

空间目标探测与识别的波段选择

李雅男 孙晓兵 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 介绍了根据目标的反射率实验测量和大气光谱特征对大气层外目标进行探测的波段选择方法。测量出样品及标准板的反射光强度, 计算出样品的光谱反射率, 在考虑空间目标自身的辐射强度、光谱反射率、背景大气的辐射亮度、目标-背景对比度、不同波段斜程透过率等诸多因素后进行波段选择。利用 MODTRAN 大气传输模型计算了目标亮度、背景大气的辐射亮度、对比度以及不同波段斜程透过率的典型光谱特征, 并进行光谱特征分析, 综合考虑目标的视亮度以及对比度, 结果表明 $0.76\sim 0.90\ \mu\text{m}$ 是包覆黄色镀铝聚酯薄膜的目标最佳探测波段, $0.52\sim 0.60\ \mu\text{m}$ 是包覆银色镀铝聚酯薄膜的目标最佳探测波段。

关键词 物理光学; 波段选择; 光谱反射率; 辐射传输; 目标探测

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0067

Waveband Selection for Space Target Detection and Identification

Li Yanan Sun Xiaobing Qiao Yanli

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Based on the measured spectral reflectivity and the spectral signature of atmosphere radiation, a waveband selection method is given to detect target outside atmosphere. The reflection spectra of the samples and standard board are measured, and the spectral reflectivity of the samples is obtained. In order to improve the target identification, waveband selection is proceeded after considering the target radiation, the spectral reflectivity, the background radiation, the target-background contrast, the transmittance of slanting path and so on. The typical spectral characteristics of the above considerations are calculated by the atmospheric transmission model software MODTRAN and analyzed. The results show that $0.76\sim 0.90\ \mu\text{m}$ is the optimal detection waveband for target with yellow aluminium-coated polyester thin-film, and $0.52\sim 0.60\ \mu\text{m}$ for target with silver aluminium-coated polyester thin-film.

Key words physical optics; waveband selection; spectral reflectivity; radiation transfer; target detection

1 引言

随着军用航天技术的发展, 成百上千的航天器进入太空, 在民用与军用领域发挥着重要作用。空间目标的探测与识别已经成为一个重要的研究问题。空间目标主要指卫星, 还包括其他的残骸等, 卫星由本体和两个大的太阳能电池板组成, 还装载有实现卫星功能的有效载荷, 包括天线, 光谱仪等。卫星表面的大部分都被柔性薄膜热控材料等包裹^[1]。由于空间目标相机的探测任务属于点目标探测, 它的几何形状已不可辨认, 所以必须利用其他特征, 如

亮度、对比度。空间目标的亮度是由太阳光的照射而产生的, 影响空间目标亮度的因素很多, 如目标的形状、大小、表面反射率以及它与太阳和观测站之间的相对位置等, 此外, 空间目标的探测通常会受大气的影 响。因此, 对目标的探测在很大程度上取决于几个因素: 目标自身和周围背景的辐射特征以及它们之间的对比度^[2~4]。迄今为止, 人们对大气内目标探测已进行了深入研究^[5~7], 目标探测波段选择的基本思想是使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

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-09-12

基金项目: 国家 863 计划(2002AA731041)资助课题。

作者简介: 李雅男(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感信息量化方面的研究。E-mail: yananli@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 乔延利(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感信息检测方面的研究。E-mail: yljiao@aiofm.ac.cn

能小,从而提高信噪比,最终达到对目标进行探测的目的,对大气外目标探测也是如此。因此研究空间目标材料的细分光谱特性,对空间目标探测与识别的波段选择具有十分重要的作用。

本文测量了空间目标几种常用的材料铝板、太阳能电池板、热控材料(银色镀铝聚酯薄膜、黄色镀铝聚酯薄膜)的反射率细分光谱特性,并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下的目标自身辐射、整层大气背景辐射和斜程大气透过率^[8,9]。比较选择出用于空间目标探测的最佳波段。

