

根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择

范伟,王毅,饶瑞中

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

摘要:介绍了通过大气光谱特征分析对大气层外目标进行探测的波段选择方法。在考虑目标本身辐射强度、背景大气的辐射强度、目标背景对比度、斜程大气透过率以及探测器的响应特性诸因素后进行波段选择,从而提高对目标的鉴别性能。选择中纬度夏季白天、无云城市气溶胶模式、春夏季气溶胶廓线以及背景平流层廓线和消光的大气条件,利用辐射传输计算软件 MODTRAN 计算了目标背景亮度、对比度以及透过率的典型光谱特征,并进行光谱特征分析,然后在其他大气模式下对所选波段进行了验证,从而选择出目标探测的最优波段。

关键词:波段选择; 目标背景对比度; 辐射传输; MODTRAN; 目标探测
中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0177-06

Wavelength band selection method for target detection based on character of atmosphere radiation

FAN Wei, WANG Yi, RAO Rui-zhong

(Atmospheric Optics Laboratory, National 863 Program, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Wavelength band selection method for target detection which is out of the atmosphere based on character of atmosphere radiation is proposed in the paper. In order to improve the target identification performance, wavelength band is selected by considering the target radiance, the background radiance, the target background contrast, the transmittance of slanting path and the response character of the sensor. By adopting atmospheric condition of the midlatitude summer model in the daytime, no clouds urban aerosols, spring-summer aerosol profiles and background stratospheric profiles extinct model, the typical spectrum characters of target background radiance, contrast and transmittance are computed by the radiative transfer computation software MODTRAN, and then the spectrum characters in the wavelength bands are analyzed. From the analysis results and the validation in other atmosphere models, the optimal detection wavelength band is selected.

Key words: Wavelength band selection; Target background contrast; Radiative transfer;

0 引言

目标探测广泛应用于航空、航天、气象等领域,在气象方面,利用某些目标探测方法可以获得更多的气象资料,从而更准确地进行气象预报;在天文上,目标探测可辅助光学观测对临近地球的星球及物体进行更深入的研究^[1]。

对目标的探测在很大程度上取决于以下几个因素:目标本身和周围背景的辐射特征以及它们之间的对比度^[2]。目标探测通常会受大气的影 响:目标与背景的辐射特征经过大气最终到达观测者,辐射信号在大气中传输受到大气衰减,同时大气或太阳的辐射又会构成一定的背景辐射,这些背景辐射或大气衰减很强时,使目标信号完全淹没于背景辐射中而无法探测^[3]。

迄今为止,人们针对大气内目标探测已进行了深入研究^[4],如 Karlholm 和 Renhorn^[5]用滤波片选择波段,使接收到的大部分信号为需要探测的信号;Doo 和 Oh 发现目标和背景在红外波段难以区分,但在紫外波段探测可有效区分。这些基本思想都是使所接收到的原始信号中包含尽可能强的目标光谱信号,同时使背景信号在此波段内尽可能小,从而提高信噪比,最终达到对目标进行探测的目的。对大气外目标探测,相应的研究工作开展得并不多。但是上述思想是完全可以运用到此类研究领域中的。通过对目标辐射、背景辐射、目标背景对比度、大气透过率的谱线的详细分析,并考虑探测器的响应特征^[5],可以选择恰当的波段实现对大气外目标的探测。

本文从辐射传输理论出发,运用辐射传输方程推导了大气外空间目标的对比度表达式。利用辐射传输计算软件 MODTRAN,计算分析了中纬度夏季大气条件、无云城市气溶胶模式、春夏季气溶胶廓线以及平流层廓线和消光^[6]下的目标自身辐射、整层大气背景辐射和斜程大气透过率,并由此推算出目标背景对比度。在结合仪器响应特征后,选择出最优波段用于大气外目标探测。

