

遥感影像邻坡反射辐射计算与分析探讨

罗庆洲¹ 王培法¹ 石玉立¹ 李先华²

1 南京信息工程大学遥感学院,江苏南京, 210044

2 上海大学通信与信息工程学院,上海, 200072

摘要:通过对邻坡反射辐射机理的剖析,考虑邻坡反射路径中气柱程辐射、透过率等影响因素,建立了邻坡反射辐射物理模型,实现了对像元接收到的邻坡反射辐射照度及其比例的定量化计算。影像实验结果表明,像元接收到的邻坡反射辐射照度取决于周边下垫面反射率、地形、太阳入射光谱等因素的共同影响,高反射率的周边下垫面推升邻坡反射辐射照度;像元的邻坡反射辐射比例取决于它接收到的直接辐射、散射辐射与邻坡反射辐射的综合计算,低照度像元的邻坡反射辐射比例较高,阴影像元在弱散射波段的邻坡反射辐射比例一般高于强散射波段。

关键词:邻坡反射辐射;遥感;大气影响

中图法分类号:P227.4; TP753 文献标志码:A

在复杂地形条件下,忽略地表和大气之间的多次反射,地表接收的入射总辐射可分为太阳直接辐射、天空下行散射辐射与邻坡反射辐射(亦称地形反射辐射)^[1-3](见图 1)。通常情况下,邻坡反射辐射较小,易被人们忽略,但是,在某些环境下目标像元接收到的邻坡反射辐射不可被忽视,如冰雪区、近红外高反射率的植被区等^[4]。在坡面太阳入射角较大的低照度区域与阴影区域,邻坡反射辐射是遥感影像坡面地物反射率反演、地形校正的重要信号源之一^[5-6]。随着应用遥感信息定量化要求的提高,需要精确计算邻坡反射辐射。

由于邻坡反射辐射与天空下行散射辐射都同时以散射形式进入辐射测量仪器的感光面,在实际环境中邻坡反射辐射难以测量,目前,山地气候、地形校正等相关研究中都采用理论模型来估算邻坡反射辐射,模型可归纳为简化积分法与逐点计算法。简化积分法是一种视环境为均质的经验方法^[7-8],主要用于邻坡反射辐射的理论分析,它对具体像元接收的邻坡反射辐射难以精确计算。在遥感影像中,需要采用计算周围各地表单元对目标像元反射辐射贡献值之和的逐点法^[4,9-10]。文献[4,9]分别采用模拟辐亮度、平均辐亮度来计算邻坡反射辐射,实质上仍等同于简

化积分法。文献[10]对逐点法计算进行了一些有益尝试,但没有考虑大气对遥感影像及邻坡反射辐射的影响机理,仅采用大气层顶表观辐亮度代替目标像元接收到的反射像元亮度。本文尝试通过剖析邻坡反射辐射机理,建立理论严密的邻坡反射辐射照度及其相对比例的计算模型,在此基础上探讨邻坡反射辐射与周边下垫面反射率、地形、太阳入射光谱等因素的联系。

1 计算模型

如图 1(a)所示,目标像元接收到的邻坡反射辐射照度为可视地形范围内的亮度积分^[1, 11]:

$$E_R = \int_0^{2\pi} \int_0^{h'(\varphi)} L(h, \varphi) \cos i \cosh d h d \varphi \quad (1)$$

$$\cos i = \cos \alpha \sinh + \sin \alpha \cosh \cos(\varphi - \beta) \quad (2)$$

式中, E_R 为目标像元接收到的邻坡反射辐射照度; h 为反射像元的高度角; φ 为反射像元的方位角; $h'(\varphi)$ 为方位 φ 上的地形遮蔽角; $L(h, \varphi)$ 为反射像元到达目标像元的辐亮度; i 为辐射光线的坡面入射角; α 与 β 分别为目标像元的坡度和坡向。

