

# 基于艇载遥感成像数据的高空间分辨率 全色遥感图像仿真

刘 晓<sup>1,2</sup>, 易维宁<sup>1</sup>, 乔延利<sup>1</sup>, 崔文煜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室,安徽 合肥 230031;  
2. 解放军电子工程学院,安徽 合肥 230037)

**摘要:**高空间分辨率全色遥感图像在军事侦察、地面监视等领域具有较高的应用价值.为模拟星载全色遥感图像,提出了一种由艇载遥感成像系统获取的低空遥感图像为数据源的高空间分辨率全色遥感图像仿真方法.首先将低空宽视场图像按典型地物类型进行监督分类,其次将低空宽视场图像与多光谱图像按不同地物类型分类拟合,并将多光谱拟合结果合成高空间分辨率全色仿真图像,最后对高空间分辨率全色仿真图像进行仿真精度评价.相比星载全色遥感图像,仿真图像同样具备高空间分辨率、全色波段、宽视场等特点.仿真方法可为星载全色遥感图像仿真提供较准确的数据支撑.

**关键词:**遥感图像;高空间分辨率;多光谱;全色波段;图像仿真  
**中图分类号:**TN911.73 **文献标识码:**A

## High spatial resolution panchromatic remote sensing image simulation

LIU Xiao<sup>1,2</sup>, YI Wei-Ning<sup>1</sup>, QIAO Yan-li<sup>1</sup>, CUI Wen-Yu<sup>1</sup>

(1. Key laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Panchromatic remote sensing image with high spatial resolution has been applied in military reconnaissance, ground surveillance and other areas. A simulation method for high spatial resolution panchromatic remote sensing image is presented. The data source of the simulation is a kind of the airship remote sensing image. The low-altitude wide-field images were classified according to typical surface features. Then these images and the multi-spectral images were fitted to different typical features. The high spatial resolution panchromatic simulation image was composed by the fitting results. The simulation precision was assessed. Compared with satellite panchromatic remote sensing images, high spatial resolution panchromatic simulation image has the same spatial resolution, panchromatic band, wide view and so on. This method provides accurate data source for the satellite panchromatic remote sensing image simulation.

**Key words:** remote sensing image; high spatial resolution; multi-spectral; panchromatic band; image simulation  
**PACS:** 07.07.Df

## 引言

高空间分辨率遥感图像的分析与解译,尤其是全色波段图像的处理,在军事上具有较高的应用价值<sup>[1]</sup>.利用星载光学遥感平台获取的高空间分辨率遥感图像,特别是全色波段图像具有内容丰富、对比度好、清晰度高等特点,但遥感平台成本较高,图像

数据传输方式较复杂.随着低空遥感技术的发展,低空光学遥感平台已层出不穷,其费用和系统复杂程度相对星载平台低很多,利用低空遥感平台模拟星载光学遥感数据已成为一种趋势<sup>[2]</sup>.基于低空遥感平台的遥感图像仿真是在时间、空间、光谱以及辐射能量等方面,对目标地物的光学辐射分布进行仿真,最终仿真结果为目标地物每个像元对应于光学遥感

收稿日期:2011-08-17,修回日期:2011-09-22  
基金项目:国家自然科学基金(41071232)

Received date: 2011-08-17, revised date: 2011-09-22

Foundation item: Supported by National Natural Science Foundation of China (41071232)

作者简介(Biography): 刘晓(1984-),男,安徽合肥人,助教,博士研究生,主要研究领域为遥感信息处理、遥感图像仿真. E-mail: liuxiao\_0007@163.com

器成像面元的辐射能量值<sup>[3]</sup>. 仿真遥感图像具有较高的应用价值,如评估光学遥感系统的设计可行性、评估遥感图像质量、遥感图像处理算法验证、图像解译训练等,遥感图像仿真技术已受到各国研究机构的广泛关注<sup>[4]</sup>.

遥感图像仿真包括大气辐射传输、MTF、空间分辨率、噪声、光谱等仿真,其中针对光学遥感器光谱响应特性的仿真方法研究较少.而为了确保仿真精度,光谱仿真是遥感图像仿真中不可缺少的一部分.本文在大气辐射传输、MTF、空间分辨率、噪声仿真等研究的基础上针对全色光学遥感器的光谱响应特性,提出了基于艇载遥感成像数据的高空间分辨率全色遥感图像仿真方法.该方法为高空间分辨率全色遥感图像仿真提供一种新思路.