1 原理

1.1 目标背景对比度

对于大气外的观测目标,主要依据亮度的差异进

行目标探测^[7]。所以目标与背景的亮度对比是对大气外目标探测的重要因素。

目标辐射在传输到观察者的路径中经历了大气的消光作用(包括散射和吸收),观察者实际接收到的为视亮度,背景是天空散射的太阳光和天空热辐射。因此,目标背景对比度的一般定义为^[8,9]:

$$C^* = \frac{I_T - I_B}{I_B} \quad (1)$$

式中 I_T 为观测者接收到的目标亮度; I_B 为观测者接收到的环境辐射亮度,在文中指天空背景辐射; C^* 为观测者处目标背景对比度。 I_T 和 I_B 均可由辐射传输方程求解得到。

假定观察者向上观察,如图 1 所示,大气层顶处的光学厚度 $\tau = 0$,地面处 $\tau = \tau_0$ 。观察者天顶角和方位角分别为 θ_1 、 φ_1 ,太阳天顶角和方位角分别为 θ_s 、 φ_s 。

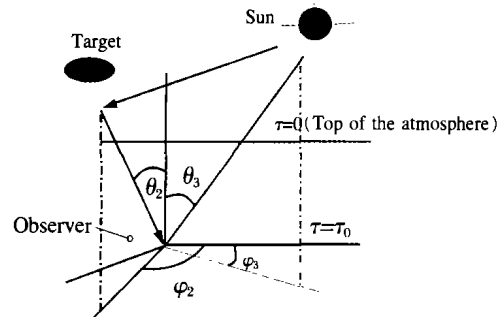


图 1 辐射传输几何关系

Fig.1 Geometry of radiative transfer

辐射传输方程的一般形式为^[10,11]:

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = I - J \quad (2)$$

式中 I 是辐射亮度; J 是源函数。实际接收到的目标视亮度 I_T 和背景天空辐射亮度 I_B 由公式(2)可得^[4,11]:

$$I_T = I_0 e^{-\tau_0/\mu} + \int J e^{-((\tau_0 - \tau')/\mu)} \frac{d\tau'}{\mu} \quad (3)$$

$$I_B = \int J e^{-((\tau_0 - \tau')/\mu)} \frac{d\tau'}{\mu} = I^*(\tau_0) \quad (4)$$

将公式(3)、(4)代入公式(1)中:

$$C^* = \frac{I_T - I_B}{I_B} = \frac{I_0}{I^\downarrow(\tau_0)} e^{-\tau_0/\mu} = \frac{I_0}{I^\downarrow(\tau_0)} T \quad (5)$$

式中 T 是斜程大气透过率; I_0 是目标固有亮度; I^\downarrow 是背景天空亮度。由公式(5)的结果可以看出,大气外目标背景对比度与目标固有辐射亮度 I_0 、观测者所看到的背景天空亮度 $I^\downarrow(\tau_0)$ 及观察路径的透过率有关。

1.2 目标背景对比度计算的假设条件

由于目标本身的形状、吸收反射特性以及大气背景的复杂多变,为简化计算可假设:

(1)假设目标表面反射率为 1,即太阳辐射传输到目标,在被其反射的前后,数值无变化。

(2)在求解背景天空亮度 $I^\downarrow(\tau_0)$ 时,只考虑大气对太阳辐射的散射以及大气本身的热辐射的影响。

在具体运算过程中,计算目标及背景的辐射亮度以及斜程大气透过率时采用了 MODTRAN,并由此推算对比度。

2 计算分析及波段选择

在 MODTRAN 计算分析中,选择参数为:中纬度夏季白天,无云,城市气溶胶模式,春夏季气溶胶廓线。海拔为零,观测位置 $\theta_1=30^\circ, \theta_2=60^\circ$,观测者和太阳方位角之差 $|\varphi_2 - \varphi_1|=90^\circ$,近地面水平能见度 5 km。针对大气外目标主要是通过反射太阳的辐射被探测到的,故选择波段为 0.4~4 μm ,即太阳的主要光谱范围,结果如图 2 所示。

