

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ
НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЦВЕТНОСТИ В ДИСТАНЦИОННОЙ
КОЛОРИМЕТРИИ**

© 2012 г. А. Ш. Мехтиев¹, Х. Г. Асадов^{2*}, Л. Р. Бекирова¹

¹ Национальная Академия авиации, Баку

² Национальное аэрокосмическое агентство, Баку

E-mail: asadzade@rambler.ru

Поступила в редакцию 20.12.2011 г.

Теоретически обоснована возможность осуществления аппаратурной коррекции искажений цветности, вызванных влиянием атмосферного аэрозоля. Предложены три способа аппаратурной коррекции искажений цветности, вызванных влиянием атмосферного аэрозоля. Изложены различные варианты реализации предложенных способов коррекции.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, колориметрия, оптическая толщина, спектр, мутность

Хорошо известно, что RGB-колориметрия основывается на таком экспериментально установленном факте, как существование определенных функций $\varphi_1(\lambda)$, $\varphi_2(\lambda)$ и $\varphi_3(\lambda)$, называемых “tristimulus values”, которые, образуя линейную свертку с произведением $E(\lambda)\gamma(\lambda)$, $i = 1, 3$, где $E(\lambda)$ – спектральная характеристика света; $\gamma(\lambda)$ – функция спектрального отражения объекта в виде

$$\Phi = \int_{380}^{760} [E(\lambda)\gamma(\lambda)\varphi_1(\lambda) + E(\lambda)\gamma(\lambda)\varphi_2(\lambda) + E(\lambda)\gamma(\lambda)\varphi_3(\lambda)]d\lambda,$$

способны создать в зрительном восприятии человека ощущения, эквивалентные наблюдению практически любого спектрального цвета. При этом функции $\varphi_1(\lambda)$, $\varphi_2(\lambda)$ и $\varphi_3(\lambda)$ и имеют строго определенную форму (рис. 1), установленную эмпирическим путем (Безродный, 2011). Изложенное выше положение составляет основу колориметрии – науки об измерении цветов.

Известны многочисленные практические примеры использования RGB-колориметрии в дистанционном зондировании (ДЗ) различных цветных объектов. Сюда можно отнести следующие актуальные задачи ДЗ:

- определение состояния растительности путем определения ее цвета;
- определение цвета воды в различных водоемах и в береговых зонах;
- определение цвета почвы и т.д.

Одной из важнейших задач колориметрического ДЗ с борта носителя является правильный

учет и коррекция влияния атмосферного аэрозоля на результат цветового измерения и воспроизведения. Так, согласно теории переноса радиации при авиационном ДЗ, отраженный от объекта оптический сигнал на входе бортового спектрометра (рис. 2) вычисляется по следующей формуле (Vermette et al., 2011):

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v, z) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v) + \frac{\rho_t}{1 - S(z)\rho_t} T(\theta_v, z) T(\theta_s, z), \quad (1)$$

где $\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi_s - \varphi_v, z)$ – отраженный от объекта и принятый бортовым спектрометрическим сигналом; θ_s – зенитный угол Солнца; θ_v – зенитный угол направления наблюдения; φ_v – угол азимута направления наблюдения; φ_s – угол азимута Солнца; ρ_t – отражаемость объекта; S – сферическое альbedo атмосферы; ρ_a – радиация на входе спектрометра, обусловленная свечением атмосферы (path radiance); $T(\theta_v)$ – пропускание атмосферы от объекта до сенсора; $T(\theta_v) = e^{-\tau_v/\mu_v} + t_d(\theta_v)$; $t_d(\theta_v)$ – пропускание диффузной радиации на пути объект–сенсор; τ_v – оптическая толщина атмосферы от объекта до сенсора; $T(\theta_s) = e^{-\tau_s/\mu_s} + t_d(\theta_s)$; $t_d(\theta_s)$ – пропускание атмосферы на пути объект–Солнце; τ_s – оптическая толщина атмосферы на пути объект–Солнце; μ_s , μ_v – параметры, определяемые как $\cos\theta$, где θ – зенитный угол падающего луча.

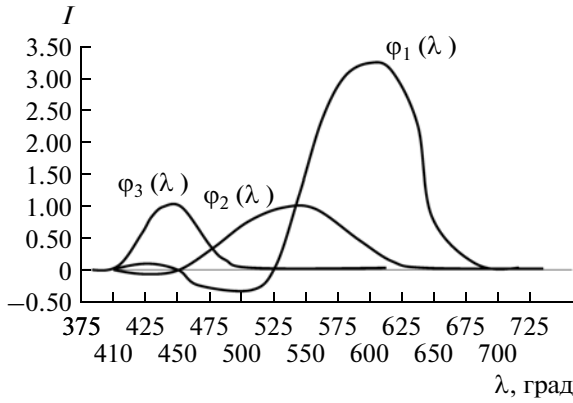


Рис. 1. Общий вид эмпирических функций $\varphi_1(\lambda)$, $\varphi_2(\lambda)$ и $\varphi_3(\lambda)$.

