

遥感模拟图像应用于不同传感器光谱性能分析

叶泽田 顾行发 刘先林 王志民

(中国测绘科学研究院,北京市北太平路16号,100039)

摘要 研究利用高光谱成像数据,用数字的方法定量模拟了 SPOT-HRV、CBERS-CCD、Landsat5-TM 和 NOAA14-AVHRR 类似波段的空中表面反射率及地面光谱反射率图像,并利用这些图像对上述传感器相应波段的光谱响应、大气影响特性用基于反射率和基于归一化植被指数(NDVI)的方法进行了定量的比较分析。研究表明,由于传感器类似波段的光谱响应不同,因而由其计算的反射率和 NDVI 之间均存在明显差异,这种差异是大气改正所无法完全消除的。多传感器定量分析时需要进行相应的辐射改正。

关键词 遥感模拟图像;传感器光谱性能;植被指数分析

分类号 P237.9; TP73

在遥感应用中,为提高数据分析的精度,常常需要使用不同时相、不同传感器的数据进行多传感器分析。特别是在环境的动态变化监测和农业遥感中,人们更希望从遥感数据中尽可能多地提取关于地表覆盖的有关物理参量,如植物的水分、叶绿素含量等。这就要求对遥感数据进行定量分析。研究表明,人们常用的很多植物生物量与传感器的可见光、近红外波段的辐射能量有关。根据可见光、近红外辐射计算的归一化植被指数与很多的植物生物量之间具有很强的相关性^[1]。由于计算 NDVI 值需要利用传感器的可见光和近红外波段信息,它必然受到传感器光谱特性、传感器绝对辐射校正及大气的影响^[2,3]。由于不同传感器类似波段的光谱响应存在着不同程度的差异,这使得利用不同传感器数据计算的 NDVI 也不同。人们从不同的角度,运用不同的方法对于如何利用不同传感器数据进行 NDVI 分析,评估不同传感器数据之间的差异进行了研究^[3,4,5]。研究表明,遥感定量分析必须利用经过辐射改正后的数据,强调了辐射改正在遥感定量分析中的重要性。

尽管利用实际的遥感图像来进行不同传感器系统性能的比较分析是一种有效的方法,但是要获取同一时间、同一地区的不同传感器的资料却十分困难。另一方面,不同的传感器不仅在光谱响应上存在差异,而且在空间的几何分辨率上也往往不同,这就需要对不同几何分辨率的图像进行重采样。显然,这样的图像不能完全真实地反映所分析传感器的辐射性能。本研究旨在利用同

数据源的高光谱数据,用遥感图像模拟的方法来产生所分析传感器的模拟图像,使得这些图像具有相同成像时间、相同覆盖地区和相同几何分辨率。在没有传感器绝对辐射校正误差影响的情况下,利用图像数据(而非离散数据点)来分析比较不同传感器系统的光谱响应及大气特性,定量比较和评估不同传感器系统的光谱响应及大气特性对 NDVI 的影响。

1 遥感图像的模拟

利用同源数据产生不同传感器的光谱图像,需要利用遥感图像的定量模拟方法。遥感图像的模拟是利用一种已知数据源来模拟生成待分析传感器数据的处理方法与过程。本文利用机载 MIVIS 获取的高光谱成像数据作为模拟的数据源。MIVIS 是一种比 SPOT、CBERS、TM、NOAA 传感器具有更高光谱分辨率的传感器系统,其光谱范围不仅包含了可见光、近红外波段,而且还具有中红外和热红外波段,其航空遥感平台所具有的灵活性使之能够获取较高几何分辨率的图像,因而 MIVIS 数据是较好的模拟数据源。

利用模拟数据源数据,可进行遥感传感器不同性能的模拟,如光谱响应函数模拟、调制传递函数(MTF)模拟、大气影响改正模拟和几何分辨率模拟。本文主要考虑传感器光谱响应函数模拟和大气影响改正模拟,以便利用源数据来模拟用于分析的不同传感器的地面光谱反射率图像。其过程为利用源数据图像进行光谱响应函数模拟,得

