

## 基于高光谱辐亮度图像进行目标探测的大气状态影响分析

张 兵<sup>1</sup>, 沙建军<sup>1,2</sup>, 王向伟<sup>1</sup>, 高连如<sup>1</sup>

1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 基于高光谱辐亮度图像直接进行目标探测可以提高数据处理效率, 满足实时处理的要求。然而遥感器所获取的辐亮度光谱信息会受到大气的影 响。通过对高光谱成像过程的模拟, 分析大气状态变化对辐亮度图像中目标探测性能的影响。研究表明: 高光谱辐亮度图像可以直接用于目标探测, 不同的大气状态对 RXD 异常探测影响很小, 而 MF 探测则受输入光谱准确度的影响, 待检测目标的辐亮度光谱要求与辐亮度图像获取时的大气状态一致, 才有良好的效果。

**关键词** 辐亮度图像; 大气状态; 光谱差异; 目标探测

**中图分类号:** TP722 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)08-2043-07

### 引 言

高光谱遥感不仅可获取地物的空间图像, 同时还能以纳米(nm)级的光谱分辨率得到地物的连续光谱, 这种图谱合一的特点使高光谱遥感技术在地物精细分类、目标探测识别等方面具有独特的优势。但是, 由于波段数众多, 高光谱遥感所获取的数据量巨大, 使高光谱数据处理异常复杂。而在未来的遥感智能观测系统中, 要求数据实时处理并将结果迅速下传, 这对数据快速处理有着迫切需求<sup>[1]</sup>。特别地, 在对自然场景中人工(或军事)目标的探测和识别上, 辐射校正、数据降维等预处理过程占据了整个探测过程数据处理量的绝大部分, 因而有效降低数据处理量成为目标探测识别快速处理的关键。一种行之有效的处理方法是直接在遥感器获得的原始辐亮度图像上处理<sup>[2-4]</sup>, 如通过模拟传感器上目标辐亮度光谱进行匹配滤波或者直接在辐亮度图像上进行异常探测。

在 400~2 500 nm 的可见到短波红外波段, 遥感器接收的能量以地物对太阳辐射反射为主, 实际情况下遥感器获得的目标光谱信号会存在着某些不确定性, 如大气状态变化、邻近像元效应以及传感器噪声等因素, 都会给目标的辐亮度光谱带来一定的误差, 其中以大气状态的影响最为显著。而在基于高光谱辐亮度图像进行目标探测算法的研究中若忽略了由于这些因素造成的光谱异质性(Variability), 则会使所发展的目标探测算法有很强的数据依赖性, 在实际应用中容

易出现算法失效、误差被放大的情况, 因而需要分析这些因素对于高光谱辐亮度图像直接应用于目标探测的影响, 从而提高探测算法的鲁棒性。目前, 对高光谱遥感器成像过程的模拟以及光谱混合等关键问题已经有了深入的研究<sup>[5-9]</sup>。因此, 通过在成像过程中引入这些误差因素, 就可以模拟得到这些因素影响下的高光谱辐亮度数据, 在此基础上通过目标检测可以分析其中关键因素的影响, 从而指导目标探测应用。

本工作立足于高光谱辐亮度图像的目标探测过程, 通过对遥感器成像过程进行模拟, 分析了不同大气状态下目标与背景辐亮度光谱之间的差异, 并以典型的探测算法对辐亮度图像进行目标探测, 比较了不同大气状态对探测性能的影响。

### 1 遥感器成像过程

成像光谱仪等光学遥感器接收到的目标信号按照其传输路径通常可以分解为以下几个过程: 首先是太阳辐射穿过大气到达地表, 然后与地物相互作用, 经反射、多次散射等作用后, 再次经过大气到达遥感器, 最后在遥感器中成像并记录下来<sup>[10]</sup>。因此, 成像链路可以简化为“太阳→大气→地表(目标)→大气→遥感器”的传输路径。假设地表为朗伯体, 不考虑周围地物的邻近效应, 则到达传感器的辐亮度为<sup>[6, 11]</sup>

$$L(\mu_v) = L_o(\mu_v) + \frac{1}{\pi} \frac{\rho_v}{1 - \rho_v} F_d T(\mu_v) \quad (1)$$

收稿日期: 2012-01-15, 修订日期: 2012-05-10

基金项目: 国家(863)计划项目(2011AA120203)和国家自然科学基金项目(40901225, 41101394)资助

作者简介: 张 兵, 1969 年生, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心研究员 e-mail: zhangbing@ceode.ac.cn

