

# 根据表面反射特性进行目标探测的波段选择

范伟<sup>1</sup> 王毅<sup>2</sup> 饶瑞中<sup>1</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所国家 863 计划大气光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 南京大学大气科学系, 南京 210093)

**摘要** 计算和分析了表面反射特性对选择波段进行目标探测的影响. 通过引入正交子空间投影方法, 将背景信号从接收到的混合光谱中消除, 从而达到压缩背景信号的目的. 并在此基础上运用匹配跟踪算法自动地进行优化波段的选择, 达到选择最佳波段的目的, 从而进行目标探测. 在大气外实际目标的探测中, 得到了进行大气外目标探测的波段选择与目标表面反射特性的关系.

**关键词** 目标探测; 波段选择; 正交子空间投影; 匹配跟踪算法; 表面反射特性

**中图分类号** P422; TP391 **文献标识码** A

## 0 引言

对目标进行探测的研究在航空、航天、气象等部门具有很重要的应用价值. 在低信噪比情况下, 目标背景对比度较差, 人们往往通过各种算法达到提高对比度、去除噪音、分离目标等效果, 从而进行目标探测<sup>[1~4]</sup>. 文献[5]根据大气辐射传输方程推导大气外目标背景对比度的表达式, 并在此基础上选择波段, 使得在此波段范围内得到较高的信噪比, 从而达到对目标进行探测的目的; 然后又根据子空间投影的概念, 将接收到的混合信号向背景空间的正交子空间做投影, 从而达到从混合信号中压缩背景信号的目的. 在得到的剩余信号中运用匹配跟踪算法自动选择波段, 同样达到了提高信噪比和进行目标探测的目的<sup>[6]</sup>.

以上结果都是在假设大气外目标表面反射率为 1 的理想情况得出的探测波段的结果. 由于在实际中是不存在全反射体的, 目标表面反射率是在 0~1 之间变化, 而且基本上都是随波长变化的. 实际目标物表面吸收和反射均会对目标的探测产生影响. 目标物反射的太阳的辐射将影响接收系统对目标的探测. 目标物表面的材料, 表面粗糙度也影响着探测的效果, 而这些表面细节主要反应在目标物对太阳的反射特性上. 因而要更为准确地评估人眼或仪器系统对目标探测的能力, 就必须详细考虑这些特征. 本文选择 MODTRAN 软件包<sup>[7]</sup>, 在不同目标表面反射率情况下计算得到目标辐射、背景辐射, 及整层大气透过率, 并选取正交子空间投影方法和匹配跟踪算法选择优化波段, 用于考虑表面反射时对大气外目标的探测.

## 1 减背景的正交子空间投影方法计算原理及滤镜函数的优化选择

对于任一给定的线性混合系统<sup>[6,8~10]</sup>, 运用线性光谱成份组合来描述光谱象素, 在只考虑背景信号和噪音信号相互独立的情况下, 将原始光谱的模型可以表示为目标子集( $s_t$ )、背景子集( $s_b$ )和噪音( $n$ )的线性相加.

为消除干扰的背景信号的影响, 提高信杂比, 可引入一个针对背景信号的分类算子  $P_b^\perp$ ,  $P_b^\perp = I - s_b(s_b^T s_b)^{-1} s_b^T$ , 可以将不感兴趣的背景信号最小化,  $P_b^\perp$  实现将原始信号投影到子空间  $B$  的正交子空间  $B^\perp$ . 其中, 子空间  $B$  是由干扰背景  $s_b$  形成. 若在接收到的混合信号中噪音信号相比于目标和背景信号很小可忽略, 或者假设无噪音信号, 那么实际得到的理想的映射函数就是  $z = P_b^\perp s_t$ . 映射函数数值为正的部分, 则说明对应的波段范围内, 目标信号较强而背景信号较弱, 目标易于被探测.

在此基础上通过匹配跟踪算法<sup>[6,11,12]</sup> 自动选择的波段函数(滤镜函数)形成一个子空间, 在最大程度近似这个理想的映射, 达到压缩背景和提高信杂比的目的. 也就是此算法选择的波段函数应该在最大程度上近似目标信号向正交于背景空间的子空间的投影, 也即  $z = P_b^\perp s_t$  可以用一组线性滤镜函数的和来描述.

