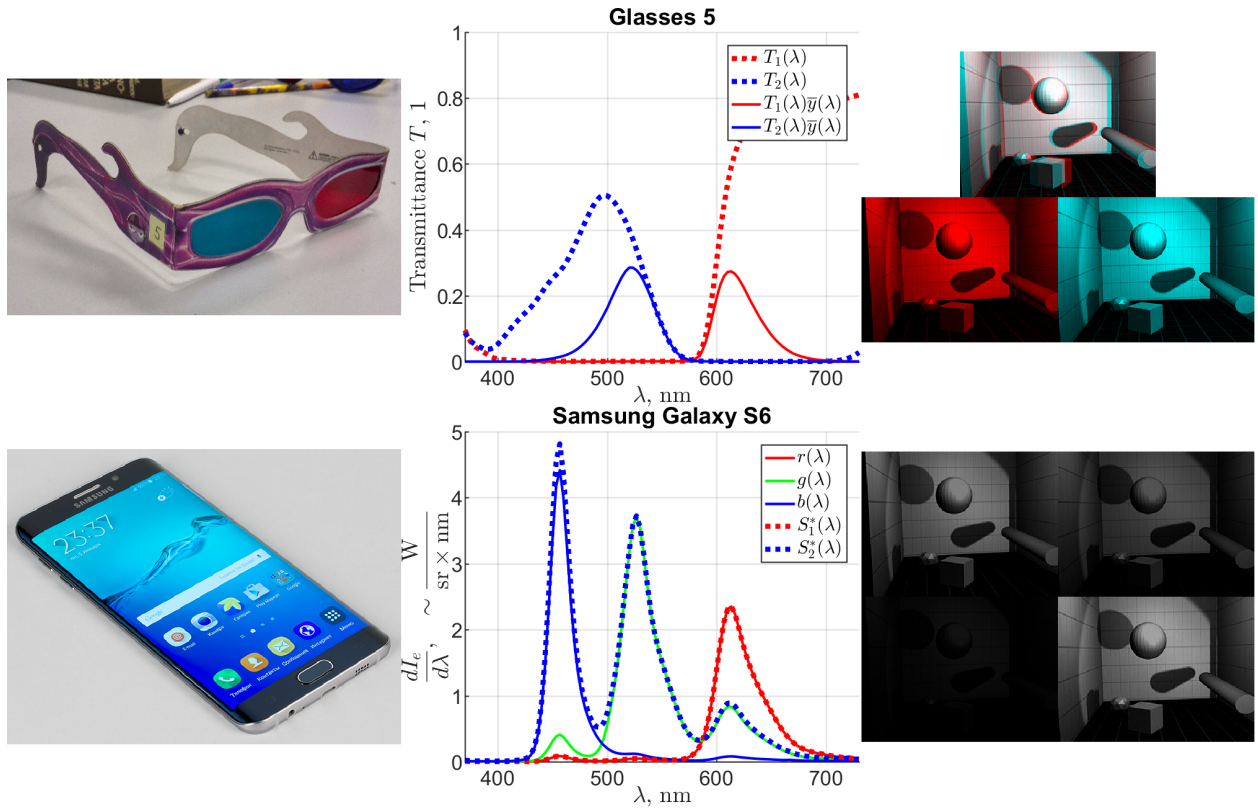


Рис. 11. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S6 + очки 5. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