式中,  $L(\mu_v)$  是传感器接收到的辐射亮度,  $L_0(\mu_v)$  是路径辐射项,  $F_d = \mu_s F_0 T(\mu_s)$  是太阳下行总辐射 ( $F_0$  是大气层顶的太阳辐照度,  $\mu_s$  是太阳天顶角余弦,  $T(\mu_s)$  是太阳到达目标的总透过率),  $T(\mu_v) = t_{\text{dir}}(\mu_v) + t_{\text{dif}}(\mu_v)$  是目标到传感器的上行总透过率 ( $t_{\text{dir}}(\mu_v) = e^{-\tau/\mu_v}$  是直射透过率,  $t_{\text{dif}}(\mu_v)$  是漫射透过率),  $S$  为大气半球反照率,  $\rho_t$  为地表反射率。

在整个成像过程中, 对传感器获得的目标辐射亮度光谱影响最为重要的因素就是大气, 主要体现在大气中各种组分对辐射传输的散射和吸收作用。在可见光到短波红外区域, 影响辐射传输的主要有气溶胶、水汽 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、 $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_3$  四种大气成分, 其中又以气溶胶和水汽最为显著。在这四种大气成分的组成比例上, 气溶胶和水汽含量极易变化, 而  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_3$  虽然相对稳定, 在时间和空间分布上却也会呈现出一定的起伏。因此, 不考虑邻近效应时, 大气对传感器接收到的

辐射亮度光谱的影响可以看作是不同含量的大气成分引起的吸收、散射作用。

## 2 实验数据与辐亮度图像模拟

选取一幅大小为  $250 \times 250$  像元的 AVIRIS 地表反射率图像作为待模拟的自然场景, 空间分辨率为  $3.4 \text{ m}$ , 光谱分辨率约  $10 \text{ nm}$ , 在  $373 \sim 2508 \text{ nm}$  之间有 224 个波段, 去除水汽吸收波段后共 180 个波段。在场景中选取 7 个位置 (图 1(a) 所示) 分别嵌入 2~4 个像元的某种人工绿色材料 (模拟绿色植被) 作为待检测的目标 (共 24 个像元), 从而得到含有目标的高光谱反射率场景数据。其中, 目标光谱反射率 (图 1(b) 所示) 为实验室分光光度计测量所得。

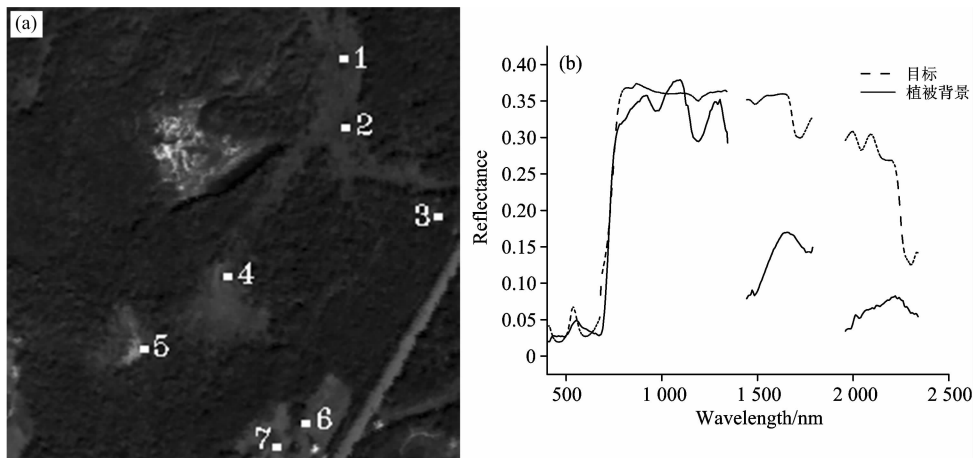


Fig. 1 Simulated scene

(a): Hyperspectral reflectance image (band 29, 19, 10);

(b): Spectral reflectance of the target and vegetation background

以中纬度地区为例, 采用中纬度夏季大气模式, 气溶胶模式为乡村型, 模拟场景所处地区的海拔高度为  $0.5 \text{ km}$ , 传感器高度  $100 \text{ km}$ , 观测角度为  $180^\circ$  (星下观测)。在观测条件相同的情况下, 设置了五组不同的大气成分含量, 分别代表从优到差的五种大气状态, 如表 1 所示, 从而得到场景模拟所需的参数。

