

# 蓝波段缺失遥感影像真彩色模拟方法研究

许辉熙<sup>1,2,3</sup> 陈云浩<sup>3</sup> 薛万蓉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>四川建筑职业技术学院测量工程研究所, 四川 德阳 618000

<sup>2</sup>四川建筑职业技术学院测绘工程系, 四川 德阳 618000

<sup>3</sup>北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

**摘要** 针对一些遥感数据缺失蓝波段而无法进行真彩色影像合成的问题,提出一种模拟多光谱传感器真彩色影像的方法。将中分辨率成像光谱仪 MODIS 地表反射率产品(MOD09)作为参考影像,经影像聚类分析得到具有代表性训练样本,并通过反向传播(BP)人工神经网络训练得到蓝波段与特征波段(绿/红/近红)间关系的非线性回归模型,该模型用于模拟 Landsat TM/MSS 和 SPOT-5 的蓝波段并最终合成真彩色影像。实验结果表明:BP 神经网络能够很好地模拟多光谱影像的蓝波段,并且能够在一定程度上去除蓝波段上的大气影响,从而可以得到较为理想的真彩色合成效果。研究成果进一步扩展了图-图遥感影像波段模拟模型的研究深度。

**关键词** 遥感; 蓝波段模拟; 真彩色影像; 反向传播人工神经网络

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051003

## Research about Method of Simulating True Color Image for Remote Sensing Image Lack of Blue Band

Xu Huixi<sup>1,2,3</sup> Chen Yunhao<sup>3</sup> Xue Wanrong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Surveying Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 618000, China

<sup>2</sup>Department of Geomatics Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 618000, China

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract** True color images can not be synthesized due to some remote sensing data missing blue band. A method of simulating true color remote sensing image is proposed. The MODIS land surface reflectivity product (MOD09) is used as reference image where to select pixel samples, and a non-linear regression analysis model is acquired through a back-propagation (BP) artificial neural network that used to fit the spectral reflectance relationship among the blue band and red, or green and near-infrared bands. Then Landsat TM/MSS and SPOT-5 blue bands are simulated with the trained fitting model, and a natural-color image is acquired. The experimental result shows that using the BP neural network model, the blue band of a multispectral image is well simulated and even the atmospheric effect of the blue band is removed. Thus a more realistic and informative natural-color image is acquired. The research results further extend the research depth on remote sensing image band simulation model based on the image-image relationship.

**Key words** remote sensing; band simulation; natural-color image; back-propagation artificial neural network

**OCIS codes** 100.2000; 100.3010; 100.2960; 110.4234

## 1 引言

遥感影像 R(红)G(绿)B(蓝)真彩色合成,对于影像解译与制图、三维地形虚拟现实等应用具有重要作用。由于瑞利散射的缘故,可见光蓝光波段(0.45 ~ 0.52  $\mu\text{m}$ )受大气影响较大<sup>[1]</sup>。在遥感发展的早期阶段,由于技术制约,一些中等分辨率的卫星遥感传感器(如美国陆地资源卫星多光谱扫描仪 Landsat MSS、法国 SPOT-5)没有设置蓝光波段,不能合成真彩色影像,制约了遥感技术的应用发展。而近年来,由于技术的进

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2015-01-03; 网络出版日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41471348)、四川省环境保护重大科技专项(2013HBZX01)

作者简介: 许辉熙(1979—),男,博士后,副教授,主要从事地理学、遥感与 GIS 技术应用等方面的研究。

E-mail: 529382949@qq.com

步,一些高分辨遥感数据(Ikonos、QuickBird、Orbview、Geoeye等)已经包含了蓝光波段。在遥感技术实际应用中,经常使用历史存档数据,对于那些早期没有蓝光波段的历史存档影像,通过模拟蓝波段合成真彩色影像十分必要且具有重要应用价值。

遥感影像模拟已成为近年的研究热点<sup>[2-4]</sup>。以往研究中发展了许多模拟模型,其中大多数为线性模型,即采用线性的波段代数计算来模拟和生成真彩色影像<sup>[5-6]</sup>。尽管遥感影像的蓝波段与其他波段间存在较大的相关性,但由于地表覆盖的复杂异质性加上其光谱响应的多样性,波段间的复杂关系难以通过简单的线性公式得以表现。近年来,非线性机器学习模型方法开始引入到波段模拟的相关研究中<sup>[7]</sup>,在通过已知影像模拟特定影像的图-图模拟模式基础上,同时发展了基于典型地物波谱库的库-图模拟模型<sup>[8]</sup>。该模型方法为:首先将波谱库数据记录采样到遥感影像的波段区间,再通过神经网络或波谱角匹配建立已有波段与模拟波段间的拟合关系来模拟影像的缺失波段最后合成真彩色影像。