本文只考虑单个目标. 用归一化的矩形函数来表示滤镜函数. 与其它算法相比, 该优化算法的优点是能进行波段的自动选择, 而且提高了准确度, 避免了通过观察进行选择的盲目性.

## 2 计算与结果分析

本文只考虑大气对太阳辐射的散射以及大气本身的热辐射所造成的天空辐射, 其它辐射源不予以

考虑<sup>[1]</sup>.

计算到达观测者的目标辐射时,认为大气外目标主要是通过反射太阳的辐射从而被探测到的,不考虑目标本身的热辐射.将太阳辐射与目标表面反射率进行点乘,并考虑整层大气透过率的影响.计算过程各参量之间的关系如图 1.

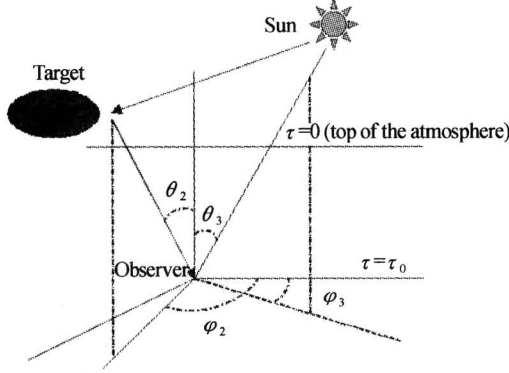


图 1 辐射传输几何关系  
Fig. 1 The geometry of radiative transfer

设观测方向向上,大气层顶处的光学厚度 $\tau=0$ ,地面处 $\tau=\tau_0$ .在 MODTRAN 计算分析中,选择参量为:美国标准大气模式,白天,无云,城市气溶胶模式,观察者的天顶角 $\theta_o=30^\circ$ ,太阳的天顶角 $\theta_s=60^\circ$ .观察者的方位角为 $\phi_o$ ,太阳的方位角为 $\phi_s$ , $|\phi_s-\phi_o|=90^\circ$ ,且近地面水平能见度选择为 5 km.通过建立的几何模型,计算到达大气层外的太阳辐射,沿 $30^\circ$ 观测者天顶角方向的背景天空辐射以及整层大气透过率.

一般来说很多物体表面反射率随波长具有选择性,而且反射率也是随波长变化的,在计算中选择以下两种有代表性的目标表面反射率进行分析.这两种表面涂层普遍运用在航天领域.图 2 和图 5 分别是这两种目标的表面反射率随波长的分布图,纵坐标是表面反射率;图 3 和图 6 则是理想的映射函数随波长的分布情况,而图 4 和图 7 则是在此基础上运用匹配跟踪算法选择的探测波段的结果,纵坐标是权函数.图中所有横坐标均是波长( $\mu\text{m}$ ).

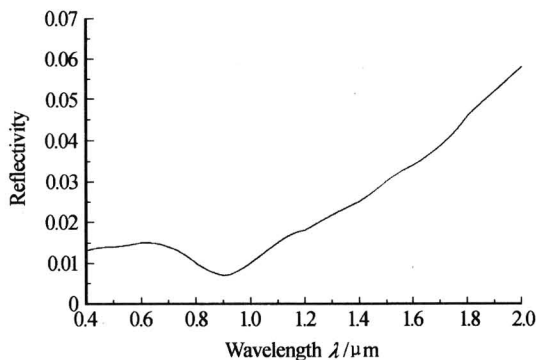


图 2 隐形材料表面反射光谱随波长的变化  
Fig. 2 The relation between the invisible material reflectivity and the wavelength

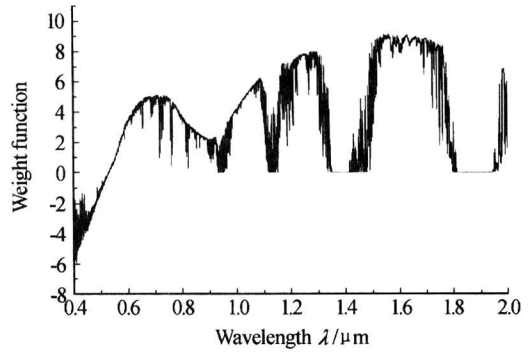


图 3 对隐形材料探测时对应的理想的映射函数  
Fig. 3 The relation between the ideal projection function and the wavelength considering detecting invisible material