Table 1 Atmospheric parameters

大气状态	能见度 /km	$\text{H}_2\text{O}$ 含量 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$\text{CO}_2$ 含量 /ppmv	$\text{O}_3$ 含量 /( $\text{ATM} \cdot \text{cm}$ )
状态 1	40	0.1	370	0.2
状态 2	30	0.3	380	0.3
状态 3	20	1.0	390	0.3
状态 4	10	2.0	400	0.3
状态 5	3	7.0	420	0.4

根据以上参数, 利用式(1)对高光谱反射率场景数据进行逐像元计算, 即可得到到达传感器的辐射亮度数据。式(1)中的大气总透过率  $T(\mu_v)$ 、直射透过率  $t_{\text{dir}}$ 、漫射透过率  $t_{\text{dif}}$ 、大气路径辐射  $L_0(\mu_v)$ 、地表太阳辐照度  $F_d$ 、大气半球反照率  $S$

等各个参数可由特定大气条件和观测几何下两次不同地表反射率的 MODTRAN 运行结果计算求得<sup>[12]</sup>。图 2(b)~(f) 是最终模拟的五种不同大气状态下目标场景经大气传输后到达传感器的辐亮度图像。

## 3 大气状态影响分析

目标的探测性取决于其与背景在信号上的差异, 即目标与背景在光谱上的可分性决定了目标能否容易在高光谱图像中被探测到。而不同光谱上的差异可用它们之间的光谱相似度进行定量描述。同时, 对于高光谱图像, 利用典型探测算法对实际场景进行探测可以更直接地反映目标的探测性。本工作从光谱相似度比较和高光谱目标探测两个角度去分析不同大气状态对辐亮度图像目标探测性能的影响。

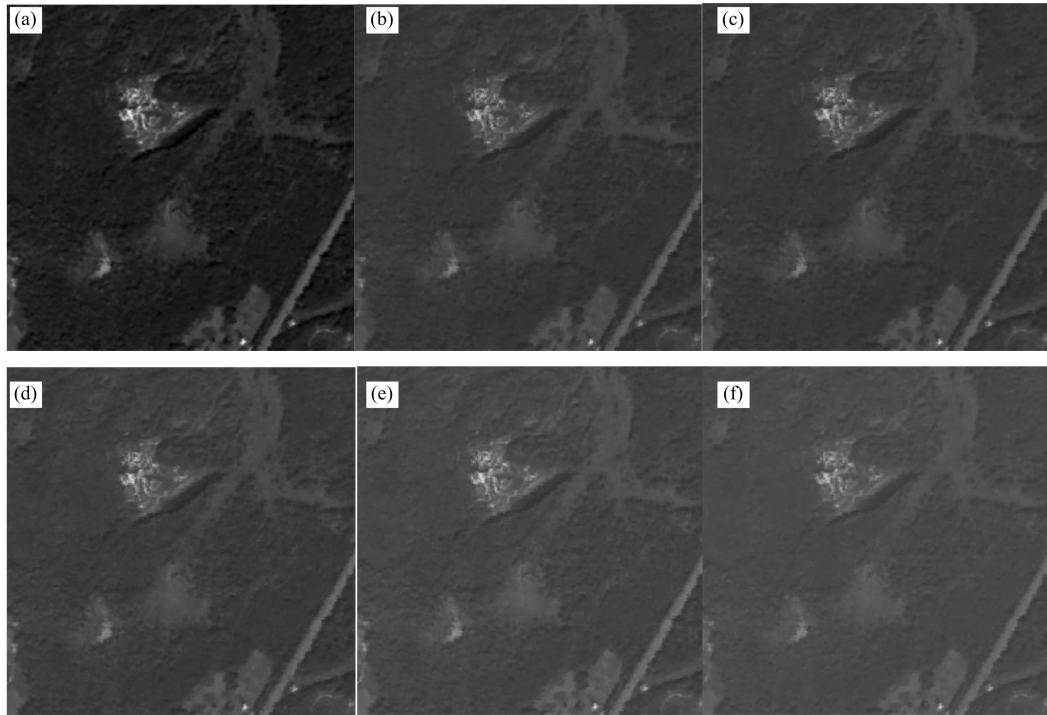
### 3.1 目标与背景的光谱相似度比较

两个光谱之间的相似度有很多度量算子, 最常用的有光谱欧氏距离 (spectral distance, SD) 和光谱夹角余弦 (spectral angle, SA), 此外光谱相关系数 (spectral correlation, SC) 和光谱信息离散度 (spectral information divergence, SID) 因具

