

文章编号: 0253-2239(2008)04-0664-05

一种新的高光谱图像中太阳耀斑去除方法

张 翔 张建奇 靳 薇 刘德连

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 太阳耀斑掩盖了水体的真实物理特性,严重干扰了水下特征的获取。根据被耀斑污染的像素和邻近未污染像素间的辐射差值,获得大气组分的吸收特征,并调节大气辐射传输模型中的模型参量,进而得到大气透射率。分析了影响耀斑污染程度的主要因素,依据近红外波段离水辐亮度近似为零,求出水体受耀斑污染程度的空间分布,据此进行耀斑去除,得到未被耀斑污染的图像。结果表明,应用该方法提取离水辐亮度,去除耀斑的效果较好。

关键词 遥感; 耀斑去除; 水体分割; 大气透射率; 离水辐亮度

中图分类号 TP751.2 **文献标识码** A

Method for Removing Sun Glint from Hyperspectral Image

Zhang Xiang Zhang Jianqi Jin Wei Liu Delian

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Sun glint masks real physical properties of water and severely interferes with the acquisition of underwater characteristics. Based on the difference between the glint-contaminated pixel and nearby nonglint pixel, the atmospheric absorption feature which can be used to tune the input parameters of the atmospheric radiative transfer model is obtained, then the atmospheric transmissivity is calculated, and the major factors which influence the degree of glint contamination are discussed in detail. According to the fact that the water-leaving radiance value in near-infrared bands is negligible, the spatial distribution of the glint contamination is solved, the glint is removed, and the non-contaminated image is displayed. It is applied to extract the water-leaving radiance, and the experimental results prove the validity of this algorithm.

Key words remote sensing; glint removal; water segmentation; atmospheric transmissivity; water-leaving radiance

1 引 言

利用遥感手段获取地表真实的物理特性一直受到广泛地关注。从高光谱图像中获取地表真实的物理特性,包含了更多窄带的信息,与现场直接测量相比具有快速、准确、信息量大等特点^[1]。太阳耀斑是一种常见的自然现象,是水面镜面反射太阳辐射的结果,当场景中有水体存在时,阳光照射到水面上会产生闪烁的耀斑。耀斑严重干扰了目标自身的信号,给估算离水辐射率、研究水下生态环境、监测水质污染状况带来很多困难。近年来一直在研究如何有效地去除光谱图像中的耀斑污染,寻求高精度、高稳健性、高效率的耀斑去除算法。Hochberg 等^[2]利用图像中

最亮和最暗的水体像元估算耀斑反射的太阳辐射,然而算法在执行前需要模糊陆地像元增加了后续处理的难度;此外,仅依赖两个像素值进行计算其可靠性大为降低,一旦所选择的像素异常,结果会产生明显的偏差。Hedley 等^[3]对该算法进行了改进,提出一种线性回归的方法,通过构建像元辐亮度在可见光和近红外波段间的线性关系进行耀斑去除,避免对图像进行模糊,然而算法的精度依赖计算回归线的斜率可靠性同样较差,较小的误差会带来严重的影响。为了克服这一缺陷,Philpot 通过计算采样区内多组污染/未污染像素间的辐射差值获得该区域镜面反射的太阳辐射的相对强度^[4],以此作为整幅图像受耀斑污染程

收稿日期: 2007-08-11; **收到修改稿日期:** 2007-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(604777042)资助课题。

作者简介: 张 翔(1982-),男,内蒙古包头人,博士研究生,主要从事辐射计算和遥感信息处理等方面的研究。

E-mail: zh_xiang11@163.com

导师简介: 张建奇(1960-),男,河南巩义人,教授,博士生导师,主要从事目标与环境光学特性、光电成像系统仿真、光电对抗等方面的研究。E-mail: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