到传感器的空中表面反射率图像;然后进行大气影响改正模拟,产生相应的地面光谱反射率图像。

遥感图像模拟方法具有较大的灵活性。它既可模拟传感器的单一性能以分析其影响,也可模拟传感器的多个性能以分析其综合影响。遥感图像模拟包括对传感器成像系统的光学性能的模拟和对大气影响改正的模拟。前者除了光谱响应函数的模拟外,还包括 MTF 模拟。对于一个传感器系统来说,光谱响应和 MTF 特性是相对稳定的,在一定的时间范围内,其变化较小。因此,光学性能的模拟可以看作是对传感器成像系统静态性能的模拟。而大气影响改正模拟与图像获取时的大气状况及成像几何条件有关,具有相对的时间和位置变化特性,可以看作是对传感器成像系统动态性能的模拟。不同传感器成像差异的对比分析实质上可以看做是对其静态性能和动态性能及其组合影响进行对比分析。

2 不同传感器的表面反射率及其差异分析

不同传感器成像性能的差异可以通过其表面反射率(apparent reflectance at sensor level)的差异或基于表面反射率计算的归一化植被指数($NDVI\rho^*$)的差异来体现。在本文的研究中,首先利用 MIVIS 数据进行传感器的静态性能——光谱响应函数的模拟,然后根据式(1)计算产生相应传感器的表面反射率图像。该图像反映了传感器光谱响应和大气状况等的综合影响。

$$\rho^*(\lambda) = \pi \cdot L(\lambda) \cdot d^2 / (E(\lambda) \cdot \cos(\theta)) \quad (1)$$

式中, $\rho^*(\lambda)$ 表示传感器所在高度的光谱表面反射率; $L(\lambda)$ 表示经过光谱响应模拟后生成的光谱亮度; d 表示太阳-地球距离因子; $E(\lambda)$ 表示大气层顶部的太阳光谱辐射通量; θ 表示传感器位置的太阳高度角。

从式(1)可以看出,与光谱亮度值 $L(\lambda)$ 相比,光谱表面反射率 $\rho^*(\lambda)$ 考虑了太阳-地球距离变化、传感器的光谱响应和太阳高度角的影响,进一步减小了辐射误差的影响,因而更适合进行不同传感器、不同时相的遥感数据之间的比较。

如前所述,NDVI 是遥感定量分析应用中最常用的参数之一。正是因为 NDVI 的广泛应用,使得其成为人们分析和评价不同传感器系统差异的重要指标。在本研究中,除了评估不同传感器表面反射率之间的差异,也比较分析基于表面反

射率图像不同传感器的 $NDVI\rho^*$ 值。 $NDVI\rho^*$ 的计算式定义为:

$$NDVI\rho^* = (\rho_{NIR}^* - \rho_R^*) / (\rho_{NIR}^* + \rho_R^*) \quad (2)$$

式中, $NDVI\rho^*$ 表示基于表面反射率计算的归一化植被指数; ρ_{NIR}^* 表示近红外波段的表面反射率; ρ_R^* 表示红波段的表面反射率。

对于待比较分析的不同传感器波段,分别应用式(1)、(2)计算其对应的表面反射率图像和 $NDVI\rho^*$ 值。在此基础上,应用数理统计的方法可以求得不同传感器数据对应的均值和均方差,以分析不同传感器性能之间的差异程度。这种差异反映了不同传感器系统在未进行大气辐射改正情况下的相互偏离程度是大气和光谱响应综合影响的结果。

3 利用不同传感器数据计算的地面反射率及其差异分析

如果不考虑 MTF 和地形等其他因素的影响,可以认为表面反射率图像是大气和光谱响应作用的综合结果。要分析不同传感器光谱响应的影响,必须使用与这些传感器相应的地面反射率图像。要得到地面反射率图像,需根据成像时的大气条件,定量地消除大气散射和吸收对成像的影响,进行大气的辐射改正,将空中的表面反射率图像变换为相应传感器的地面反射率图像。从理论上来说,如果大气的影响得到了正确的改正而又不考虑地形的影响,则地面反射率图像反映了传感器光谱响应的特性,因而应用不同传感器数据得到的地面反射率图像可以分析这些传感器光谱响应特性的差异。