有较好的光谱分辨能力和光谱分辨概率也常被使用<sup>[13]</sup>。其中，光谱距离完全取决于光谱在幅度上的差异，SD 值越小光谱幅度差异越小；光谱夹角则反映了光谱形状上的差异，与幅度无关，光谱形状越相似 SA 值越接近于 1；而光谱相关系数和光谱信息离散度则同时对光谱的幅度和形状敏感，是更综合的描述，光谱越相似 SC 值越接近于 1 而 SID 值越接

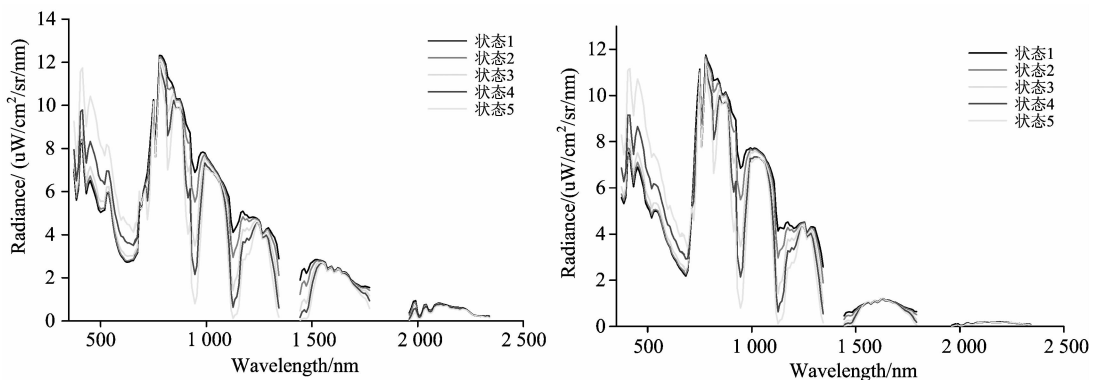
近于 0。

由图像模拟结果得到相应大气状态下的目标与植被背景辐亮度光谱(去除 3 个水汽吸收波段)，如图 3 所示。利用上述四种度量算子计算目标与植被背景在反射率图像和辐亮度图像中的光谱相似度，结果见表 2。



**Fig. 2 Original reflectance image and simulated hyperspectral radiance image in different atmospheric conditions (band 29, 19, 10)**

(a): Original reflectance image; (b): Atmospheric state 1; (c): Atmospheric state 2;  
(d): Atmospheric state 3; (e): Atmospheric state 4; (f): Atmospheric state 5



**Fig. 3 Simulated radiance spectrum of the target and vegetation background in different atmospheric conditions**

(a): The target radiance spectrum; (b): The vegetation background radiance spectrum

从表 2 计算结果可以看出，在辐亮度光谱上，从状态 1 到状态 5，SD 值从 11.03 逐渐减小到 7.942，说明目标与背景辐亮度光谱的幅度差异不断减小；SA 值从 0.155 5 逐渐减小到 0.115 3，说明目标与背景辐亮度光谱在形状上也变得

更接近；而 SC 值的逐渐增大和 SID 值的逐渐减小则都说明目标与背景之间的辐亮度光谱总体上变得更加相似。由此可见，随着大气中气溶胶、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 含量的增加，大气状况逐渐变差，大气的吸收和散射作用不断增强，从而导致

目标与背景之间经大气传输到达传感器的辐亮度光谱上差异性减小, 这充分说明大气状况的变差会使目标与背景在辐亮度光谱上变得更为接近, 从而会降低目标的可区分性。

Table 2 Spectral similarity between the target and the vegetation background

光谱相似度	反射率光谱	辐亮度光谱				
		状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
SD	1.652 0	11.030 0	10.452 8	9.660 2	8.851 8	7.942 0
SA	0.440 6	0.155 5	0.150 7	0.144 1	0.132 9	0.115 3
SC	0.723 5	0.980 1	0.981 4	0.982 8	0.985 4	0.989 3
SID	0.336 2	0.096 2	0.090 8	0.082 4	0.072 2	0.056 6

与反射率光谱中的情况相比, 除了辐亮度光谱上的 SD 比反射率光谱的 SD 大之外, 辐亮度光谱上的 SA、SC 和 SID 都更小, 说明辐亮度光谱中目标与背景的光谱差异除了幅度上比反射率光谱中的大, 从形状上以及综合来看都比反射率光谱中的差异小。这是由于反射率值均在 0~1 之间, 而辐亮度值(单位:  $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$ )却可达到 10 以上, 量纲上的不同导致采用欧氏距离度量辐亮度光谱差异时 SD 值更大。

### 3.2 目标探测结果分析

高光谱目标探测常根据有、无目标的先验知识(通常指光谱)采用不同的探测算法, 分别称之为匹配探测、异常探测。选择这两种情况下的典型算法, 对模拟的高光谱辐亮度图像进行目标探测。

