

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ, ИМЕЮЩЕЙ ПЕРЕКРЫВАЮЩИЕСЯ УЧАСТКИ ЗОН РЕГИСТРАЦИИ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ

М.А.Калитов, Н.П.Корнышев

SIGNALS TRANSFORMATION IN THE MULTISPECTRAL TELEVISION SYSTEM WITH OVERLAPPING SPECTRAL RANGES

M.A.Kalitov, N.P.Kornyshev

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Nikolai.Kornyshev@novsu.ru

Обсуждаются вопросы математического описания дифференциального, мультипликативного и комбинированного методов цифровой обработки спектрозональных изображений. Описывается методика проведения эксперимента по качественной и количественной сравнительной оценке изображений. Приводятся результаты качественной и количественной оценки изображений, получаемых при различных вариантах обработки. Анализируется соответствие значений цветовых коэффициентов при использовании различных методов цифровой обработки спектрозональных изображений. Делается вывод о соответствии математического описания сигнальных процессов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков, результатам экспериментального исследования.

Ключевые слова: спектрозональная визуализация, обработка спектрозональных изображений

Для цитирования: Калитов М.А., Корнышев Н.П. Преобразование сигналов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С. 52-59. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).52-59](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).52-59)

The issues of mathematical description of differential, multiplicative, and combined methods of digital processing of multispectral images are discussed. The method of conducting an experiment on the qualitative and quantitative comparative evaluation of images is described. The results of qualitative and quantitative evaluation of images obtained with various processing options are presented. The correspondence of the values of the color coefficients is evaluated when using various methods of digital processing of multispectral images. It is concluded that the mathematical description of signal processes in a television multispectral system with overlapping areas of the registration zones of radiant fluxes corresponds to the results of experimental research.

Keywords: multispectral imaging, multispectral image processing

For citation: Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Signals transformation in the multispectral television system with overlapping spectral ranges // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.52-59. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).52-59](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).52-59)

Методы цифровой обработки спектрозональных изображений, полученных в перекрывающихся участках зон регистрации лучистых потоков, позволяют извлечь дополнительную визуальную информацию об этих участках. Известен ряд таких методов, основанных, в частности, на вычитании (дифференциальные методы) [1-6] и перемножении (мультипликативные методы) [7-9] исходной пары цифровых телевизионных спектрозональных изображений. Однако данные методы получены в основном эвристически, и их теоретическое обоснование, в том числе математическое описание, в литературе освещены недостаточно. Недостаточной является также и экспериментальная проверка теоретических исследований в данном вопросе.

Целью настоящей статьи является ознакомление с результатами теоретических и экспериментальных исследований сигнальных процессов в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков, при использовании дифференциальных и мультипликативных методов спектрозональной визуализации, а также экспериментальная проверка полученных выражений.

зации, а также экспериментальная проверка полученных выражений.

Теоретическая часть

Рассмотрим сигнальные процессы в телевизионной спектрозональной системе, имеющей перекрывающиеся участки зон регистрации лучистых потоков при общем диапазоне спектральной чувствительности фотоприемника $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$.

Воспользуемся выражением для полного фототока элемента фотоприемника [10]:

$$i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{A/W}(\lambda) P_W(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{A/W}(\lambda)$ [А/Вт] — характеристика спектральной чувствительности фотоприемника, а $P_W(\lambda)$ [Вт] — характеристика спектральной мощности источника излучения.

С учетом нормировки характеристик:

$$0 \leq \varepsilon(\lambda) = \frac{\varepsilon_{A/W}(\lambda)}{\varepsilon_{\max}} \leq 1 \text{ и } 0 \leq P(\lambda) = \frac{P_W(\lambda)}{P_{\max}} \leq 1,$$

где $\varepsilon_{\max}$ — максимальная чувствительность фотоприемника, $P_{\max}$ — максимальная мощность источника излучения, выражение (1) имеет вид:

$$i = \varepsilon_{\max} P_{\max} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon(\lambda) P(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Поскольку функция $\varepsilon(\lambda)$ интегрируема на интервале $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, а функция $P(\lambda) \geq 0$, то воспользуемся теоремой о среднем [11] и перепишем (2) следующим образом:

$$i = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P(\lambda) d\lambda,$$

где $i_0 = \varepsilon_{\max} P_{\max} \varepsilon_{\text{ср}}$.