上述研究方法为遥感影像真彩色模拟提供了一定的思路,但由于遥感影像成像过程的复杂性不可避免地存在一些问题。图-图模拟模型中,包括蓝波段在内系列波段均受到强烈的大气影响干扰,如果将这些波段直接作为模拟模型的训练输入,将难以准确描述波段拟合关系从而难以得到高质量的模拟结果。而库-图模拟模型中,由于光谱库中地物类型的限制使其无法完全描述复杂地表覆盖的光谱特征,另外从光谱库中的地物光谱测量样本分析外推到遥感像元尺度的计算,也存在尺度转换的问题,需要进一步解决和论证。

本文提出了一种利用美国地球观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据<sup>[9-10]</sup>和多光谱数据模拟真彩色影像的方法。利用MODIS地表反射率产品(MOD09)作为参考影像,从中选择训练样本,并以BP神经网络作为机器学习模型训练波段非线性拟合模型,进而模拟特定多光谱传感器缺失的蓝波段合成与对应时相和区域的多光谱真彩色影像。选择MOD09产品作为模拟参考影像主要基于以下原因:1) MODIS传感器以较高的时间分辨率提供每日观测数据,易于保证与模拟影像的季节同步性;2) MODIS为高光谱传感器,覆盖了从可见光到热红外的36个波段,并且可以反演同步的大气参数,可以得到更为准确的大气纠正效果,而且MOD09地表反射率产品能够有效地去除了大气气体、气溶胶以及微小卷云等影响,可以提供影像波段间最真实的相对关系,更利于作为波段模拟模型的训练样本。

## 2 研究方法

使用MODIS数据模拟对应多光谱影像(Landsat TM/MSS以及SPOT-5)的蓝波段合成真彩色影像,分

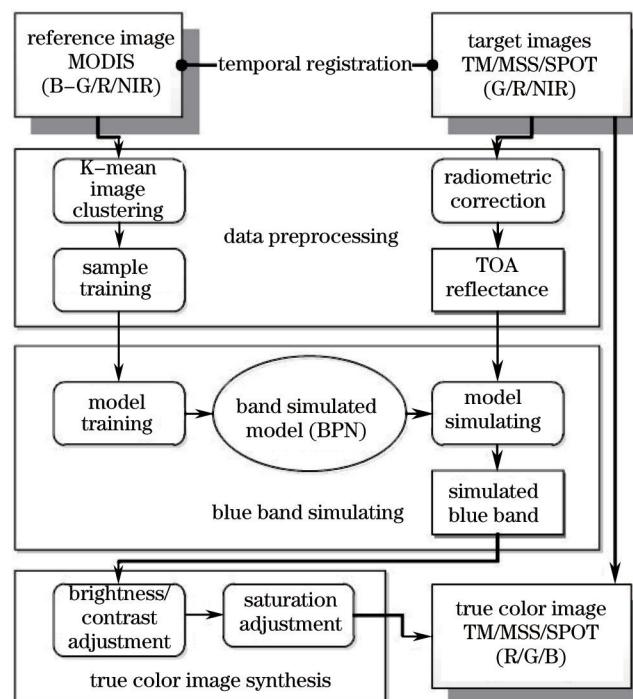


图1 研究技术流程

Fig.1 Research workflow

三个主要步骤:1) 在MODIS影像上通过采样得到具有代表性的像元作为机器学习模型的训练样本(蓝波段作为目标波段);2) 通过机器学习模型进行模型训练与调整得到最优的波段关系拟合模型;3) 将待模拟的遥感影像已有波段的反射率值输入模型,得到模拟蓝波段并合成真彩色影像。图1为研究技术流程图。

## 2.1 影像预处理

选择MODIS影像作为参考影像来训练波段模拟模型。首先,选择与待模拟影像时相近的MODIS数据以保证地表覆盖的一致性。对于MODIS参考影像,除常规预处理外,需通过K-Means等非监督聚类分析方法自动地将影像划分为数个类别以对应不同的地表覆盖类型,然后对于每个类别分别进行随机采样,从而保证所选样本在影像上具有代表性。对于待模拟影像,由于地表的复杂异质性以及太阳高度角、地形因素等外部影响因素,遥感影像最初记录的像元亮度值(DN)值对于不同的地表类型反射具有不同程度的增益和偏移,因此首先将影像DN值转换为具有物理意义的反射率,以还原真实的影像光谱特征。计算影像反射率包括两个步骤:1) 将传感器光谱辐射亮度转换为表观反射率(TOA);2) 通过大气纠正模型将TOA反射率转换为地表反射率,但由于缺少大气纠正模型所需参数而使计算具有不确定性且过程复杂,因此仅做了TOA反射率校正。