## 1 基于艇载遥感成像系统的全色图像仿真流程

### 1.1 艇载遥感成像系统

艇载遥感成像系统是一种以自主导航的无人飞艇为平台,搭载光学成像传感器,获取目标区域地物信息的低空观测系统.艇载遥感平台相比星载光学遥感平台,具备成本低廉、获取数据便捷等特点,获取的低空遥感图像具有较高的空间分辨率<sup>[5]</sup>.艇载遥感成像系统的任务载荷携带两种光学成像系统,分别为宽视场彩色成像系统和多光谱成像系统.其中宽视场彩色成像系统能够获取地面场景 R、G、B 三通道图像数据并合成彩色图像,该系统视场角较大,但光谱响应范围窄,为 400 ~ 680 nm.多光谱成像系统由 420 ~ 720 nm 的 LCTF (Liquid Crystal Filter) 相机和 720 ~ 950 nm 的近红外相机构成,其中 LCTF 相机光谱带宽分辨率为 20 nm.虽然多光谱成像系统光谱响应范围较宽,但视场角较小.由于受到飞艇飞行速度和视场角的影响,在航拍过程中,多光谱成像系统无法获取连续场景的图像数据.

调研相关文献后发现,目前大多数高空间分辨率卫星的全色波段成像系统光谱响应范围为 450 ~ 900 nm<sup>[6]</sup>.相比之下艇载遥感成像系统中宽视场彩色成像系统具有获取连续场景图像的能力,但缺乏近红外波段信息.而多光谱成像系统虽具备较广的光谱响应范围,但视场角小无法获得连续场景的图像.由于受到两种光学成像系统的各自特点的约束,无法直接利用两种图像数据模拟星载全色遥感图像.

### 1.2 全色图像仿真流程

为实现星载全色遥感图像仿真,综合艇载遥感

成像系统获取的多光谱和宽视场图像数据,设计了一种仿真方法,具体的仿真流程如图 1 所示.

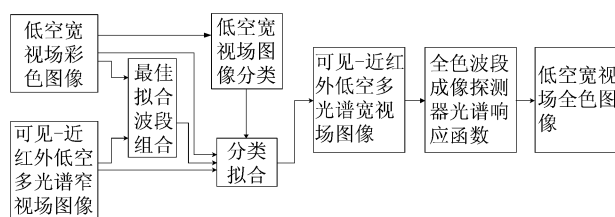


图 1 仿真流程

Fig. 1 The chart of simulation process

仿真流程分为两步:首先对艇载遥感成像系统获取的低空宽视场彩色图像进行分类;其次按不同地物类型计算宽视场彩色图像和最相关多光谱图像的拟合系数,并进行多光谱图像拟合;最终将多光谱拟合图像合成全色图像.

其中宽视场彩色图像分类是将低空宽视场彩色图像按地物类型进行分类,并去除分类结果中孤立点、断点等干扰区域;

分类拟合处理流程为:首先将低空宽视场彩色图像分解为 R、G、B 三个通道,并与相同区域的多光谱图像计算相关度,确定最佳拟合波段组合;接着根据不同拟合波段组合,计算多光谱相同区域不同地物类型的拟合系数;最后利用各波段不同地物的拟合系数计算多光谱宽视场拟合图像.

合成全色图像是根据全色成像探测器的光谱响应函数,利用多光谱宽视场拟合图像合成宽视场全色图像.

## 2 低空宽视场图像分类

### 2.1 图像分类方法

宽视场彩色图像是通过亮度值或像素值的高低差异来表示不同地物的差异的,如植被、土壤、岩石及水体等不同类型,这也是区分图像中不同地物的物理依据.宽视场彩色图像分类是对图像中的地物进行属性的识别与分类.

目前常用的图像分类方法主要有监督分类方法和非监督分类方法,其中监督分类常用的方法有距平均值最小距离分类法、平行多面体分类法、最大似然分类法等,非监督分类主要有 K 均值算法、ISO-DATA 法等<sup>[7]</sup>.