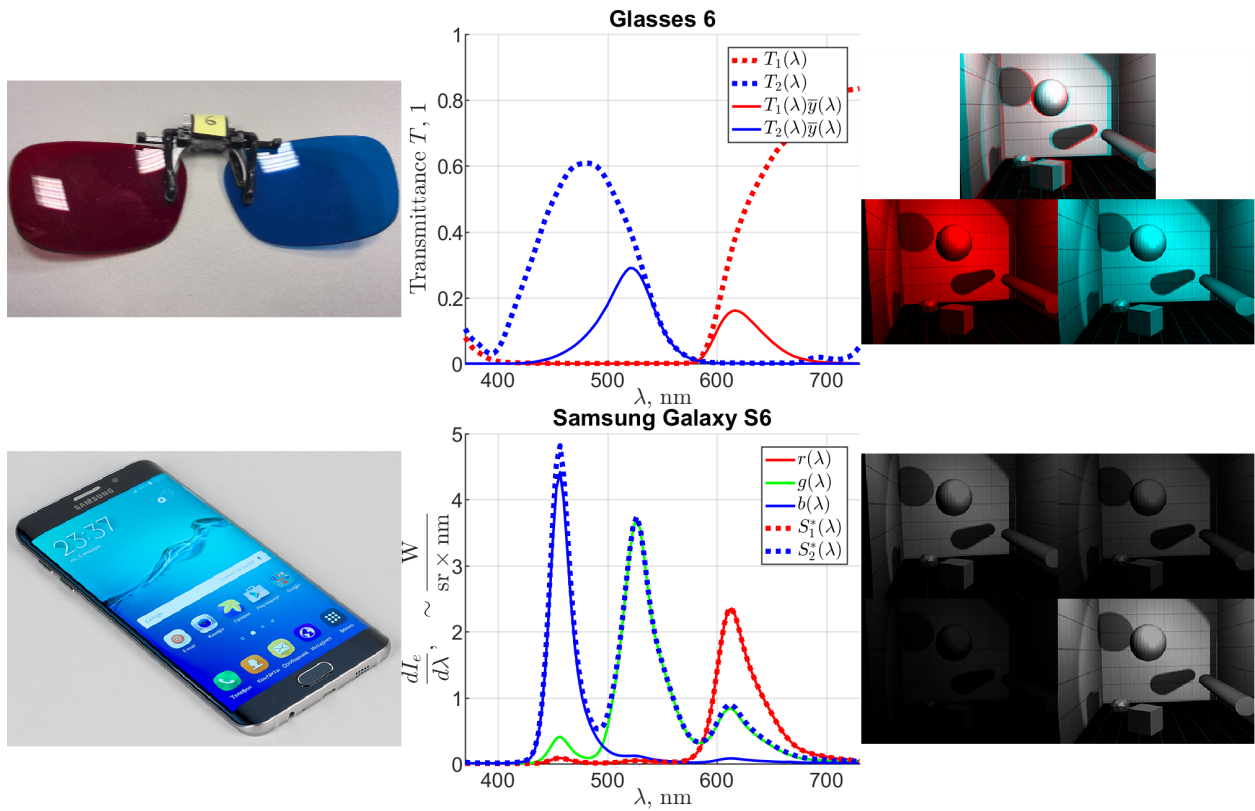


Рис. 12. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S6 + очки 6. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплеев + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