Тогда электрические сигналы (фототоки), получаемые в двух перекрывающихся участках зон регистрации лучистых потоков при помощи одного и того же фотоприемника, можно выразить в следующем виде:

$$i_1 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \quad \text{и} \\ i_2 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda,$$

где $P_1(\lambda)$ — характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от λ_1 до $\lambda_{\max}$, $P_2(\lambda)$ — характеристика спектральной мощности источника излучения в диапазоне от λ_2 до $\lambda_{\max}$, причем $\lambda_{\min} \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_{\max}$, а $P_1(\lambda) \neq P_2(\lambda)$.

Рассмотрим сигнальные процессы дифференциального [1-6] метода, при котором имеем:

$$i = i_1 - i_2 = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda.$$

Покажем, что инверсия $\overline{i_2}$ сигнала i_2 соответствует инверсии $\overline{P_2(\lambda)}$ спектральной характеристики $P_2(\lambda)$ лучистого потока с точностью до постоянной величины C . Здесь подразумевается, что $\overline{i_2} = i_W - i_2$, где $i_W = \text{const}$ — уровень «белого» в сигнале изображения, соответствующий, в частности, значению 255 относительных единиц для восьмиразрядного цифрового кодирования.

В этом случае должно выполняться соотношение:

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) + \overline{P_2(\lambda)}] d\lambda + C. \quad (3)$$

Заметим, что, с одной стороны:

$$i = i_1 - i_2 = i_1 + \overline{i_2} - i_W,$$

а с другой стороны:

$$\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda).$$

Тогда интеграл в правой части выражения (3) может быть переписан в следующем виде:

$$i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \{P_1(\lambda) + [1 - P_2(\lambda)]\} d\lambda = \\ = i_0 \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [1 - P_2(\lambda)] d\lambda \right\}$$

или

$$i_0 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} d\lambda \right] = \\ = i_1 - i_2 + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) = i_1 + \overline{i_2} + C,$$

где $C = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) - i_W$.

Таким образом, правая часть выражения (3) соответствует его левой части, что и требовалось доказать.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для мультипликативного [7-9] метода, при котором спектрозональный сигнал формируется по формуле:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = \left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \right] \times \left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right].$$

Известно, что в общем случае справедливо:

$$\left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda \right] \times \left[i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \neq i_0^2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda.$$

Рассмотрим отдельно интеграл в правой части данного неравенства. Обе функции $P_2(\lambda)$ и $\overline{P_1(\lambda)}$ интегрируемы на интервале $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, причем $0 \leq P_2(\lambda) \leq 1$ и $0 \leq \overline{P_1(\lambda)} \leq 1$.

Таким образом, возможно использование теоремы о среднем, согласно которой в данном случае, с одной стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_1 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda, \quad (4)$$

а с другой стороны:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda = \mu_2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где $0 \leq \mu_1 \leq 1$ и $0 \leq \mu_2 \leq 1$.

Перемножив, соответственно, левые и правые части равенств (4) и (5) получим:

$$\left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 = \mu_1 \mu_2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right].$$

Таким образом, для мультипликативного метода справедливо:

$$i = \overline{i_1} \times i_2 = A i_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \overline{P_1(\lambda)} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2, \quad \text{где } A = \frac{1}{\mu_1 \mu_2}. \quad (6)$$

Однако электрический сигнал от лучистого потока, получаемого, например, при комбинации свето-

фильтров со спектральными характеристиками, соответствующими $P_1(\lambda)$ и $\overline{P_2(\lambda)}$, определяется выражением:

$$i_{1,2} = i_0 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda,$$

которое исходит из того, что общий коэффициент пропускания последовательно расположенных оптических сред равен произведению коэффициентов пропускания этих сред [12].

Следовательно, для получения соответствия электрического сигнала реальному лучистому потоку необходима следующая коррекция выражения (6): $i_{\text{вых}} = N\sqrt{i}$, где $N \leq 1$ — нормирующий множитель, обеспечивающий требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

Для инверсии выходного сигнала необходимо дополнительно выполнить $\overline{i_{\text{вых}}} = i_W - i_{\text{вых}}$.

