

doi:10.3788/gzxb20184704.0410001

基于谱段关联的近红外图像模拟方法

武红宇¹, 王灵丽¹, 钟兴^{1,2}, 苏志强¹, 陈关州³, 白杨^{1,2}

(1 长光卫星技术有限公司, 长春 130051)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(3 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘 要:提出一种基于谱段关联的近红外图像模拟方法,分析遥感图像成像链路模型,以及卫星载荷传感器可见光多光谱谱段和全色谱段的关联性,计算得到了谱段关联系数,并基于谱段的关联系数生成模拟近红外图像.为了提高近红外模拟图像生成的速度,利用基于 GPU 的 SIFT 算法对全色图像与多光谱图像进行匹配.采用所提方法利用吉林一号光学 A 星的数据,生成模拟近红外图像,单景图像计算时间优于 3 s,该方法对合成真彩色图像和去云去雾均有较好的效果.

关键词:遥感图像;近红外图像模拟;谱段关联性;基于 GPU 的 SIFT 算法;真彩色合成图像;去云去雾

中图分类号:TP722

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0410001-8

Near-infrared Image Simulation Based on Spectral Correlation Method

WU Hong-yu¹, WANG Ling-li¹, ZHONG Xing^{1,2}, SU Zhi-qiang¹, CHEN Guan-zhou³, BAI Yang^{1,2}

(1 Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130051, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(3 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A near-infrared image simulation method based on spectral correlation is proposed. The remote sensing image-link model, and spectral correlation between visible multispectral and panchromatic for satellite sensors were analyzed, and the spectral correlation coefficient was calculated. Thus the simulation near-infrared image was generated based on the spectral correlation coefficient. In order to improve the speed of near-infrared image generation, the SIFT algorithm based on GPU was used. The proposed method utilized the data of Jilin-1A optical sensor to generate the simulation near-infrared images. The computation time of individual image was better than 3 s, and the simulation image had better effects for synthesis of true color image and removal of cloud and haze.

Key words: Remote sensing image; Near-infrared image simulation; Spectral correlation; SIFT algorithm based on GPU; Synthesis of true color image; Removal of cloud and haze

OCIS Codes: 100.1160; 100.2960; 110.3080; 280.4778

0 引言

图像的光谱信息是遥感应用的重要基础,传感器利用光谱遥感成像技术获得同一地物目标的不同谱段图像,可以得到地表景物的空间、光谱和辐射三重信息,这些信息不仅表现了地物空间分布的影像特征,同时能够以某一像元或像元组为目标获得地物的辐射强度和光谱特征^[1-3].为了满足不同的遥感应用需要不同的

基金项目:国家重点研发计划(No. 2016YFB0502602)资助

第一作者:武红宇(1989-),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为遥感图像处理. Email:wuhongyu@whu.edu.cn

通讯作者:白杨(1983-),女,副研究员,博士,主要研究方向为卫星数据预处理、卫星任务管控与规划. Email:baiy776@163.com

收稿日期:2017-09-13;录用日期:2018-01-10

<http://www.photon.ac.cn>

0410001-1

光谱信息,采用遥感图像模拟技术,能够以较低的成本获得更丰富的光谱信息.遥感图像模拟技术是在遥感理论模型、遥感先验知识及现有遥感图像的基础上,通过一定的手段,获取特定条件下的模拟图像的技术^[4-6].

许多学者深入研究了光学遥感图像的模拟^[7].叶泽田等^[8]利用 MIVIS 超光谱图像数据,结合光谱模拟和 MODTRAN 大气改正的方法定量模拟了 SPOT-HRV 多光谱波段 XS1, XS2, XS3 的地面反射率图像,模拟值的相对误差分别为 12%, 0.7% 和 3.1%.陈方等^[9]提出利用波段知识库的数据支持来模拟获取具有更高光谱分辨率的细分光谱遥感图像的方法,以 TM 传感器的第 1、2、3、4、5、7 波段数据进行了波段数据细分.然而,这种方法依赖于多光谱数据和地物光谱数据库,且多光谱数据模拟中,多光谱混合像元、谱段响应差异,以及构建的转换模型误差都将影响最终遥感图像模拟的精度.张冬英等^[10]提出基于低空图像的 Worldview-1 全色波段仿真,利用飞艇平台获取的实验数据,通过辐射传输模拟、光谱波段匹配、空间分辨率仿真和传感器调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 仿真,得到 Worldview-1 全色波段图像.周强等^[11]通过辐射定标实验建立了可见光、近红外图像灰度值的映射关系,对简单的场景图像进行了分割,实现了利用可见光图像得到近红外图像,并提高了仿真图像的真实感.这种近红外图像模拟方法利用典型地物的光谱特性构建了可见光、近红外图像灰度值的映射关系,通过可见光波段信息模拟近红外图像,其精度容易受到不同大气条件的影响.