2 原 理

2.1 空间目标材料反射率细分光谱测量原理

空间目标常用的材料有铝板、银色镀铝聚酯薄膜、黄色镀铝聚酯薄膜、太阳能电池板。

空间目标细分光谱特性是空间目标探测、识别的基础。在测量卫星相关材料细分光谱特性时,可以采用比较测量法,即以同样测量条件分别同步获取卫星相关材料和标准漫反射参考板的光谱辐亮度数据,由于两次测量的时间间隔通常为十几秒,因此,测量时常将由周围环境变化引起的测量条件不一致性忽略,认为实际目标与标准板的测量值之比即为光谱反射率之比。计算式为

$$\rho(\lambda) = \rho_s(\lambda) \frac{V(\lambda)}{V_s(\lambda)}, \quad (1)$$

其中 $\rho(\lambda)$ 为被测物体的反射率, $\rho_s(\lambda)$ 为标准板的反射率, $V(\lambda)$ 和 $V_s(\lambda)$ 分别为测量物体和标准板的仪器测量值。

2.2 空间目标与背景的对比度

空间目标探测可采用地基和天基两种观测方式。目前,空间目标监视主要是基于地基观测方式实现,目标辐射在到达地面之前,辐射通量通常会受到大气的影响。目标与背景的辐射信号经大气传输到达探测器,辐射信号在传输过程中受到大气衰减;同时大气或太阳的辐射又会构成一定的背景辐射。当背景散射辐射很强时,使目标信号完全被背景辐射所淹没而无法被探测到。天基光电光学探测空间目标不能在太阳的视圆面上及其附近区域,也不能在地影中,由于地球大气等的作用,地球反射太阳光也较强,当空间目标出现在地球视圆面及其附近区域时,背景要比地基光电探测强的多,另外空间目标不能在地球背影中,也不能出现在月亮视圆面上^[10]。只讨论地基光电探测,空间目标的天基光电

探测将在以后做进一步探讨。

对空间目标的探测,只有当空间目标与背景的对比度有差异时才能分辨出物体来。视亮度对比 C^* 定义为^[2]

$$C^* = (I_T - I_B) / I_B, \quad (2)$$

其中 I_T 和 I_B 分别表示目标物和背景的视亮度。

假定采用地基观测方式,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 $\tau=\tau_0$ 。目标相对与观察者的天顶角和方位角分别为 θ_1, φ_1 , 观察者的太阳天顶角和方位角分布为 θ_2, φ_2 。

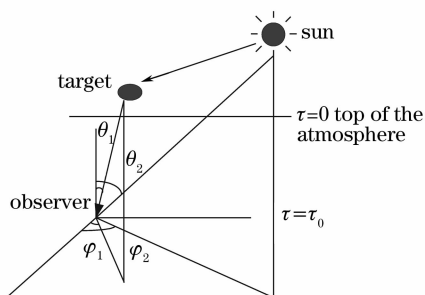


图1 辐射传输几何关系

Fig. 1 Geometry of radiation transfer

辐射传输方程的一般形式为^[11]

$$\mu \frac{dI}{d\tau} = I - J, \quad (3)$$

其中 $\mu = \cos \theta$, θ 为相对于向上垂线的倾角, τ 为大气上界向下测量的光学厚度, I 为辐射亮度; J 为源函数。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(3)式可得^[12,13]

$$\begin{aligned} I_T &= I_0 \exp[-(\tau_0/\mu)] + \int J \exp\{-[(\tau_0 - \tau')/\mu]\} \frac{d\tau'}{\mu}, \\ I_B &= \int J \exp\{-[-(\tau_0 - \tau')/\mu]\} \frac{d\tau'}{\mu} = I^\downarrow(\tau_0), \end{aligned} \quad (4)$$

