

# 基于光谱可调积分球光源的多光谱相机颜色校正研究

项金蓉<sup>1,2</sup> 任建伟<sup>1</sup> 刘洪兴<sup>1</sup> 李宪圣<sup>1</sup> 万志<sup>1</sup> 刘则洵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 多光谱遥感器彩色图像合成是直接提取多光谱图像中 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 波段合成,由于多光谱成像探测器光谱响应特性与国际照明委员会(CIE)颜色匹配函数严重不匹配,合成的彩色图像出现严重的颜色失真,需进行颜色校正。针对目前传统的白平衡法和色度学合成法的不足,提出了基于发光二极管(LED)光谱可调积分球光源的多光谱相机多点改进型色度合成校正方法。该方法既考虑了地物的光谱特性而且实现简单。实验表明,采用白平衡法校正,目标色品误差最大为0.15,而采用该方法能够将目标色品误差限制在0.05以内。

**关键词** 遥感; 颜色校正; 色度学; 发光二极管; 光谱可调谐

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.013301

## Research on Color Correction of Multi-Spectral Camera Based on Spectral Tunable Integrating Sphere

Xiang Jinrong<sup>1,2</sup> Ren Jianwei<sup>1</sup> Liu Hongxing<sup>1</sup> Li Xiansheng<sup>1</sup> Wan Zhi<sup>1</sup> Liu Zexun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Multi spectral remote sensor image synthesis is directly extracted from  $R$ ,  $G$ ,  $B$  bands of the multispectral images. Because of the mismatch between the spectral response characteristics of multi spectral imaging detector and international commission on illumination (CIE) color matching functions, color images appear serious color distortion. In order to correct the color distortion, color correction is needed. Aiming at the shortcoming of traditional white balance method and color synthesis method, improved multi point color synthesis method based on spectral tunable light emitting diode (LED) integrating sphere is proposed. This method not only contains the spectral features of the objects but also is easy to realize. It is proved that the color chromaticity error of the target can reach 0.15 corrected by white balance. However the color chromaticity error of the target can be limited less than 0.05 when the method is used to correct the color distortion.

**Key words** remote sensing; color correction; chroma; light emitting diode; spectrally tunable

**OCIS codes** 330.1710; 330.1730; 350.4600; 350.5610

## 1 引言

近年来,全球对资源和环境认识的要求有了进一步加深,在遥感信息领域人们不仅要求提高遥感图像空间分辨率,还对遥感图像光谱分辨率提出了新的要求<sup>[1-2]</sup>。随着科学技术和图像处理技术的发展,多光谱乃至高光谱遥感图像被广泛应用于各领域,例如在地质上用于探矿、地质结构分析、岩性识别与分类等;在农

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-08-06; 网络出版日期: 2014-12-12

基金项目: 国家 863 计划(86325113B)

作者简介: 项金蓉(1987—),女,硕士研究生,主要从事光学遥感,光学辐射等方面的研究。E-mail: hitxjr1105@126.com

导师简介: 任建伟(1956—),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事光学遥感辐射校正、光谱/辐射测试设备开发研制等方面的研究。E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn

业方面主要用于地质分类、农作物分类与估产等;在军事方面主要用于目标识别等。然而,人的视觉系统具有颜色恒常性,能从某些变化的光照环境和成像条件下获取物体表面颜色的不变特征<sup>[3]</sup>。但多光谱遥感器不具有这种调节功能,不同的光照环境,将会导致采集图像的颜色与物体真实颜色之间存在一定程度的偏差。寻求合适的颜色校正方法对多光谱图像进行预处理是获得与物体真实颜色相一致的彩色图像的关键步骤,因此研究颜色校正方法具有重要意义。