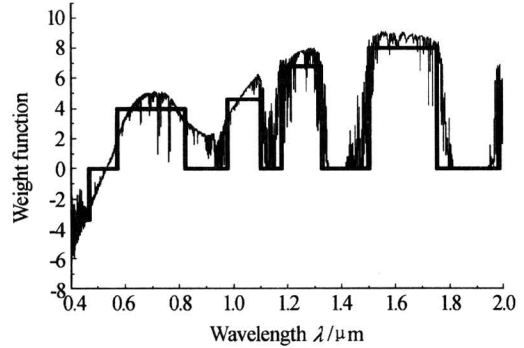


图 4 理想的映射函数和用匹配跟踪算法近似选择的矩形滤波函数  
Fig. 4 Ideal projection function and approximation by use of the filters selected by matching pursuit algorithm

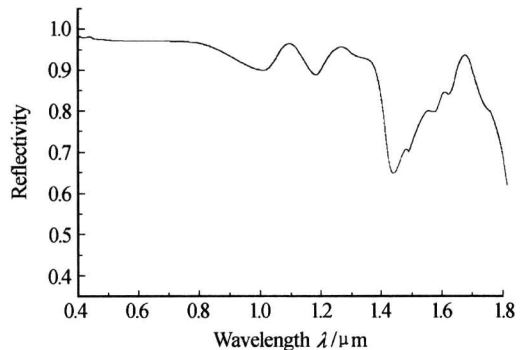


图 5 热反射材料表面反射光谱随波长的变化  
Fig. 5 The relation between the heat reflection material reflectivity and the wavelength

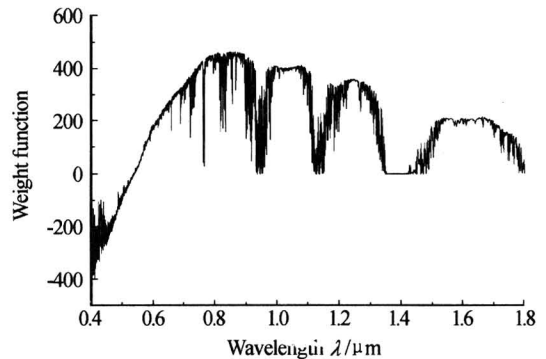


图 6 对太阳热反射涂料探测时对应的理想的映射函数  
Fig. 6 The relation between the ideal projection function and the wavelength considering detecting heating reflection material

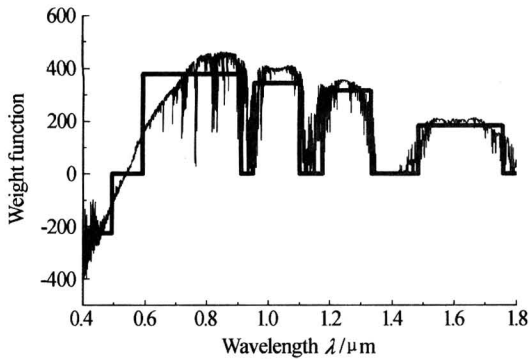


图7 理想的映射函数和用匹配跟踪算法近似选择的矩形滤波函数

Fig. 7 Ideal projection function and approximation by use of the filters selected by matching pursuit algorithm

## 2.1 隐形材料

有些大气外目标,外表加隐身涂层后,由于能够吸收雷达的回波信号,从而达到隐身的目的.选择一种隐形材料,它在可见和近红外区反射率低,即吸收比高.

表面是隐形材料的目标,其在背景天空下进行探测,需要进行光谱映射函数计算,向背景空间的正交子空间映射的目标信号是

$$z_{\text{mapping}} = P_{\text{sky}}^{\perp} S_t = (I - P_{\text{sky}}) S_{\text{invisible material}} = S_{\text{invisible material}} - (S_{\text{sky}}^T S_{\text{sky}})^{-1} (S_{\text{sky}}^T S_{\text{invisible material}}) S_{\text{sky}} \quad (1)$$

结果如图3.

由于目标表面反射率很低,所以投影计算得到的权重函数的绝对数值非常小,说明目标不易被探测到.通过对映射函数随波长的分布可知,在可见光紫光区域附近数值最小,说明在此区域目标最不易被探测.随着波长的增大,函数的数值也随之增加,在可见光接近红光波段以及红外波段出现若干幅值,并且幅值随着波长的增加而增大.这些幅值就对应着探测的优化波段.

