

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦВЕТОВЫХ ПРОСТРАНСТВ YC_bC_r , YC_oC_g И YC_oC_g-R В ЗАДАЧЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СИГНАЛАМ ПОЛУТОНОВЫХ ВИДЕОДАТЧИКОВ ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ

И. С. Холопов

*ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»
Рязань, Россия
e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru*

Рассмотрен алгоритм комплексирования полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений в псевдоцветах (ложных цветах) в декоррелированных цветовых пространствах YC_bC_r , YC_oC_g и YC_oC_g-R с последующим приведением гаммы цветов результата к условиям дневного освещения с использованием алгоритма «переноса» цвета. Выполнен сравнительный анализ быстродействия «переноса» цвета при использовании указанных цветовых пространств.

Ключевые слова: цветовые пространства YC_bC_r , YC_oC_g и YC_oC_g-R ; комплексирование изображений; псевдоцвет; алгоритм «переноса» цвета; гистограмма.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF COLOR SPACES YC_bC_r , YC_oC_g AND YC_oC_g-R IN THE PROBLEM OF THE COLOR IMAGE FORMING FROM GRAYSCALE IMAGES OF VISIBLE AND INFRARED VISION SENSORS

I. S. Kholopov

*Ryazan State Radio Engineering University
Ryazan, Russia*

The algorithm of grayscale television and infrared false color image fusion in decorrelated color spaces YC_bC_r , YC_oC_g , and YC_oC_g-R and color transfer to daylight condition is considered. A comparative analysis of color transfer performance for this color spaces is done.

Keywords: color spaces YC_bC_r , YC_oC_g and YC_oC_g-R ; image fusion, false color; color transfer algorithm; histogram.

Для наблюдения объектов в сложных условиях (дым, пыль, туман, осадки, фоновая засветка, низкая освещенность, маскировка и др.) применяют оптико-электронные комплексы, обозначаемые термином «системы “улучшенного видения”» (СУВ), или, в зарубежной литературе, EVS (*Enhanced Vision Systems*). Под термином «улучшение видения» понимают [1] совокупность преобразований, направленных на усиление

контрастности и акцентирование контурного препарата изображения, которые вносят наибольший вклад в выделение объектов в наблюдаемом кадре. Разработка СУВ, как правило, предполагает использование в каналах системы технического зрения (СТЗ) телевизионных (ТВ) датчиков видимого диапазона длин волн (длина волны 380–760 нм) и как минимум одного тепловизионного (ТПВ) датчика: как правило, средневолнового (*Medium Wave Infrared*, MWIR, 3–5 мкм) или длинноволнового LWIR (*Long Wave Infrared*, 8–14 мкм) инфракрасного (ИК) диапазона. Объединение информации от разноспектральных монохромных сенсоров реализуется с помощью алгоритмов комплексирования (или, в зарубежной литературе, слияния «*fusion*»). Результирующее изображение при этом имеет большую информативность, чем изображения от каждого из каналов многоспектральной СТЗ в отдельности.

Если все сенсоры СТЗ являются полутонными, то для повышения информативности результата комплексирования могут применяться алгоритмы комплексирования в псевдоцветах (*false color*) с последующим приведением к гамме естественных цветов (*true color*) [2, 3].

Предполагая, что поля зрения ТВ- и ТПВ-датчиков совмещены, а их кадры приведены к одинаковому разрешению, задача объединения полутонных изображений с формированием цветного результата комплексирования (в псевдоцветах) сводится к выбору функционалов:

$$\begin{aligned} R_F(i, j) &= F_R\{TV(i, j), IR(i, j)\}, \\ G_F(i, j) &= F_G\{TV(i, j), IR(i, j)\}, \\ B_F(i, j) &= F_B\{TV(i, j), IR(i, j)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $TV(i, j)$ и $IR(i, j)$ – яркости пикселей ТВ- и ТПВ-камер соответственно с 2D-координатами (i, j) , а $R_F(i, j)$, $G_F(i, j)$ и $B_F(i, j)$ – соответственно результирующие интенсивности псевдоцвета в каналах R , G и B .

Изображения в псевдоцветах, как показано в [4], затруднительны для восприятия по причине неестественных цветов элементов сцены (небо, водная поверхность, растительность), на фоне которых наблюдаются представляющие интерес объекты.