针对多光谱图像颜色失真现象,目前最常用的方法有传统白平衡法和基于色度学原理彩色合成法以及在传统白平衡法衍生出来的一系列算法,例如基于灰度世界模型自动白平衡方法和基于标准白板的颜色校正方法等<sup>[4-6]</sup>。传统的白平衡方法实现起来方便,运算速度快但是对于色彩单一的图像,颜色偏差较大;基于色度学合成法适用的前提条件是获得所有地物的光谱反射率,地物光谱反射率数据的获取限制了这种方法的使用,并且色度学合成法计算量大;基于灰度世界模型自动白平衡方法和基于标准白板的颜色校正方法也都是脱离地物的光谱特性的颜色校正方法,仅仅适用于对颜色要求不高的场合。

本文利用光谱可调积分球光源能够产生任意形状的地物光谱分布,提出了一种基于色度学原理的多点颜色校正方法。该方法将国际照明委员会(CIE)色品图划分为几个区域,每一色品区域选用一种基准地物利用色度学原理计算获得校正系数,用得到的校正系数对区域中其他色品对应的地物进行颜色校正,理论数值模拟分析比较了利用本方法和传统的白平衡方法的校正结果。

## 2 光谱可调积分球光源

在人们日常生活中,光的辐射特性、光度特性以及颜色特性起着重要作用。光源的光谱分布决定光源的特性,随着科学技术的发展和进步,在一些领域光谱分布单一光源已经不能满足应用需求,为此国内外的一些研究机构提出研制光谱可调光源。英国的国家物理实验室(NPL)曾设计了由溴钨灯、准直系统、分光系统和空间滤波器组成的光谱分布可调谐的光源系统,该系统结构复杂、产生的光谱形状有限且辐射能量低,难以用于工程实践<sup>[7]</sup>。随着发光二极管(LED)技术的发展,特别是大功率蓝光和白光LED的出现,LED光源得到广泛应用,研究者开始提出研制基于LED的光谱可调光源,例如美国标准与技术研究所(NIST)设计的基于LED的光谱可调积分球光源(STIS)<sup>[8]</sup>。在国内安徽光学精密机械研究所、长春光学精密机械研究所以及台湾国立中央大学等研究机构也做了类似的研究<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1 光谱可调积分球光源结构

光谱可调积分球光源具体结构如图1主要包括4个模块:积分球模块、电源模块、监测模块、主控计算机模块。其中积分球包括基底光源和Epitex公司的一定数量覆盖380~900 nm波段的LED光源;驱动电源模块包括LED驱动电源和基底光源程控电源;监测模块采用的是美国海洋光学公司的HR2000+高分辨率光纤光谱仪。

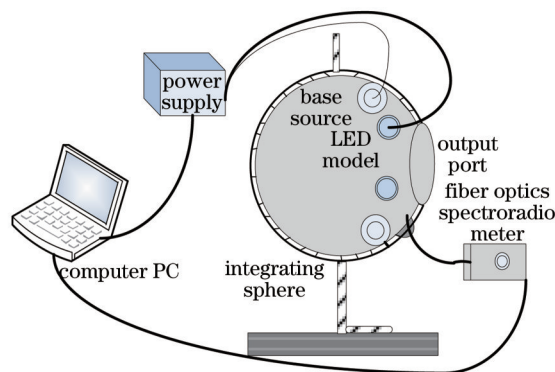


图1 光谱可调积分球光源结构图

Fig.1 System structure of spectrally tunable integrating sphere

工作原理如下:积分球是较为理想的朗伯光源并能实现基底光源和LED光源充分混光。通过调节可变光阑控制基底光源的发光亮度,调节每种LED光源点亮个数或者驱动电流控制LED发光亮度,基底光源和LED光源相结合共同调节光谱可调积分球光源开口处的光能量分布。主控计算机中包含了来自美国地质