用匹配跟踪算法自动选择的前6个近似的滤镜(波段)函数,如图4.其中正的权函数数值及对应的优化波段分别是:0.57013 μm~0.8196 μm,数值4.0012;0.97561 μm~1.10011 μm,数值4.6021;1.17578 μm~1.32363 μm,数值6.8102;1.49925 μm~1.75131 μm,数值8.1021.以上4组波段即为此类目标探测的优化波段.

## 2.2 太阳热反射涂料

运行在太空中的卫星等航天器,由于没有大气保护,表面温度很高.为了防止高温对卫星所产生的不良影响,宇航部门采用在卫星表面涂敷一层太阳热反射涂料,可反射或辐射掉大部分太阳能,以降低卫星表面的温度.太阳热反射涂料反射率如图5.可以看出:在太阳辐射到地球表面能量最集中的频段(可见到近红外波段范围),太阳热反射涂料的

反射率基本上都是在90%以上.所以可以说,这种涂料就是针对反射太阳的热能而设计的.

表面是热反射材料的目标,其在背景天空下进行探测,也需要进行光谱映射函数计算,向背景空间的正交补空间映射的目标信号是

$$z_{\text{mapping}} = P_{\text{sky}}^{\perp} S_t = (I - P_{\text{sky}}) S_{\text{heat reflection material}} = S_{\text{heat reflection material}} - (S_{\text{sky}}^T S_{\text{sky}})^{-1} (S_{\text{sky}}^T S_{\text{heat reflection material}}) S_{\text{sky}} \quad (2)$$

结果如图6.

由于目标表面涂层表面反射率很高,所以在整个波段范围内投影计算得到的权函数绝对数值非常大.通过对映射函数随波长的分布可知,在可见光紫光区域附近映射函数数值最小,说明目标最不易被探测到.在可见光接近红光区域以及红外区域出现若干幅值,但是其随着波长的增加而逐步减少,这些幅值就对应着探测的优化波段.

用匹配跟踪算法自动选择的前5个近似的滤镜(波段)函数,如图7.其中正的权函数数值及对应的优化波段分别是:0.59035 μm~0.91042 μm,数值379.61916;0.95021 μm~1.10023 μm,数值345.10833;1.17592 μm~1.33262 μm,数值316.3493;1.485 μm~1.75623 μm,数值183.01848.以上4组波段即为此类目标探测的优化波段.

## 3 结论

本文通过考虑两种有代表性的表面反射率,得到对目标进行探测的优化波段.分析表明,运用正交子空间投影的方法及匹配跟踪算法得到的优化波段与目标物表面涂层反射率的谱分布密切相关.

1)当选择的探测目标表面是隐身涂层材料时,在整个波段范围内权重数值非常小,说明目标不易被探测到,0.57013 μm~0.8196 μm、0.97561 μm~1.10011 μm、1.17578 μm~1.32363 μm以及1.49925 μm~1.75131 μm是较好的探测波段.

2)当选择的探测目标的表面是太阳热反射涂料时,在整个波段范围内权重数值非常大,说明目标易被探测到,0.59035 μm~0.91042 μm、0.95021 μm~1.10023 μm、1.17592 μm~1.33262 μm和1.49925 μm~1.75131 μm可以选择作为此类目标的探测波段.

通过以上分析可以看到,目标表面选择隐形材料及太阳热反射涂料时,得到的投影数值相差很大,说明不同表面反射对目标探测的影响是非常明显的.即使为了提高信杂比选择波段最终达到对目标进行探测,但用较高权重选择波段进行探测的效果一定比用较低权重选择波段进行探测的效果要好.

而且,在目标表面选择这两种有代表性的涂层材料时,从可见到近红外波段均有优化探测的波段,且波段范围较宽,目标易于被探测.当目标表面是隐形反射材料时,在整个红外区选择的波段对应的权重数值超过了可见光波段内对应的权重数值,说明近红外波段是进行此类目标探测的较好区域.从 $1.49925\ \mu\text{m}\sim 1.75131\ \mu\text{m}$ ,对应的权重数值最大,是进行此类目标探测的最佳波段.若目标表面涂层选择的是太阳热反射涂料时,从可见光至近红外探测波段 $0.59035\ \mu\text{m}\sim 0.91042\ \mu\text{m}$ ,权重数值最大且宽度较宽,超过了其它近红外波段的权重数值及宽度,无疑是探测此类目标的最佳波段.由此可见,对于不同表面反射涂层进行目标探测时,得到的探测波段的结果也是不同的.