目前,研究遥感图像模拟的方法主要是利用典型地物的光谱数据和传感器的光谱特性,模拟图像在一些场景中能够获得较好的效果,然而图像模拟的精度受限于谱段转换模型和大气环境.多光谱图像之间具有一定的关联性,李旭阳等^[12]基于各谱段间的光谱响应关联,针对蓝光谱段的带外响应影响图像质量的问题,提出了蓝色谱段带外响应的修正方法.本文研究了卫星载荷传感器多光谱 RGB 谱段和全色谱段的关联性,并基于全色谱段与多光谱谱段的关联性生成模拟近红外图像,模拟近红外图像对于图像目视和去云去雾有较好的效果.

1 遥感图像成像链路模型

遥感图像的整个成像链路模型为:地面目标的反射或发射光能量通过大气后被相机光学系统收集,并将能量汇聚于光电传感器的感光像素上,基于光电效应,传感器将光子转换成电子,进一步对光生电子进行收集,转换成电压,最后进行量化并以灰度图像形式输出^[13-15].其物理过程如图 1.

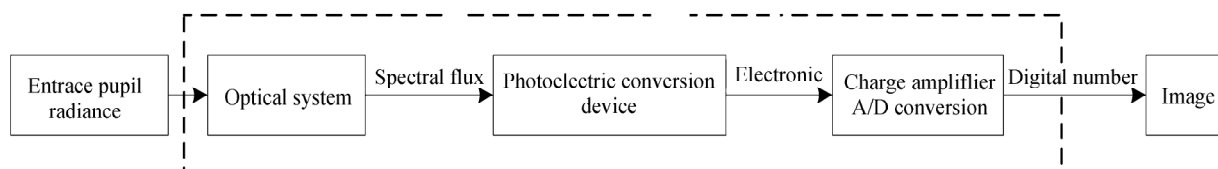


图 1 遥感图像成像链路
Fig.1 Remote sensing image-link model

成像过程中,入瞳处辐亮度通过光学系统,每个探测像元作为一个感光像素接收到的光谱通量 $\Phi(\lambda)$ 为

$$\Phi(\lambda) = \frac{\pi A_d}{4F^2} L(\lambda) \tau_0 \quad (1)$$

式中, A_d 为探测像元面积, F 为光学系统相对孔径的倒数, $L(\lambda)$ 为入瞳处辐亮度, τ_0 为光学系统透过率.

每个探元接收的光谱通量通过光电转换器件,将光信号转换为电信号,则探测像元在成像曝光时间内积累的电子数 S_e 为

$$S_e = \int \frac{\Phi(\lambda) R(\lambda) t_{int}}{hc} \lambda d\lambda \quad (2)$$

式中, $R(\lambda)$ 为探测像元的光谱响应, t_{int} 为曝光时间, h 为普朗克常量, c 为光速.

探测像元积累的电子数通过电荷放大器与数值量化,获得量化输出,即图像的灰度值 DN 为

$$DN = S_e \times G \quad (3)$$

式中, G 为转换增益,单位为 DN/e^- .

因此,多光谱相机各谱段的图像灰度值由目标的辐射能量、相机光学系统的光谱响应、探测器光电转换参数和积分时间决定,图像的灰度值与光谱响应的关系可以表征为

$$DN = t_{int} A_d k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) L(\lambda) \lambda d\lambda \quad (4)$$

其中, $k = \frac{\pi \tau_0 G}{4hcF^2}$.

2 模拟近红外图像

根据卫星遥感图像成像链路模型,图像实际输出的灰度值由地物的光谱特性、光学传感器的光谱响应决定.分析不同谱段的响应的关联性,利用全色谱段与 RGB 多光谱谱段图像,模拟近红外图像.