## 2.2 蓝波段模拟

模拟蓝波段是生成多光谱遥感真彩色影像的关键技术环节,可以分为波段模拟模型的训练和应用两个步骤。波段模拟模型是通过机器学习的方式来拟合参考影像蓝波段与特征波段反射率之间的复杂非线性关系,进而将对应模拟影像在已有特征波段的反射率值输入该模型以获得其在蓝波段内的反射率模拟预测值,并合成模拟真彩色影像。将MODIS三个波段[绿/红/近红外(NIR)]作为特征波段向量,蓝波段作为目标波段来进行机器学习,然后将其他多光谱影像已有波段(绿/红/近红外)反射率输入该模型,从而得到预测的蓝波段反射率。对于机器学习模型的选择并没有限制,如神经网络、支持向量机(SVM)、回归决策树等模型均可使用,研究中选择BP神经网络作为拟合模型。

BP神经网络(BPN)是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一,模型包括一个正向传播过程和一个误差反馈过程。BPN通过外部输入训练样本的刺激不断改变网络的连接权值,以使网络的输出不断地接近期望的目标输出,其关键是对各连接权值的动态调整。通过前后传递的反复计算,不断地调整权值,使最终输出误差在可接受的精度范围以内,又或者是在指定迭代次数范围内进行权值调整<sup>[1]</sup>。研究中仅选择了包含一个隐藏层(六个节点)的三层网络结构(图2),但是并没有考虑网络隐藏层数、节点数及传递函数选择等技术细节问题。对应MODIS训练样本集  $T = [(G_i, R_i, N_i), B_i]_{i \in \{1, 2, \dots, l\}}$ , 式中  $(G_i, R_i, N_i)$  为第  $i$  个样本像元对应于各传感器波段绿、红、近红外的反射率组成的三维向量,目标值  $B_i$  为第  $i$  个样本像元对应于蓝波段的反射率值,  $l$  为地物样本数;经样本采集后,将样本向量集  $T$  输入 BPN, 通过训练得到特征向量  $(G_i, R_i, N_i)$  与目标值  $B_i$  之间的模拟关系模型;最后将其他多光谱影像(TM/MSS/SPOT-5)的波段向量  $(G_i, R_i, N_i)$  输入模型,得到对应的模拟蓝波段影像。

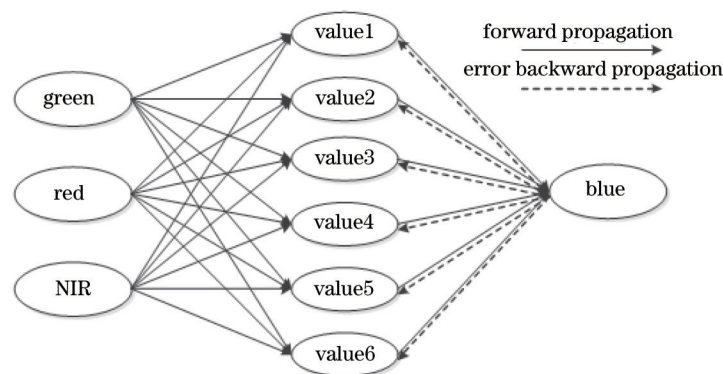


图2 BP神经网络结构图

Fig.2 Model structure of BPN

## 2.3 真彩色影像合成

由BPN模型得到的模拟蓝波段与已有的绿、红波段合并即可合成真彩色遥感影像,但是由于部分极值像元的影响往往导致合成的真彩色影像整体偏暗或偏亮,此外影像像元值往往集中在相对较小的值域范围

而致使影像对比度较小。所以,需要对模拟影像进行后期处理来调整其亮度和对比度,得到具有较好的真彩色视觉效果。采用了没有进行大气纠正的 TOA 反射率影像来模拟蓝波段,因绿、红、近红外波段受大气影响较小,可以直接应用于模拟蓝波段影像。但是各波段上不同程度的大气影响也导致合成真彩色影像视觉效果较差,所以对各波段分别进行亮度/对比度/饱和度调整来生成视觉自然的真彩色影像。