图 2(a)为目标的亮度,(b)为背景天空的辐射亮度,(c)、(d)分别为目标对比度和斜程大气透过率在波段的分布关系。由图 2(a)、(b)可见,在波长较小的区域,强度幅值较大,变化剧烈;随着波长增加,有若干幅值出现,但逐渐减小。在 0.6~2.4 μm 范围内,目标辐射强度存在几个明显峰值(0.6~0.8 $\mu\text{m}, 1.0\sim 1.1 \mu\text{m}, 1.20\sim 1.30 \mu\text{m}, 1.50\sim 1.76 \mu\text{m}, 2.0\sim 2.4 \mu\text{m}$);而背景辐射强度的较大峰值基本上集中在 1.0 μm 之前,在 2.0~4.0 μm 范围内,背景辐射强度趋于最小值。从图 2(b)可见,在可见光范围(0.40~0.77 μm)内,对比度基本上随着波长增大而缓慢增大;在红外

波段,对比度数值起伏明显,并且在 0.8~2.4 μm 波段

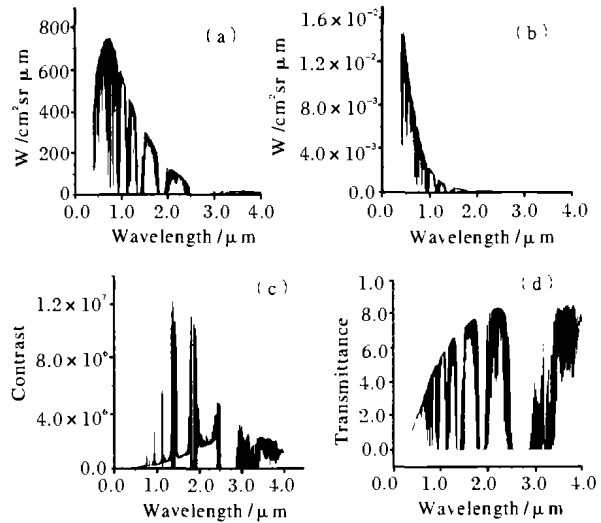


图 2 目标辐射、背景辐射、对比度和透过率在波段的具体分布关系
Fig.2 Relations between wavelength band and target background radiance, contrast and transmittance

范围内出现若干峰值。最大峰值出现在 1.3~1.5 μm 及 1.8~1.9 μm 范围内。可以看出,在 1.5~1.8 μm 及 2.0~2.4 μm 内,对比度变化平稳,数值较大,而且后者数值明显大于前者。从图 2(c)可见,斜程大气透过率随着波长变化更加明显,在可见光范围内远离红光波段处,数值基本上是平稳变化的,并随着波长的增加而增加。但在可见光的红光以及红外波段范围内数值起伏,存在几个明显峰值,其中 1.25~1.30 $\mu\text{m}, 1.51\sim 1.80 \mu\text{m}, 2.0\sim 2.4 \mu\text{m}$ 数值较大,是比较理想的大气窗口。

对比度的峰值不仅与透过大气的目标辐射有关,而且与背景辐射有着密切关系。为了探测目标,需要选取恰当的波段使目标信号较强^[5]、对比度较大,同时也要兼顾大气窗口,以包含较强的光谱信号^[5]。综上所述,在同时考虑目标背景辐射、对比度和大气透过率后,选择 2.0~2.4 μm 波段范围恰好可以满足对目标探测的上述要求。

为了进一步详细说明,在 0.60~0.80 $\mu\text{m}, 1.00\sim 1.10 \mu\text{m}, 1.20\sim 1.30 \mu\text{m}, 1.50\sim 1.80 \mu\text{m}$ 和 2.00~2.40 μm 波段考察目标背景辐射亮度、对比度以及斜程大气透过率在其中的数值变化。表 1 为在此波段范围内各变量的算术平均值。

表 1 在所选波段范围内目标背景辐射、对比度和透过率的变化

Tab.1 Variety of the target background radiance, contrast and transmittance in the selected bands

Wave band / μm	Target radiance / $\text{W}/\text{cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$	Background radiance / $\text{W}/\text{cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$	Contrast	Transmittance
0.60~0.80	681.52	6.51E-3	1.16E5	0.32
1.00~1.10	529.08	1.8E-3	2.98E5	0.55
1.20~1.30	396.12	8.27E-4	4.86E5	0.61
1.50~1.80	225.33	2.58E-4	1.00E6	0.66
2.00~2.40	83.44	4.60E-5	1.97E6	0.68