异常探测不需要任何目标或背景先验知识, 就可将与背

景光谱有差异的小目标检测出来。由于高光谱图像中目标一般是少数的像元, 而背景通常符合正态分布, 图像中能量小的异常点就很可能是目标。选用经典的 RXD 异常探测算子<sup>[14]</sup>, 其计算公式为

$$\delta_{\text{RXD}}(x) = (x - \mu_0)^T \Sigma^{-1} (x - \mu_0) \quad (2)$$

其中,  $\mu_0$  为样本的均值光谱向量,  $\Sigma$  为样本的协方差矩阵。

匹配探测需要在目标光谱先验知识的支持下进行搜索的探测识别。此时寻找高光谱图像中的目标像元可以通过匹配滤波器(matched filter, MF)  $C_{\text{MF}} = \kappa \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0)$  对像元  $x$  进行滤波操作, 即计算  $C_{\text{MF}}^T (x - \mu_0)$ , 从而在抑制背景的同时得到各像元与目标光谱的匹配程度, 匹配度越高是目标的可能性越大。实际情况中 MF 使用的滤波算子<sup>[15]</sup>为

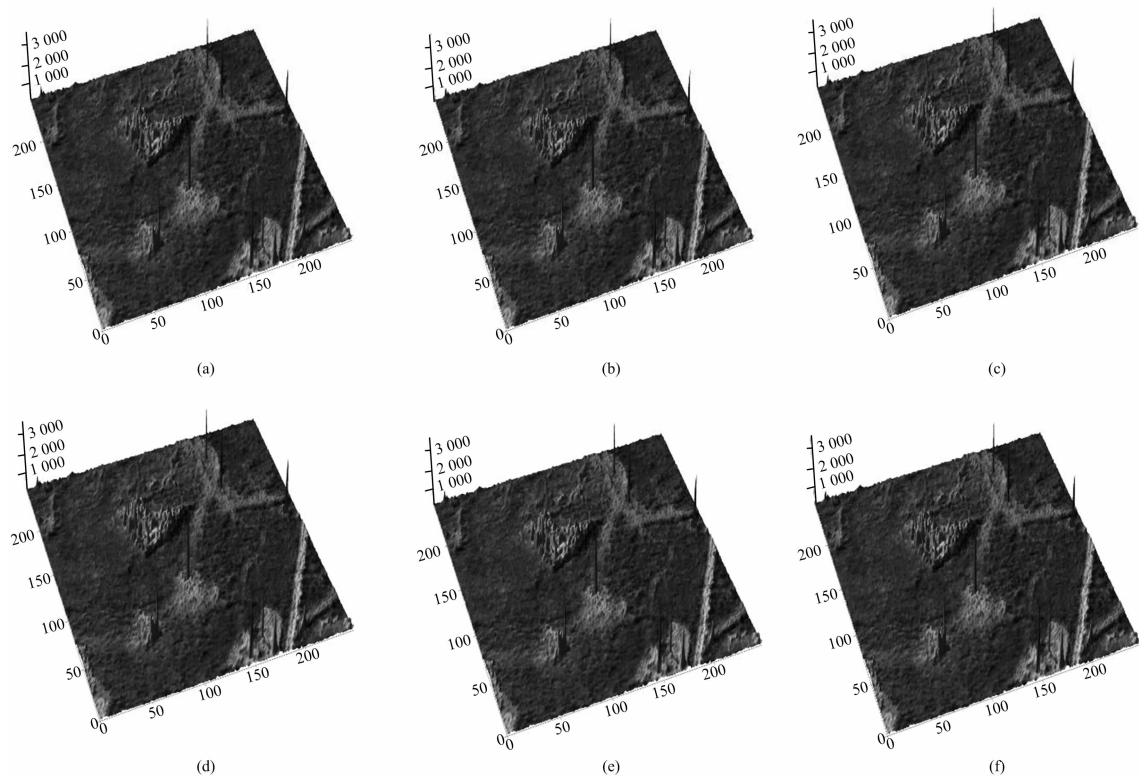


Fig. 4 RXD detection of original reflectance image and simulated radiance image in different atmospheric conditions

(a): Original reflectance image; (b): Atmospheric state 1; (c): Atmospheric state 2;  
(d): Atmospheric state 3; (e): Atmospheric state 4; (f): Atmospheric state 5