### 3 实验与结果分析

利用 MODIS 数据(空间分辨率 250 m)模拟其他多光谱传感器波段需要考虑尺度问题。由于波段模拟强调各波段间的拟合关系,且基于混合像元为线性组合及地物覆盖类别有限的假设,设计了三组实验:1) 模拟 MODIS 已有的蓝波段,验证方法的模拟精度;2) 模拟 Landsat TM 影像已有的蓝波段,验证方法在不同空间分辨率上的模拟精度,并比较 TOA 反射率和地表反射率分别进行的真彩色模拟的效果差异;3) 模拟 Landsat MSS 和 SPOT-5 影像缺失的蓝波段,验证用于生成真彩色影像的效果。

#### 3.1 实验数据

选择 MODIS 作为参考影像,Landsat TM、Landsat MSS、SPOT-5 等影像作为测试数据,各影像波段数据如表 1 所示,在数据选择时确保了影像获取时间的同步性,从而保证地面覆盖的一致,实验数据如表 2 所示。其中 MODIS 影像选用了 MOD09 地表反射率产品,Landsat TM/MSS 和 SPOT-5 影像均定标为 TOA 反射率。

表 1 实验各传感器波段信息(单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 1 Summary of the band settings for the test data (units:  $\mu\text{m}$ )

Band	Sensor			
	Landsat5 TM	SPOT-5	Landsat2 MSS	MODIS
Blue	0.452-0.518 (0.485)	-	-	0.459-0.479 (0.469)
Green	0.528-0.609 (0.569)	0.50-0.59 (0.545)	0.497-0.598 (0.548)	0.545-0.565 (0.555)
Red	0.626-0.693 (0.660)	0.61-0.68 (0.645)	0.607-0.710 (0.659)	0.620-0.670 (0.635)
NIR	0.776-0.904 (0.840)	0.78-0.89 (0.835)	0.697-0.802 (0.750) 0.807-0.990 (0.899)	0.841-0.876 (0.858)
SWIR	1.567-1.784 (1.676)	1.58-1.75 (1.635)	-	1.628-1.652 (1.640)

表 2 实验数据集信息

Table 2 Summary of the test data

	Reference images (MOD09)		Target images		
	Date	H/V	Date	Path/row	Sensor type
Test1	2010.09.14	23/04	The same image on the left		
Test2	2010.09.14	23/04	2010.09.15	149/030	Landsat5 TM
Test3	2011.05.17	23/04 24/04	1977.05.16	154/027	Landsat2 MSS
	2011.05.01	23/04 24/04	1975.04.27	160/030	Landsat2 MSS
	2008.06.17	23/04 24/04	2008.06.21	210/261	SPOT-5 HRG2
	2008.06.01	23/04 24/04	2008.06.05	216/255	SPOT-5 HRG2

#### 3.2 MODIS 真彩色模拟及结果分析

将实验 MODIS 影像采用 K-Mean 聚类算法对训练影像进行聚类(15类),并在各类中根据所占面积比例随机采集了共 3000 pixel 作为 BPN 模型训练样本。将样本输入 BPN 训练生成对应的 MODIS 模拟蓝波段,并与已有 MODIS 绿、红波段合并生成真彩色,如图 3 所示。在模拟蓝波段和真实蓝波段进行随机采样(与训练样本相异)来验证模型的模拟精度,如图 4 所示,给出了两波段间的直方图对比,如图 5 所示,可见模拟波段值与真实波段值具有较好的拟合效果。计算模拟波段和原始波段的基本统计信息,如表 3 所示,两者的均值及标准差统计几乎相等,而两波段间的相关系数达到 0.999。相关系数反映了波段间信息的重复性,相关性越大,说明两波段信息的重复量越多,表明两个波段信息总体一致。图 3 为模拟蓝波段与真实蓝波段及其分别合成真彩色影像的对比,可见两者几乎一致。实验证明,本文方法模拟的 MODIS 蓝波段能够较准确地还原真实波段光谱信息,模拟结果可信。