由表 1 可知,随着波长的增加,目标和背景的辐射均减少,而对比度逐渐增大。这是因为虽然目标辐射减少,但是背景辐射减少的速率更快,且透过率随着波长的增大也增大。对比度和斜程大气透过率在 2.0~2.4 μm 均达到了极大值。数值分析的结果与以上分析一致。

对 2.0~2.4 μm 波段进行大气外目标探测,可以选择 MCT(碲镉汞)探测器。该探测器在 0.56~22 μm 波段内具有优良的响应特征,可满足实际需要^[12]。

为了验证以上分析所得的结果,将近地面水平能见度分别改为 1、2、5、8、10、15、20、40、50、80、100 km,其他条件保持不变。结果目标背景辐射、对比度以及斜程大气透过率的谱线形状及其随波长变化的趋势均与图 2 基本一致。

在 2.0~2.4 μm 波段范围内,目标亮度、目标背景对比度以及斜程大气透过率随地面水平能见度变化的规律如表 2 和图 3 所示。表 2 为在此波段范围内各变量的算术平均值。可以看出,目标辐射亮度、对比度以及大气斜程透过率随着地面水平能见度的增大均增大。其中对比度的数值变化更为明显,几乎呈线性增加;目标辐射亮度和透过率变化趋势极为相似,在能见度小于 5 km 时增加较快,在能见度超过 5 km 后虽也增大,但是增长的速率大大减小,远不如对比度明显,而在能见度超过 20 km 后呈极为缓慢的增大趋势,透过率数值已经增大至极大值,而目标辐射亮度变化也已趋于平稳。

表 2 在 2.0~2.4 μm 范围内目标亮度、对比度及透过率随地面水平能见度变化的规律

Tab.2 Relation between horizon visibility and target radiance, contrast and transmittance in 2.0~2.4 μm

Visibility/km	Target radiance / $\text{W}/\text{cm}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$	Contrast	Transmittance
1	45.32	2.70E5	0.37
2	56.36	1.04E6	0.46
5	77.88	2.70E6	0.63
8	84.67	4.18E6	0.69
10	87.12	5.09E6	0.70
15	91.15	7.57E6	0.73
20	93.34	1.01E7	0.75
40	96.69	1.93E7	0.782
50	97.36	2.35E7	0.787
80	98.37	3.47E7	0.795
100	98.71	4.12E7	0.797

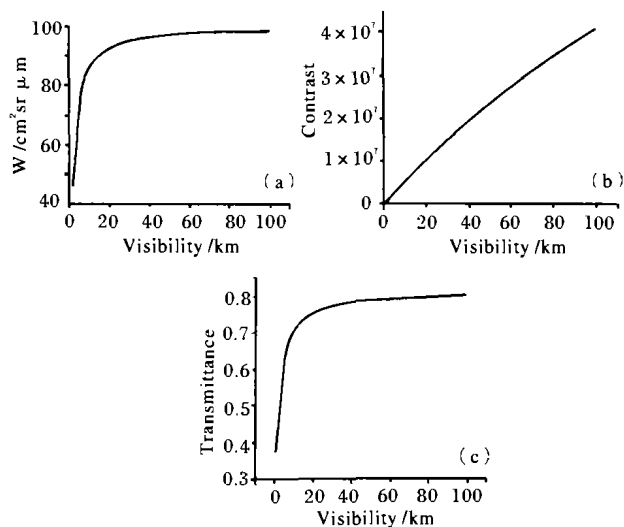


图 3 在 2.0~2.4 μm 范围内目标辐射亮度、对比度及透过率随地面水平能见度变化的规律

Fig.3 Relation between horizon visibility and target radiance, contrast and transmittance in 2.0~2.4 μm

3 其他大气情况简要分析

以上仅对一种大气条件进行了分析,而在不同的大气模式下,由于季节和经纬度等条件均发生变化,相应的对比度、大气斜程透过率也会发生变化^[13]。分别选择热带、中纬度冬季、副极地夏季和副极地冬季

的大气模式进行分析,近地面水平能见度选择为5 km,其他观测条件不变,结果如图4所示。在0.60~0.80 μm、1~1.10 μm、1.20~1.30 μm、1.50~1.80 μm和2~2.40 μm几个波段的对比度和大气斜程透过率如表3所示,表中数据均为在此波段范围内各变量的算术平均值。