度的估计取得了较好的效果,然而问题在于,用采样区计算的结果作为整幅图像受污染程度的估计是不合理的。事实上,不同位置的水面状态、观测角度、光线照射角度都会影响探测器接收信号的强弱,遥感图像覆盖范围广,不同地点上述因素差异又很大,不同像元受耀斑污染的程度并不相同,仅用固定数值来描述整幅图像受耀斑污染的程度是不准确的。本文给出一种新的耀斑去除算法,首先对图像进行分割得到水体区域,避免了模糊陆地像元,便于后续处理;利用被耀斑污染像素和邻近未污染像素间的辐射差值计算大气透射率;分析了影响耀斑污染的主要因素,求出水体受耀斑污染的空间分布,然后进行耀斑去除得到未被污染的图像。由于计算了每一像元受耀斑污染的程度,计算精度大为提高,摆脱了以往算法仅依赖个别值进行计算的限制,增强了算法的稳健性。结果表明,应用该算法提取离水辐亮度,去除耀斑的效果较好。

2 水体分割

耀斑去除针对水体像元进行操作,首先需要得到水体区域。文献[2]的算法在执行前需要模糊陆地像元,增加了后续处理的难度;本文通过纹理分割提取水体区域同时陆地信息得到很好的保持。区别于以往对单通道图像进行分割的方法^[5],光谱图像需要充分考虑每个像元的光谱信息。采用支持向量机(Support vector machines, SVM)对图像进行分割,将各个像元的光谱矢量作为训练数据描述分离超平面,直接解决分类问题。机载可见光红外成像光谱仪(Airborne visible-infrared imaging spectrometer, AVIRIS)图像的每个像元包含 224 个连续波段的像素值,丢弃受大气影响较为严重的 20 个波段,将剩余波段值看成一个光谱矢量,选用了 800 个训练样本(水体区域 300 个陆地区域 500 个),利用多项式核函数对所有样本进行训练得到各个拉格朗日乘子,进而获得训练好的支持向量机,最后利用训练好的支持向量机对纹理进行分类,提取水体像元^[6]。

3 辐射传输模型和大气透射率的估计

3.1 辐射传输模型

探测器接收到的辐射包括:经地表反射到达探测器的天空和太阳辐射,到达探测器的目标自身的辐射,大气路径辐射。因此,探测器接收到的来自水体的辐亮度可表示为

$$L_{\text{sensor}+} = \tau_s(\tau_{\text{sun}}\rho f L_{\text{sun}}) + \tau_s\rho L_{\text{sky}} + \tau_s L_w + L_{\text{path}}, \quad (1)$$

式中 L_{sun} 为大气层外的太阳辐亮度, L_{sky} 为天空漫射辐亮度, L_{path} 为大气路径辐亮度, L_w 为离水辐射度, ρ 为水面的菲涅耳反射率, τ_{sun} 、 τ_s 为太阳到水面和水面到探测器间的大气透射率, f 为水面镜面反射的太阳直射辐射的相对强度,描述了水体受耀斑污染的程度。探测器接收到的未被耀斑污染水体的辐亮度为

$$L_{\text{sensor}} = \tau_s\rho L_{\text{sky}} + \tau_s L_w + L_{\text{path}}, \quad (2)$$

与(1)式相比,(2)式中 $f = 0$,表明 L_{sensor} 不包含太阳的贡献,该地点水体未被耀斑污染。通常认为图像中近红外波段最暗的水体像元受耀斑污染的程度最低,近似为零^[2]。由(1)式、(2)式可得探测器接收到的第 k 个采样区镜面反射的太阳直射辐亮度:

$$L_{\text{gl},k} = L_{\text{sensor}+,k} - L_{\text{sensor},k} = \tau_s\tau_{\text{sun}}\rho f_k L_{\text{sun}}, \quad (3)$$

$L_{\text{gl},k}$ 的大小取决于比例因子 f_k , f_k 为第 k 个采样区镜面反射的太阳直射辐射的相对强度。由上式可得

$$f_k = \frac{L_{\text{gl},k}}{\tau_s\tau_{\text{sun}}\rho L_{\text{sun}}}. \quad (4)$$

3.2 大气透射率的估计

由(3)式导出采样区 k 上空的双向大气透射率

$$\tau_s\tau_{\text{sun}} = \frac{L_{\text{gl},k}}{\rho f_k L_{\text{sun}}}, \quad (5)$$