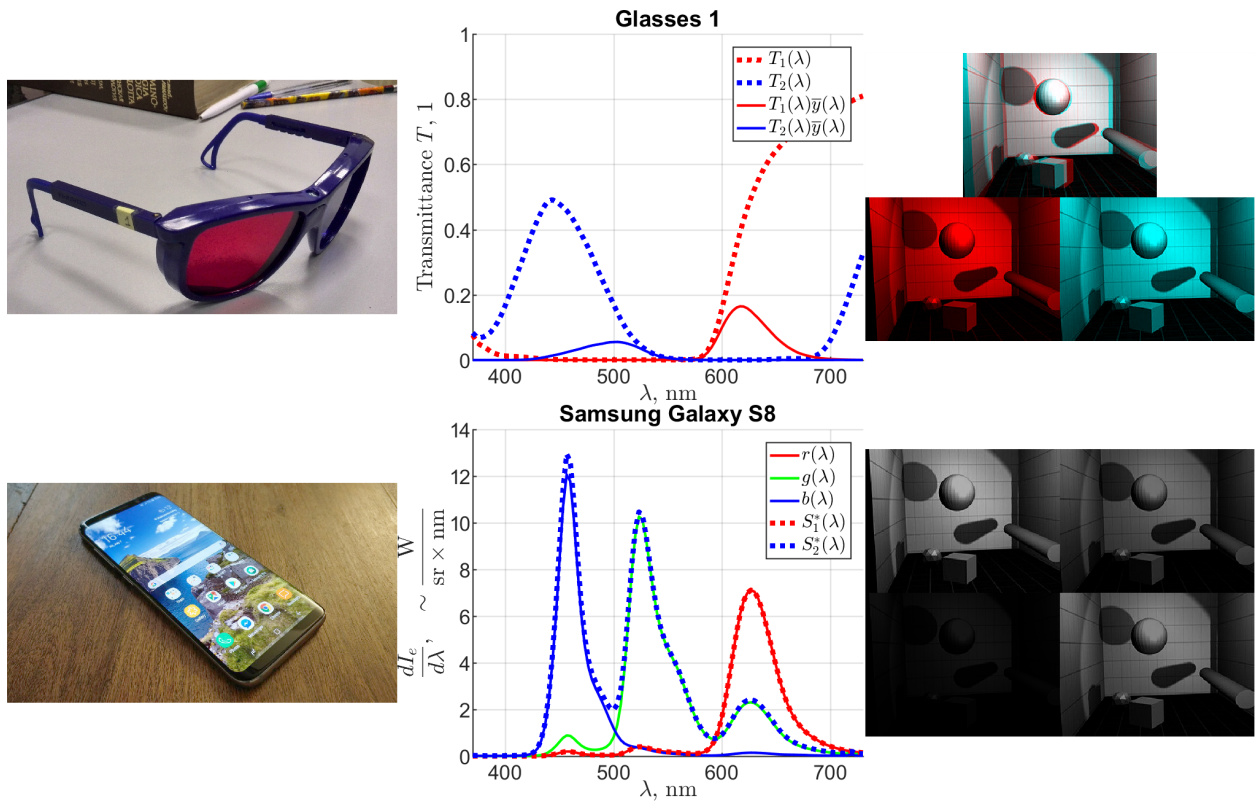


Рис. 13. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S8 + очки 1. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

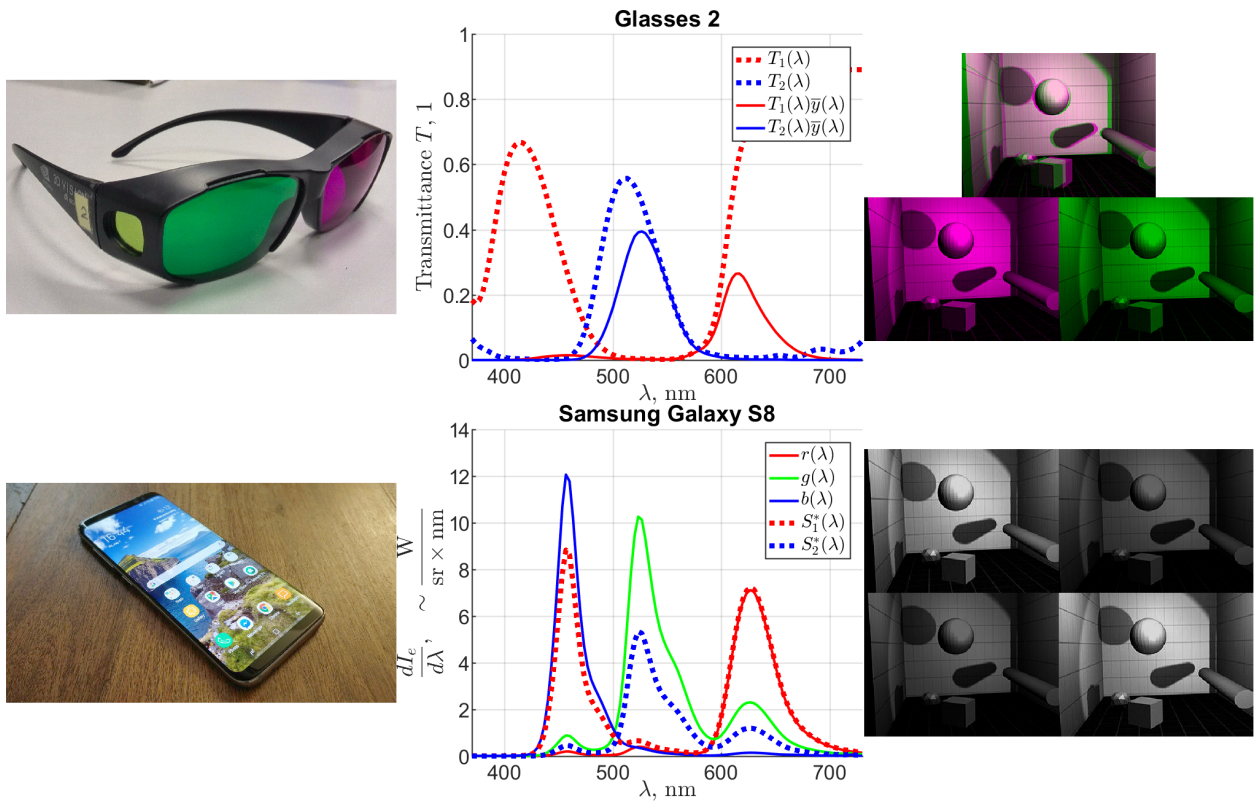


Рис. 14. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S8 + очки 2. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