以上优化的探测波段,在实际的应用中,可以选择对应于这几个波段上的滤光片,达到截止其它波段信号的目的,在此波段范围内提高信噪比,实现针对以上两类目标的探测;也可以选择在此波段范围内有响应的探测器,如可以选择一种采用 ZnSe (硒化锌)的MCT(碲镉汞)探测器.该探测器在 $0.56\sim 22\ \mu\text{m}$ 这个很宽的波段范围内具有优良的响应特征,可以满足实际需要<sup>[5]</sup>.

匹配追踪算法能自动选择波段,而且准确度较高,避免了通过观测选择波段的缺陷.而且由于在进行目标探测时是考虑实际目标的表面反射率,使得得到的探测波段的结果更有实际意义.

应该指出的是,由于大气外的目标并不考虑自身的热辐射,是靠反射的太阳辐射作为探测的目标光源,因此其被认为是冷物体,所以在以上波段特别是可见光波段内考虑对目标的探测更有意义.

#### 参考文献

- 1 袁慧晶,王涌天.一种抗干扰的弱小目标检测方法.光子学报,2004,33(5):609~612  
Yuan H J, Wang Y T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5):609~612
- 2 张锋,蒋一峰,陈真诚,等.对一种新的基于局部标准差的自适应对比度增强算法的评价.光子学报,2004,32(8):989~992  
Zhang F, Jiang Y F, Chen Z C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 32(8):989~992
- 3 过润秋,李大鹏,林晓春.红外点目标检测的小波变换方法研究.光子学报,2004,33(4):464~467  
Guo R Q, Li D P, Lin X C. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4):464~467
- 4 周军妮,曹剑中,刘波,等.一种基于局部最小代价分水岭变换的图像分割新方法.光子学报,2005,34(1):142~145  
Zhou J N, Cao J Z, Liu B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1):142~145
- 5 范伟,王毅,饶瑞中.根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择.红外与激光工程,2005,34(2):177~182  
Fan W, Wang Y, Rao R Z. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2):177~182
- 6 范伟,王毅,饶瑞中.减背景的波段选择算法及其在目标探测中的应用.强激光与粒子束,2005,17(5):828~832  
Fan W, Wang Y, Rao R Z. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5):828~832
- 7 Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN, a moderate resolution model for LOWTRAN 7 Technology Report GL-TR-89-0122, air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Mass, 1989
- 8 Harsanyi J C, Chang C I. Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1994, 32(4):779~785
- 9 Manolakis D, Shaw G. Detection algorithms for hyperspectral imaging applications. *IEEE Signal Process*, 2002, 19(1):29~43
- 10 Manolakis D, Shaw G, Keshava N. "Comparative analysis of hyperspectral adaptive matched filter detectors", in Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI, S. S. Chen and M. R. Descour, eds. *Proc SPIE*, 2000, 4049: 2~17
- 11 Mallat S, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Trans Signal Process*, 1993, 41(12):3397~3415
- 12 Davis G, Mallat S, Zhang Z. Adaptive time-frequency decomposition. *Opt Eng*, 1994, 33(7):2183~2191

## Wavelength Band Selection Method for Target Detection Considering Surface Reflectivity

Fan Wei<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>2</sup>, Rao Ruizhong<sup>1</sup>

*1 Atmospheric Optics Center, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*

*2 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210039*

Received date: 2005-01-10

**Abstract** The influence on target detection of surface reflective character was computed and analyzed in the article. By introducing the orthogonal complement subspace projection method, the background signal was eliminated from the receiving mixture signal. Therefore the aim to compress the background signal was achieved. On the basis of the remaining signal, the matching pursuit algorithm was adopted to select the optimal wavelength bands automatically. Aiming at selecting the optimum wavelength bands was achieved and the target can be detected. The algorithm was applied to target detection out of the atmosphere. At last the relation between the wavelength band selection for target detection out of the atmosphere and the target's surface reflective character was obtained.

**Keywords** Target detection; Wavelength band selection; Orthogonal subspace projection; Matching pursuit algorithm; Surface reflective character



**Fan Wei** was born in April, 1977, Hefei, Anhui Province. He received his M. S. degree from Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics of CAS. Now He is a doctor graduate in Optical Department, Atmospheric Optics center of Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics of CAS. His current researches primarily focus on atmospheric radiative transfer, information process and target detection.