2.1 模拟近红外图像算法

卫星遥感图像全色谱段响应范围通常为 400~800 nm,近似覆盖了多光谱谱段 R(600~700 nm)、G(500~600 nm)、B(400~500 nm),以及近红外(700~800 nm)的谱段范围,全色谱段实际量化输出图像灰度值 DN 表示为^[16]

$$DN_P = DN'_B + DN'_G + DN'_R + DN'_{NIR} \quad (5)$$

式中, DN_P 为全色谱段的量化输出, DN'_R, DN'_G, DN'_B 分别为全色谱段在 RGB 多光谱响应谱段的量化输出.根据式(4),可得

$$\begin{cases} DN'_R = t_{int} A_d k \int_{\lambda_{Rs}}^{\lambda_{Re}} R_P(\lambda) L_R(\lambda) \lambda d\lambda \\ DN'_G = t_{int} A_d k \int_{\lambda_{Gs}}^{\lambda_{Ge}} R_P(\lambda) L_G(\lambda) \lambda d\lambda \\ DN'_B = t_{int} A_d k \int_{\lambda_{Bs}}^{\lambda_{Be}} R_P(\lambda) L_B(\lambda) \lambda d\lambda \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\lambda_{Rs}, \lambda_{Re}, \lambda_{Gs}, \lambda_{Ge}, \lambda_{Bs}, \lambda_{Be}$ 分别为 RGB 波段光谱响应的起止波长, DN'_{NIR} 为全色谱段在近红外谱段的量化输出.

而 RGB 每个谱段在各自对应有有效谱段的范围内的量化值为

$$\begin{cases} DN_R = t_{int} A_d k \int_{\lambda_{Rs}}^{\lambda_{Re}} R_R(\lambda) L_R(\lambda) \lambda d\lambda \\ DN_G = t_{int} A_d k \int_{\lambda_{Gs}}^{\lambda_{Ge}} R_G(\lambda) L_G(\lambda) \lambda d\lambda \\ DN_B = t_{int} A_d k \int_{\lambda_{Bs}}^{\lambda_{Be}} R_B(\lambda) L_B(\lambda) \lambda d\lambda \end{cases} \quad (7)$$

为了解算近红外谱段的实际量化输出,通过全色谱段与多光谱谱段响应的关联系数建立多光谱谱段各自量化值与全色谱段量化值的对应关系,关联系数 $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_R = \frac{DN'_R}{DN_R} = \frac{t_{intP} A_{dP}}{t_{intR} A_{dM}} \cdot \frac{\int_{\lambda_{Rs}}^{\lambda_{Re}} R_P(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{Rs}}^{\lambda_{Re}} R_R(\lambda) \lambda d\lambda} \\ \alpha_G = \frac{DN'_G}{DN_G} = \frac{t_{intP} A_{dP}}{t_{intG} A_{dM}} \cdot \frac{\int_{\lambda_{Gs}}^{\lambda_{Ge}} R_P(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{Gs}}^{\lambda_{Ge}} R_G(\lambda) \lambda d\lambda} \\ \alpha_B = \frac{DN'_B}{DN_B} = \frac{t_{intP} A_{dP}}{t_{intB} A_{dM}} \cdot \frac{\int_{\lambda_{Bs}}^{\lambda_{Be}} R_P(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{Bs}}^{\lambda_{Be}} R_B(\lambda) \lambda d\lambda} \end{cases} \quad (8)$$

式中, A_{dP} 为全色谱段的像元大小, A_{dM} 为 RGB 谱段的像元大小.

在计算过程中,由于全色谱段与多光谱谱段采用相同的光学系统,与光学系统相关的系数 k 可以被约去,假设在各多光谱谱段范围内,辐亮度为常数,可以将入瞳处辐亮度约去,那么近红外谱段的量化输出可