ρ 由文献[7]得到, L_{sun} 由文献[8]给出。式中只有 f_k 未知,因此假设 $f_k = 1$,由(5)式得到 $\tau_s\tau_{\text{sun}}|_{f_k=1}$ 。与真实值相比, $\tau_s\tau_{\text{sun}}|_{f_k=1}$ 的光谱形态和吸收特征不变只是量值上相差 f_k ,根据 $\tau_s\tau_{\text{sun}}|_{f_k=1}$ 得到的大气组分的吸收特征和特殊波长处的吸收带深度,调节 SMARTS 模型^[9](一种辐射传输计算软件用来计算大气透射率)的输入参量计算双向透射率 $\tau_s\tau_{\text{sun}}|_{\text{based on SMARTS}}$,当 $\tau_s\tau_{\text{sun}}|_{\text{based on SMARTS}}$ 与 $\tau_s\tau_{\text{sun}}|_{f_k=1}$ 匹配良好时,用 SMARTS 计算的结果作为当时气象条件下双向透射率的估计,将计算结果代入(4)式求出 f_k 。

4 耀斑去除和离水辐亮度的提取

f_k 为采样区 k 镜面反射的太阳直射辐射的相对强度,描述了该区域水体受耀斑污染的程度。文献[4]将 f_k 作为整幅图像受耀斑污染程度的估计,求出图像中受污染的水体镜面反射的太阳直射辐亮度。然而该方法的问题在于,遥感图像的覆盖范围往往很大,不同高度拍摄的图像其像元尺度对应地面的实际大小可以从几米达到几十千米。受耀斑的

影响,探测器接收到的水面镜面反射的太阳辐射由:不同位置的水面状态、观测几何角度、光线照射几何角度等因素决定。很显然,不同地点上述因素的差异很大, f_k 仅代表采样区 k 受耀斑污染的程度,对整幅图像来说,不同位置的像元受耀斑污染的程度并不相同;例如,若 (i, j) 位置反射的太阳辐射未被探测器接收,此时 (i, j) 受耀斑污染的程度 $f_{i,j}$ 应当为零,而根据文献[4] $f_{i,j}$ 等于 f_k , 一个非零常量,这显然是错误的,因此该方法不能准确消除不同位置耀斑的影响。文中给出的近似计算 $f_{i,j}$ 的方法,由于所选采样区受耀斑污染严重,不能保证区域内像元未被耀斑污染,且 L_w 为零的波长难以确定,使用该方法容易出错。所以,本文对像元进行计算,得到每一像元受耀斑污染镜面反射的太阳辐射的相对强度,而 f 独立于波长,因此

$$f_{i,j} = f_{i,j}^{\text{NIR}}, \quad (6)$$

$f_{i,j}^{\text{NIR}}$ 分别为整个波段和近红外波段受耀斑污染像元 (i, j) 镜面反射的太阳直射辐射的相对强度。依据近红外波段离水辐亮度近似为零,导出基于波段 λ_m 计算的 f 值

$$f_{i,j}(\lambda_m) = \frac{L_{\text{sensor}^+,i,j}(\lambda_m) - L_{\text{dark}}(\lambda_m)}{\tau_s(\lambda_m)\tau_{\text{sun}}(\lambda_m)\rho L_{\text{sun}}(\lambda_m)} \Big|_{\lambda_m \in \text{NIR}}, \quad (7)$$

式中 λ_m 为近红外波段第 m 通道的波长, $L_{\text{dark}}(\lambda_m)$ 为最暗的水体像元在 λ_m 处的辐亮度,该像元未被耀斑污染,其他参量为各自对应 λ_m 波段的辐亮度。据此可得

$$f_{i,j}^{\text{NIR}} = \sum_{m=1}^N f_{i,j}(\lambda_m) / N, \quad (8)$$

式中 N 为近红外波段的通道数。因此,去除耀斑后探测器接收到的 (i, j) 位置像元的辐亮度为

$$L_{\text{glint remove},i,j} = L_{\text{sensor}^+,i,j} - L_{\text{gl},i,j} = L_{\text{sensor}^+,i,j} - \tau_s \tau_{\text{sun}} \rho f_{i,j} L_{\text{sun}}, \quad (9)$$

(9)式给出了耀斑去除的方法,用下式来评价算法的性能:

$$R = \frac{L_{\text{glint remove},i,j} - L_{\text{dark}}}{L_{\text{bright}} - L_{\text{dark}}}, \quad (10)$$