Рассмотрим аналогичным образом сигнальные процессы для комбинированного (мультипликативно-дифференциального) метода [13], при котором спектральный сигнал формируется по формуле:

$$i = i_1 \times i_2 + i_2 \times i_1, \quad (7)$$

с последующей нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала.

В этом случае, с одной стороны, справедливо:

$$\overline{i_1 \times i_2} = (i_W - i_2) \times i_1, \quad \overline{i_2 \times i_1} = (i_W - i_1) \times i_2 \quad \text{и} \quad \overline{i_2 \times i_1} = i_W - i_2 \times i_1.$$

Следовательно:

$$i = i_W \times (i_1 - i_2 + 1) = i_W \left\{ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [P_1(\lambda) - P_2(\lambda)] d\lambda + 1 \right\}.$$

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (7) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (3) при дополнительном усилении (линейной яркостной коррекции) получаемого разностного сигнала.

С другой стороны, с учетом выражения (6) справедливо:

$$\begin{aligned} i &= i_1 \times i_2 + i_2 \times i_1 = Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 + \\ &+ \left\{ i_W - Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right]^2 \right\} \quad \text{или} \\ i &= Ai_0^2 \left\{ \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda \right]^2 - \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right]^2 \right\} + i_W \quad \text{или} \\ i &= Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] \times \\ &\times \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) \overline{P_2(\lambda)} d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) \overline{P_1(\lambda)} d\lambda \right] + i_W. \end{aligned}$$

Поскольку $\overline{P_1(\lambda)} = 1 - P_1(\lambda)$ и $\overline{P_2(\lambda)} = 1 - P_2(\lambda)$, имеем:

$$\begin{aligned} i &= Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \right. \\ &+ \left. \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right] + i_W. \end{aligned}$$

Обозначив через $I_1 = \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) P_2(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]$ и $I_2 = \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]$, запишем:

$$i = Ai_0^2 I_1 I_2 + i_W.$$

Поскольку сигнал яркости униполярен, и нас интересуют его положительные значения, в дальнейшем будем рассматривать значения I_1 и I_2 по абсолютной величине.

Рассмотрим модуль I_1 , для которого в данном случае можно записать неравенство:

$$\left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right| \leq |I_1| \leq \left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right|^2.$$

Тогда для произведения $|I_1 I_2|$ будет справедливо неравенство:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right|^2 &\leq |I_1 I_2| \leq \\ &\leq \left| \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right|^3. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом (8) запишем:

$$\begin{aligned} Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^2 + \\ + i_W \leq i \leq Ai_0^2 \left[\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_1(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P_2(\lambda) d\lambda \right]^3 + i_W. \end{aligned} \quad (9)$$

Из полученного соотношения следует, что результат вычислений по формуле (7) после соответствующей нормировки, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала, соответствует результату, получаемому дифференциальным методом по формуле (3), и отличается нелинейным усилением получаемого разностного сигнала.

Таким образом, эквивалентный результат можно получить тремя способами:

1) вычислением по формуле (3) с дополнительной линейной яркостной коррекцией;

2) вычислением по формуле (3) с последующим возведением в степень $2 \leq b \leq 3$ в соответствии с (9) и нормировкой, обеспечивающей требуемый динамический диапазон изменения выходного сигнала;

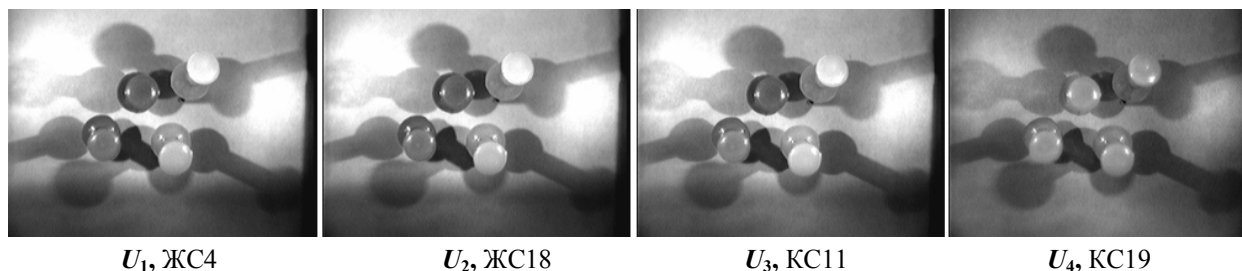


Рис.1. Спектрозональные изображения U_1 , U_2 , U_3 , U_4 , полученные при помощи стандартных светофильтров ЖС4, ЖС18, КС11, КС19

3) вычислением комбинированным методом по формуле (7) с последующей нормировкой.