以表示为

$$DN'_{NIR} = DN_P - \alpha_B DN_B - \alpha_G DN_G - \alpha_R DN_R \quad (9)$$

根据式(8),基于全色谱段与多光谱谱段响应的关联性,能够利用实际获取的全色图像与 RGB 多光谱图像,生成模拟近红外图像。

2.2 模拟近红外图像生成流程

根据模拟近红外图像算法原理,通过获取的全色谱段图像与多光谱 RGB 谱段图像生成仿真的近红外波段图像,具体生成过程如图 2。

全色谱段、多光谱各谱段的 CCD 安装位置不同,在卫星成像过程中,全色和多光谱谱段将沿着推扫方向依次对同一地区成像,对应于同一地物不同谱段成像存在一定的时间差,因此对应的成像角度、成像姿态均有一定的变化,使得不同分辨率影像间相同地物具有不同的畸变及像点坐标。同时,卫星全色影像与多光谱影像分辨率通常不一致,而待配准图像分辨率的不一致会使得配准过程中存在尺度不一致的问题,无法建立两幅影像同一地物像元一一对应的关系。然而,仿真近红外影像需与多光谱影像分辨率一致,不同谱段影像间同一地物像点坐标不一致会使得地物边缘出现伪影现象,导致数据无法进行后续的遥感应用。为了解决上述问题,需要对全色影像降采样,并采用具有空间尺度不变形的尺度不变特征转换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)匹配方法进行图像配准。为了快速准确地生成模拟近红外图像,采用基于图形处理单元(Graphics Processing Units, GPU)的 SIFT 算法快速提取待匹配图像的特征点,通过建立基于特征点的仿射变换模型,进行图像重采样。在图像配准后,利用近红外图像模拟算法生成近红外模拟图像。

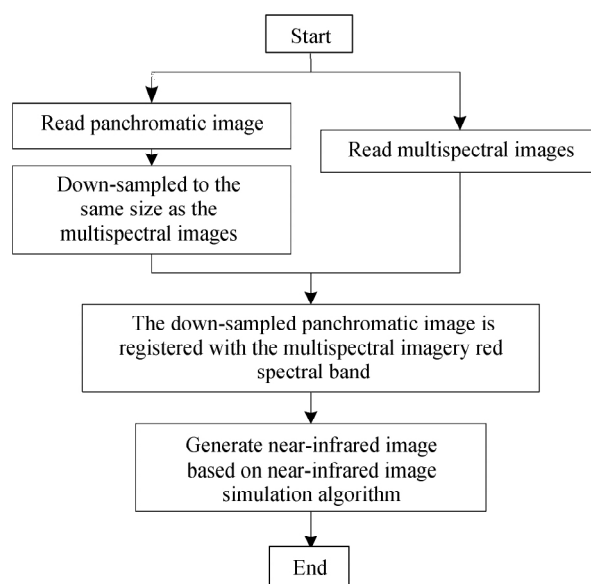


图 2 模拟近红外图像生成流程

Fig.2 Flow chart of simulation near-infrared image generation

3 模拟近红外图像应用

为了验证本文提出的算法,采用吉林一号光学 A 星的数据生成模拟近红外图像,模拟近红外图像在多光谱图像合成与去云去雾方面均有较好的应用效果。吉林一号光学 A 星采用 TDI-CCD 线阵探测器,具有全色谱段(450~800 nm),以及多光谱 R(450~550 nm),G(500~600 nm),B(620~700 nm)成像能力,全色谱段的响应包含了 RGB 谱段和近红外 700~800 nm 谱段范围。