L_{bright} 为最亮的水体像元的辐亮度。分母表示图像中受污染程度最大的像元镜面反射的太阳直射辐亮度,分子为去除耀斑后像元包含的残余的镜面反射的太阳直射辐亮度, R 为耀斑去除后像元残余的太阳直射辐亮度占最大太阳直射辐亮度的比例,比值越低表明像元受耀斑的污染越小,算法性能越好。

离水辐亮度是水色遥感的基础物理量,是水体色素成分的光学表现^[10],为了从图像中获取实际的

离水辐亮度,必须进行耀斑去除和大气校正。一些人通过观测获取过境时刻的大气参量(由同步大气廓线获得),借助辐射传输模型计算大气透射率^[11],然而同步廓线不易获得,且某特定地区上空的大气透射率受气象影响很大,在较短时间内可能会发生较大程度的改变。为了准确地进行大气校正,本文通过光谱匹配获得当时气象条件下的大气透射率 τ_s 和 τ_{sun} ,考虑 (i, j) 位置像元,有

$$L_{\text{sensor}^+,i,j} = \tau_s \tau_{\text{sun}} \rho f_{i,j} L_{\text{sun}} + \tau_s \rho L_{\text{sky}} + \tau_s L_{w,i,j} + L_{\text{path}}, \quad (11)$$

得到 (i, j) 位置水体的离水辐亮度

$$L_{w,i,j} = \frac{(L_{\text{sensor}^+,i,j} - L_{\text{path}})}{\tau_s} - \tau_{\text{sun}} \rho f_{i,j} L_{\text{sun}} - \rho L_{\text{sky}}. \quad (12)$$

5 实验结果分析

实验数据为 AVIRIS^[12] 高光谱数据,能够在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的波长范围内获取 224 个连续光谱波段的图像。图 1 为 1996 年 7 月 5 日采集的 AVIRIS 高光谱数据第 52 通道量化后的图像。 $W_1 \sim W_3$ 为采样区,图像拍摄时采样区内发生了明显的太阳耀斑现象, $p_1 \sim p_3$ 为采样区内受耀斑污染程度不同的像元,用于提取离水辐亮度。

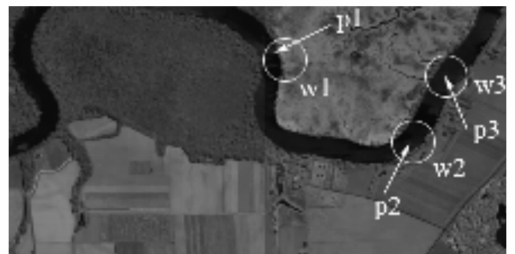


图 1 采样区域

Fig. 1 Sampling area

采用支持向量机方法对图像分割得到水体区域,如图 2 所示。可以看出,陆地区域与水体区域很好地分开,表现出较好的分割性能。文献[2]的算法在执行前需要模糊陆地像元,而本文采用纹理分割提取水

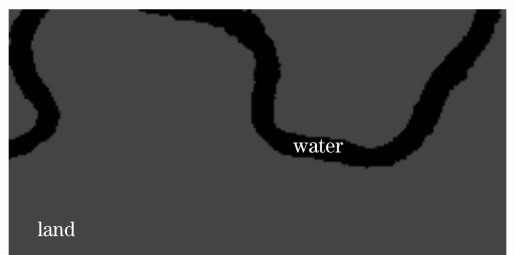


图 2 支持向量机水体分割的结果

Fig. 2 Water segmentation result based on SVM method

体区域,保留了原有的陆地信息,便于后续处理。

选取采样区中多个受耀斑污染严重的像素,寻找周围与其不直接相邻(避免邻近效应^[13])且污染程度较低的像素,计算多组 L_{gl} 值取平均后作为采样区 k 镜面反射的太阳直射辐亮度 $L_{gl,k}$ 。图 3 为匹配良好的双向大气透射率,同时标出了主要气体的吸收波段。