Таким образом, в отличие от дифференциального метода при комбинированном методе дополнительная яркостная коррекция получаемого разностного сигнала обеспечивается автоматически.

Экспериментальная часть

В основе методики эксперимента лежит качественная и количественная сравнительная оценка изображений, получаемых при различных вариантах обработки исходных спектрозональных изображений [2,4,5]. При качественной оценке требуется визуальное сравнение изображений, получаемых при оптическом выделении спектральных потоков и при цифровой обработке соответствующих спектрозональных изображений. В идеале изображение, полученное оптическим выделением спектрального потока в интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$, должно визуально восприниматься одинаково с изображением, полученным путем цифровой обработки пары спектрозональных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в данном интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$.

Для такого однозначного сравнения необходимо при оптическом выделении спектральных потоков использовать в большинстве случаев специальные оптические светофильтры, в частности узкополосные интерференционные фильтры, которые далеко не всегда имеются в распоряжении исследователя. Однако эффективность того или иного метода цифровой обработки пары спектрозональных изображений с перекрывающимися зонами регистрации можно проверить на частном случае и распространить его на общий случай.

Так, в частном случае, для получения рассмотренными выше методами цифровой обработки сигналов синего — B (400-500 нм), зеленого — G (500-600 нм) и красного — R (600-700 нм) участков видимой области спектра можно использовать соответствующие пары спектрозональных изображений: $[U_1$ (ЖС4), U_2 (ЖС18)], $[U_2$ (ЖС18), U_3 (КС11)] и $[U_3$ (КС11), U_4 (КС19)], получаемые в широких зонах регистрации при помощи стандартных цветных стекол, спектральные характеристики которых обеспечивают «отрезание» участков области спектра от 400, 500, 600 и 700 нм (рис.1,2).

Суть качественной оценки эффективности метода цифровой обработки пар спектрозональных изображений с перекрывающимися зонами регистрации в данном случае сводилась к оценке качества цвето-

передачи тестовых объектов по синтезируемому цветному изображению из соответствующих сформированных изображений синего — B (400-500 нм), зеленого — G (500-600 нм) и красного — R (600-700 нм) участков видимой области спектра.

Как известно, каждой длине волны излучения соответствует свой воспринимаемый глазом человека цвет. Несмотря на то, что обратное утверждение о том, что каждому наблюдаемому цвету соответствует излучение строго определенной длины волны, в общем случае не является верным, поскольку существуют, в частности, так называемые, метамерные красители, в данном конкретном случае можно рассчитывать на соответствие цвета визуализируемого объекта выделяемому участку спектра потока излучения.

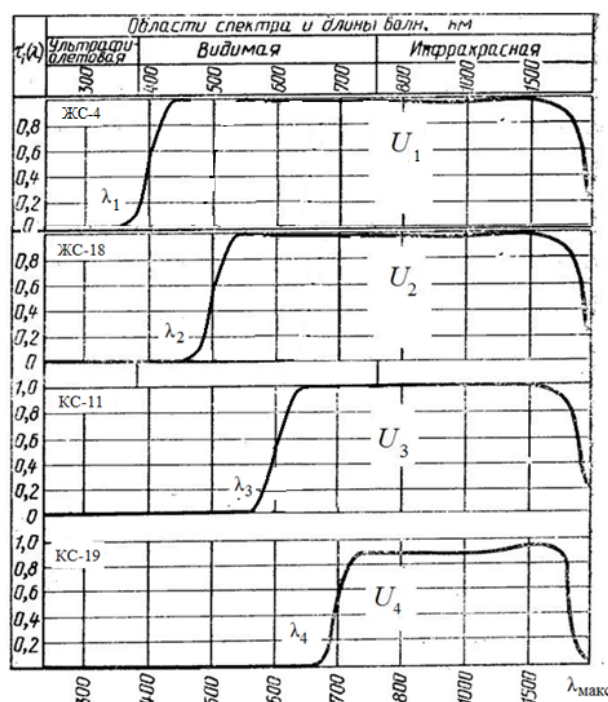


Рис.2. Спектральные характеристики стандартных светофильтров ЖС4, ЖС18, КС11, КС19

На рис.3.1 показаны изображения, RGB компоненты которых сформированы мультипликативным методом из исходных спектрозональных изображений, приведенных на рис.1, при нормировании сигнала с коэффициентом $N = i_{\max}/i_H$, а на рис.3.2 при формировании выходного сигнала по формуле (6) и извлечением корня квадратного. На рис.3.3 показано изображение 3.1 после дополнительной цветовой коррекции (баланс белого).