表3 其他大气模式下在所选波段范围内目标背景辐射、对比度和透过率的变化

Tab.3 Variety of the target background radiance, contrast and transmittance in the selected bands

Wave band /μm	Tropical mode		Midlatiude	
	Contrast	Transmittance	Contrast	Transmittance
0.60~0.80	1.76E5	0.31	1.88E5	0.33
1.00~1.10	3.95E5	0.52	4.17E5	0.53
1.20~1.30	6.13E5	0.56	6.34E5	0.59
1.50~1.80	1.26E6	0.60	1.19E6	0.66
2.00~2.40	2.57E6	0.61	2.53E6	0.67

Wave band /μm	SubArctic		SubArctic winter	
	Contrast	Transmittance	Contrast	Transmittance
0.60~0.80	1.82E5	0.32	1.83E5	0.33
1.00~1.10	4.08E5	0.52	4.06E5	0.54
1.20~1.30	6.27E5	0.58	6.16E5	0.60
1.50~1.80	1.22E6	0.63	1.14E6	0.67
2.00~2.40	2.55E6	0.65	2.45E6	0.68

由图4可知,在其他大气模式下,对比度和大气斜程透过率在2.0~2.4 μm波段范围内基本上达到了极大值,符合在目标探测中选择对比度较大并且兼顾大气窗口的要求;表3则反映了在各个大气模式下,对比度和大气斜程透过率都随波长的增加而逐渐变大,在2.0~2.4 μm均达到了极大值,与前面的变化规律一致。由此可见,在多种典型气象环境模式下,选择2.0~2.4 μm波段进行大气层外目标探测均符合最大对比度要求。

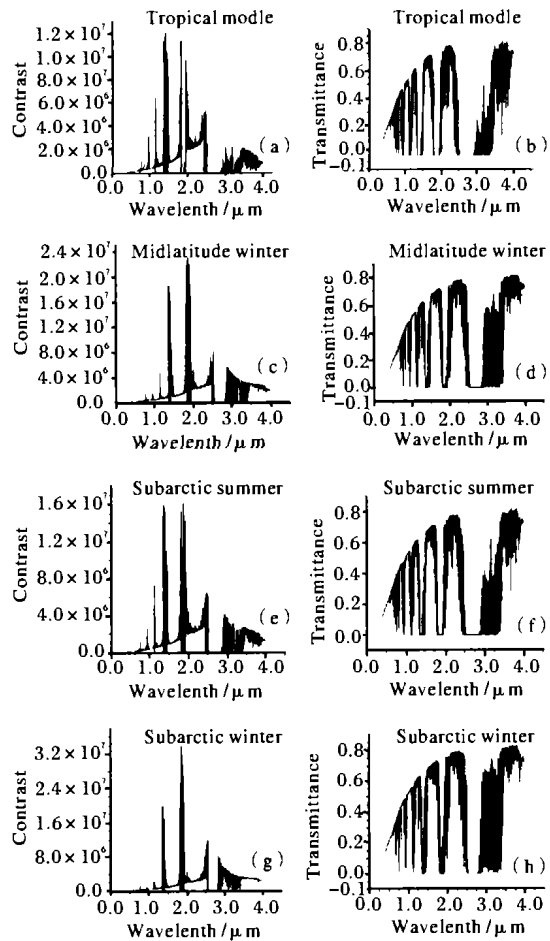


图4 其他大气模式下目标背景对比度以及大气斜程透过率

Fig.4 Relations between wavelength band and target background contrast and transmittance

4 结论

综合以上分析可知,在2.0~2.4 μm波段范围内,目标辐射较强而背景辐射很小,目标背景对比度的数值较大,且随着波长变化没有大的波动,斜程大气透过率也很高,在兼顾了仪器的响应特性后,可以使所接收到的原始信号中包含尽可能强的目标光谱信号,同时使背景信号在此波段内尽可能很小,以减少其对目标探测的影响,从而提高信噪比,最终达到对大气外目标进行探测的目的。可以认为2.0~2.4 μm是进行大气外目标探测的理想波段。

必须指出本文采用了一些条件假设:如目标表面反射率为1;忽略了大气层中云层的影响等。虽然得到了对大气外目标探测的优化波段范围,但是由于这些假设的理想化,还存在一些影响因素需要进一步深入研究。

参考文献:

[1] 徐产兴.雷达目标识别技术及其新发展[J].雷达与对抗,1994, 2:1-9.