大气对成像的影响是相当复杂的。大气改正一般使用模型的方法。在这些改正方法中,可以输入成像时大气的探空资料,包括大气断面中气体的湿度、压力、水汽含量等。采用模型的方法修改相应的参数可以模拟成像时大气的状况和成像几何条件。常用的大气辐射改正软件有 6S、MODTRAN 等。

一般来说,当将地面反射面看做一个朗伯平面(Lambertian surface)时,传感器表面反射率 ρ^* 与地面对目标反射率 ρ_c 的关系为:

$$\rho^* = T_g \cdot (\rho_a + \rho_c \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)) / (1 - \rho_c \cdot S) \quad (3)$$

式中, T_g 是大气的总透过率; ρ_a 是大气反射率; S 是半球反照率; $T(\theta_s)$ 是向下散射透过率; $T(\theta_v)$

是向上散射透过率。

研究应用 MODTRAN 大气辐射传输模型来进行大气的改正。MODTRAN 的输入参数设置为:传感器高度 3km, 太阳高度角 25.2°, 大气模型为 MIDLATITUDE SUMMER, 气溶胶模型为 RURAL 模型, 能见度 23km。经过大气改正, 得到了相应传感器的地面反射率图像。应用与表面反射率图像类似的分析方法, 根据地面反射率图像比较分析了不同传感器的差异。同时, 还评估了不同传感器的基于地面反射率计算的归一化植被指数($NDVI\rho$)的差异程度。 $NDVI\rho$ 的计算式为:

$$NDVI\rho = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (4)$$

式中, ρ_{NIR} 、 ρ_R 分别表示相应于传感器的近红外波段及红波段的地面反射率值。对于不同传感器的类似波段, 以其相应的地面反射率或 $NDVI\rho$ 的平均值作为真值, 可以统计出以均方差表示的传感器之间性能的偏差程度。

4 数据分析与结论

1995 年 7 月 12 日利用机载 MIVIS 高光谱成像系统, 在海拔 3km 处获取的法国南部 La Crau 大气校正场的高光谱数据模拟了 5m 地面几何分辨率的 SPOT-HRV1、中巴地球资源卫星 CBERS-COD、Landsat5-TM 的绿、红、近红外波段和 NOAA14 的 AVHRR1、AVHRR2 波段的表面反射率和地面反射率图像。MIVIS 高光谱数据具有 102 个光谱波段, 其中可见光 20 波段, 近红外 8 波段, 中红外 64 波段, 热红外 10 波段, 其相应的波段范围分别为 0.43~0.83μm、1.15~1.55μm、1.985~2.479μm 和 8.21~12.7μm。

为了比较上述 4 种传感器类似波段的性能和研究大气对辐射传输的影响, 笔者利用了模拟的表面反射率和地面反射率图像。试验中, 以这两种图像为基础, 参考野外地面实地调查数据, 在图像上适当选取了 7 类地物作为比较分析的样本。这 7 类地物包括玉米、草、矮林、橄榄、麦子、葡萄园和水稻, 对应的样本大小(像元数)列于表 1。

根据 7 类地物的样本值, 分别以该样本的平均表面反射率、平均地面反射率作为该类地物的表面反射率和地面反射率, 然后以地物的表面反射率和地面反射率为基础, 分析了 SPOT-HRV1、中巴地球资源卫星 CBERS、Landsat5-TM 和 NOAA14-AVHRR 的可见光波段、近红外波段的反射率差异, 同时还分别对用它们计算的归一化