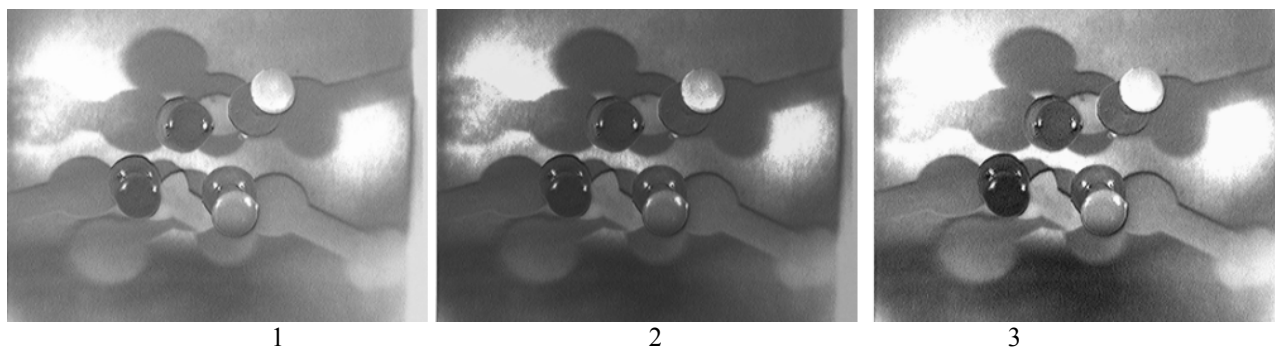


Рис.3. *RGB* изображения: 1 — при формировании спектральных компонент мультипликативным методом с нормировкой, 2 — и при формировании выходного сигнала по формуле (6), 3 — изображение 1 после цветовой коррекции

На рис.4.1 показано изображение, *RGB* компоненты которого сформированы по дифференциальному методу без яркостной коррекции, а на рис.4.2 показано это же изображение после линейной яркостной коррекции с предельными нижним и верхним пороговыми уровнями, 0,4 и 0,6 соответственно, при которых отсутствует ограничение полезного сигнала. На рис.4.3 приведено реальное *RGB* изображение объектов, полученное при помощи цветной телевизионной камеры.

Ниже показаны изображения, *RGB* компоненты которых сформированы комбинированным методом по формуле (7) — рис.5.1, по формуле (9) при $b = 2$ — рис.5.2 и при $b = 3$ — рис.5.3.

Количественная оценка заключалась в определении уровней *RGB* сигналов для участков изображений, соответствующих синему (*B*), зеленому (*G*), красному (*R*), желтому (*Ye*) объектам и белому (*W*) фону и вычислении цветовых коэффициентов r , g и b . Приведенные в табл.1 и 2 результаты были получены при использовании пакета Matlab. Участки изображения выделялись последовательно вручную при использовании стандартной функции выделения фрагмента изображения $f = imcrop$. Для выделенных фрагментов вычислялась средняя яркость и цветовые коэффициенты по формулам: $r = R/(R + G + B)$, $g = G/(R + G + B)$, $b = B/(R + G + B)$, где R , G и B — средние значения яркости в соответствующих каналах красного, зеленого и синего.