调查局(USGS)光谱数据库<sup>[11]</sup>中 1000 余种地物光谱,可以随意选取任何种类的地物光谱,根据选取的目标地物光谱数据依照光谱匹配算法计算可变光阑调节系数和每种 LED 点亮个数或驱动电流。光纤光谱仪实时监测开口处的光能量分布并将光能量数据反馈到主控计算机,主控计算机进而通过优化算法优化可变光阑调节系数和 LED 组合并发送调节指令逐渐优化匹配效果,从而实现较高的光谱匹配精度。

## 2.2 光谱分布可调积分球光源模拟典型地物光谱

光谱分布可调光源模拟典型地物光谱的过程:即利用光谱匹配技术寻找与地物光谱最为匹配时所对应的 LED 光源组合以及其各自的驱动电流或者点亮个数。光谱匹配技术最终转化为解决优化组合问题,本文介绍的光谱可调光源采用最小二乘法 and 遗传算法相结合的方法作为光谱匹配优化算法,采用平均光谱匹配误差函数  $\chi$  衡量光谱匹配误差,平均光谱匹配误差函数是综合评价光谱匹配精度的物理量,实际反映的是辐射能量的差异。如(1)式所示,其中  $k_i'$  为 LED 的个数,  $S_{LED_i}(\lambda)$  为 LED 的光谱分布,  $S_{base}(\lambda)$  为基底光源光谱分布,  $S_{target}(\lambda)$  为目标光谱的光谱分布。

$$\chi = \frac{\sum_{\lambda} \left| \sum_{i=1}^n k_i' S_{LED_i}(\lambda) + S_{base}(\lambda) - S_{target}(\lambda) \right|}{\sum_{\lambda} S_{target}(\lambda)} \times 100\% . \quad (1)$$

光谱分布可调积分球光源模拟几种典型的地物光谱分布结果如图 2 所示,平均光谱匹配误差如表 1 所示,由图 2 和表 1 可以看出光谱可调光源模拟地物光谱输出光谱基本上和目标光谱重合,平均光谱匹配误差小于 10%,能应用于工程需要。

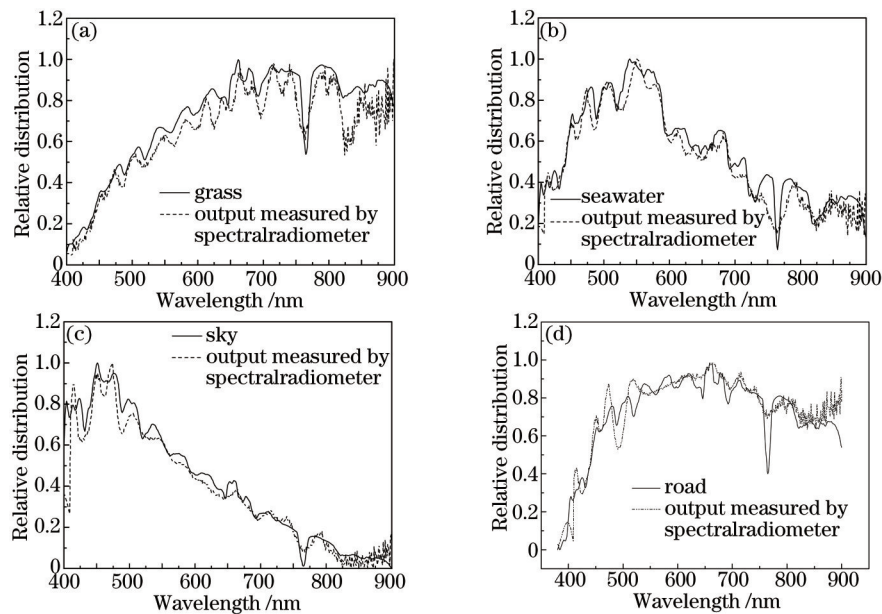


图 2 光谱可调积分球光源模拟 4 种地物光谱结果

Fig.2 Four kinds of typical ground scenery spectral distribution (solid line) and spectral distribution (dashed line) produced by spectrally tunable integrating sphere