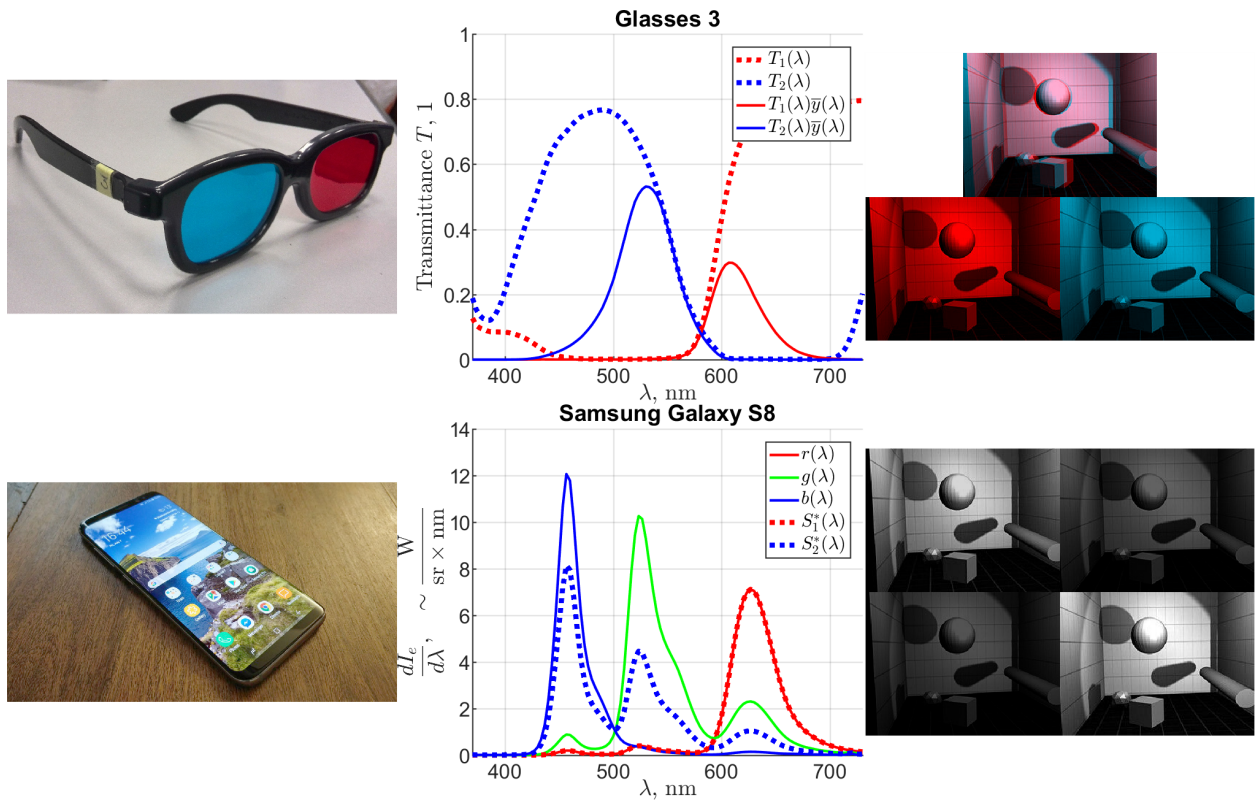


Рис. 15. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S8 + очки 3. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