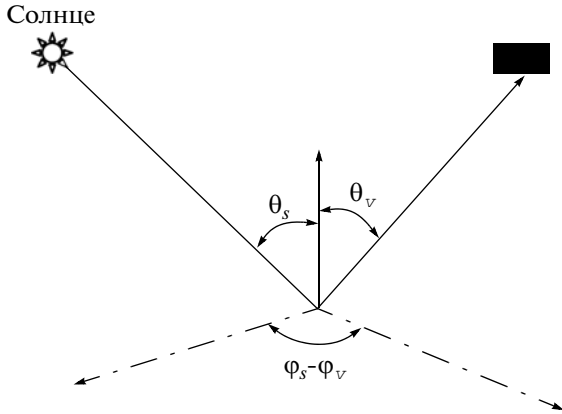


Рис. 2. Схематическое представление параметров и лучей при авиационном зондировании объектов на отражение.

Далее будем считать, что составляющая, характеризующая свечение атмосферы, устраняется методом компенсации, с использованием для этого метода темного объекта.

Далее, для упрощения анализа приняв $\varphi_s - \varphi_x = 180^\circ$, $z = \text{const}$,

$$t_d(\theta_s) = t_d(\theta_v) = 0,$$

$$\frac{\rho_t}{1 - S(z)\rho_t} = \chi = \text{const},$$

выражение (1) можем записать как

$$\rho^* = \chi \left[e^{-\tau_s/\mu_s} e^{-\tau_v/\mu_v} \right] = \chi e^{-\left[\frac{\tau_s}{\mu_s} + \frac{\tau_v}{\mu_v} \right]}. \quad (2)$$

Таким образом, если принять, что на рассматриваемых длинах волн отсутствуют линии поглощений атмосферных газов, а также допустить гомогенность атмосферы, то формула (2), с учетом

$\tau_s = \tau_a$, где τ_a – оптическая толщина атмосферы, приобретает следующий вид:

$$\rho^* = \chi e^{-\tau_a \left[\frac{1+z}{\mu_s z_{ekv}\mu_v} \right]}, \quad (3)$$

где z – высота полета носителя; z_{ekv} – эквивалентная высота атмосферы.

Формула (3) в целях RGB-колориметрии может быть записана отдельно для соответствующих монохроматических цветов

$$\rho_R = \chi e^{-\tau_a(\lambda_R) \left[\frac{1+z}{\mu_s z_{ekv}\mu_v} \right]},$$

$$\rho_G = \chi e^{-\tau_a(\lambda_G) \left[\frac{1+z}{\mu_s z_{ekv}\mu_v} \right]},$$

$$\rho_B = \chi e^{-\tau_a(\lambda_B) \left[\frac{1+z}{\mu_s z_{ekv}\mu_v} \right]}.$$

Таким образом, для устранения искажений цветов R, G, B, вследствие зависимости τ_a от λ , могут быть предложены следующие способы компенсации:

1) способ изменения μ_s для компенсации искажения цветности. Для конкретности рассмотрим обобщенный канал цветности с длиной волны λ . Должно быть выполнено условие

$$\tau_a(\lambda) \left[\frac{1+z}{\mu_s z_{ekv}\mu_v} \right] = \text{const}. \quad (4)$$

Согласно формуле Ангрстрема,

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (5)$$

где β – аэрозольная мутность атмосферы; α – параметр Ангрстрема.

С учетом (4) и (5), получаем условие изменения μ_s – для компенсации погрешности цвета

$$\frac{1}{\mu_s} = \frac{\text{const} \lambda^\alpha}{\beta} - \frac{z}{z_{ekv}\mu_v}, \quad (6)$$

или

$$\mu_s = \frac{\beta z_{ekv}\mu_v}{\text{const} \lambda^\alpha z_{ekv}\mu_v - \beta z}. \quad (7)$$

Таким образом, с учетом $\mu_s = \cos \theta_s$, получим

$$\theta_s = \arccos \left[\frac{\beta z_{ekv}\mu_v}{\text{const} \lambda^\alpha z_{ekv}\mu_v - \beta z} \right].$$

Следовательно, на длинах волн $\lambda = \lambda_R$, $\lambda = \lambda_G$ или $\lambda = \lambda_B$ для компенсации аэрозольной погрешности цветности зенитные углы Солнца должны быть выбраны по формуле (7), т.е. в рассматриваемом способе компенсации необходимо осуществить три последовательных полета над объектом и соответственно вести съемку на выбранной длине волны λ_R , λ_G или λ_B ;