3.1 模拟近红外图像

依据本文提出的方法,利用吉林一号光学 A 星全色与多光谱图像生成了模拟近红外影像,试验结果与各谱段对比如图 3。

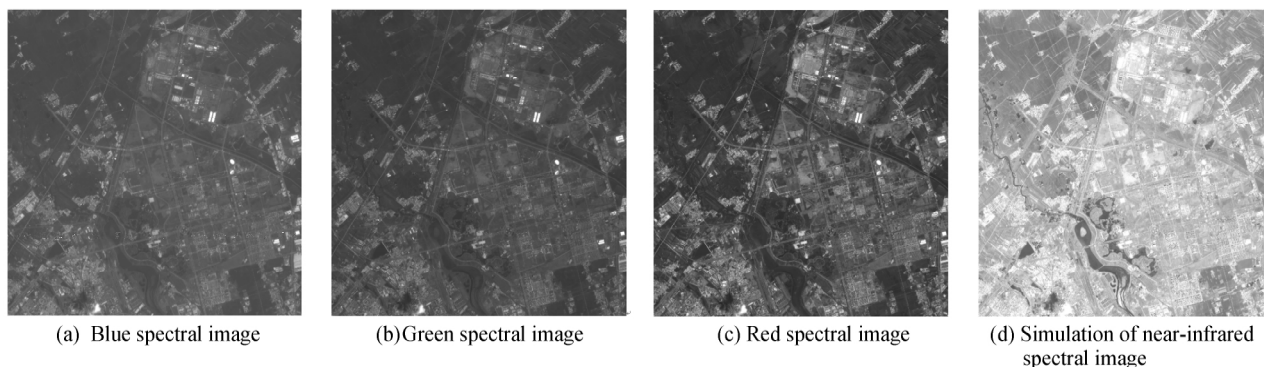


图 3 模拟近红外图像与多谱段图像的对比

Fig.3 Contrast of simulation near-infrared and multispectral images

吉林一号光学 A 星单景全色图像的大小为 527MB,多光谱图像的大小为 98 MB,采用基于 GPU 的 SIFT 算法对图像进行配准,单景近红外模拟图像的生成时间优于 3 s,而采用基于 CPU 的算法需要约 6 min,可见本文的算法提高了模拟图像生成的效率。

3.2 模拟近红外图像应用

模拟近红外图像能够结合 RGB 谱段的信息合成真彩色影像,获得颜色更为丰富艳丽的图像,并利用近红外波段能够穿透薄云薄雾的特性提升图像在去云去雾方面的应用。

3.2.1 遥感多光谱影像合成

遥感多光谱影像多采用 RGB 谱段进行模拟真彩色合成,合成结果生动逼真,符合人眼视觉特性,但是由于大气干扰等因素,合成图像容易出现彩色失真,同时因为没能利用对绿色植物类别及长势差异最敏感的近红外波段信息,而导致植被颜色偏暗、色彩不突出。利用模拟近红外图像,结合 RGB 谱段的信息能够生成合成图像,结果如图 4、5,其生成近红外谱段的配准精度分别达到了 0.37 个像素、0.23 个像素,均优于 0.4 个像素,实现了高精度配准。