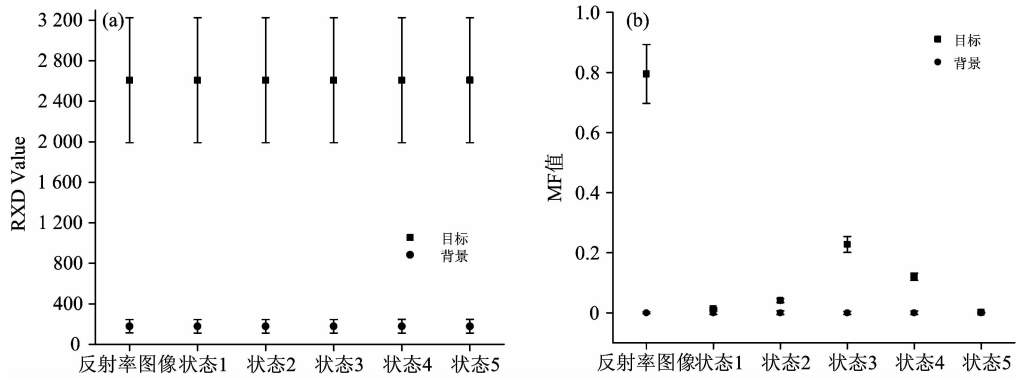


Fig. 5 Mean and standard deviation of target and background in detection image

(a): RXD; (b): MF

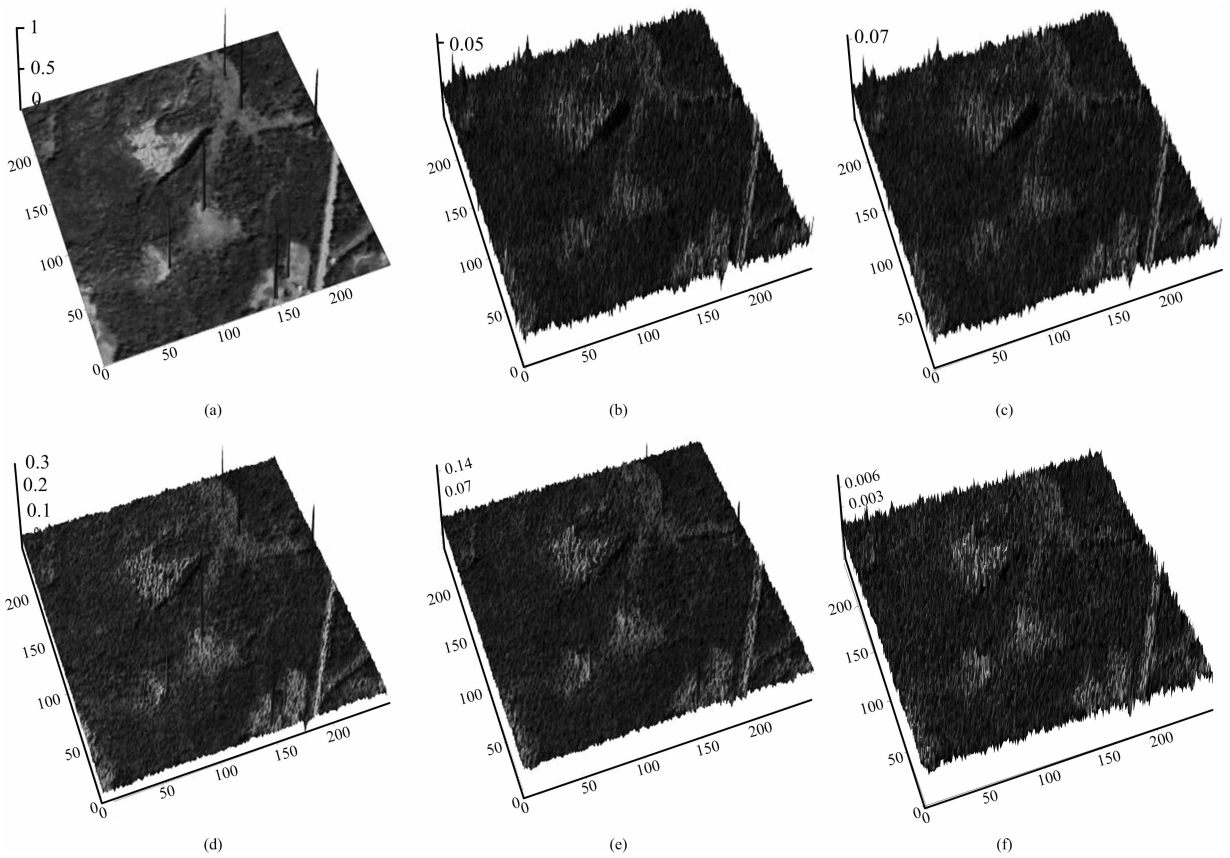


Fig. 6 MF detection of original reflectance image and simulated radiance image in different atmospheric conditions