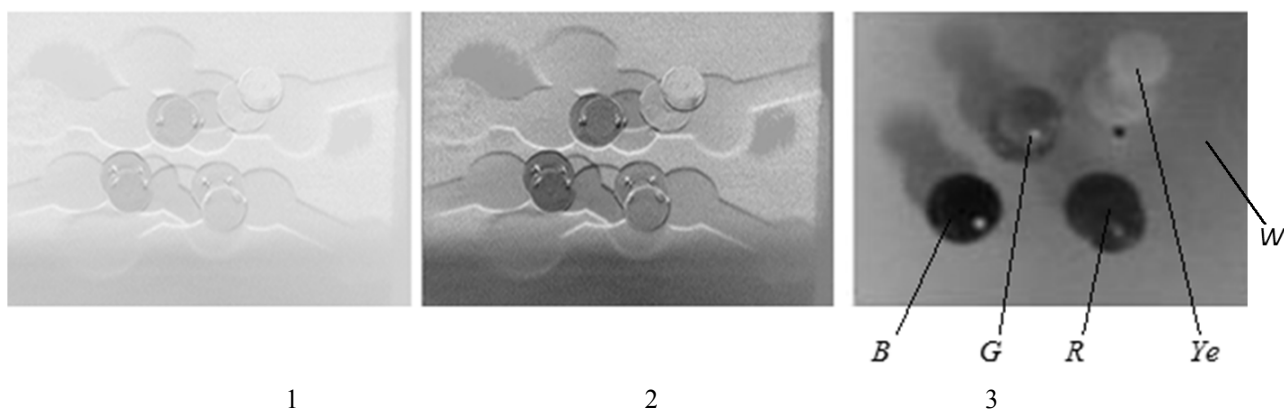


Рис.4. *RGB* изображения: 1 — при формировании спектральных компонент дифференциальным методом без яркостной коррекции, 2 — после линейной яркостной коррекции. 3 — реальное *RGB* изображение объектов

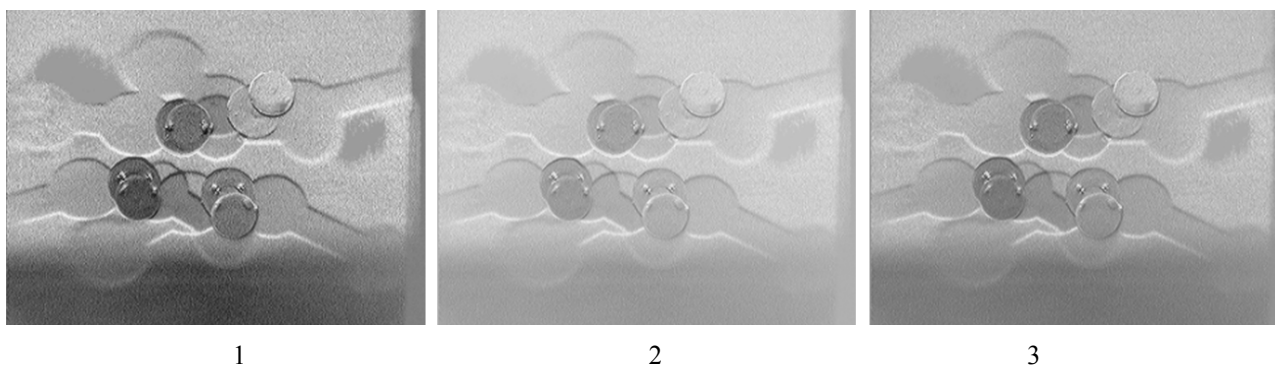


Рис.5. *RGB* изображения при формировании спектральных компонент комбинированным методом: 1 — формула (7), 2 и 3 — формула (9) при $b = 2$ и $b = 3$ соответственно

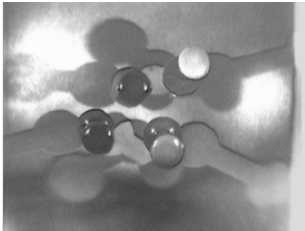
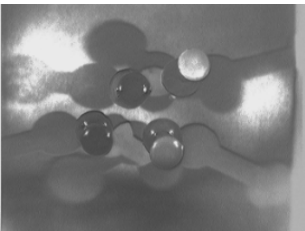
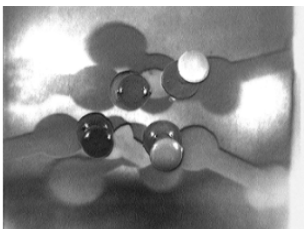
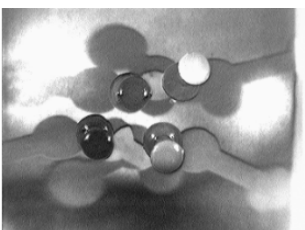
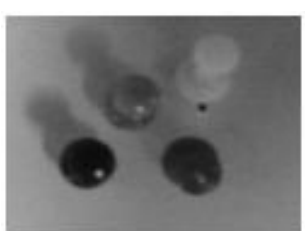
Таблица 1