植被指数的大小进行了比较, 现将结果分析如下。

表 1 试验地物类型及其样本大小

Tab. 1 The Type and Window Size of Samples for Test Objects

地物类型	玉米	草	矮林	橄榄	麦子	葡萄园	水稻
样本大小	357	638	2 795	988	1 634	572	520

利用 MIVIS 的可见光波段、近红外波段的光谱亮度数据和上述传感器的光谱响应数据模拟得到了这些传感器相应的光谱亮度图像, 然后根据式(1)计算了各种传感器相应的表面反射率图像。计算中 d 取 1, $E(\lambda)$ 利用大气层顶部的太阳光谱辐射常量与传感器光谱响应相乘得到。利用表面反射率图像数据, 计算了表 1 所列 7 种地物样本的平均表面反射率。应用 MODTRAN 大气辐射传输模型对各种传感器的表面反射率图像进行大气改正模拟, 得到了这些传感器相应的地面反射率图像。利用地面反射率图像数据, 计算表 1 所列 7 种地物样本的平均地面反射率。利用平均表面反射率和平均地面反射率数据按式(2)、(4)分别计算, 得到上述 7 类地物的基于表面反射率和地面反射率的归一化植被指数。

就地物对应的表面反射率数据而言, 如果以每一类地物的 SPOT、CBERS、TM 的绿波段、红波段、近红外波段的表面反射率的平均值作为该类地物该波段表面反射率的真值, 则可计算出这 3 种传感器在这 3 个波段表面反射率的平均偏差值。平均偏差值在一定程度上反映了不同传感器的性能差异。对地物的表面反射率及地面反射率数据的类似分析结果列于表 2。表 2 显示了不同传感器特性对反射率的影响。

如果以每一类地物的 SPOT、CBERS、TM 及 NOAA14 数据计算的归一化植被指数的平均值作为该类地物的归一化植被指数真值, 则可分析和评估由不同传感器数据计算的归一化植被指数之间的偏差程度。不同地物的归一化植被指数真值数据见表 3。从表 3 可以看出, 经过大气改正后计算的归一化植被指数比改正前的要高。

利用上述数据, 用统计的方法可求得基于不同传感器数据计算的归一化植被指数的均方差, 见表 4。相应于不同传感器反射率的平均偏差值, 均方差的大小从另一个侧面反映了不同传感器的性能差异。

通过以上分析, 可以得出如下结论:

- 1) 从表 2 看出, 不同传感器的地面反射率相对于其他传感器的地面反射率均存在一定的平均

偏差;表4的均方差也显示出基于地面反射率计算的不同传感器的NDVI之间也存在差异。因而可认为,如果不同传感器的光谱响应不同,则经过大气改正以后,无论是它们的地面反射率还是NDVI值都会存在相应的差异。应用多传感器数据进行定量分析时应考虑这个因素的影响。

2)从表3可知,试验中所用的7类地物的 $NDVI_{\rho^*}$ 均与 $NDVI_{\rho}$ 不同,这说明大气改正对NDVI的计算有影响。表中所有 $NDVI_{\rho^*}$ 均小于 $NDVI_{\rho}$,这表明大气影响使NDVI值变小,而大气改正有增大NDVI值的趋势。

表3 不同地物的归一化植被指数真值数据

Tab.3 NDVI True Value of Different Objects

项目	玉米	草	矮林	橄榄	麦子	葡萄园	水稻
$NDVI_{\rho^*}$	0.550 2	0.717 9	0.552 2	0.285 0	0.191 5	0.276 9	0.715 4
$NDVI_{\rho}$	0.555 3	0.719 3	0.625 0	0.328 5	0.311 8	0.285 3	0.777 5

表4 基于不同传感器数据计算的归一化植被指数的均方差

Tab.4 Standard Error of NDVI Based on Different Sensors

项 目	SPOT	CBERS	TM	NOAA14
基于 $NDVI_{\rho^*}$ 的均方差/ 10^{-2}	1.174 2	1.755 2	1.983 9	1.760 8
基于 $NDVI_{\rho}$ 的均方差/ 10^{-2}	2.906 9	1.319 3	2.606 8	2.663 5

3)表2、4的表面反射率和 $NDVI_{\rho^*}$ 数据显示,由于传感器光谱响应不同和大气影响,不同传感器的表面反射率和 $NDVI_{\rho^*}$ 也会产生差异。

4)本文对CBERS的模拟图像分析方法为新型传感器的性能研究提供了一条新的途径。

5)试验表明,采用MIVIS资料作为数据源的遥感图像模拟方法可以定量评估SPOT、CBERS、TM及NOAA14传感器光谱性能的差异。分析结果还显示,由不同传感器光谱响应差异造成的影响只靠大气改正不能完全消除的,因而需要做进一步研究。