本文选择最大似然分类法,其实质是基于贝叶斯准则的分类错误概率最小的一种非线性分类,是应用比较广泛的一种监督分类方法.它是根据相似的光谱性质和属于某类的概率最大的假设来指定每

个像素的类别. 该方法能够快速指定待分类像素到若干类之中的一类中去. 在实际计算中, 最大似然法常采用经过对数变换的形式, 其一般形式如下所示:

$$g_i(x_i) = \ln P(w_j) - \frac{1}{2} \ln \left| \sum_j \right| - \frac{1}{2} (x_i - M_j) \sum_j^{-1} (x_i - M_j), \quad (1)$$

式中,  $P(w_j)$  是任一像素属于  $w_j$  的概率, 在事先无法确定的情况下, 可以假设所有的  $P(w_j)$  都相同;  $\sum_j$  为第  $j$  类的协方差矩阵,  $M_j$  为该类的均值向量.

## 2.2 分类后处理

遥感图像的监督分类或非监督分类, 都是依据遥感图像光谱特征进行聚类分析, 分类结果中都会出现一些面积很小的图斑, 斑块较为零碎, 同时会产生孔穴、断点、孤立点、毛刺等干扰, 会给图像质量、精度以及后期分析处理带来影响<sup>[8]</sup>. 因此需要对分类结果进行后处理. 分类后处理方法即对分类结果进行归并和清除. 图像滤波方法可去除分类结果中的杂散干扰, 常见滤波方法有均值滤波、中值滤波等. 中值滤波是一种的非线性平滑滤波器, 它将窗口内的所有像素值按大小排序后, 取中值作为中心像素的新值. 该方法在抑制噪声的同时能够有效地保留边缘, 减少模糊. 因此本文采用中值滤波进行分类后处理.

## 3 分类拟合与全色图像合成

### 3.1 最佳拟合波段组合

多光谱图像包括 19 个波段的多光谱数据和 1 个全色通道数据, 宽视场彩色图像包含 R、G、B 三通道的图像数据. 其中 19 个波段的多光谱数据和宽视场 R、G、B 三通道数据表示在相对较窄的波段范围内不同地物的光谱反射特性. 由于同类地物的波段间光谱反射率存在相关性, 因此在同一场景中不同波段的图像数据均具有相关性<sup>[9,10]</sup>. 计算宽视场图像相对多光谱图像的拟合系数时, 选择相关性较大的多光谱图像与宽视场图像某颜色分量进行拟合可减小拟合误差. 本文选择图像相似测度进行图像间相关度的测量. 假设  $X$  和  $Y$  是两幅图像的特征矢量,  $X_0$ 、 $Y_0$  分别代表  $X$ 、 $Y$  各分量的均值,  $X$ 、 $Y$  的相关系数为  $R$ .

$$R(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} = \frac{\sum_{i=1}^p (X_i - X_0)(Y_i - Y_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (X_i - X_0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p (Y_i - Y_0)^2}}. \quad (2)$$

当  $R$  越大,  $X$  和  $Y$  的相似程度越好, 反之相似程度越差. 选择某场景(植被为主要地物)中重合区域 420 ~ 950 nm 范围内多光谱图像与宽视场彩色图像, 计算相似度.

从计算结果中可以发现, 宽视场图像中 R 通道图像与 520 ~ 700 nm 光谱图像相似度高, G 通道图像与 720 ~ 875 nm 光谱图像相似度高, B 通道图像与 420 ~ 500 nm 光谱图像相似度高. 由于场景中的主要地物为植被, 以上结论基本符合植被在可见—近红外波段的光谱反射特性. 得出的最佳拟合波段组合如表 1 所示.

表 1 多光谱—宽视场图像最佳拟合波段组合

Table 1 The best fit band combinations between multi-spectral images and wide-field images

多光谱图像 中心波长	宽视场图像 最佳拟合 波段组合	多光谱图像 中心波长	宽视场图像 最佳拟合 波段组合	多光谱图像 中心波长	宽视场图像 最佳拟合 波段组合
420 nm	Blue	560 nm	Red	700 nm	Red
440 nm	Blue	580 nm	Red	720 nm	Green
460 nm	Blue	600 nm	Red	740 nm	Green
480 nm	Blue	620 nm	Red	780 nm	Green
500 nm	Blue	640 nm	Red	875 nm	Green
520 nm	Red	660 nm	Red		
540 nm	Red	680 nm	Red		