Значения цветовых коэффициентов на красном — R , зеленом — G , синем — B , желтом — Ye и белом — W участках изображения для дифференциального и комбинированного методов

Метод	Участок	r	g	b	Изображение
Дифф.	R	0,39	0,30	0,31	
ф-ла (3)	G	0,28	0,36	0,36	
	B	0,33	0,33	0,35	
	Ye	0,39	0,32	0,30	
	W	0,39	0,30	0,30	
		r	g	b	
Дифф.	R	0,55	0,18	0,26	
ф-ла (3)	G	0,00	0,52	0,48	
с ярк. корр	B	0,29	0,29	0,42	
	Ye	0,47	0,31	0,22	
	W	0,49	0,26	0,25	
		r	g	b	
Дифф.	R	0,44	0,27	0,30	
в соотв. с (9)	G	0,23	0,39	0,38	
при $b=2$	B	0,32	0,32	0,36	
	Ye	0,41	0,32	0,27	
	W	0,42	0,29	0,29	
		r	g	b	
Дифф.	R	0,49	0,23	0,27	
в соотв. с (9)	G	0,18	0,42	0,40	
при $b=3$	B	0,31	0,31	0,37	
	Ye	0,45	0,31	0,25	
	W	0,46	0,27	0,26	
		r	g	b	
Комбинир.	R	0,58	0,16	0,26	
ф-ла (7)	G	0,00	0,52	0,48	
с нормировкой	B	0,27	0,27	0,45	
	Ye	0,46	0,33	0,21	
	W	0,49	0,26	0,25	

Таблица 2

Значения цветовых коэффициентов на красном, зеленом, синем, желтом и белом участках изображения для мультипликативного метода

		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,43	0,28	0,29	
с нормировкой.	<i>G</i>	0,05	0,49	0,46	
Ф-ла (6)	<i>B</i>	0,31	0,30	0,39	
	<i>Ye</i>	0,32	0,35	0,33	
	<i>W</i>	0,33	0,33	0,33	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,44	0,32	0,25	
по ф-ле (6)	<i>G</i>	0,22	0,46	0,32	
с извлечением	<i>B</i>	0,35	0,37	0,28	
кв. корня	<i>Ye</i>	0,32	0,36	0,32	
	<i>W</i>	0,33	0,34	0,33	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,43	0,27	0,29	
с нормировкой	<i>G</i>	0,00	0,51	0,49	
и ярк. корр.	<i>B</i>	0,00	0,38	0,62	
Ф-ла (6)	<i>Ye</i>	0,32	0,34	0,33	
	<i>W</i>	0,33	0,33	0,33	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Мультипл.	<i>R</i>	0,54	0,27	0,20	
с нормировкой,	<i>G</i>	0,00	0,61	0,39	
ярк. корр.	<i>B</i>	0,00	0,46	0,53	
и балансом	<i>Ye</i>	0,37	0,37	0,26	
белого	<i>W</i>	0,37	0,37	0,27	
		<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>	
Цветное	<i>R</i>	0,79	0,19	0,02	
изображение	<i>G</i>	0,10	0,85	0,05	
	<i>B</i>	0,17	0,22	0,62	
	<i>Ye</i>	0,49	0,50	0,01	
	<i>W</i>	0,36	0,36	0,29	

Как видно из таблиц, наилучшее соответствие значений цветовых коэффициентов достигается при использовании комбинированного метода, а также мультипликативного метода с нормировкой по яркости и дополнительной яркостной коррекцией. Несмотря на то, что хотя полного соответствия цветному изображению, как показывает качественное и количественное сравнение, при рассмотренных выше методах цифровой обработки достичь не удастся, получаемые изображения, тем не менее, несут дополнительную визуальную информацию о выделяемых узких зонах спектра.

Выводы

1. Математические выражения, описывающие сигнальные процессы при дифференциальном, мультипликативном и комбинированном методе цифровой обработки спектральных изображений, подтверждаются экспериментально.
2. При цифровой обработке пары спектральных изображений, полученных в широких перекрывающихся зонах регистрации, наибольшей эффективностью выделения узкой зоны регистрации обладает мультипликативный и комбинированный метод.