在实际影像中,目标像元所处的周边地形与下垫面环境往往复杂多样,便出现了计算每个反射像元(如图 1(b))对目标像元的贡献值之和的

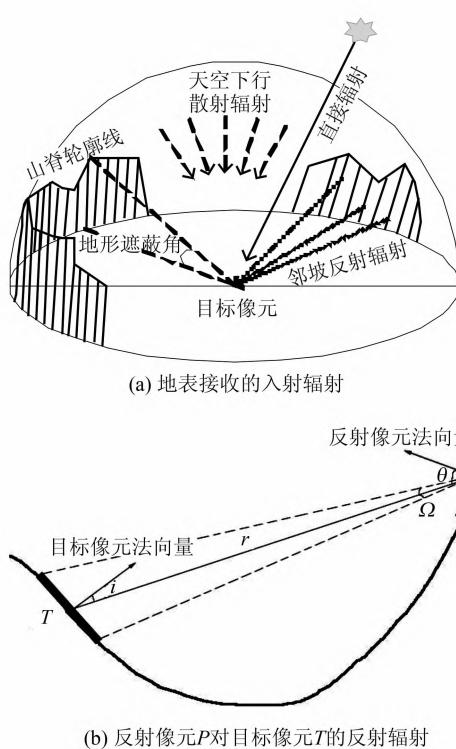


图1 地表接收的邻坡反射辐射示意图

Fig. 1 Radiance Reflected from Neighboring Slopes

方法,即式(1)的离散化形式:

$$E_R = \sum_P \text{VIS} \cdot L(P) \cdot \cos\theta \cdot S(P) \cdot \cos i / r^2 \quad (3)$$

式中,VIS表示T、P两点间的通视性(1或0);
L(P)是反射像元P到达目标像元T的辐亮度;
S(P)为反射像元P的坡面面积,
 $S(P) = S' / \cos\alpha$,
 S' 为像元水平面积,它取决于影像空间分辨率;
i为TP向量与目标像元法向量的夹角(辐射光线的坡面入射角);
 θ 是PT向量与反射像元法向量的夹角;
r是T、P两点间的距离;
 \sum_P 表示周围反射像元的贡献值之和。

考虑到大气对遥感成像系统存在影响,需要计算像元的地表辐亮度。

$$L_{\text{sur}}(P) = (L_{\text{app}}(P) - L_{\text{atm}}(P)) / T_u(P) \quad (4)$$

式中,
 $L_{\text{sur}}(P)$ 为P点地表辐亮度;
 $L_{\text{app}}(P)$ 为传感器接收到的P点表观辐亮度;
 $L_{\text{atm}}(P)$ 为P点至传感器的大气程辐射亮度;
 $T_u(P)$ 为地表P点至传感器的大气上行透过率。

反射像元的地表辐亮度在到达目标像元前也受邻坡反射路径气柱的大气程辐射与大气透过率影响,为简化计算,本文使用某高度范围内单位长度气柱的程辐射亮度与消光系数。

$$L(P) = L_{\text{sur}}(P) \cdot e^{-k \cdot r} + A(1 - e^{-k \cdot r}) / k \quad (5)$$

式中,k为邻坡反射路径气柱的消光系数;A为单

位长度气柱的程辐射亮度;
 $e^{-k \cdot r}$ 与
 $A(1 - e^{-k \cdot r}) / k$ 分别表示邻坡反射路径气柱的透过率与程辐射亮度。

通过式(3)可以计算出邻坡反射辐射照度,但在坡面地物反演、地形校正等研究中对邻坡反射辐射占总辐射的比例同样予以关注。为获得邻坡反射辐射的相对比例,本文应用式(6)计算邻坡反射辐射 E_R 占坡面入射总辐射 E_T 的比例 Ratio。

$$\text{Ratio} = \frac{E_R}{E_S^h \cos i_s / \cos(z_s) + E_D^h V_{\text{sky_view}} + E_R} \quad (6)$$

$$V_{\text{sky_view}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{h'(\varphi)}^{\frac{\pi}{2}} \cos i \cosh h d\theta d\varphi \quad (7)$$

式中,
 E_S^h 、 E_D^h 分别表示平坦地表接收的直接辐射照度与散射辐射照度;
 $V_{\text{sky_view}}$ 为天空开阔度^[12];
 z_s 是太阳天顶角;
 i_s 是太阳直射光线和坡面法向量构成的坡面太阳入射角。
 i_s 的计算原理与式(2)类似,即
 $\cos i_s = \cos\alpha \cos z_s + \sin\alpha \sin z_s \cos(\varphi_s - \beta)$,
其中,
 φ_s 为太阳方位角。式(6)分母中第一项与第二项分别表示目标像元接收到的坡面直接辐射与坡面散射辐射,散射辐射采用各向同性模式计算。