### 3.2 分类线性拟合

确定最佳拟合波段组合后, 计算组合内容波段重合区域多光谱图像相对宽视场图像的拟合系数. 假设组合中宽视场图像和多光谱图像中同类地物 DN 值存在线性关系, 公式如下所示:

$$DN_m = K \cdot DN_w + b \quad (3)$$

通过已知两种图像重合区域内同类地物的  $DN$  值(其中  $DN_m$  为多光谱图像  $DN$  值,  $DN_w$  为宽视场图像  $DN$  值), 求出系数  $K$ 、 $b$ . 得到相同地物在两种图像中  $DN$  值的相互关系式, 进行宽视场图像向多光谱图像的转换. 具体计算步骤如下所示:

(1) 在重合区域中选择相同积分时间的多光谱图像、宽视场图像以及宽视场分类结果图;

(2) 按不同地物类型划分多光谱图像与宽视场图像的数据集;

(3) 利用最小二乘法线性回归, 计算宽式图像中各个地物类型对应多光谱图像的拟合系数  $K$ 、 $b$ ;

(4) 利用各个地物在某波段的拟合系数、宽视场图像和宽视场分类图像计算对应光谱波段的宽视场拟合图像.

### 3.3 全色波段合成

各个波段宽视场拟合图像按一定系数加权得到

全色波段合成图像. 加权系数由待仿真全色遥感器的光谱响应函数确定. 文中以多光谱相机全色通道的光谱响应函数为参考标准, 计算每个波段相对的加权系数, 计算公式如下所示.

$$\alpha_i = \frac{\sum_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} f(\lambda)}{\sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda)}, \quad (4)$$

式(4)中  $\alpha_i$  为第  $i$  波段的加权系数,  $\lambda_{i1}$  和  $\lambda_{i2}$  分别为第  $i$  波段光谱响应范围的下界和上界,  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  分别为全色波段光谱响应范围的下界和上界,  $f(\lambda)$  为全色波段光谱响应函数. 计算加权系数如表 2 所示.

表 2 多光谱图像合成全色图像加权系数

Table 2 The weighting coefficients of multi-spectral image by panchromatic image synthesis

波段	加权系数	波段	加权系数	波段	加权系数
420 nm	0.018 134 21	560 nm	0.041 316 421	700 nm	0.052 490 887
440 nm	0.025 683 727	580 nm	0.043 484 157	720 nm	0.052 445 068
460 nm	0.027 943 876	600 nm	0.046 462 016	740 nm	0.075 902 99
480 nm	0.030 280 361	620 nm	0.048 108 81	780 nm	0.093 279 193
500 nm	0.032 925 989	640 nm	0.050 639 541	875 nm	0.186 361 981
520 nm	0.034 170 851	660 nm	0.051 439 068		
540 nm	0.037 455 546	680 nm	0.051 475 308		

## 4 试验数据处理与精度评价

### 4.1 试验数据处理

文中的试验数据为 2009 年 9 月在湖北某地区艇载遥感成像系统获取的低空观测数据. 飞艇飞行高度为 500 m, 地面景观的主要类型为植被, 其中包含土壤、水泥地、水池等其他地物. 图 2 为宽视场彩色相机拍摄某区域的图像. 根据全色图像的仿真流程先后对宽视场图像进行图像分类、分类后处理、分类拟合、全色合成, 最终的全色仿真图像如图 4 所示.



图 2 原始图像

Fig. 2 The original image

从全色仿真图像可以发现, 由于加入了近红外信息, 与原始可见光图像存在较大差异. 为评价全色仿真图像的仿真效果, 文中将飞艇成像平台中多光

谱相机全色通道的图像数据作为参考图像, 与全色仿真图像进行仿真精度评价. 由于多光谱相机视角小, 获取的全色波段图像数据与宽视场图像重合区域少, 因此在图 3 中选择两块重合区域进行仿真精度评价.



图 3 全色仿真图像

Fig. 3 The simulation result of panchromatic image

### 4.2 仿真精度评价

仿真精度评价是图像仿真的必要研究工作, 是检验仿真方法有效性的重要环节. 目视比较图像的相似程度是最直接的评价方法, 但无法量化仿真精度, 因此需要进行定量化的客观评价. 本文采用绝对客观评价和相对客观评价两种方法对仿真结果进行精度评价.