表 1 光谱可调积分球光源模拟地物光谱平均光谱匹配误差

Table 1 Average spectral matching error of three kinds of typical ground scenery produced by simulator

Spectral matching result	Average spectral matching error /%
Grass	6.68
Seawater	9.12
Sky	9.19
Road	6.16

### 3 基于色度学多光谱相机颜色校正原理

获得与真实物体颜色相一致的多光谱图像,需要对多光谱图像进行预处理,通常情况下,采用白平衡方法获得各波段的校正系数,力求多光谱图像反映物体的真实色彩,但实验结果表明,采用白平衡方法,往往会造成较大的彩色失真现象,难以满足应用要求。

#### 3.1 色度学颜色校正原理

CIE 色度系统采用三刺激值定量描述颜色,地物的颜色由地物所处的环境光源的色温、地物表面的反射特性和人眼的光谱灵敏度共同决定的,通过(2)式可以定量地计算地物的颜色三刺激值<sup>[12]</sup>。传统的白平衡方法,即采用和太阳光谱比较接近的 D65 光源对多光谱相机进行颜色校正,这种校正方法对于色品图上偏离 D65 光源的较远的地物,颜色校正偏差较大。并且多光谱遥感器各波段的相对光谱响应[如图 3(a)所示]与 CIE 规定的标准颜色匹配函数[如图 3(b)所示]明显不匹配,地物反射光谱与 D65 光源光谱不匹配时,也会严重影响颜色校正效果。在多种因素的影响下,采用一点白平衡校正,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  最大能达到 0.15。

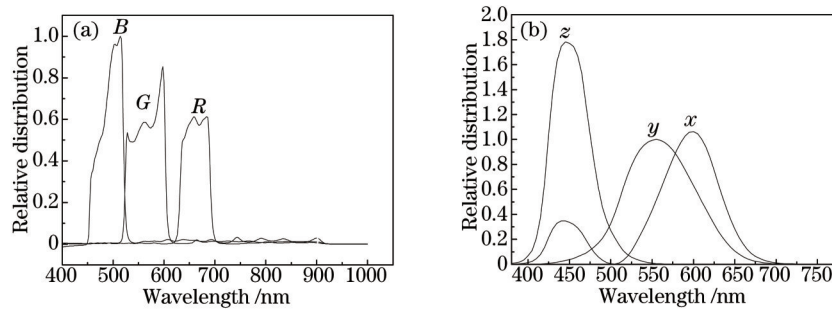


图3 多光谱相机各通道相对光谱响应度和 CIE 标准颜色匹配函数

Fig.3 Relative spectral responsivity of multi spectral camera and CIE standard color matching functions

$$\begin{cases} X = k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $k$  为归一化系数,多光谱相机接收的地物光谱基本上都是地物反射的太阳光谱,因此  $\varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \rho(\lambda)$ ,  $\rho(\lambda)$  为物体的光谱反射比,  $S(\lambda)$  为太阳的相对光谱功率分布,  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  为 CIE1931 标准色度系统颜色匹配函数。

多光谱相机各波段灰度值代表的是入瞳处辐亮度与对应波段多光谱相机光谱响应曲线的卷积结果,通过(3)式可计算各波段的像素值,由于多光谱相机  $R$ 、 $G$ 、 $B$  各波段光谱响应曲线不匹配,因此多光谱相机各波段的像素值与地物光谱辐射量在颜色匹配函数上的积分结果是不一致的。

$$\begin{cases} P_R = \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ P_G = \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ P_B = \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \rho(\lambda)$ ,  $\rho(\lambda)$  为物体的光谱反射比,  $S(\lambda)$  为太阳的相对光谱功率分布,  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  分别为多光谱相机  $R$ 、 $G$ 、 $B$  各波段的光谱响应度。