References

1. Сагдуллаев Ю.С., Сагдуллаев Т.Ю. К вопросу выбора зон регистрации в спектрозональном телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2011. Вып.2. С.20.
2. Корнышев Н.П., Калитов М.А., Сенин А.С. Исследование метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2018. №1(107). С.62–69.
3. Патент RU 2679921 C1. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А.Калитов, Н.П.Корнышев. Заявл. 28.04.2018. Опубл. 14.02.2019. Бюл.5.
4. Калитов М. А., Корнышев Н. П. Повышение точности метода дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2019. №2(114). С.31–34.
5. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Computer simulation of digital spectral imaging processes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1352. Article number: 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1352/1/012028>
6. Ваниев А.А., Калитов М.А., Корнышев Н.П. Улучшение изображений, полученных методом дифференциальной спектрозональной визуализации // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2019. №4(116). С.9–12.
7. Калитов М.А., Корнышев Н.П. Компьютерное моделирование мультипликативного метода формирования цифровых спектрозональных изображений // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №2 (118). С.76–78.
8. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Computer simulation of the multiplicative method for the formation of digital spectrozonal images // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol.1658. Article number: 012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1658/1/012023>
9. Патент № 2731880 RU, МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / Д.И.Борисов, Н.А.Ерганжиев, М.А.Калитов, Н.П.Корнышев. Заявл. 20.01.2020. Опубл. 08.09.2020. Бюл. №25.
10. Халфин А.М. Основы телевизионной техники. М.: Советское радио, 1955. 580 с.
11. Бронштейн И.А., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 544 с.
12. Вильчинская С.С., Лисицин В.М. Оптические материалы и технологии: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С.12.
13. МПК H04N 7/18. Способ формирования цифровых спектрозональных телевизионных сигналов / М.А.Калитов, Н.П.Корнышев. Заявка №2020138417 от 24.11.2020.
1. Sagdullaev Iu.S., Sagdullaev T.Iu. K voprosu vybora zon registratsii v spektrozonal'nom televidenii [Choice of zones of registration in spectrozonal television]. Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniia, 2011, no. 2, p.20.
2. Kornyshev N.P., Kalitov M.A., Senin A.S. Issledovanie metoda differentsial'noi spektrozonal'noi vizualizatsii [Study of the method of differential spectral visualization]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2018, no. 1(107), p.62–69.
3. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniia tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. 2679921 RU, MPK H04N 7/18, 2019.
4. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Povyshenie tochnosti metoda differentsial'noi spektrozonal'noi vizualizatsii [Accuracy increase of the differential multispectral imaging method]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2019, no. 2(114), pp.31–34.
5. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniia tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. 2679921 RU, MPK H04N 7/18, 2019.
6. Vaniev A.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Uluchshenie izobrazheniy, poluchennykh metodom differentsial'noy spektrozonal'noy vizualizatsii [Accuracy increase of the differential multispectral imaging method]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2019, no. 2(114), pp.31–34.
7. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Komp'yuternoe modelirovanie mul'tiplikativnogo metoda formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Computer simulation of a multiplicative method for generating digital spectral images]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2020, no.2 (118), p.76–78.
8. Kalitov M.A. Kornyshev N.P. Computer simulation of digital spectral imaging processes. Journal of Physics: Conference Series, 2019, ser.1352 012028.
9. Borisov D.I., Erganzhev N.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniia tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. 2731880 RU, MPK H04N 7/18. Application: 20.01.2020 Published: 08.09.2020. Bull. no.25.
10. Khalfin A.M. Osnovy televizionnoy tekhniki [Fundamentals of Television Technology]. Moscow, Sovetskoe radio, 1955, p.86.
11. Bronshteyn, I. A. Spravochnik po matematike [Reference book in mathematics]. Moscow, Nauka, 1986. 544 p.
12. Vi'lchinskaya S.S., Lisitsin V.M. Opticheskie materialy i tekhnologii: uchebnoe posobie [Optical materials and technologies: Textbook]. Tomsk, TPU Publishing, 2011, p. 12.
13. Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Sposob formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [A method of forming a multispectral digital television signals]. Patent RF no. MPK H04N 7/18. Application no. 2020138417 dated 24.11.2020.