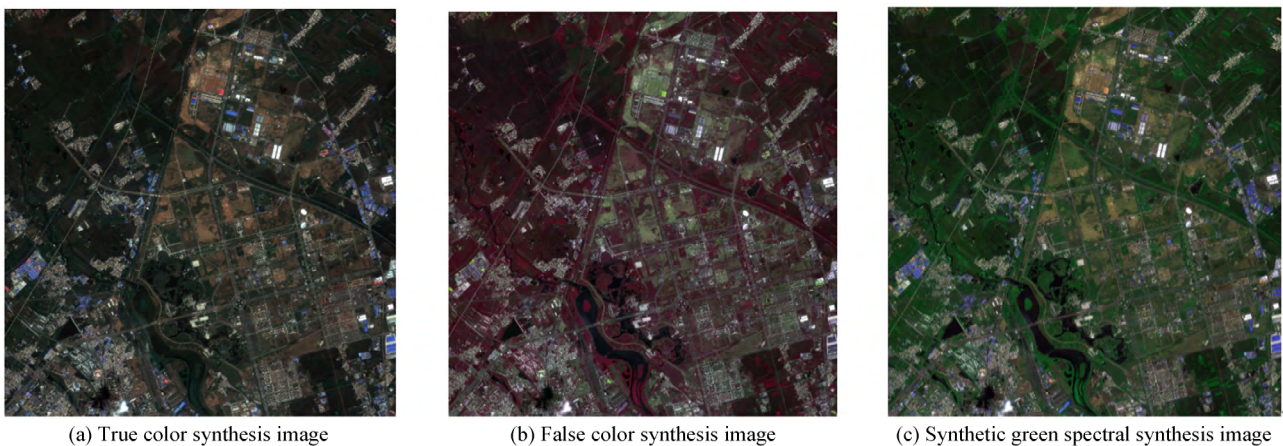


图 4 城镇多光谱谱段合成影像对比

Fig.4 Contrast of town multispectral synthesis images

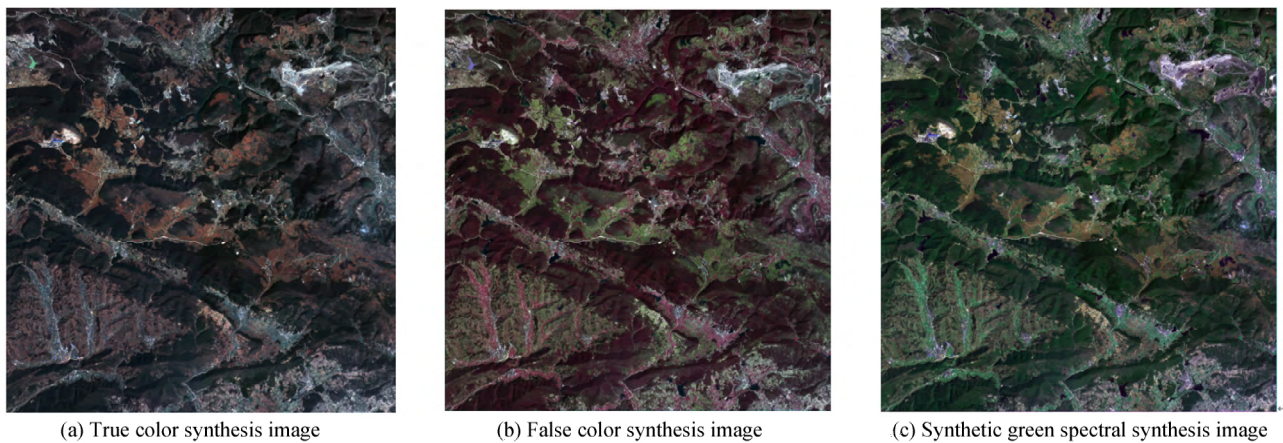


图 5 山区多光谱谱段合成影像对比

Fig.5 Contrast of mountain multispectral synthesis images

图 4 为城镇多光谱谱段合成图,其中图 4(a)为 RGB 谱段合成的真彩色图像,草地与农田颜色较暗,与人眼目视效果有一定差异;图 4(b)为合成的假彩色图像,合成结果中包含了近红外谱段信息,舍弃了易受大气散射影响的蓝谱段信息,相对与真彩色合成结果而言,其合成影像清晰、信息量丰富、色彩艳丽,但是“物体颜色”均会向短波谱段方向移动一个色位,即绿色物体呈蓝色,红色物体呈绿色,从而使得合成影像不符合人眼视觉;图 4(c)为合成绿谱段合成结果,采用绿谱段与近红外谱段按照一定的比例合成新的绿谱段用于真彩色合成,既保证合成影像的清晰度、信息量,同时突出植被信息,图像颜色更接近人眼视觉。图 5 为山区多

光谱谱段合成影像对比,图 5(c)合成绿谱段合成结果中山脊处的绿色树木被突显出来,裸地与山体的颜色也更丰富艳丽.

对图 4(a)、(c)及图 5(a)、(c)的绿谱段从清晰度、边缘能量、熵等几个方面进行定量评价,结果见表 1 和 2,可以看出合成绿谱段在保持了原有绿谱段图像信息的同时,有效提升了清晰度及边缘能量.

表 1 图 4(a)与(c)绿谱段指标评价

Table 1 Evaluation of green band of Fig.4 (a) and (c)

Image number	Evaluating indicator		
	Definition	Edge Energy	Entropy
(a)	18,525 250	7,333 058	5,921 780
(c)	25,729 819	14,245 929	6,372 679

表 2 图 5(a)与(c)绿谱段指标评价

Table 2 Evaluation of green band of Fig.5 (a) and (c)

Image number	Evaluating indicator		
	Definition	Edge Energy	Entropy
(a)	14,225 420	4,406 054	5,612 534
(c)	21,905 290	8,699 796	6,096 145

3.2.2 去云去雾效果

光学遥感卫星成像过程中经常会受到云雾的影响,使得拍摄的地物目标受到遮挡,近红外波段波长较可见光长,受到大气散射的影响更小,能穿透薄云与薄雾,在受到云雾遮挡过程时近红外谱段可以获取更多信息,如图 6,因此可以利用模拟近红外图像提升去云去雾效果.