上述公式中的大气程辐射亮度、地表至传感器的大气上行透过率、平坦地表接收的直接辐射照度与散射辐射照度,采用6S模式进行逐像元计算。6S以严密的大气辐射传输理论为基础,计算时需要输入各层基本气体参数(O_2 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 H_2O 、 O_3 的浓度)与气溶胶参数(550 nm 光学厚度与气溶胶类型)^[11,13]。

上述公式中的坡度、坡向、通视性、入射角余弦、地形遮蔽角、天空开阔度等地形相关因子,基于DEM计算获取^[14-15]。由式(3)可知,增加搜索距离,扩大了目标像元的可视范围,邻坡反射辐射计算越精确,但计算量会随之增加。而随着距离增加,某个反射像元对目标像元的贡献会以 $1/r^2$ 倍迅速减小。因此,实际计算中可根据地形特点设置合理的搜索距离,以超过周边山脊线的距离为宜。

2 实验区域与数据

本文选择秦岭山脉的太白山附近为实验区域,该区域SPOT5影像见图2。区域内地形复杂,高程为1580~3520 m,下垫面类型主要为积雪与植被。影像成像时间为2007-11-20 GMT时

间3时52分,影像中心位置位于东经 $107^{\circ}24'59''$ 、北纬 $33^{\circ}54'36''$,太阳天顶角和方位角分别为 54.45° 和 167.43° 。根据SPOT DIMAP文件中的辐射定标系数计算获取各波段表观辐亮度。根据1:5万地形图及其等高线数字化得出的DEM对表观辐亮度图像进行正射校正,然后进行大气计算。逐像元大气校正计算量较大,本文使用IDL语言编程调用6S,自动计算像元地表辐射度。

考虑到西安探空站距离实验区域最近,输入该站温度、气压、露点的探空数据用于计算各层大气基本气体浓度。探空气球不对臭氧浓度进行探测,本文使用6S中纬度冬季大气模式的臭氧廓线。气溶胶550 nm光学厚度采用当日4时(GMT)的Terra MODIS高光谱数据反演的气溶胶产品^[16],气溶胶类型选用6S大陆型。地表像元间的消光系数及单位长度气柱程辐射亮度根据实验区2 000 m高程的反射像元至3 000 m高程的目标像元的大气,使用6S计算而得,见表1。反射像元搜索距离设置为5 km。

表1 消光系数与单位长度气柱程辐射亮度(每km)

Tab. 1 Extinction Coefficient and Atmospheric Path Radiance Per km

波段/ μm	b_1	b_2	b_3	b_4
	0.49~0.61	0.61~0.68	0.78~0.89	1.58~1.75
$A/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	4.152	2.681	1.131	0.069
k	0.131	0.094	0.067	0.027

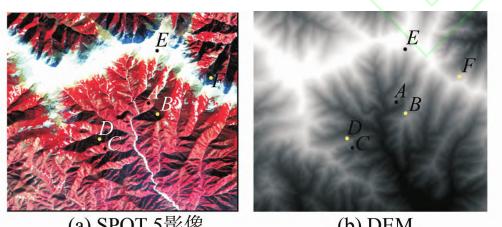


图2 实验区域与目标像元分布

Fig. 2 Experimental Region and Target Points

3 实验结果与分析

选择的目标像元如图2中的A~F点。为使目标像元间具有可比性,A与B的高程、天空开敞度、周边下垫面接近但坡面太阳入射角差异大。C与D,E与F也基于同样的考虑选择,各点的基本情况见表2。计算各像元在SPOT5多光谱波段接收的邻坡反射辐射照度及其比例,结果如