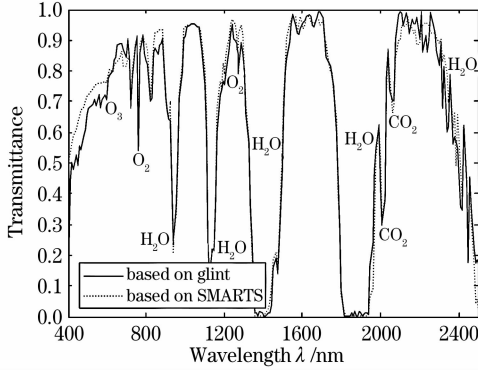


图 3 相互匹配的双向大气透射率

Fig. 3 Well matched two-way transmittance

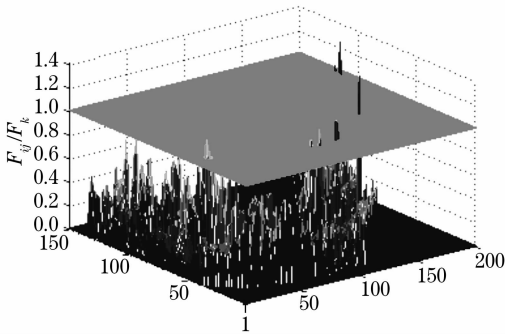


图 4 本文方法与文献[4]方法计算的图像受耀斑污染程度的比较

Fig. 4 Comparison of image's contamination degree calculated by glint with the presented algorithm and the algorithm in Ref. [4]

图 4 为本文与文献[4]计算结果的比较。 x 轴和 y 轴为像元的坐标, z 轴为两种算法计算的受耀斑污染程度的比值。可以看出,与定值 f_k 相比,不同位置像元受耀斑污染的程度 $f_{i,j}$ 差异较大。曲面的起伏反映了不同地点的水体受耀斑污染的程度,一些区域的值明显偏高表明该地点的水体受耀斑污染严重,一些区域的值很低接近于零表明这些区域受耀斑污染的程度很小。

耀斑去除结果如图 5 所示。可以看出,三个采样区中耀斑污染严重的区域(亮度较高的白色区域)均被去除,同时陆地信息得到了很好的保持。用(10)式评价算法的性能,图 6 给出了耀斑去除后像

元残余的太阳直射辐亮度占图像最大太阳直射辐亮度的比例。可以看出,去除耀斑后残余的太阳直射辐亮度值很小,水体区域受耀斑污染的程度相对于原始图像受耀斑污染的程度大为降低,基本消除了耀斑污染带来的影响。

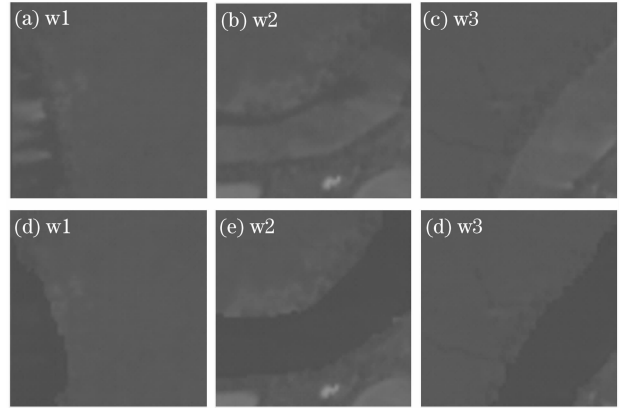


图 5 $W_1 \sim W_3$ 耀斑去除前(a)~(c)和后(d)~(f)的图像

Fig. 5 $W_1 \sim W_3$ images before (a)~(c) and after (d)~(f) removing glint

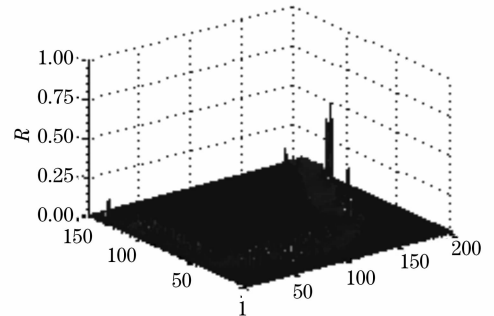


图 6 耀斑去除后残余的太阳直射辐亮度占图像最大太阳直射辐亮度的比例

Fig. 6 Ratio of the residual direct solar radiance to the maximum direct solar radiance after removing glint