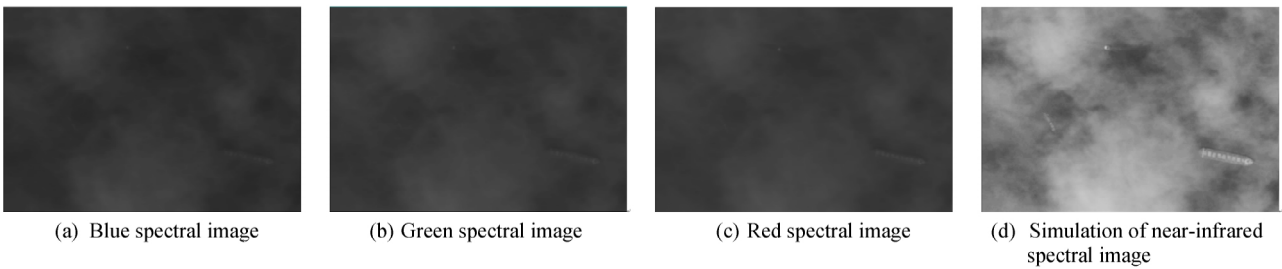


图 6 谱段透射云雾对比

Fig.6 Contrast spectral transmission of cloud

采用基于暗通道的去云去雾方法,去除云雾前后多光谱合成影像结果如图 7,结果表明结合模拟近红外图像的去云去雾效果好于仅使用可见光谱段图像.对实验影像进行定量分析,结果见表 3,从表 3 中的评价

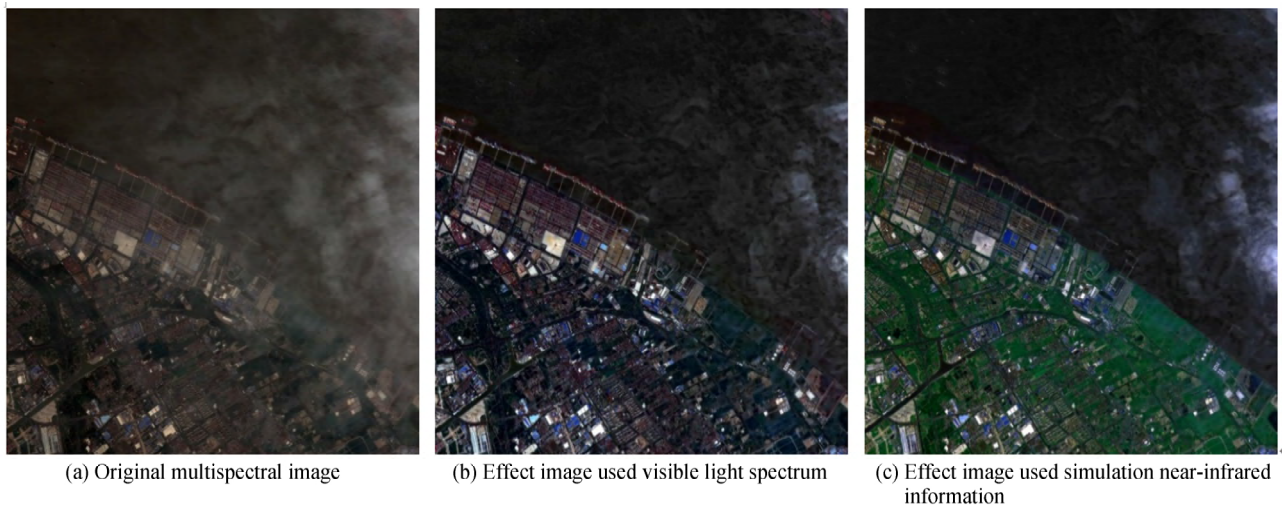


图 7 去云雾效果

Fig.7 Effect images for removal of cloud and haze

表3 去云雾影像定量分析结果

Table 3 Quantitative analysis results of the effect images for removal of cloud and haze

Imag number	Band	Evaluating indicator			
		Definition	Edge energy	Entropy	Color cast
(a)	Blue	13.399 21	3.763 652	6.359 472	0.128 967
	Green	10.726 76	2.647 706	6.255 492	
	Red	9.967 859	2.508 149	6.265 398	
(b)	Blue	26.528 79	14.877 1	6.318 953	0.033 253
	Green	25.197 19	16.723 4	6.170 47	
	Red	31.880 51	26.023 43	6.284 952	
(c)	Blue	27.909 51	22.292 09	6.230 473	0.080 751
	Green	27.515 64	17.466 7	6.417 61	
	Red	28.810 51	28.859 33	6.351 275	