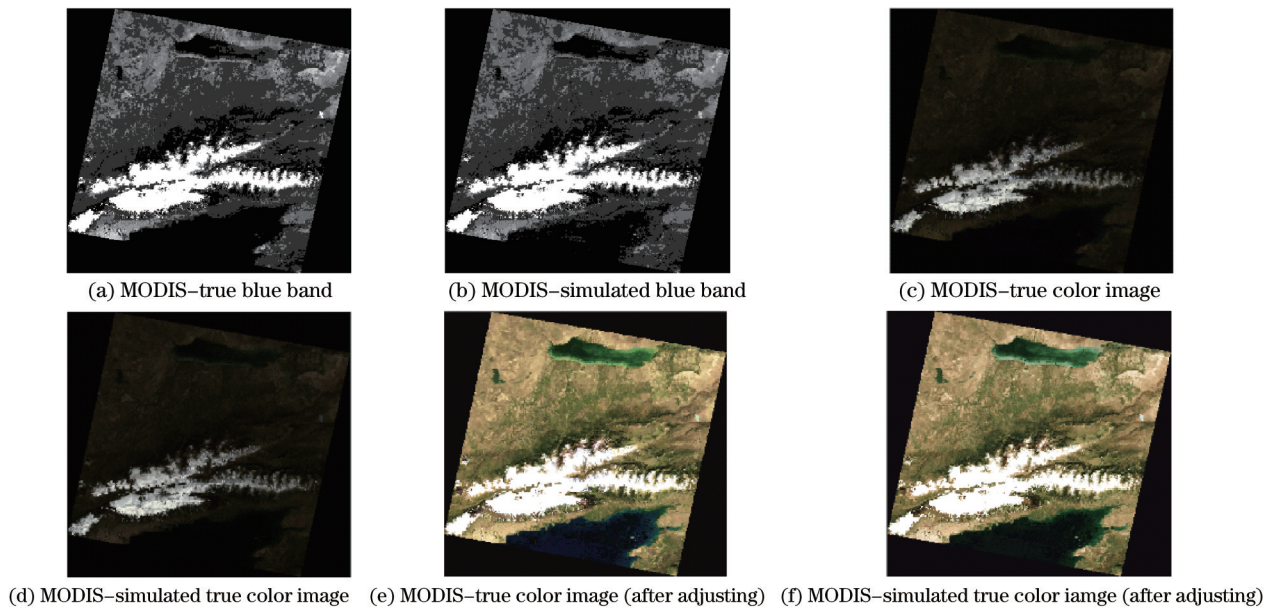


图3 MODIS 真彩色模拟结果对比

Fig.3 Comparison of true color image and simulated true color image by MODIS

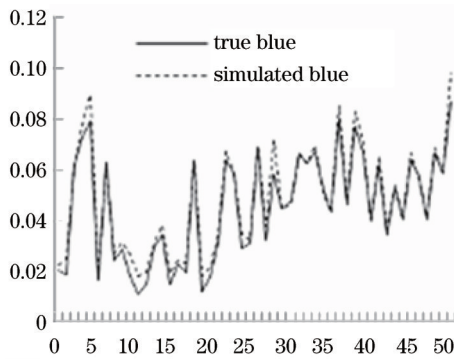


图4 模拟/真实蓝波段随机采样对比

Fig.4 Random sample contrast between true blue band and simulated blue band

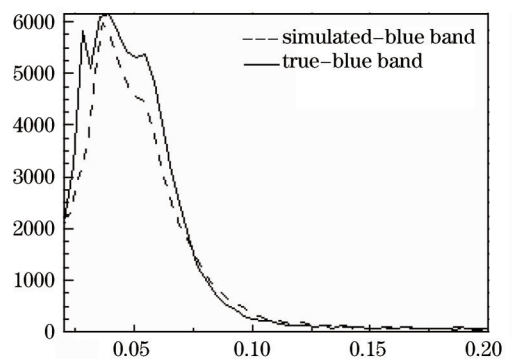


图5 模拟/真实蓝波段直方图对比

Fig.5 Histogram contrast between true blue band and simulated blue band

表3 MODIS 模拟波段与原始波段统计值对比

Table 3 Statistics contrast between the MODIS true blue band and simulated blue band

Band	Indicators				
	Min	Max	Mean	Stdev	Correlation
True blue band	0.008937	0.97653	0.070628	0.132659	0.998588
Simulated blue band	0.012546	0.899419	0.071886	0.133078	