В [5] показано, что в декоррелированном цветовом пространстве можно выполнить перенос гаммы цветов на изображение в псевдоцветах с изображения-эталона путем замены математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) хроматических компонент:

$$\theta_k(i, j) = [\theta_k(i, j)_s - \mu_s^{\theta_k}] \sigma_t^{\theta_k} / \sigma_s^{\theta_k} + \mu_t^{\theta_k}, \quad (2)$$

где $\theta_k(i, j)$, $k = 1, 2$, – интенсивности цветоразностных компонент пикселя с координатами (i, j) , индексы s и t обозначают соответственно исходное изображение (*source*) и эталон (*target*), а символами μ^{θ_k} и σ^{θ_k} обозначены соответственно математическое ожидание и СКО параметра θ_k , оцениваемые по кадру изображения.

На практике для сокращения вычислительных затрат $\theta_k(i, j)$, $k = 1, 2$ вместо декоррелированного цветового пространства $L\alpha\beta$, применяемого авторами [5], в [2, 6] предложено использовать другие декоррелированные пространства – YUV и YC_bC_r :

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2990 & 0,5870 & 0,1140 \\ -0,1471 & -0,2888 & 0,4359 \\ 0,6148 & -0,5148 & -0,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2990 & 0,5870 & 0,1140 \\ -0,1687 & -0,3313 & 0,5000 \\ 0,5000 & -0,4187 & -0,0813 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (3)$$

с обратными преобразованиями

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,0000 & 1,4020 \\ 1,0000 & -0,3947 & -0,5808 \\ 1,0000 & 2,0325 & 0,0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,0000 & 1,4020 \\ 1,0000 & -0,3441 & -0,7141 \\ 1,0000 & 1,7720 & 0,0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Преимуществом пространства YC_bC_r по сравнению с YUV является упрощение вычисления значений цветоразностных компонент, поскольку умножение на коэффициент 0,5 при операциях в формате с фиксированной точкой эквивалентно арифметическому сдвигу на один разряд вправо.

В алгоритмах сжатия изображений используются также обладающие хорошими декоррелирующими свойствами цветовые пространства YC_oC_g и YUV_I [7, 8]. Данные пространства разработаны для вычисления значений цветоразностных каналов в формате с фиксированной точкой. Прямое и обратное преобразования YC_oC_g имеют вид

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_o \\ C_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \\ -1/4 & 1/2 & -1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ C_o \\ C_g \end{bmatrix}, \quad (6)$$

т. е. требуют для реализации только операций суммирования и арифметического сдвига. Отличием цветового пространства YC_oC_g-R от YC_oC_g является наличие составляющей G в цветоразностном канале C_o вместо канала C_g ; при этом равенство нулю суммы элементов 2-й и 3-й строк матрицы преобразования для расчета цветоразностных каналов сохраняется. Прямое и обратное преобразования YC_oC_g-R имеют вид

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_o \\ C_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1/2 \\ 1 & 0 & 1/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ C_o \\ C_g \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В работе для формирования комплексированного изображения в псевдоцветах (ложных цветах) по (1) применялся функционал [2, 3, 4, 6]:

$$R_f(i, j) = IR(i, j), \quad G_f(i, j) = TV(i, j), \quad B_f(i, j) = TV(i, j). \quad (9)$$

Подстановка (9) в (5) и (7) позволяет получить выражения (10) и (11) для цветоразностных каналов C_o и C_g , комплексированных в псевдоцветах (ложных цветах) изображений для пространств YC_oC_g и YC_oC_g-R соответственно:

$$C_o(i, j) = [IR(i, j) - TV(i, j)] \gg 1, \quad C_g(i, j) = [-TV(i, j)] \gg 1, \quad (10)$$

$$C_o(i, j) = IR(i, j) - TV(i, j), \quad C_g(i, j) = [-IR(i, j)] \gg 1, \quad (11)$$

а подстановка в (3) – приближенные равенства для цветоразностных каналов C_b и C_r :

$$C_b(i, j) \approx [TV(i, j) - IR(i, j)] \gg 2, \quad C_r(i, j) \approx [IR(i, j) - TV(i, j)] \gg 1. \quad (12)$$

Оператор « $\gg$ » в (10)–(12) означает арифметический сдвиг вправо на количество разрядов, указанное справа от него.