(a): Original reflectance image; (b): Atmospheric state 1; (c): Atmospheric state 2;  
(d): Atmospheric state 3; (e): Atmospheric state 4; (f): Atmospheric state 5

$$\delta_{MF}(x) = \frac{(x - \mu_0)^T \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0)}{(\mu_1 - \mu_0)^T \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0)} \quad (3)$$

其中,  $\mu_0$  为背景的均值光谱向量,  $\mu_1$  为目标光谱向量,  $\Sigma$  为样本的协方差矩阵。

(1) 不同大气状态下光谱异常探测结果分析

利用 RXD 算法分别对反射率图像和模拟的辐亮度图像进行目标探测, 结果如图 4 所示(垂直方向上的幅值为此像元上的 RXD 探测结果)。

对图 4 RXD 探测结果中目标和背景(目标除外的区域)像元进行统计, 得到目标和背景对应的均值和标准差, 如图 5(a)所示, 其中, 实点处为均值, 线段长度为对应的标准差。从图 5(a)均值和方差的分析可知, 图 4(a)–(f)所对应的 RXD 探测结果几乎相同, 从幅度上看, 背景(均值为 179)远低于目标(均值为 2608), 且背景起伏很小(标准差为 67), 因而目标与背景在探测图像中很容易被区分开, 这在图 5 中

也可以清楚地看到。由图 4 及图 5(a)分析可见, RXD 在辐亮度图像中有着良好的探测效果, 不同大气状态下的探测结果基本相同, 而且辐亮度图像与反射率图像的探测结果也几乎一致。以上分析说明, 在辐亮度图像中进行 RXD 异常探测时大气状况对探测结果的影响很小, 对 RXD 探测算子而言, 辐亮度图像与反射率图像在探测效果上近似一致。

#### (2) 不同大气状态下光谱匹配滤波结果分析

假设有目标的反射率光谱这一先验知识, 对反射率图像进行 MF 探测; 同时以正常大气状况下(能见度 23 km,  $H_2O$  含量  $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $CO_2$  含量 390 ppmv,  $O_3$  含量  $0.3 \text{ ATM-cm}$ )目标到达传感器上的辐亮度光谱作为待检目标光谱, 对辐亮度图像进行 MF 目标探测, 结果如图 6 所示, 对应的目标与背景统计结果如图 5(b)。

对图 5(b)MF 探测结果的目标和背景统计量分析可知, 五种大气状态中背景的平均值和标准差变化不大, 但目标变化明显, 目标与背景的可分性从状态 3、状态 4、状态 2、状态 1、状态 5 依次降低, 状态 3(能见度 20 km,  $H_2O$  含量  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $CO_2$  含量 390 ppmv,  $O_3$  含量  $0.3 \text{ ATM-cm}$ )对应的 MF 探测效果最好, 目标和背景易于区分, 状态 1 和状态 5 中目标和背景则很难区分, 而反射率图像中目标和背景的可分性最好。由图 6 及图 5(b)分析可见, 在待检目标辐亮度光谱一定时, 大气状态对辐亮度图像 MF 探测的效果影响很大, 待检目标与辐亮度图像的大气状况越接近则探测效果越好。这充分说明, 在辐亮度图像中进行 MF 探测时, 探测结果的好坏依赖于待检目标辐亮度光谱的准确性, 因而在实际的实时探测应用过程中, 需要同步或预先准确获取大气状态参数以得到对应大气条件下的待检目标辐亮度光谱, 从而保证 MF 探测的良好效果。

#### (3) 基于辐亮度图像目标探测的效率分析

遥感器实际得到的是辐亮度(或 DN 值)图像, 传统的目标探测处理流程是先将其转化为反射率图像, 然后再进行目标探测。利用 ENVI 软件中的 FLAASH 模块对模拟的辐亮度数据进行大气校正, 在普通性能计算机上(Inter 1.86 GHz 双核处理器, 3 G 内存)耗费了近 290 s, 而在辐亮度图像和反射率图像中进行目标探测所耗费的时间均在 10 s 以内, 直接利用辐亮度图像上进行目标探测的处理流程可以获得近