2) способ изменения z для компенсации искажений цветности. Из выражения (6) имеем

$$z = z_{ekv} \mu_v \left[\frac{\text{const} \lambda^\alpha}{\beta} - \frac{1}{\mu_s} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, задаваясь длинами волн $\lambda = \lambda_R$, $\lambda = \lambda_G$ и $\lambda = \lambda_B$, по формуле (8) можно вычислить необходимые высоты осуществления монохроматической спектральной съемки объекта;

3) способ изменения параметра μ_v для компенсации искажений цветности. Из выражения (6) имеем

$$\frac{z}{z_{ekv} \mu_v} = \frac{\text{const} \lambda^\alpha}{\beta} - \frac{1}{\mu_s}. \quad (9)$$

Из выражения (9) окончательно получаем

$$\mu_v = \frac{\beta \mu_s z}{(\mu_s \text{const} \lambda^\alpha - \beta) z_{ekv}}.$$

Таким образом, при длинах волн $\lambda = \lambda_R$, $\lambda = \lambda_G$ и $\lambda = \lambda_B$ можно вычислить значения μ_{vR} , μ_{vG} и μ_{vB} . Технически компенсация искажений цветности из-за влияния аэрозоля может быть реализована в следующих вариантах:

А) реализация различных по значению μ_{vR} , μ_{vG} и μ_{vB} на одном носителе (рис. 3) путем установки трех спектрометров с разными углами обзора. Очевидно, что в этом случае результаты монохромной цветной съемки оказываются пространственно смещенными и их на этапе предобработки требуется совмещать;

Б) реализация μ_{vR} , μ_{vG} и μ_{vB} последовательно во времени, путем установки на носителе спектрометра с регулируемым углом обзора. При этом носитель должен трижды пролетать над изучаемой местностью. И в этом случае на этапе предобработки следует решить вопрос о совмещении полученных монохроматических снимков.

Следует отметить, что все изложенные выше способы аппаратной коррекции искажения цветности требуют оперативного проведения измерения оптической толщины атмосферного аэрозоля. Эти измерения могут быть осуществлены с помощью наземных солнечных фотометров, например, типа CIMEL или портативными переносными приборами типа MICROTOSPS фирмы Solar Com.

При этом необходимо учесть неоспоримое преимущество аппаратных методов реализации коррекции над вычислительными методами вне-

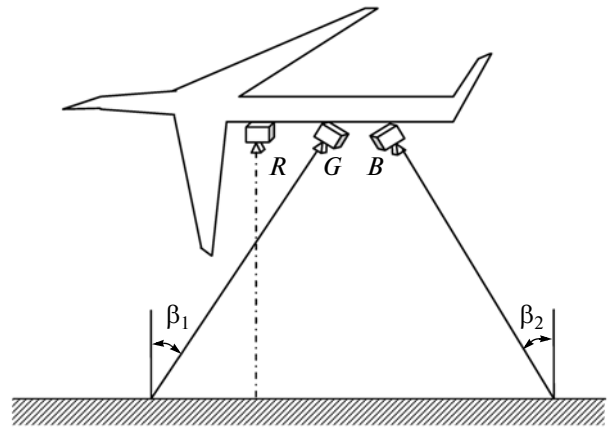


Рис. 3. Вариант реализации RGB-камер на носителе с разными зенитными углами обзора.

сения корректировочных поправок, заключающиеся в возможности физического моделирования оптимальных режимов коррекции в ситуациях, не предусмотренных в базовых математических моделях основных искажающих факторов цветности. Например, в случае отклонений от формулы Ангстрема (5) исключается необходимость нахождения более точного математического выражения зависимости $\tau_a(\lambda)$ от β и α , и вся коррекция сводится к опытному определению основных корректирующих параметров (высоты полета, зенитного угла, и т.д.) по критерию максимально правдоподобного воспроизведения цветности.

В целях подтверждения влияния атмосферного аэрозоля на энергораспределение спектрального состава солнечного излучения и выявления возможности введения корректирующих мер по регулированию цветности были проведены следующие модельно-экспериментальные исследования:

1) в качестве базового положения была принята прямо пропорциональная зависимость оптической толщины атмосферного аэрозоля от скорости ветра (Smith et al., 1993). Измерения скорости ветра проводились анеморумбометром МБЗМ-1 производства ОАО «Сафоновский завод Гидрометприбор»;

2) в течение трех безоблачных дней проводились измерения скорости ветра в разные часы дня с 9:00 до 15:00 местного времени;

3) в указанные выше часы проводились измерения интегральной радиации Солнца в диапазоне длин волн 400 нм–1.5 мкм. Измерения проводились с помощью лабораторного макета пиранометра, разработанного в НИИ Аэрокосмической информатики, г. Баку;

4) в указанные выше часы также проводились узкоспектральные фотометрические измерения в

Значения K_{ij}

Часы	Дни		
	1	2	3
9:00	0.10	0.12	0.12
10:00	0.12	0.11	0.14
11:00	0.15	0.12	0.16
12:00	0.14	0.11	0.17
13:00	0.90	то же	0.12
14:00	0.15	0.14	0.15
15:00	0.16	0.15	0.13

диапазоне длин волн 500–560 нм, соответствующем зеленому цветовому участку солнечного спектра. Измерения проводились с помощью лабораторного макета спектра солнечного фотометра, также разработанного в НИИ Аэрокосмической информатики.