[2] 韩玉阁,宣益民.目标与背景的红外辐射特征研究及应用[J].红外技术,2002,24(4):16-19.

[3] 韩玉阁,宣益民.大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J].应用光学,2002,23(6):8-11.

[4] 王毅,饶瑞中.空间斜程能见度的影响因素分析[J].强激光与粒子束,2003,15(10):945-950.

[5] Jörgen Karlholm, Ingmar Renhorn. Wavelength band selection method for multispectral target detection[J]. App Opt,2002,41(32):6786-6795.

[6] 吴北婴,李卫,陈洪滨,等.大气辐射传输实用算法[M].北京:气

象出版社,1998.

[7] 王永生.大气物理学[M].北京:气象出版社,1987.

[8] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.

[9] 张逸新,迟泽英,陈文建.烟幕对红外目标对比度衰减的变化规律的研究[A].目标与环境特征“九五”技术成果论文集(下册)[C].北京:目标特性及其传输专业组,2001.260-267.

[10] 周秀骥,陶善昌,姚克亚,等.高等大气物理学[M].北京:气象出版社,1993.

[11] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M].New York:Academic Press,1980.

[12] 方勇华,荀毓龙,韦占凯,等.一种采用 ZnSe 分束器的新型傅里叶变换光谱仪[J].量子电子学报,1997,14(1):81-85.

[13] 王毅,范伟,饶瑞中.大气、地表条件对目标-背景对比度的影响分析[J].量子电子学报,2004,21(1):92-97.

(上接第 172 页)



图 7 螺旋状星系 M81 的可见(右上角)和红外图像
Fig.7 Multiple infrared views of spiral galaxy Messier 81

2003 年 8 月 25 日,美国又将研制了 20 年、迄今最为先进的空间红外望远镜发射到了太阳系地球随动轨道上。图 6 是 Spitzer 望远镜上四波段红外照相机的光路,四个波段中心波长分别为 3.6、4.5、5.6 和 8.0 μm ,采用了 2 个 256 \times 256 元 InSb 和 2 个 256 \times 256 元 Si:As 焦平面组件^[8]。Spitzer 望远镜发回了大量图像。图 7 是距地球 1200 万光年的螺旋状星系 M81 的可见(右上角)和红外图像。左下、中下和右下分别为 24、8.0 和 3.6 μm 红外像,中央为 3.6~24 μm 多波段复合像。2003 年情人节前夕,Spitzer 望远镜又及时送来了仙王座 NGC-7192 新星团状如玫瑰花蕾的美丽图像,如图 8 所示。



图 8 仙王座 NGC-7192 新星团的图像
Fig.8 Commemorative picture taken from nebula NGC-7192 in the constellation Cepheus

参考文献:

[1] MDA.Making missile defense reality[EB/OL].http://www.acq.osd.mil/bmdo.2003

[2] Walter R Dyer,Meimei Z Tidrow.Applications of MCT and QWIP to ballistic missile defense [A].SPIE[C].1998,3379.434-440.

[3] Maxtech International, Inc.Infrared imaging news[EB/OL].http://www.maxtech-intl.com/irnews.htm.2004

[4] Dornheim M A,Fulghum D A.Four distinct AIM-9X designs proposed[J].Aviation Week and Space Technology,1996,145(23): 22-24.

[5] Goldberg A C,Theodore Fischer,Derzko Z I.Application of dual-band infrared focal plane arrays to tactical and strategic military problems[A].Proceedings of SPIE[C].2003,4820.500-514.

[6] Barbara Conboy[EB/OL].http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS.2003.

[7] Space Telescope Science Institute.NICMOS[EB/OL].http://www.stsci.edu/instruments/nicmos.2004.

[8] Spitzer Science Center[EB/OL].Spitzer Space Telescope. http://sirtf.caltech.edu.2004.