对于某一地物如果知道其光谱反射率,则可以利用(2)式和(3)式计算出  $R$ 、 $G$ 、 $B$  各波段的颜色校正系数  $k_R$ 、 $k_G$ 、 $k_B$ ;传统的基于色度学颜色校正方法需要知道每一种地物的光谱反射率才能对地物颜色进行精确校正,由于无法获得地物光谱反射率限制了该方法的使用。

$$\begin{cases} k_R = \frac{X}{P_R} \\ k_G = \frac{Y}{P_G} \\ k_B = \frac{Z}{P_B} \end{cases}, \quad (4)$$



### 3.2 基于色度学原理多点颜色校正

在传统的颜色校正的方法基础上采用多点颜色校正法,多点颜色校正法就是按照 CIE 标准色品图,对于色品图上不同的区域采用选取不同的基准光谱获得不同的颜色校正系数,多点颜色校正法主要步骤如下:

1) 利用光谱可调积分球光源模拟数据库中的光谱对多光谱相机定标,光谱辐射计记录每种光谱的颜色三刺激值,根据多光谱相机每一波段的数码输出值和光谱辐射计记录的颜色三刺激值,利用(4)式可以精确计算每一种地物的精确的颜色校正系数;

2) 采用光谱可调光源对多光谱相机进行标定,得出每一种地物各通道数字值比例,建立数据表,在图像颜色校正时可根据数字图像输出比例,确定地物的色品;

3) 根据其在色品图中的位置选择合适的颜色校正系数。

### 3.3 仿真实验与讨论

由于同色异谱现象,采用多点颜色定标方法主要影响因素包括以下两方面:1) 色品图上目标地物的色品与基准地物色品的距离;2) 目标地物与基准地物光谱分布相似度。通常情况下,获得不同种类的地物颜色校正系数,多光谱遥感需要拍摄不同的地物获得原始数据,再获得定标系数,在工程实践中实现难度较大。光谱可调光源的出现很大程度上简化了这一过程,光谱可调光源能够模拟各种地物辐射,采用光谱可调光源对多光谱遥感设备定标,即可获得不同种类地物的颜色校正系数。

为了进一步分析多点颜色校正法的校正效果,结合某型号的多光谱相机  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三波段的相对光谱响应,在 CIE1931 色品图上选取了多个色品区域(如图 4 所示,列举了两个色品区域),每个色品区域选取一种基准地物,结合 USGS 光谱数据库中的地物光谱数据,在每一个色品区域上选取 15 种以上的地物进行仿真实验,分别采用白平衡法和多点颜色校正法对其他地物进行颜色校正。待校正地物与基准地物在色品图上的相对光谱分布如图 5 所示,色品区域 1 中基准地物色品为  $x=0.3254$ ,  $y=0.3575$ ,色品区域 2 中基准地物色品为  $x=0.4065$ ,  $y=0.3998$ 。其中三角符号代表的是基准地物色品,圆圈符号代表的是待校正地物(文中目标地物的选取是根据目标地物色品在基准地物色品半径 0.1 以内),如表 2 和 3 分别列出了色品区域 1 和色品区域 2 中 10 种地物标准色品值和采用两种方法校正后的色品误差值,采用两种方法对色品区域 1 和色品区域 2 进行颜色校正后地物的色品值与实际色品的偏差  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  分别如图 6 和 7 所示,