### 3.3 TM 真彩色模拟及结果分析

实验影像为与MODIS影像覆盖范围相同的Landsat TM影像。图6为不同方法合成真彩色影像的对比,图6(a)为由TOA反射率直接合成的原始TM真彩色影像,图6(b)为由TOA反射率模拟蓝波段合成的TM真彩色影像,对比图6(a)与图6(b)可知,模拟影像具有更高的对比度,原始真彩色影像因蓝波段受大气影响强烈而对比度较低(视觉效果上有一层薄雾)。经ATCOR2模型纠正后的模拟影像与原始影像[图6(d)、(c)]几乎一致,但从视觉效果上表现并不自然,这是因为ATCOR2模型因为缺少部分相关参数而无法完全纠正大气影响,经对比度/饱和度调整后处理后,得到较好的真彩色效果[图6(e),(f)]。进一步分析水体[图6(g),(h)]、城市区域[图6(i),图6(j)]的模拟真彩色影像,对比模拟影响与原始图像的局部细节,可见模拟影像比原始影像偏绿。由于从MODIS影像上采集的像元样本分辨率为250 m,难以清楚地描述区域复杂的地表状况,致使BPN模型中该类型的训练样本不足,从而使得模拟影像化原始影像偏绿。

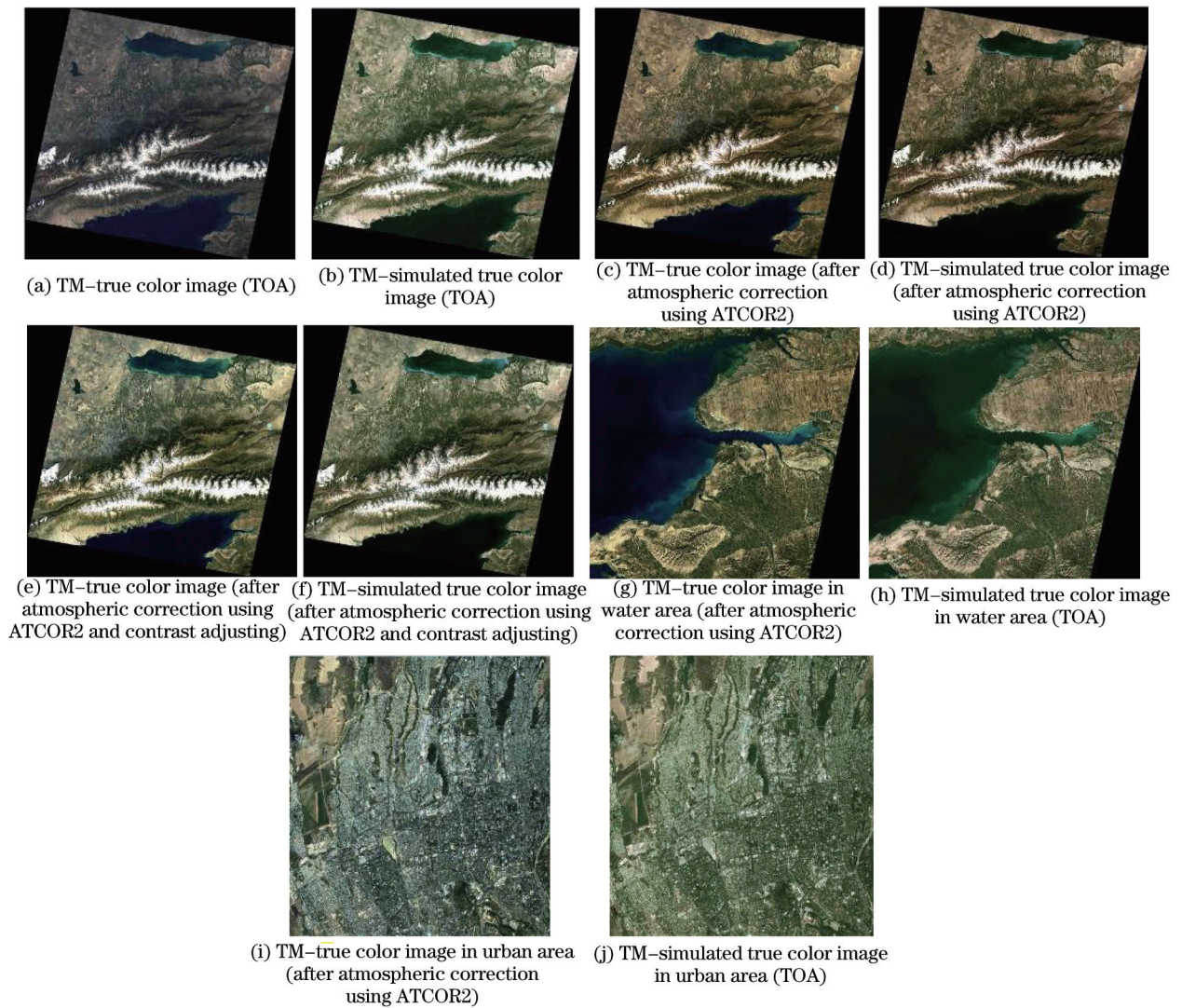


图6 TM真彩色影像模拟效果对比

Fig.6 Simulation results contrast of TM true color image

由表4可知,模拟蓝波段较原始蓝波段具有更高的标准差统计。此外 ACTOR2组的模拟蓝波段与原始蓝波段的相关度大于与 TOA组的模拟蓝波段与原始蓝波段的相关度,这是因为 ACTOR2纠正了大气对于 TM波段的影响以及 MODIS波段间具有更为准确的关系,所以能够得到更准确的计算结果。

表4 TM模拟蓝波段与原始蓝波段统计值对比

Table 4 Statistics contrast of TM true blue band and simulated blue band

Band	Indicators				
	Min	Max	Mean	Stdev	Correlation