把(4)式代入(2)式中可得

$$\begin{aligned} C^* &= \frac{I_T - I_B}{I_B} = \frac{I_0}{I^\downarrow(\tau_0)} \exp[-(\tau_0/\mu)] = \\ &= \frac{I_0}{I^\downarrow(\tau_0)} T, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 T 为斜程大气透过率, I_0 为目标固有亮度, $I^\downarrow(\tau_0)$ 为背景天空亮度。由(5)式可以看出,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。

3 实验过程

野外测量实验共测量了铝板、银色聚酯薄膜、黄

色聚酯薄膜、太阳能电池板 4 个样品,实验采用仪思特光电技术有限公司的 ISI921VF 野外地物光谱辐射计,该仪器主要用于户外目标可见-近红外波段的高光谱辐射测量,利用太阳辐射作为照明光源,可测量地物目标的光谱辐亮度;利用漫反射参考板对比测量,可获得目标的反射率光谱信息;ISI921VF-256 的光谱范围为 380~1080 nm,光谱分辨率为 4 nm。等效噪声幅亮度为 $1 \times 10^{-9} [W/(cm^2 \cdot nm \cdot sr)]$ 。实验场景和实验样品如图 2 和图 3 所示。



图 2 卫星相关材料细分光谱特性测量场景及实验材料样品

Fig. 2 Experiment of the satellite sample

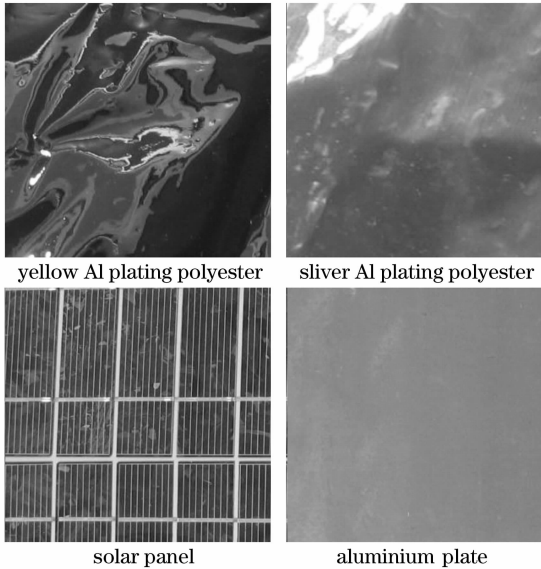


图 3 卫星相关材料及实验样品实物图

Fig. 3 Satellite sample

4 计算分析及波段选择

实验测出四种样品的光谱反射率曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,不同材料在不同波段的反射率差别比较大,太阳能电池板呈蓝色,在 425 nm 处反射率达到最大值 16.35%,在其他波段反射率约为 10%。铝板则在整个波段都比较平滑,在波长为 388 nm 处,其反射率为 26.55%,之后,随着波长的增加,反射率呈现下降的趋势,在波长为 832 nm

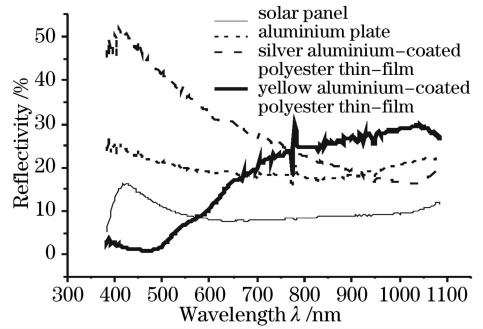


图 4 卫星相关材料光谱反射率曲线

Fig. 4 Spectral reflectance of satellite samples

处的反射率较小,其值为 16.91%,随后,波长增加,光谱反射率又逐渐增加,在波长为 1080 nm 时的反射率达到 22.97%。银色镀铝聚酯薄膜在可见光波段反射率很高,在 410 nm 时的反射率达到最大值 52.12%,随波长的增加反射率减小,至波长为 1042 nm 时,反射率仅为 16.16%。而黄色镀铝聚酯薄膜的反射特性则与银色镀铝聚酯薄膜的反射特性相反,在波长为 466 nm 处的反射率取得最小值,仅为 0.97%;在波长为 1042 nm 时的反射率达到最大值 29.74%;在 466~1042 nm 之间,随着波长的增加,黄色镀铝聚酯薄膜光谱反射率呈现逐渐上升的趋势。