#### (1) 绝对客观评价

绝对客观评价即对单幅图像进行评价参数的计算, 主要的评价指标有信息熵、标准差、平均梯度、高斯三阶细节平均统计量和图像直方图等.

熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标, 融合图像的熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少. 标准差是图像各像素偏离均值的平均数, 反映了图像像素值的分散程度. 平均梯度是反映图像对微小细节反差和纹理变化特征表达能力的指标. 高斯三阶细节平均统计量不需要原始图像作参考, 对高斯白噪声不敏感, 能较好的反映图像的信噪比, 其中定义数值越大图像质量越高<sup>[11]</sup>. 图像的直方图反映了图像灰度分布的统计特性.

#### (2) 相对客观评价

相对客观评价是计算两幅图像间的相对差异, 主要的评价指标有: 峰值信噪比、保真度、相关度、结构相似度和互信息熵.

其中峰值信噪比表现了两幅图像的灰度差异, 数值越高说明两幅图像灰度差异越小; 保真度的公式如式(4)所示, 数值越接近 1 表明图像差异越小; 相关度同样体现了图像灰度相似程度, 相关度高表明图像相

似程度大;结构相似度体现了图像间亮度、对比度和结构三方面的相互关系,图像间结构相似度越高,说明两幅图像亮度、对比度和结构均相似<sup>[12]</sup>.

$$\text{result} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) - F(i,j)]^2}{M \times N \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) \times F(i,j)]}, \quad (5)$$

式(5)中  $R(i,j)$  和  $F(i,j)$  分别代表参考图像与评价图像,  $M, N$  为图像的长和宽.

确定评价指标后将利用上述两类评价指标对全色仿真图像中两块区域进行图像评价. 为综合评价仿真精度, 选择宽视场彩色图像、多光谱全色通道图像与全色仿真图像进行比较评价. 由于全色仿真图像为灰度图像, 无法直接与宽视场彩色图像进行评价, 因此利用彩色图像灰度化方法将宽视场彩色图像转化为灰度图像后再进行评价. 本文采用加权平均法对 RGB 三分量进行加权平均得到较合理的灰度图像, 加权系数由人眼对 RGB 三分量敏感程度确定. 具体的评价过程如下所示.

首先选择相同区域的多光谱相机全色通道图像为参考图像; 计算全色仿真图像、宽视场灰度化图像和全色图像的绝对、相对评价指标, 计算结果如下所示.

图 4 和图 5 中所示的为区域 1 和区域 2 的全色图像、全色仿真图像和宽视场灰度化图像以及各自的直方图. 从图像和直方图中可以直观地发现全色图像与全色仿真图像灰度分布相似, 而灰度化图像亮度较高, 全色图像和全色仿真图像的直方图形状相近. 以下表(5~8)为两块区域绝对与相对评价结果.

表 5 区域 1 绝对评价结果

Table 5 Absolute evaluation results of the first region

	全色图	全色仿真图	灰度化图
信息熵	3.563 687	3.544 301	4.522 649
标准差	10.560 899	13.255 078	28.614 606
平均梯度	1.505 197	1.936 726	4.307 922
高斯三阶细节平均统计量	14.761 479	25.404 991	124.373 354

表 6 区域 1 相对评价结果

Table 6 Relative evaluation results of the first region

	全色仿真图	灰度化图
峰值信噪比	26.461 438	15.364 034
保真度	0.929 836	0.695 522
相关度	0.976 242	0.966 209
结构相似度	0.432 453	0.296 714

从绝对评价结果可以发现: 相比灰度化图像绝对评价结果, 全色图像与全色仿真图像的信息熵、标准差、平均梯度和高斯三阶细节平均统计量数值相近. 从相对评价结果中可以发现: 全色仿真图像的峰