Для выполнения сравнительного анализа быстродействия алгоритмов «переноса» цвета по (1) в цветовых пространствах YC_bC_r , YC_oC_g и YUV_r был проведен модельный эксперимент на ПЭВМ (процессор Intel Core-i5 с тактовой частотой 2,8 ГГц, объемом ОЗУ 4 Гб). В эксперименте использовались кадры с ТВ- и ТПВ-датчиков с предварительно совмещенными полями зрения. Размер ТВ-кадра составлял 1024×768 пикселей, ТПВ-кадра (LWIR-диапазон) – 512×384 пикселей (для выравнивания размеров кадров применялась билинейная интерполяция [9]). Для оценки быстродействия исследовались следующие алгоритмы комплексирования в псевдоцветах с последующим «переносом» цвета:

- алгоритм 1 – вычисление цветоразностных каналов $\theta_1 = C_b$ и $\theta_2 = C_r$ в цветовом пространстве YC_bC_r по (12), «перенос» цвета по (2), преобразование $YC_bC_r \rightarrow RGB$ по (4);
- алгоритм 2 – вычисление цветоразностных каналов $\theta_1 = C_o$ и $\theta_2 = C_g$ в цветовом пространстве YC_oC_g по (10), «перенос» цвета по (2), преобразование $YC_oC_g \rightarrow RGB$ по (6);
- алгоритм 3 – вычисление цветоразностных каналов $\theta_1 = C_o$ и $\theta_2 = C_g$ в цветовом пространстве YC_oC_g-R по (11), «перенос» цвета по (2), преобразование $YC_oC_g-R \rightarrow RGB$ по (8).

Для ахроматической компоненты Y выполнялось полутонное комплексирование по методу среднего арифметического [10] с последующим приведением гистограммы [11]. Для «переноса» цвета использовался эмпирически подобранный вектор параметров $\|\mu_t^{01}, \mu_t^{02}, \sigma_t^{01}, \sigma_t^{02}\|^T = \|-10, -12, 20, 35\|^T$ из работы [12] для алгоритма 1 и вектор $\|\mu_t^{01}, \mu_t^{02}, \sigma_t^{01}, \sigma_t^{02}\|^T = \|20, 20, 35, 20\|^T$ для алгоритмов 2 и 3. Скорость обработки для алгоритмов 1–3 сведена в таблицу.

Производительность алгоритмов комплексирования полутонных ТВ- и ТПВ-изображений с формированием цветного результата, кадров/с

Алгоритм	1	2	3
Производительность, кадров/с	8,63	9,76	9,77

Результаты комплексирования в цвете для всех трех алгоритмов приблизительно одинаковы (пример комплексирования с «переносом цвета» в пространстве YC_bC_r приводится в [12]).

Из полученных результатов следует, что алгоритмы 2 и 3 комплексирования полутонных телевизионных и инфракрасных изображений с формированием цветного результата и «переносом» цвета в пространствах YC_oC_g и YC_oC_g-R за счет применения только целочисленной арифметики в обратном преобразовании обеспечивают быстро-

действие в среднем на 10 % большее, чем алгоритмы комплексирования с «переносом» цвета в пространстве YC_bC_r .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Технологии систем улучшенного/синтезированного зрения для управления летательными аппаратами / Л. Н. Костяшкин [и др.] // Тр. науч.-техн. конф.-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010» / под ред. Р. Р. Назирова. М. : Механика, управление и информатика, 2011. С. 45–56.
2. Image Fusion and Its Applications / ed. by Y. Zheng. Rijeka : InTech, 2011.
3. Toet A., Hogervorst M. A. Progress in Color Night Vision // Optical Engineering. 2012. Vol. 51(1). P. 1–19.
4. Toet A., Hogervorst M. A. Portable Real-Time Color Night Vision // Multisensor, Multi-source Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications. The Int. Society for Optical Engineering. Bellingham, WA, USA, 2008. P. 706–713.
5. Color transfer between images / E. Reinhard [et al.] // IEEE Computer Graphics and Applications. 2001. Vol. 21. P. 34–41.
6. Color night vision based on color transfer in YUV color space / S. Shi [et al.] // Proc. of the SPIE. 2008. Vol. 6623. P. 66230B.
7. Colour space transforms for improved video compression / Y. Wang [et al.] // Proc. of IWS-SIP 2014. P. 219–222.
8. Strutz T., Leinertz A. Reversible Colour Spaces without Increased Bit Depth and Their Adaptive Selection // IEEE Signal Processing Letters. 2015. Vol. 22(9). P. 1269–1273.
9. Parker J. A., Kenyon R. V., Troxel D. E. Comparison of interpolating methods for image resampling // IEEE Trans. on Medical Imaging. 1983. Vol. 2(1). P. 31–39.
10. Das S., Krebs W. K. Sensor fusion of multi-spectral imagery // Institution of Electrical Engineers: Electronics Letters. 2000. № 36. P. 1115–1116.
11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2006.
12. Богданов А. П., Павлов О. В., Холопов И. С. Алгоритмы комплексирования в ложных цветах и акцентирование цветом при объединении информации от монохромных многоспектральных видеодатчиков систем технического зрения // Техническое зрение. 2014. Вып. 2. С. 49–54.