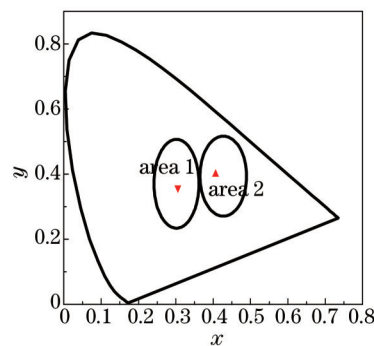


图 4 CIE1931XXZ 色品图中取两个色品区域

Fig.4 Two chromaticity regions CIE1931XXZ on chromaticity diagram

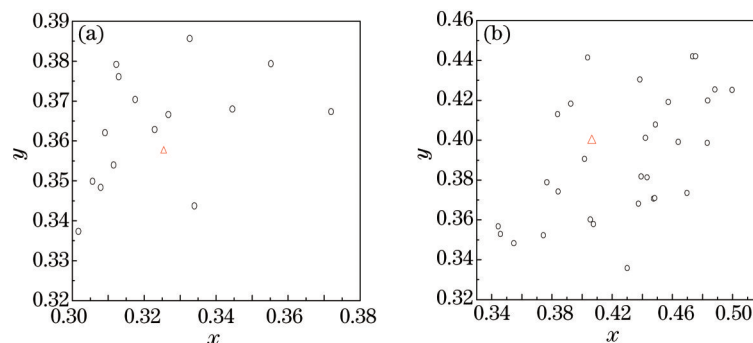


图 5 (a) 色品图区域 1 上 15 种地物与基准地物的相对分布; (b) 色品图区域 2 上 28 种地物与基准地物的相对分布  
Fig.5 Objects relative distribution with datum object on the chromaticity diagram. (a) 15 kinds of objects on first chromaticity region; (b) 28 kinds of objects on second chromaticity region

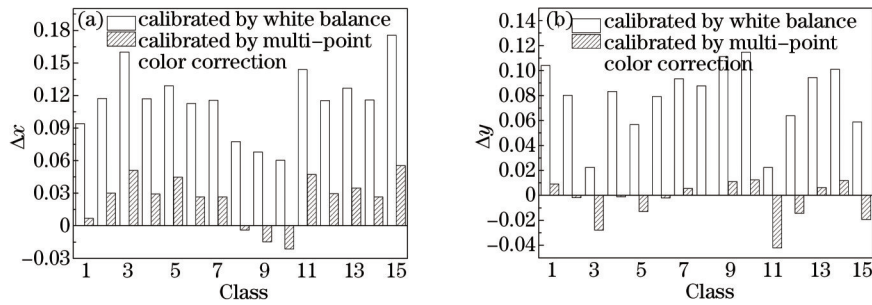


图6 白平衡法和多点颜色校正法对色品区域1上15种地物校正结果

Fig.6 Correction results of 15 kinds of the ground scenes on first chromaticity region by white balance method and multi-color correction method

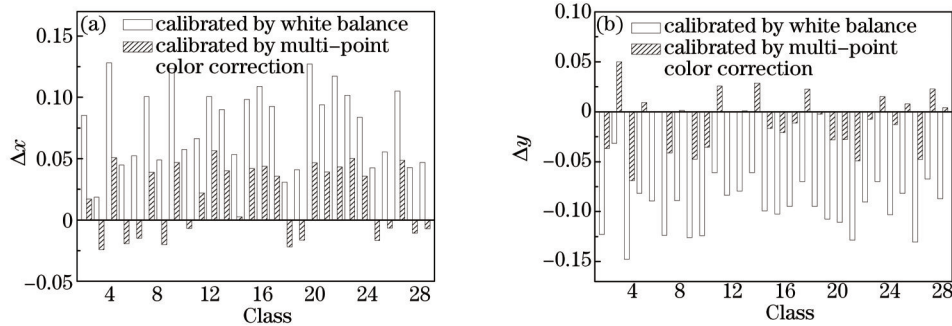


图7 白平衡法和多点颜色校正法对色品区域2上28种地物校正结果

Fig.7 Correction results of 28 kinds of the ground scenes on second chromaticity region by white balance method and multi-color correction method

表2 色品区域1上10种地物的标准色品值,白平衡法校正后色品误差值和多点颜色校正法色品误差值

Table 2 Standard color chromaticity values, chromaticity values error corrected by white balance method and multi-color correction method of 10 kinds of objects on first chromaticity region