True blue band (TOA)	0.05	0.43	0.12	0.06	0.96
Simulated blue band (TOA)	0.02	0.90	0.09	0.09	
True blue band (Atcor2)	0.00	0.95	0.12	0.13	0.99
Simulated blue band(Atcor2)	0.00	0.97	0.12	0.15	

### 3.4 MSS和SPOT-5真彩色模拟及结果分析

分别对MSS和SPOT-5影像缺失的蓝波段进行模拟并合并生成真彩色影像,MSS传感器具有两个近红外波段,如表1所示,实验中选择了与MODIS波段设置更接近的中心波长为 $0.899\mu\text{m}$ 的波段,经TOA反射率计算后,将MSS和SPOT-5的绿、红、近红外波段输入由对应MODIS影像样本(MSS、SOPT对应MODIS影像均以K-Mean聚类为15类并按各类所占面积比例随机采集3000个样本)训练的BPN模型,得到模拟蓝波段并合成真彩色影像,模拟结果如图7和图8所示。可见模拟结果在雪(白色)、沙漠(黄色),戈壁(绿-白),水体(蓝)等地

表覆盖上均具有较自然的真彩色效果,但对比 SPOT-5 模拟真彩色影像, MSS 模拟影像的真彩色表现能力稍弱,如戈壁太黄、部分植被稍蓝,这是因为 MSS 的波段设置与 MODIS 传感器相差较大所造成的。

## 4 结 论

通过 BP 神经网络回归模型定量地描述了遥感影像各波段内反射率之间的复杂非线性关系,实验结果表明以参考 MODIS 影像像元作为样本建立的 BPN 波段模拟模型能够生成可靠的模拟蓝波段,再经过对比度/饱和度调整等后处理环节,可生成高度自然的合成真彩色影像。由于 MODIS 影像(OD09 产品)分辨率高,对于任意的多光谱影像均能找到与之对应的 MODIS 参考影像进行模型训练并省去了反射率转换的计算量,有效地解决了早期的多光谱遥感影像因蓝波段缺失而无法直接合成真彩色影像的问题,并进一步拓展了图-图遥感影像波段模拟模型的研究领域。