图3、4所示。

表2 目标像元基本情况

Tab. 2 Basic Condition of Selected Target Points

	高程/m	天空开敞度	\cos_i	周边主要下垫面
A	2 445	0.703	0.895	植被
B	2 467	0.794	0.116	植被
C	2 199	0.773	0.900	植被
D	2 187	0.774	0.000	植被
E	3 100	0.790	0.796	积雪
F	3 127	0.830	0.000	积雪、植被

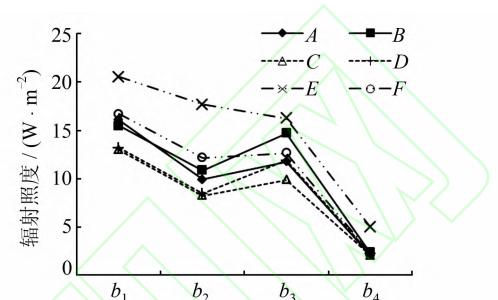


图3 各像元接收到的邻坡反射辐射照度
Fig. 3 Illuminations of Terrain Irradiance of Target Points

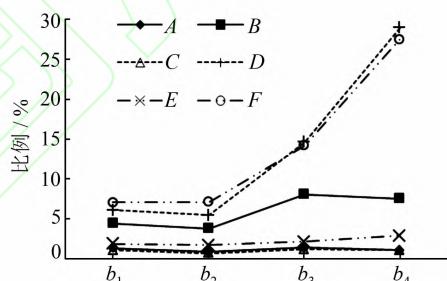


图4 各像元接收到的邻坡反射辐射占总辐射比例
Fig. 4 Ratios of Terrain Irradiance to Total Irradiance of Target Points

在图3中,各目标像元的邻坡反射辐射照度 $b_1 \sim b_4$ 波段总体上呈下降趋势。邻坡反射辐射源于周边地物对太阳辐射的反射,这种下降趋势与各目标像元周边的地物反射率及成像时太阳辐射光谱密切相关。图5为模拟成像时2 500 m高程的太阳辐射光谱,它主要集中于可见光,并从可见光向近红外、短波红外波段减弱。A~F点的周边地物主要为植被与积雪,在两种地物反射率波谱与太阳辐射光谱的共同作用下,便形成了图3中的趋势。各目标像元在近红外波段的邻坡反射辐射照度高于(或接近)红光波段,这主要是因为实验区植被多,植被的近红外高反射率导致目标像元接收到的近红外波段邻坡反射辐射照度较大。像元E与F周边积雪较多,积雪的高反射率在一定程度上使E与F的邻坡反射辐射照度比

其他像元高。

图4表示了各目标像元的邻坡反射辐射占总辐射的相对比例,像元A、C、E的值较小,而像元B、D、F的值较大。造成这种现象主要原因是坡面太阳入射角影响了太阳直接辐射照度的大小,从而导致邻坡反射辐射占总辐射比例发生变化。图6模拟了成像时刻大气条件下,D点在不同坡面太阳入射角下各波段的邻坡散射辐射比例,各波段的邻坡反射辐射比例随 $\cos i_s$ 下降呈上升趋势,尤其 $\cos i_s$ 较小时上升趋势更为明显,当阴影发生($\cos i_s=0$)时, $b_1 \sim b_4$ 波段的邻坡反射辐射比例分别高达6.1%、5.5%、14.6%与28.9%。这说明了坡面太阳入射角高值区、阴影区的邻坡反射辐射比例较高,所以在这些低照度像元的地形校正、阴影恢复等研究中需要考虑邻坡反射辐射的分量。

在图4中,阴影像元(D、F)的邻坡反射辐射比例自可见光波段向近红外、短波红外波段呈比较明显的上升趋势,这与各波段的大气下行散射辐射有着一定程度的联系。由式(6)可知,对于无直接辐射的阴影像元,邻坡反射辐射比例受大气下行散射辐射影响的敏感性更强,两者呈负相关。图5中的虚线表示成像大气条件下平坦地表接收到的下行散射辐射占总辐射的比例(记为Rd),大气散射在可见光波段较强,到近红外与短波红外波段变弱,这也是晴好天气对地遥感中常见的大气散射现象。这种大气状况下,容易导致阴影像元在弱散射波段的邻坡反射辐射比例较高。