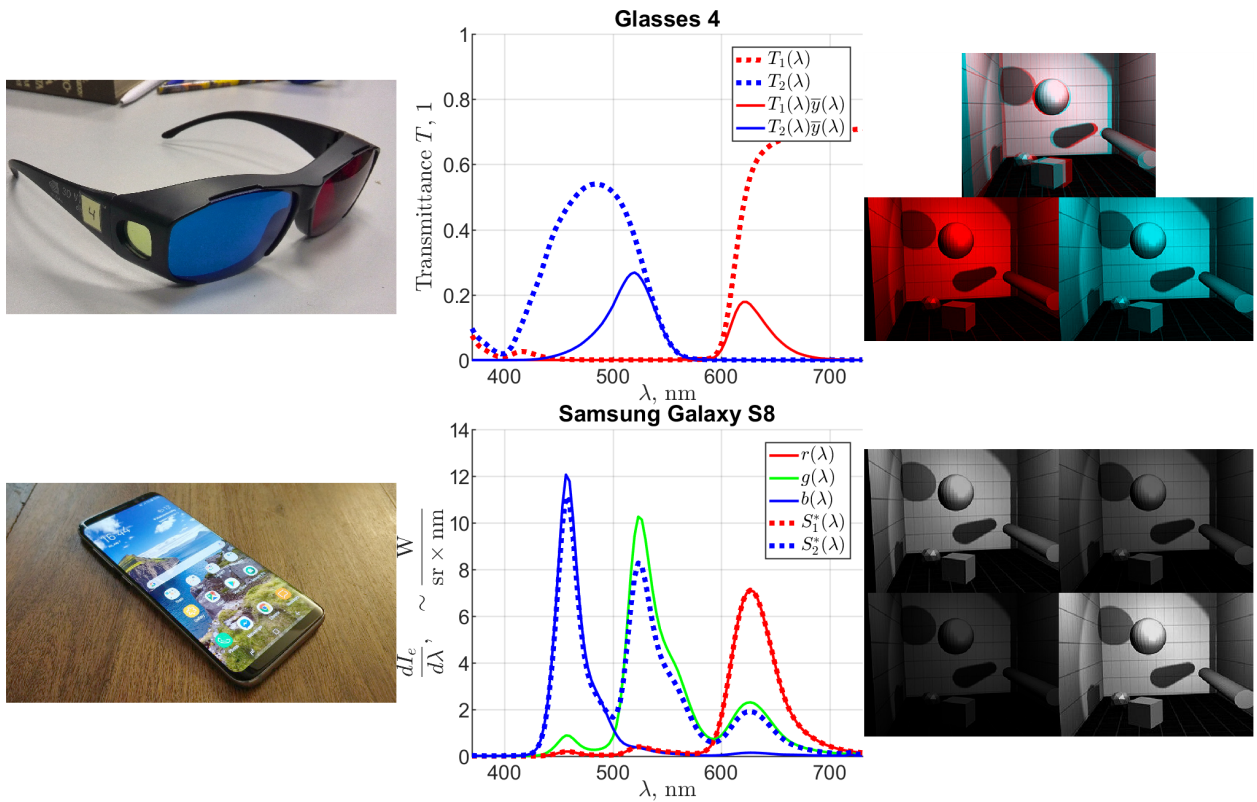


Рис. 16. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S8 + очки 4. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