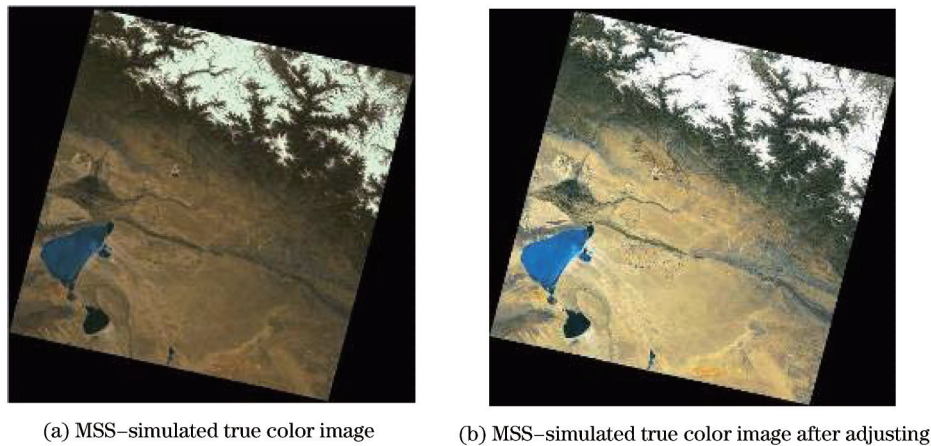


图 7 MSS 真彩色影像模拟效果对比

Fig.7 Simulation results contrast of MSS true color image

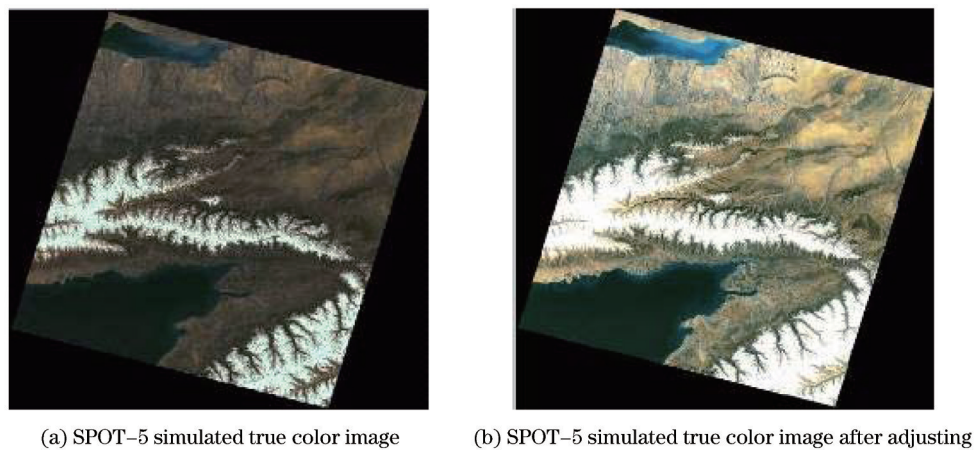


图 8 SPOT-5 真彩色影像模拟效果对比

Fig.8 Simulation results contrast of SPOT-5 true color image

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Yingshi. Remote Sensing Application and Analysis: Principles and Methods[M]. Beijing: Science Press, 2003: 20-25.  
赵英时. 遥感应应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 20-25.
- 2 Zhu Changming, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, *et al.*. Approach of SPOT true color image simulation assisted by spectral library data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(2): 169-174.  
朱长明, 骆剑承, 沈占锋, 等. 地物波谱数据辅助的 SPOT 影像模拟真彩色方法研究[J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 169-174.
- 3 Shen Jinxiang, Chen Xi, Yang Liao, *et al.*. A remote sensing band simulation approach based on image spectral [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(9): 2467-2470.  
沈金祥, 陈曦, 杨辽, 等. 基于影像光谱库的遥感波段模拟方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2467-2470.

- 4 Xu H, Chen Y. A technique for simulating pseudo natural color images based on spectral similarity scales[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2012, 9(1): 70-74.
- 5 Knudsen T. Pseudo natural color aerial imagery for urban and suburban mapping[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(12): 2689-2698.
- 6 Patra S K, Shekher M, Solanki S S, *et al.*. A technique for generating natural color images from false color composite images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 2977-2989.
- 7 Zhu Changming, Yang Liao, Luo Jiancheng, *et al.*. The nonlinear simulation model for SPOT true color image based on neural networks[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, (2):71-75.  
朱长明, 杨 辽, 骆剑承, 等. 基于神经网络的SPOT数据模拟真彩色非线性方法研究[J]. *国土资源遥感*, 2009, (2): 71-75.
- 8 Cheng Xi, Shen Zhanfeng, Luo Jiancheng, *et al.*. Method on simulating remote sensing image band by using ground-object spectral features study[J]. *Journal of Infrared and Millim Waves*, 2010, 29(1): 46-50.  
程 熙, 沈占锋, 骆剑承, 等. 利用地物波谱学习的遥感影像波段模拟方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 46-50.
- 9 Li Xin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Design of spectral target used to assess the degradation of multi-spectral sensor in flight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728002.  
李 鑫, 张黎明, 陈洪耀, 等. 光学遥感器光谱响应特性在轨评估中的光谱靶标设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0728002.
- 10 Cao Yanan, Wei Heli, Bian Jian, *et al.*. Study of atmospheric radiative properties at infrared bands under ice clouds based on atmospheric infrared sounder and moderate resolution imaging spectroradiometer observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0901003.  
曹亚楠, 魏合理, 边 建, 等. 基于大气红外探空仪和中分辨率成像光谱仪观测的冰云大气红外辐射特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0901003.
- 11 Ma Rui. *Artificial Neural Network Theory*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014: 81-125.  
马 锐. *人工神经网络原理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 81-125.

栏目编辑: 苏 岑