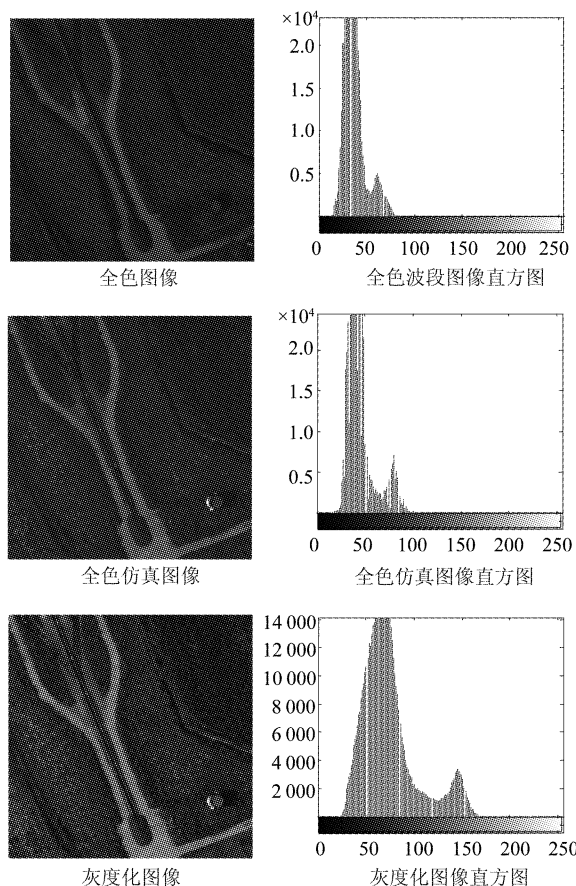


图 4 区域 1 的全色图像、全色仿真图像、灰度化图像以及各自直方图

Fig. 4 Panchromatic image, panchromatic simulation image, gray image and their histogram in the first region

表 7 区域 2 绝对评价结果

Table 7 Absolute evaluation results of the second region

	全色波段图	全色仿真图	灰度化图
信息熵	2.942 116	2.910 807	3.925 569
标准差	9.375 468	7.893 971	16.659 118
平均梯度	1.007 672	1.403 264	2.760 861
高斯三阶细节平均统计量	12.695 115	8.364 675	41.734 776

表 8 区域 2 相对评价结果

Table 8 Relative evaluation results of the second region

	全色仿真图	灰度化图
峰值信噪比	25.910 071	14.439 612
保真度	0.911 022	0.644 005
相关度	0.967 581	0.961 437
结构相似度	0.591 425	0.416 112

值信噪比约为灰度化图像的两倍. 保真度反映了图像的光谱特性, 全色仿真图像相对全色图像的保真度远高于灰度化图像相对全色图像的保真度. 由于拍摄场景相同, 因此全色仿真图像和灰度化图像相对灰度图像的相关度相近, 但全色仿真图像相对全色图像的相关度数值较高. 比较结构相似度结果可

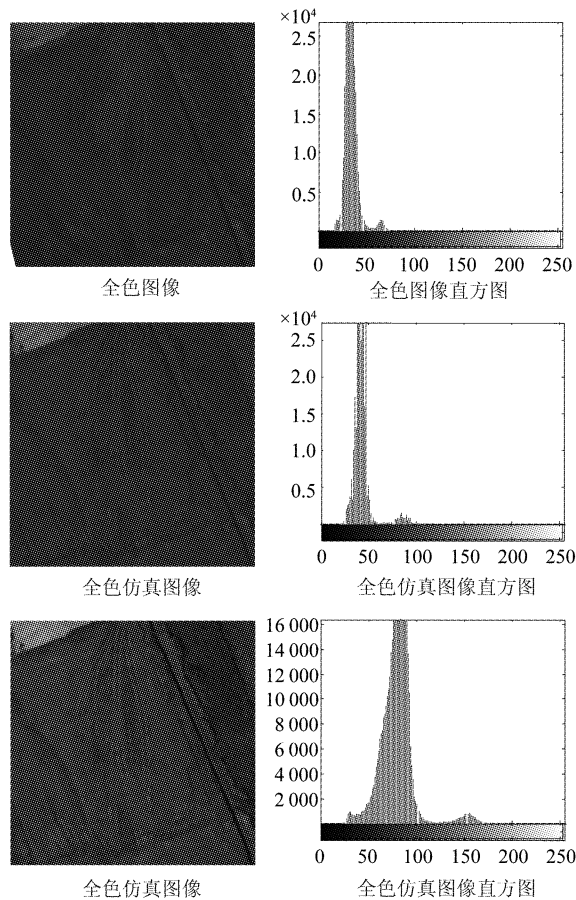


图5 区域2的全色图像、全色仿真图像、灰度化图像以及各自直方图

Fig.5 Panchromatic image, panchromatic simulation image, gray image and their histogram in the second region