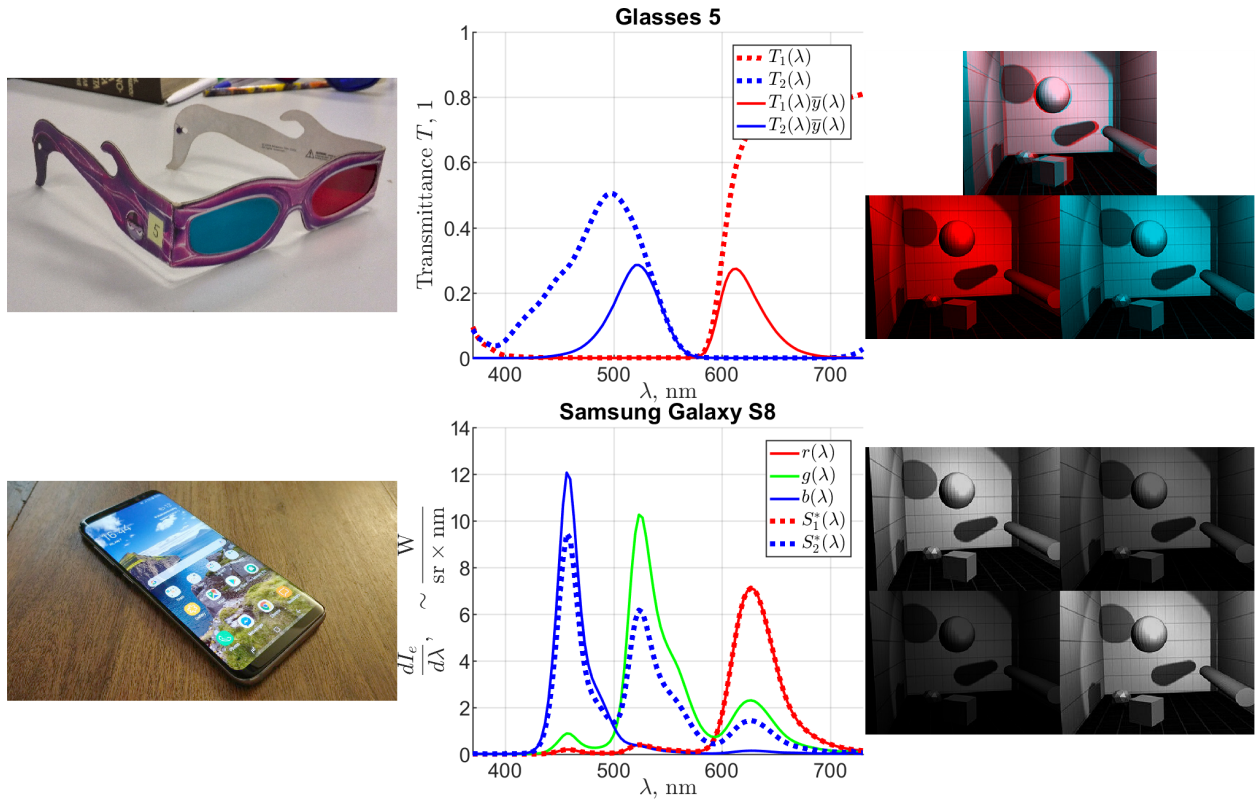


Рис. 17. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S8 + очки 5. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