Class	Standard		White balance		Multi-color correction	
	$x$	$y$	$ \Delta x $	$ \Delta y $	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	0.3091	0.3621	0.0941	0.1040	0.0069	0.0092
2	0.3720	0.3674	0.1601	0.0224	0.0511	0.0278
3	0.3445	0.3680	0.1289	0.0568	0.0448	0.0130
4	0.3117	0.3545	0.1156	0.0933	0.0264	0.0056
5	0.3552	0.3793	0.1439	0.0224	0.0473	0.0419
6	0.3079	0.3484	0.1159	0.1009	0.0265	0.0119
7	0.3326	0.3857	0.0774	0.0878	0.0038	0.0002
8	0.3229	0.3629	0.1172	0.0802	0.0300	0.0017
9	0.3017	0.3374	0.1756	0.0588	0.0553	0.0193
10	0.3129	0.3761	0.0680	0.1111	0.0150	0.0111

表3 色品区域2上10种地物的标准色品值,白平衡法校正后色品误差值和多点颜色校正法色品误差值

Table 3 Standard color chromaticity values, chromaticity values error corrected by white balance method and multi-color correction method of 10 kinds of objects on second chromaticity region

Class	Standard		White balance		Multi-color correction	
	$x$	$y$	$ \Delta x $	$ \Delta y $	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	0.4997	0.4252	0.0853	0.1229	0.0169	0.0369
2	0.3444	0.3568	0.0186	0.0980	0.0242	0.0501
3	0.4639	0.3991	0.1283	0.1477	0.0509	0.0690
4	0.4573	0.4191	0.0449	0.0815	0.0192	0.0092
5	0.4834	0.4199	0.0525	0.0895	0.0151	0.0000

续表2

Class	Standard		White balance		Multi-color correction	
	$x$	$y$	$ \Delta x $	$ \Delta y $	$ \Delta x $	$ \Delta y $
6	0.4832	0.3986	0.1007	0.1238	0.0388	0.0414
7	0.4483	0.3710	0.0925	0.0946	0.0357	0.0114
8	0.3838	0.4130	0.0307	0.0701	0.0219	0.0225
9	0.4038	0.4415	0.0408	0.0949	0.0166	0.0025
10	0.4392	0.3818	0.0939	0.1106	0.0391	0.0280

由图6和7可知,与用白平衡法相比,色品图上在基准地物附近的物采用通过基准地物色度值获得的校正系数进行颜色校正,色品误差得到明显改善。白平衡法色品误差  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  最大达到了0.15,通过利用多点颜色校正法,色品误差  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  基本限制在了0.05以内,相比于传统白平衡法,多点颜色校正法的色品误差得到改进;对于一些光谱反射率和基准地物反射率极其相近的地物,采用多点颜色校正法能够将色品误差  $\Delta x, \Delta y$  降到  $10^{-3}$  数量级内。

影响该方法颜色校正误差主要来自于待校正反射光谱与基准地物的反射光谱相似度,选取了28种地物中的10种地物,分析了10种地物的反射光谱和基准地物反射光谱的相似度,进而分析了采用基准地物系数进行颜色校正后地物在色品图上与标准色品之间距离随相似度的变化情况。图8给出了  $\Delta x^2 + \Delta y^2$  随相似度的变化趋势,从图中可以看出随着基准地物与待校正地物反射光谱相似度的增加,校正色差越小,并且当两者的光谱相似度大于0.8时,色品误差  $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$  在0.08以内,这样保证了较好的颜色校正效果。

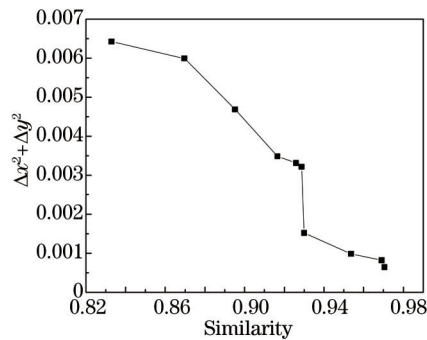


图8 目标地物反射光谱和基准地物反射光谱相似度与色品误差之间的变化关系

Fig.8 Relationship between the chroma error and the spectral similarity of target spectrum with the reference spectrum