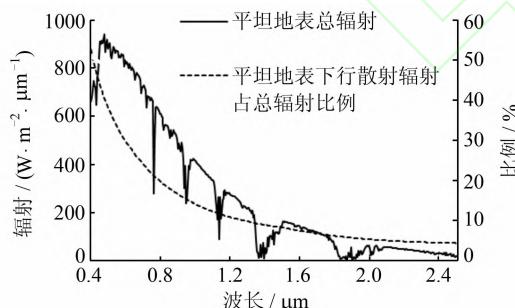


图5 平坦地表接收的太阳总辐射光谱及其下行散射辐射比例

Fig. 5 Solar Spectral Irradiance and Its Ratio of Diffuse Component on a Horizontal Surface

4 结语

目标像元接收到的邻坡反射辐射照度是受周边下垫面反射率、地形、太阳入射光谱等因素的共同作用,存在高反射率的周边下垫面(如积雪、近

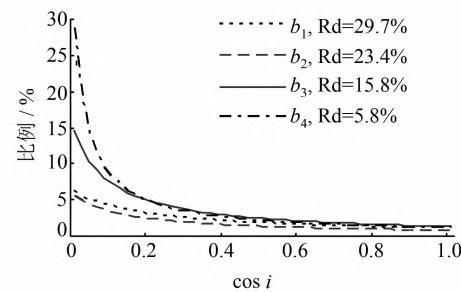


图6 模拟D点在不同坡面太阳入射角下的各波段邻坡反射辐射比例

Fig. 6 Simulated Ratio of Terrain Irradiance of Point D of $b_1 \sim b_4$ Bands Under Different Angles of Solar Incidence

红外植被)容易使目标像元接收到的邻坡反射辐射照度升高。

邻坡反射辐射占总辐射的比例取决于目标像元接收到的直接辐射照度、散射辐射照度与邻坡反射辐射照度的综合计算。复杂地形条件下,地形特征影响了像元的坡面太阳入射角,低照度像元(包括坡面太阳入射角较大的像元及阴影像元)接收的邻坡反射辐射比例较高。晴好天气对地遥感中,受到大气下行散射辐射的光谱特征影响,阴影像元邻坡反射辐射在弱大气散射的近红外、短波红外波段的比例通常高于它在散射较强的可见光波段的比例。实现对这些低照度像元接收到的邻坡反射辐射的定量计算对于后续的坡面地物反射率反演、地形校正、阴影信息恢复等研究具有积极意义。

参考文献

- [1] Li Xianhua, Huang Wei, Luo Qingzhou, et al. Research of Radiant Topographic Correction Theory for Lunar Surface Remote Sensing Imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1 197-1 201(李先华, 黄微, 罗庆洲, 等. 月球表面遥感图像的地形辐射改正原理研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 1 197-1 201)
- [2] Yan Guangjia, Zhu Chongguan, Guo Jun. A Model Based Radiative Transfer Algorithm to Correct Remotely Sensed Image in Mountainous Area [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000(1): 14-18(闫广建, 朱重光, 郭军, 等. 基于模型的山地遥感图象辐射订正方法[J]. 中国图像图形学报, 2000(1): 14-18)
- [3] Fu Baopu. Mountain Climate[M]. Beijing: Science Press, 1983(傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983)