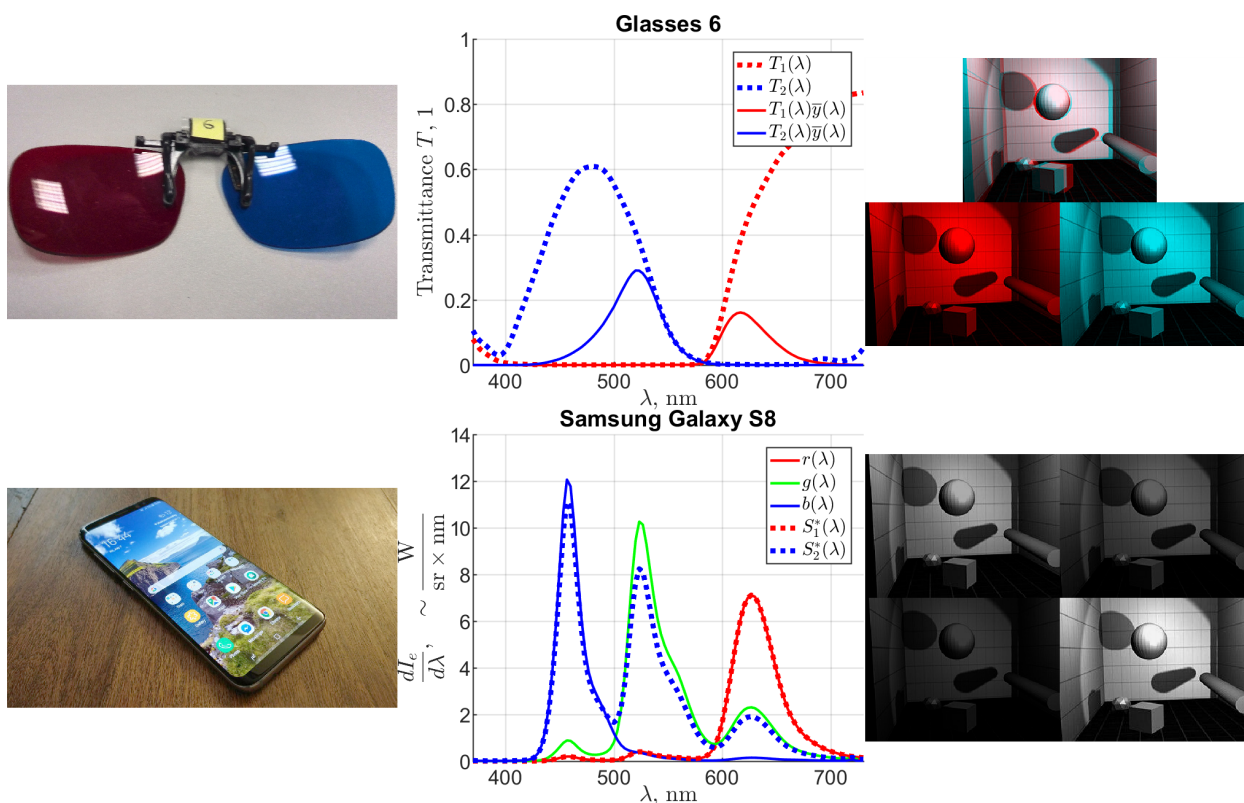


Рис. 18. Иллюстрации по паре Samsung Galaxy S8 + очки 6. Слева: анаглифные очки и дисплей. По центру: спектры пропускания светофильтров $T_1(\lambda)$, $T_2(\lambda)$, а также соответствующие спектры пропускания яркости $T_1(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $T_2(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ и базисные спектры излучения дисплея $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, а также спектры оптимально (в смысле функционала (17) для данной пары дисплей + очки) визуализированных на дисплее изображений стереопары при их максимальной интенсивности $S_1^*(\lambda)$, $S_2^*(\lambda)$. Справа сверху: стереопара совмещённая и разнесённая. Справа снизу: яркости изображений стереопары после прохождения через светофильтры анаглифных очков (левое изображение стереопары слева, правое – справа; левый светофильтр наверху, правый – внизу).

В таблице 1 приведены сводные результаты моделирования. На рисунке 19 визуализировано расположение оптимальных цветовых пар в цветовом пространстве.

Таблица 1. Оптимальные цвета \mathbf{u}_1^* , \mathbf{u}_2^* (17).

Оптимальные цвета	\mathbf{u}_1^*	\mathbf{u}_2^*	\mathbf{u}_1^*	\mathbf{u}_2^*	\mathbf{u}_1^*	\mathbf{u}_2^*	\mathbf{u}_1^*	\mathbf{u}_2^*	\mathbf{u}_1^*	\mathbf{u}_2^*	\mathbf{u}_1^*	\mathbf{u}_2^*
Дисплей \ Очки	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	6
EIZO CS2420	0.88	0.12	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0.42	0.52	0	0.94	0	0.94	0	0.94	0	0.94	0	0.94
	0.2	0.47	0.28	0.4	0.24	0.43	0.28	0.4	0.28	0.4	0.28	0.4
Samsung Galaxy S6	0.84	0.1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0.5	0.5	0	0.97	0	0.97	0	0.98	0	0.97	0	0.97
	0.5	0.5	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
Samsung Galaxy S8	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	0	0.98	0	0.52	0	0.41	0	0.78	0	0.58	0	0.77
	0	1	0.72	0	0	0.64	0	0.87	0	0.74	0	0.86

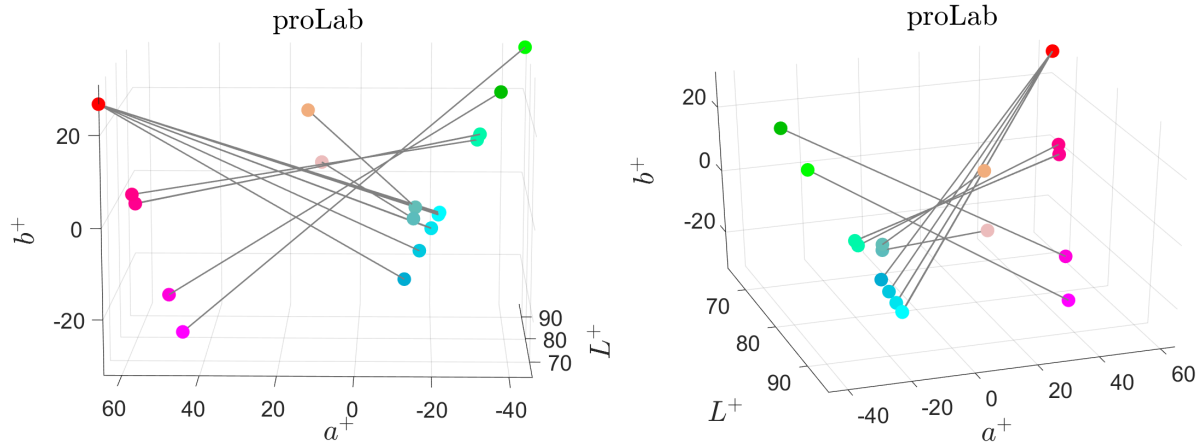


Рис. 19. Пары оптимальных цветов (\mathbf{u}_1^* , \mathbf{u}_2^*) (17) (см. таблицу 1) изображений стереопары на дисплее при их максимальной интенсивности для всех 18-ти рассматриваемых случаев, отображенные в перцептивно равномерном пространстве proLab [4] в двух ракурсах.