见全色仿真图像结构相似程度优于灰度化图像。

综合主观和客观评价结果,利用该方法得到的高空间分辨率全色遥感仿真图像各项指标均优于宽视场灰度化图像,并与全色通道图像保持较高的相似度。

## 5 结论

提出一种利用实测低空宽视场图像与低空多光谱图像仿真低空全色波段宽视场图像的方法,该方法利用艇载低空多光谱数据将可见光波段艇载低空宽视场彩色图像拓展至具备可见—近红外光谱特性、宽视场、高空间分辨率的全色仿真图像。该方法通过分类、拟合、全色合成等仿真高分辨全色图像。经过相对、绝对仿真精度评价,仿真结果逼真,仿真图像灰度分布连续自然;仿真图像与实测图像相似程度高。该方法为星载全色遥感图像大气辐射传输仿真、MTF 仿真、空间分辨率仿真、噪声仿真等后续仿真工作提供了较好的数据支撑,在遥感图像仿真领域具有较高的应用价值。

## REFERENCES

- [1] MA Jan-wei. Research on Change Detection of Specific Targets from High Spatial Resolution Panchromatic Remote Sensing Imagery[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications of CAS, 2006(马建伟. 全色波段高空间分辨率遥感影像特定目标变化检测技术研究. 北京:中国科学院研究生院博士学位论文), 2006.
- [2] Angela M Puetz, Krista Lee, Olsen R Chris. WorldView-2 data simulation and analysis results [C]. *Proc. of SPIE* Vol. 7334, 73340U; doi:10.1117/12.818187.
- [3] GU You-lin, ZHANG Dong-ying, YI Wei-ning, et al. Simulation of Space Optical Remote Sensor Imaging Based on Aviation Image[J]. *Journal of System Simulation* (顾有林, 张冬英, 易维宁, 等. 基于航空图像的航天光学传感器成像的仿真. *系统仿真学报*), 2008, 20(14): 3730-3732.
- [4] Xiao Qin, Li Min. A Study on the transformation of airborne remote sensing image to spaceborne remote sensing image[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (肖青, 李敏. 机载光学图像至卫星光学图像转换方法研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*), 2007, 43(3): 234-240.
- [5] ZHANG Dong-ying, YI Wei-ning, HONG Jing. VNIR image simulation based on low-level flight image data[J]. *Chinese Optics Letters*. 2010, 8(4): 345-347.
- [6] HE Wen-bin, ZHOU Chuan, NIU Zheng, et al. Study on Panchromatic Band Broadening of New High-Resolution Satellite Sensor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (何文斌, 周川, 牛铮, 等. 新一代高分辨率卫星遥感器全色波段展宽研究. *光谱学与光谱分析*), 2010, 30(7): 1894-1897.
- [7] GU You-lin, HAN Bang-chun. Application of High Resolution Quickbird Satellite Data in Imaging Simulation of Optical Remote Sensor[J]. *Journal of System Simulation* (顾有林, 韩帮春. 快鸟数据在光学遥感器成像仿真中的应用. *系统仿真学报*), 2008, 20(22): 6265-6267.
- [8] ZHOU Qing, LI Feng, ZHANG Hai-tao, et al. Application of supervised classification on high spatial resolution satellite image. *Journal of Beijing Forestry University* (周庆, 李峰, 张海涛, 马千里, 等. 监督分类技术在高分辨率卫星影像中的应用. *北京林业大学学报*), 2003, 25(12): 43-45.
- [9] NI Guang-bo. Researches on Hyperspectral Image Lossless Compression Algorithm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School (倪广波. 基于预测的高光谱图像无损压缩算法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学), 2009.
- [10] DOU Wen, CHEN Yun-Hao, Image fusion method of high-pass modulation including inter band correlations [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (窦闻, 陈云浩. 计入波段间相关性的高通调制图像融合方法. *红外与毫米波学报*), 2011, 29(2): 140-144.
- [11] ZHU Kong-feng, JIANG Wei, WANG Duan-fang, et al. New kind of clarity-evaluation-function of image[J]. *Infrared and Laser Engineering* (朱孔凤, 姜威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数. *红外与激光工程*), 2005, 34(4): 464-468.
- [12] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R. Image quality assessment from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.