30 倍的加速比。在探测效果上, RXD 由于不需要任何先验知识, 对辐亮度图像和反射率图像有着近似的结果; 而 MF 需要准确的目标光谱作为输入, 虽然在辐亮度图像中由于输入光谱不准确导致探测效果不如反射率图像中的探测效果好, 但实际在反射率图像中 MF 探测时也会受到反射率反演精度的影响, 而这种差异可看作是由算法输入的误差引起。

由上述分析可见, 在辐亮度图像中直接进行目标探测, 在满足精度要求的同时, 时间上可得到大幅缩减。因此, 直接以辐亮度图像进行目标探测是可行的, 它在保证探测精度的情况下, 可以有效提高目标探测过程的效率。

## 4 结 论

根据遥感器成像过程的辐射传输模型, 模拟了反射率图像场景在不同大气状态下的高光谱辐亮度图像, 并以此分析了大气状态对高光谱辐亮度图像中目标探测性能的影响。由目标、背景之间光谱相似度的分析和实际目标探测结果, 可以得到以下结论:

(1) 在辐亮度图像直接进行目标探测是可行的, 在保证精度的条件下能够大幅缩减目标探测过程的处理时间;

(2) 目标与背景之间的反射率光谱经过大气传输的影响, 在辐亮度光谱上变得更为接近, 且大气状况越差, 则光谱相似度越高;

(3) 在辐亮度图像目标探测上, RXD 异常探测对辐亮度图像和反射率图像有着近似一致的良好效果, 不同的大气状态对辐亮度图像目标探测的结果影响很小; 而 MF 探测性能会受到输入光谱准确度的影响, 通过计算模拟得到的目标辐亮度光谱要求与辐亮度图像获取时大气状态一致, 才有良好的探测效果。

综上所述, 基于辐亮度数据进行目标探测的处理策略, 可应用到遥感智能观测系统的星上准实时处理或机载实时处理系统之中, 同时在系统实时获取的大气参数等前场( fore-field)信息辅助下<sup>[1]</sup>, 达到对目标准确而快速的探测识别及结果下传, 这将具有很高的实际应用价值。

**致谢:** 感谢 NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory) 提供的 AVIRIS 数据。

## References

- [1] Zhang Bing. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(3): 415.
- [2] Kolodner M A. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2007, 27(3): 208.
- [3] Kolodner M A. Applied Optics, 2008, 47(28): F61.
- [4] Gillis D, Palmadesso P J, Bowles J H. Proc. SPIE 4381, 2001, 34.
- [5] Parente M, Clark J T, Brown A J, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(11): 3877.
- [6] Guanter L, Segl K, Kaufmann H. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2340.
- [7] Kerekes J P, Baum J E. Lincoln Laboratory Journal, 2003, 14(1): 117.
- [8] Gao Lianru, Zhang Bin, Zhang Wenjuan, et al. Proc. SPIE, 2009.
- [9] YAN Guo-qian, ZHAO Yun-sheng, NING Yan-ling, et al(阎国倩, 赵云升, 宁艳玲, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(12): 3358.
- [10] ZHANG Bing, GAO Lian-ru(张兵, 高连如). Hyperspectral Image Classification And Target Detection(高光谱图像分类与目标探测). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2011. 1.

- [11] Verhoef W, Bach H. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 23.
- [12] Guanter L, Richter R, Kaufmann H. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(6): 1407.
- [13] Freek van de Meer. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8: 3.
- [14] Reed I S, Yu X. *IEEE Transactions on Acoustic Speech Signal Process*, 1990, 38(10): 1760.
- [15] Yu X, Reed I S, Stocker A D. *IEEE Transactions on Signal Process*, 1993, 41(8): 2639.

## Impact Analysis of Atmospheric State for Target Detection in Hyperspectral Radiance Image

ZHANG Bing<sup>1</sup>, SHA Jian-jun<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-wei<sup>1</sup>, GAO Lian-ru<sup>1</sup>

1. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Target detection based on hyperspectral radiance images can improve data processing efficiency to meet the requirements of real-time processing. However, the spectral radiance acquired by the remote sensor will be affected by the atmosphere. In the present paper, hyperspectral imaging process is simulated to analyze the effects of the changes in atmospheric state on target detection in hyperspectral radiance image. The results show that hyperspectral radiance image can be directly used for target detection, different atmospheric states have little impacts on the RXD detection, whereas the MF detection is dependent on the accuracy of the input spectrum, and good results can only be obtained by the MF detector when the atmospheric states are similar between the radiance spectrum of the target to be detected and the simulated hyperspectral image.

**Keywords** Hyperspectral radiance image; Atmospheric state; Spectral similarity; Target detection

(Received Jan. 15, 2012; accepted May 10, 2012)