## 4 结 论

针对白平衡法对多光谱图像进行颜色校正由于脱离了地物光谱特性容易造成颜色偏差以及采用色度合成法计算量大,工程应用难以实现等缺点,结合基于LED光谱可调积分球光源能够产生各种地物光谱,提出采用多点颜色校正的方法对多光谱图像进行颜色校正。理论仿真实验表明,利用多点颜色校正能够明显减小颜色校正误差,能够尽可能地复现地物的真实色彩。

光谱可调积分球光源提供的是面均匀光源,大口径的光谱可调积分球光源既能够模拟太阳光谱对多光谱空间传感器进行辐射定标,解决了通常实验室采用的色温为3000 K的溴钨灯积分球扩展源与传感器工作目标光谱不匹配造成的定标误差;在大口径光谱可调积分球光源控制系统设置地物光谱数据库,收集各种地物光谱,通过模拟各种种类的地物光谱对多光谱相机进行色度定标,定标系数对于后续处理多光谱图像具有重要作用,可以有效地解决多光谱成像设备颜色失真现象;此外光谱可调积分球光源可用于探测器以及遥感设备的光谱辐射定标。

## 参 考 文 献

- 1 Du Fenglan, Tian Qingjiu, Xia Xueqi. Expectation and evaluation of the methods on remote sensing image classifications[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(6): 521-525.  
杜凤兰, 田庆久, 夏学齐. 遥感图像分类方法评析与展望[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 521-525.

- 2 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-bronehyperspectral imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010008.  
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010008.
- 3 Hu Weijie, Tang Shunqing, Zhu Zhengfang. *Modern Color Science and Application*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. 32-100.  
胡威捷, 汤顺青, 朱正芳. *现代颜色技术原理及应用*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007. 32-100.
- 4 You Jing, Liu Xiao, Yi Weining, *et al.*. A white balance method for multi-spectral color synthesis image[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(4): 282-290.  
游晶, 刘晓, 易维宁, 等. 一种处理多光谱彩色合成图像的白平衡方法[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(4): 282-290.
- 5 Wang Min, Li Binqiao, Xu Jiangtao. Auto white balance algorithm based on color-temperature estimation[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(12): 1872-1875.  
王敏, 李斌桥, 徐江涛. 基于色温估计的自动白平衡算法研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(12): 1872-1875.
- 6 Xu Xiaozhao, Cai Yiheng, Liu Xiaomin, *et al.*. Improved grey world color correction algorithms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 559-564.  
徐晓昭, 蔡轶珩, 刘晓民, 等. 改进灰度世界颜色校正算法[J]. *光子学报*, 2010, 39(3): 559-564.
- 7 C F Wall, A R Hanson, J A F Taylor. Construction of a programmable light source for use as a display calibration artifact[C]. *SPIE*, 2001, 4295: 259-266.
- 8 I Fryc, S W Brown, Y Ohno. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source[C]. *SPIE*, 2005, 5941: 300-308.
- 9 Yuan Yinlin, Xu Jun, Zhai Wenchao, *et al.*. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712004.  
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制与检测[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0712004.
- 10 Liu Hongxing, Sun Jingxu, Liu Zexun, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1447-14541.  
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1447-14541.
- 11 Li Changjun, Cui Guihua, Zhao Dazun, *et al.*. A simple method for computing optimum weighting table for colorimetric tristimulus intergration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(11): 1346-1353.  
李长军, 崔桂华, 赵达尊. 一种计算色度学三刺激值加权表的新方法[J]. *光学学报*, 2003, 23(11): 1346-1353.
- 12 R N Clark, G A Swayze, R Wise, *et al.*. *USGS Digital Spectral Library Splib06a*[M]. Reston, VA: US Geological Survey Press, 2007.

栏目编辑: 张浩佳