- [4] Proy C, Tanre D, Deschamps P Y. Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 21-32
- [5] Sandmeier S, Itten K I. A Physically-Based Model to Correct Atmospheric and Illumination Effects in Optical Satellite Data of Rugged Terrain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 708-717
- [6] Gu D G, Gillespie A R, Adams J B, et al. A Statistical Approach for Topographic Correction of Satellite Images by Using Spatial Context Information [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 236-246
- [7] Sirguey P. Simple Correction of Multiple Reflection Effects in Rugged Terrain[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(4): 1 075-1 081
- [8] Luo Qingzhou, Li Xianhua, Mei Anxin. Evaluation on Impact of Neglecting Radiance Reflected from Neighboring Slopes on Calculating Target Reflectance[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 932-935(罗庆洲, 李先华, 梅安新. 邻坡反射辐射对地物反射率计算的影响评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(8): 932-935)
- [9] Wang J, White K, Robinson G J. Estimating Surface Net Solar Radiation by Use of Landsat-5 TM and Digital Elevation Models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(1): 31-43
- [10] Cao Ana, Huang Wei, Li Xianhua. Research on Calculating Adjacent Radiance with High Precision [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010 (6): 29-31(曹阿娜, 黄微, 李先华. 邻近辐射的精确计算研究[J]. 测绘科学, 2010(6): 29-31)
- [11] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Beijing: Science Press, 2004(廖国男. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004)
- [12] Dozier J, Frew J. Rapid Calculation of Terrain Parameters for Radiation Modeling from Digital Elevation Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 963-969
- [13] Vermonte E, Tanre D, Herman M, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)[R]. 6S User Guide Version, USA, 1997
- [14] Luo Qingzhou, Huang Wei, Yan Yechao, et al. Research on Calculating Sky-view Factor with High Precision[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009 (4): 533-536(罗庆洲, 黄微, 闫业超, 等. 天空开阔度的精确计算研究[J]. 遥感技术与应用, 2009(4): 533-536)
- [15] Liu Xuejun, Zhang Ping. Effective Scale of Slope and Aspect Derived from Grid-Based Digital Elevation Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 2008, 33(12): 1 254-1 258(刘学军, 张平. DEM 坡度、坡向的有效尺度范围[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12): 1 254-1 258)
- [16] Kaufman Y J, Tanr E D. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS[R]. NASA MODIS Algorithm Theoretical Basis Document, Goddard Space Flight Center, USA, 1998

Calculating and Analyzing Radiance Reflected from Neighboring Slopes on Remote Sensing Image

LUO Qingzhou¹ WANG Peifa¹ SHI Yuli¹ LI Xianhua²

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing 210044, China

2 School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract: A physically-based model for calculating radiance reflected from neighboring slopes is developed. The path radiance and atmospheric transmittance of reflected terrain radiance between two adjacent slopes are considered. The model computes terrain irradiance illumination and its ratio to total irradiance as quantitatively supported by DEM data and atmospheric parameters. According to an experiment with spot images and the principle of terrain irradiance, terrain irradiance illumination depends on the surface reflectance of the adjacent objects, terrain, the total irradiance reaching the adjacent slopes and other factors. The radiance reflected from neighboring slopes usually is small, but it has to

Coordinate Datum Unification for Regional CORS Network Combination

JIANG Weiping¹ YUAN Peng¹ TIAN Zhi^{2,3} XIAO Yugang⁴

1 Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, Shijiazhuang 050031, China

3 Hebei Province Surveying and Mapping Data Archives, Shijiazhuang 050031, China

4 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In order to prevent the gaps in coordinate datum between different regional continuously operating reference systems (CORS), we analyze the causes and introduce a method for coordinate datum unification. Using experimental data from the Hubei and Hunan CORS, the results show that the systematic deviation reaches 17.9 ± 4.5 mm between these two datums. The proposed method establishes a unified coordinate datum to eliminate the systematic deviation and builds connections between each coordinate datum. The validity of our method was supported by empirical evidence. Finally, some suggestions about coordinate datum unification for a regional CORS network combination are put forward.

Key words: CORS; networking; coordinate datum; systematic deviation

First author: JIANG Weiping, PhD, professor, PhD supervisor, specializes in satellite geodesy. E-mail: wpjiang@whu.edu.cn

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2012AA12A209; the National Natural Science Foundation of China, No. 41074022; Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM Opening Funded Project, No. LEDM2011B06.

(上接第 545 页)

be accounted in high surface reflectance areas. The ratio of terrain irradiance to total irradiance depends on direct irradiance, diffused irradiance, and terrain irradiance, which are received by a target pixel. The ratio of terrain irradiance to total irradiance of low illumination pixels is larger than that of its surrounding pixels. For a shadow pixel, the ratio of terrain irradiance to total irradiance of the weak scattering bands is larger than that of the strong scattering bands.

Key words: radiance reflected from neighboring slopes; remote sensing; atmospheric effect

First author: LUO Qingzhou, PhD, specializes in remote sensing image processing, GIS software development and atmosphere application. E-mail: luofirst@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41001288; the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China, No. BK2010571; Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.