应用本文算法提取离水辐亮度:从 $W_1 \sim W_3$ 中选取三个受耀斑污染程度不同的像元用于验证,如

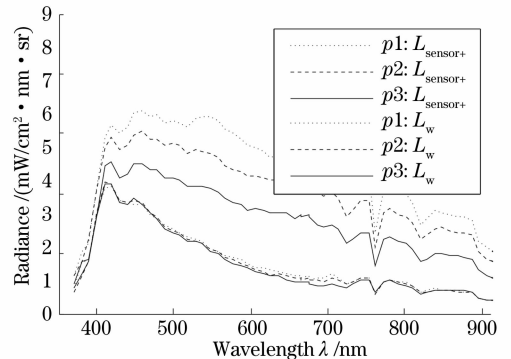


图 7 p_1, p_2, p_3 提取的离水辐亮度

Fig. 7 Water leaving radiance extracted from $p_1 \sim p_3$

图 7 所示,同时给出了 3 个像元的原始辐亮度 $L_{\text{sensor}+}$ 。可以看出,由于不同位置像元受耀斑污染程度的不同, p_1 、 p_2 、 p_3 的 $L_{\text{sensor}+}$ 差异很大;若直接将其作为离水辐亮度的估计与真实值相比误差极大,这是因为该地点的水体受到了耀斑的污染,除 L_w 外 $L_{\text{sensor}+}$ 还包含了天空漫射辐亮度、大气路径辐亮度和镜面反射的太阳直射辐亮度,因此,为了得到真实的 L_w 必须进行耀斑去除。由(12)式求出真实的离水辐亮度 L_w 。采样区 $W_1 \sim W_3$ 位于同一河上且相距不远,因此 $W_1 \sim W_3$ 的水质状况应当大致相同;如图所示,从 p_1 、 p_2 、 p_3 提取的 L_w 的光谱曲线基本相同,显示了本文方法的合理性。

6 结 论

提出的耀斑去除新算法,采用支持向量机方法进行纹理分割提取水体区域,避免了模糊陆地像元,便于后续处理。精确地计算出每一像元受耀斑污染的程度,克服了以往算法仅依赖个别值进行计算的限制,增强了算法的稳健性。结果表明,将该算法应用于提取实际的离水辐亮度,具有很好的耀斑去除性能。

参 考 文 献

- Zhou Youxi, Li Yunsong, Wu Chengke. Environmental satellite multispectral image compression algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 336~340
周有喜,李云松,吴成柯. 环境卫星多光谱图像压缩算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 336~340
- E. J. Hochberg, A. Andrefouet, M. R. Tyler. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(7): 1724~1729

- J. D. Hedley, A. R. Harborne, P. J. Mumby. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos [J]. *International J. Remote Sensing*, 2005, **26**(10): 2107~2112
- W. Philpot. Estimating atmospheric transmission and surface reflectance from a glint-contaminated spectral image [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(2): 448~457
- Liu Delian, Zhang Jianqi. New texture segmentation-based approach for change detection in remote sensing image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1177~1181
刘德连,张建奇. 基于纹理分割的遥感图像的变化探测[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1177~1181
- F. Melgani, L. Bruzzone. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(8): 1778~1790
- K. L. Carder, P. Reinersman, R. F. Chen *et al.*. AVIRIS calibration and application in coastal oceanic environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44**(2~3): 205~216
- C. A. Gueymard. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models [J]. *Solar Energy*, 2004, **76**(4): 423~453
- SMARTS: A effective Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine. Online: <http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS>
- He Xianqiang, Pan Delu, Zhu Qiankun *et al.*. Exact Rayleigh scattering calculation for Chinese ocean color and temperature scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 145~151
何贤强,潘德卢,朱乾坤等. 海洋水色及水温扫描仪精确瑞利散射计算[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 145~151
- J. Brazile, R. A. Neville, K. Staenz *et al.*. Scene-based spectral response function shape discernibility for the APEX imaging spectrometer [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**(3): 414~418
- Xun Lina, Fang Yonghua, Li Xin. A small target detection approach based on endmember extraction in hyperspectral image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1178~1182
寻丽娜,方勇华,李新. 高光谱图像中基于端元提取的小目标检测算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1178~1182
- R. Richter, M. Bachmann, W. Dorigo *et al.*. Influence of the adjacency effect on ground reflectance measurements [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**(4): 565~569