Для произвольной пары дисплей + очки определим отношение сигнал/шум как худшее по светофильтрам отношение яркости целевого изображения к яркости паразитного:

$$\text{SNR}_2 = \min \left(\frac{\mathbf{m}_1 \mathbf{u}_1^*}{\mathbf{m}_1 \mathbf{u}_2^*}, \frac{\mathbf{m}_2 \mathbf{u}_2^*}{\mathbf{m}_2 \mathbf{u}_1^*} \right), \quad (19)$$

значения этого критерия приведены в таблице 2.

Таблица 2. Отношение сигнал/шум SNR_2 (19).

Дисплей \ Очки	1	2	3	4	5	6	Среднее	СКО
EIZO CS2420	1.58	15.94	22.90	14.84	20.73	15.01	15.17	7.43
Samsung Galaxy S6	0.97	2.85	2.31	2.55	2.50	2.49	2.28	0.66
Samsung Galaxy S8	2.71	4.88	5.50	3.54	4.50	3.43	4.09	1.04
Среднее	1.75	7.89	10.24	6.98	9.24	6.98	7.18	
СКО	0.88	7.04	11.09	6.83	10.00	6.97		7.14

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена линейная цветовая модель анаглифной сепарации стереопары. В рамках этой модели сформулирован ряд критериев, характеризующих качество колоризации стереопары для её последующей анаглифной сепарации, после чего предложена скаляризация этих критериев. В рамках той же модели формализованы физические ограничения на множество возможных колоризаций. Таким образом, поставлена задача поиска колоризации стереопары, оптимальной для её дальнейшей анаглифной сепарации. Эта задача была решена численно для всевозможных комбинаций шести анаглифных очков и трёх дисплеев. На основании полученных оптимальных колоризаций можно сделать следующие выводы:

- анаглифные очки и дисплей могут как подходить друг другу практически идеально, так и образовывать фактически неработоспособную пару;
- оптимальные решения в общем случае не являются тривиальными – вклад каналов дисплея в колоризацию изображений стереопары может быть дробным, причём один и тот же канал дисплея может участвовать в формировании обоих изображений стереопары одновременно.

Таким образом, задача колоризации не может быть оптимально решена эвристически. Описанный в работе подход позволяет как вычислять оптимальную колоризацию стереопары, так и подбирать удачные сочетания анаглифных очков и дисплея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валуц Н.А. *Стереоскопия*. М: Издательство Академии Наук СССР, 1962.
2. Judd D., MacAdam D., Wyszecki G., Budde H., Condit H., Henderson S. and Simonds J. Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, vol. 54 (8), pp. 1031–1040, DOI: 10.1364/JOSA.54.001031.
3. Zone R. *Stereoscopic Cinema and the Origins of 3-D Film, 1838-1952*. Kentucky: University Press of Kentucky, 2007.
4. Konovalenko I., Smagina A., Nikolaev D. and Nikolaev P. ProLab: A Perceptually Uniform Projective Color Coordinate System. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 133023–133042, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3115425.
5. Рожкова Г.И., Алексеенко С.В., Большаков А.С., Васильева Н.Н., Ватолин Д.С., Грачева М.А., Ковалец (Забалуева) Н.П., Крутцова Е.Н., Николаев Д.П., Николаев П.П., Рожков С.Н., Федоров А.А. *Стереозрение человека и стереотехнологии*. М.: КУНА, 2022.
6. Rozhkova G., Belokopytov A., Gracheva M., Ershov E. and Nikolaev P. A simple method for comparing peripheral and central color vision by means of two smartphones. *Behavior Research Methods*, 2023, vol. 55 (1), pp. 38–57, DOI: 10.3758/s13428-021-01783-3.

Optimal Colorization of Monochromatic Stereo Pairs in 3D Anaglyph Visualization

A.S. Bolshakov, A.V. Belokopytov, I.A. Konovalenko

This study delves into optimal color selection for displaying stereo pairs in 3D anaglyph visualization on self-emitting displays. Introducing a multicomponent mathematical criterion for color selection optimization, we optimized colors for anaglyph presentation across all combinations of three displays and six anaglyph glasses with distinct parameters using numerical simulations. Findings demonstrate that anaglyph glasses and displays can either closely match or form ineffective pairs. Our results demonstrate that optimal solutions are typically non-trivial: the weights of RGB color components in optimal colors are fractional, while a single display channel contributes to both images of the stereo pair.

KEYWORDS: stereo pair, stereopsis, anaglyph, colorization, mathematical modeling, optimal methods.