指标可以看出,去云雾处理后图像在保持了原有图像信息的基础上极大地改善了各谱段的清晰度,结合了近红外谱段信息的去雾影像在改善清晰度、提升边缘能量、保持影像熵信息的同时具有良好的视觉效果,符合人眼对绿谱段信息更加敏感的特点,极大地凸显了影像中的植被信息,有效地改善了目视色偏,利于遥感影像的目视判读。

4 结论

本文提出一种基于谱段关联的模拟近红外图像方法,分析遥感图像成像链路模型,基于全色谱段与多光谱 RGB 谱段的关联性,计算谱段间的关联系数,根据全色与多光谱图像生成模拟近红外图像.采用基于 GPU 的 SIFT 算法,单景图像生成时间优于 3 s,有效提高了模拟近红外图像生成的效率.模拟近红外图像在多光谱合成图像中,能够结合 RGB 谱段信息,获得更符合人眼视觉、颜色丰富的合成真彩色图像,同时利用近红外的光谱特性,将模拟近红外图像应用于去云去雾,相比于 RGB 多光谱图像有更好的云雾去除效果.

参考文献

- [1] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHANG Li-fu. Current progress of hyperspectral remote sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(5): 689-707.
童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. *遥感学报*, 2016, **20**(5): 689-707.
- [2] CHEN Yun. Study on the simulation of multispectral infrared images[D]. Wuhan: Huazhong university of science and technology, 2011.
陈云. 红外多光谱图像仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [3] LI Xu-yang, YI Hong-wei, QI Hao-cheng. Optical system design of multispectral space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0311002.
李旭阳, 易红伟, 齐浩程. 多光谱遥感相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0311002.
- [4] CHEN Cheng. Simulation of high-spectral image from multi-spectral image[D]. Wuhan: Huazhong university of science and technology, 2013.
陈程. 基于多光谱图像的高光谱图像模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [5] PONG Xiao-dong, LIU Bo, MENG Xin, et al. Research on remote sensing image generation modeling in the visible regions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1106-1111.
彭晓东, 刘波, 孟新, 等. 星载可见光相机成像仿真建模研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1106-1111.
- [6] SHAW G A, BURKE HK. Spectral imaging for remote sensing[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2003, **14**(1): 3-28.
- [7] COTA S A, BELL J T, BOUCHER R H, et al. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging systems[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, **4**(1): 043535.
- [8] YE Ze-tian, GU Xing-fa. Simulation of remote sensing images based on MIVIS data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, **29**(3): 235-239.
叶泽田, 顾行发. 利用 MIVIS 数据进行遥感图像模拟的研究[J]. *测绘学报*, 2000, **29**(3): 235-239.
- [9] CHEN Fang, NIU Zheng, TAN Yu-chu. Simulation of an Image with a subsection of spectral band using an image with a wider spectral band[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 89-96.
陈方, 牛铮, 覃驭楚. 基于宽波段光学遥感图像的细分光谱光学遥感图像的模拟[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 89-96.
- [10] ZHANG Dong-ying, YI Wei-ning, HONG Jing, et al. Panchromatic image simulation of Worldview based on low-level flight images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(2): 620-624.

- 张冬英, 易维宁, 洪津, 等. 基于低空图像的 Worldview-1 全色波段仿真[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(2): 620-624.
- [11] ZHOU Qiang, BAI Ting-zhu, LIU Ming-qi, *et al.* Near infrared scene simulation based on visual image[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(1): 11-15.
- 周强, 白廷柱, 刘明奇, 等. 基于可见光图像的近红外场景仿真[J]. 红外技术, 2015, **37**(1): 11-15.
- [12] LI Xu-yang, YI Hong-wei, HE Tian-bing. Modified multispectral camera out-band response base on correlation spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0911002.
- 李旭阳, 易红伟, 贺天兵. 基于光谱关联修正多光谱相机的带外响应[J]. 光子学报, 2015, **44**(9): 0911002.
- [13] NAKAMURA J. Image sensors and signal processing for digital stillcameras[M]. CRC press, 2016.
- [14] FIETE R D, PAUL B D. Modeling the optical transfer function in the imaging chain[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 083103.
- [15] FIETE R D. Modeling the imaging chain of digital cameras[M]. Bellingham: SPIE press, 2010.
- [16] SCHÖBERLM, BRÜCKNER A, FOESSEL S, *et al.* Photometric limits for digital camera systems[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, **21**(2): 020501.