致谢:促进科学技术研究中法协会对本研究给予大力支持,在此深表感谢。

参 考 文 献

1 Gallo K P, Daughtry C S T. Difference in Vegetation In-

表2 不同传感器表面反射率及地面反射率的平均偏差值
Tab.2 Average Error of Apparent Reflectance
and Ground Reflectance for Different Sensors

传感器	平均偏差		
	绿波段	红波段	近红外波段
表面 反射率	SPOT 0.002 8	0.003 6	0.002 7
	CBERS 0.001 4	0.003 4	0.006 3
	TM 0.005 5	0.003 5	0.009 0
地面 反射率	SPOT 0.004 4	0.002 2	0.012 8
	CBERS 0.001 6	0.004 6	0.009 6
	TM 0.005 8	0.003 4	0.003 3

dices for Simulated Landsat-5 MSS and TM, NOAA-9 AVHRR, and SPOT-1 Sensor Systems. Remote Sens. Environ., 1987, 23:439~452

- 2 Santer R, Gu X F. SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France). Remote Sens. Environ., 1992, 41: 227~237
- 3 Guyot G, Gu X F. Effect of Radiometric Correction on NDVI-Determined from SPOT-HRV and Landsat-TM Data. Remote Sens. Environ., 1994, 49: 169~180
- 4 Colwell R N, Poulton C E. SPOT Simulation Imagery for Urban Monitoring: A Comparison with Landsat TM and MSS Imagery and with High Altitude Color Infrared Photography. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1985, 51(8):109 3~110 1
- 5 Hill J, Aifadopoulou D. Comparative Analysis of Landsat-5 TM and SPOT HRV-1 Data for Use in Multiple Sensor Approaches. Remote Sens. Environ., 1990, 34: 55~70

Analysis of Spectral Characteristics Among Different Sensors by Use of Simulated RS Images

Ye Zetian Gu Xingfa Liu Xianlin Wang Zhimin

(Chinese Academy of Surveying & Mapping, 16 North Taiping Road, Beijing, China, 100039)

Abstract This research, by use of RS image-simulating method, simulated apparent reflectance images at sensor level and ground-reflectance images of SPOT-HRV, CBERS-CCD, Landsat-TM and NOAA14-AVHRR's corresponding bands. These images were used to analyze sensor's differences caused by spectral sensitivity and atmospheric impacts. The differences were analyzed on normalized difference vegetation index(NDVI). The results showed, the differences of sensors' spectral characteristics cause changes of their NDVI and reflectance. When multiple sensors' data are applied to digital analysis, the error should be taken into account. Atmospheric effect makes NDVI smaller, and atmospheric correction has the tendency of increasing NDVI values. The reflectance and their NDVI of different sensors can be used to analyze the differences among sensor's features. The spectral analysis method based on RS simulated images can provide a new way to design the spectral characteristics of new sensors.

Key words simulated RS image; sensor spectral characteristic; vegetation index analysis

(上接第 294 页)

very urgent task. Normal data encoding technique comes to loss-less compression, while the compression ratio only ranges about 2 and can't be satisfied with actual requirement. The new developing compression techniques, such as wavelet compression and fractal compression will reach a high compression ratio, but they belong to degraded compression and need much more CPU time. So for the time being, these methods have not much actual use in the field of the remote sensing.

In this paper, the technique of quasi-lossless compression based on the image restoration is presented. The technique of compression described here will include three steps, namely, bit compression, removing correlation and image restoration based on the theory of modulation transfer function(MTF). The quasi-lossless compression comes to high speed and the quality of reconstructed image under restoration reached the quasi-lossless level with higher compression ratio. The test of TM and SPOT remote sensing images show that the average compression ratio is about 4~5, the fidelity reaches 0.99 and peak value signal-noise ratio(PSNR) is over 42. All of the results confirm that the technique is reasonable and applicable.

Key words quasi-lossless compression; image restoration; fidelity; peak value signal-noise ratio; edge curve; line spread function