Обработка и анализ результатов проведенных измерений осуществлялись в следующем порядке:

1) вычислялись коэффициенты отношения измеренных величин

$$K_{i,j} = \frac{aI_{f_{i,j}}}{I_{p_{i,j}}}; \quad i = \overline{1,7}; \quad j = \overline{1,3},$$

где I_f — сигнал на выходе фотометра; I_p — сигнал на выходе пиранометра; a — масштабный коэффициент. Вычисляемые значения $K_{i,j}$ приведены в таблице;

2) строились графики изменения измеренных значений скорости ветра во времени (рис. 4).

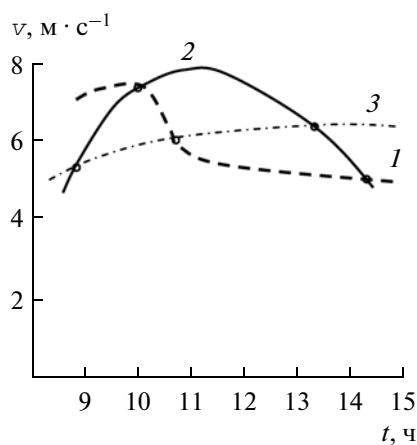


Рис. 4. Кривые зависимости $v = f(t)$, снятые в течение трех дней. Нумерация на кривых соответствует порядковому номеру дня проведенных измерений.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, имеются несколько точек пересечения кривых, координаты которых на оси абсцисс обозначены как $t_l, l = \overline{1,5}$.

Исходя из предположения стабильности фоновой аэрозольной обстановки в первом приближении линейной зависимости оптической толщины аэрозоля от скорости ветра, можно заключить, что в точках $t_l, l = \overline{1,5}$ значения коэффициентов $K_{i,j}$ должны быть максимально схожими. Если посмотреть на таблицу, то можно увидеть, что в точках $t_l, l = \overline{1,5}$ значения коэффициентов $K_{i,j}$ мало отличаются друг от друга. С другой стороны, линейная зависимость параметров μ_s и β согласно формуле (10) наводит на мысль о том, что в восходящей ветви кривой 2 (рис. 4) до полудня, когда наблюдался рост как скорости ветра, так и параметра μ , значения $K_{i,j}$ должны быть намного более стабильными, чем в спадающей ветви. Эта закономерность также наблюдается в результатах, приведенных в таблице. Таким образом, изложенное выше косвенно подтверждает возможность исключения явления аэрозольного метамеризма путем использования восходящей ветви функции $v = f(t)$ до полудня для проведения калориметрических измерений.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

Теоретически обоснована возможность осуществления аппаратной коррекции искажений цветности, вызванных влиянием атмосферного аэрозоля.

Предложены три способа аппаратной коррекции искажений цветности, вызванных влиянием атмосферного аэрозоля. Изложены различные варианты реализации предложенных способов коррекции.

Проведенные модельно-экспериментальные исследования подтвердили возможность устранения аэрозольного метамеризма аппаратными способами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безрядин С.Н. Введение в цветовые пространства. Пространство // Human Color. <http://www.zenitcamera.com/articles/colour/human-colour-space.html>

Smith M.H., Park P.M., Consterdine I.E. Marine aerosol concentrations and estimated fluxes over the sea // Q. J. R. Meteorol. Sci. 1993. V. 115. P. 383–395.

Vermote E., Tanre D., Deuse J.L., Herman M., Morcrette J.J., Kotchenova S.Y. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum Vector (bSV) // 6s.ltdri.org/S_code2_thiner_stuff/6S_Manual_Part_1.pdf

Estimation for Apparatus Correction of Atmospheric Aerosol Effect on Color Representation in Remote Colorimetry

A. Sh. Mehtiyev¹, H. H. Asadov², L. R. Bekirova¹

¹ National Aviation Academy, Baku

² Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku

The possibility of carrying out of apparatus correction of color distortions caused by effect of atmospheric aerosol is theoretically grounded. Three methods of apparatus correction of color distortions caused by atmospheric aerosol are suggested. The various variants for realization of suggested methods are described.

Keywords: atmosphere, aerosol, colorimetry, optical depth, spectrum, turbidity