空间目标往往是几种材料组合而成,对于地基观测来说,地面观测到的一般是空间目标的热控涂层,将对黄色镀铝聚酯薄膜和银色镀铝聚酯薄膜这两种涂层进行具体分析,从图 4 和分析可以看出黄色镀铝聚酯薄膜的反射率整体上随波长增加而增大,而银色镀铝聚酯薄膜的变化趋势则相反。根据这两种材料的不同光谱反射率特征,利用辐射传输计算软件 MODTRAN 计算目标背景亮度、不同波段斜程透过率的典型光谱特征,并进行光谱特征分析。

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。海拔为零,设目标位于东经 119°,北纬 44°,800 km 高度,测量时间为 2008 年 6 月 30 日,北京时间 06:00,此时,太阳天顶角为 74.2°,方位角为 107.2°;观测位置是东经 116°,北纬 40°,此时观测站处的太阳天顶角为 77.6°,方位角为 110°,其相对于目标的天顶角为 35.2°,选择波段为 0.38~1.08 μm。

图 5 是根据 MODTRAN 计算出来的这几种材料的固有亮度,根据材料的光谱特性以及大气的散射特性等,选择 0.45~0.52 μm, 0.52~0.60 μm,

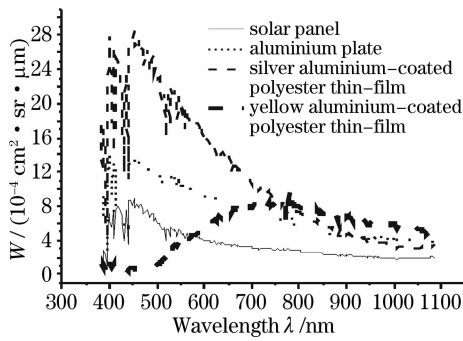


图 5 目标的固有亮度

Fig. 5 Target radiance

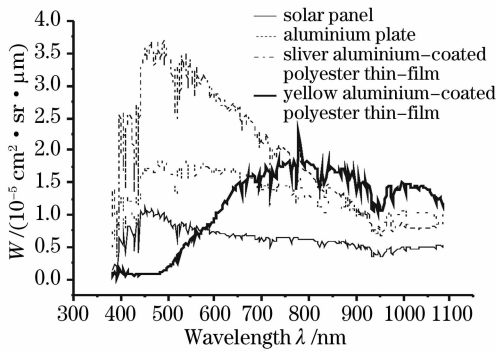


图 6 经大气传输后接收到目标的视亮度

Fig. 6 Radiance received after transmission

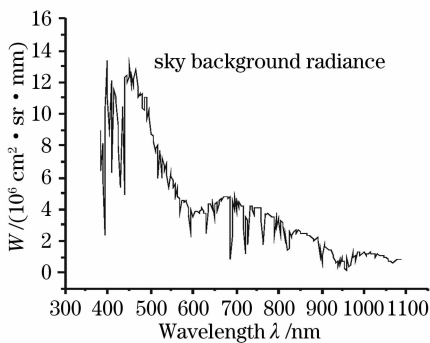


图 7 天空背景辐射

Fig. 7 Sky background radiance

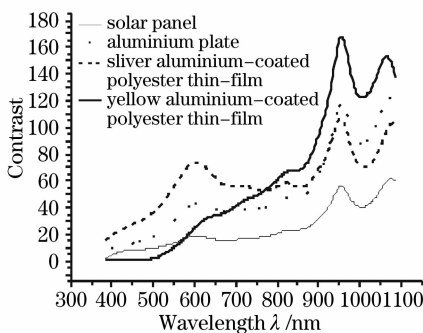


图 8 几种材料的对比度

Fig. 8 Target-background contrast

0.63~0.69 μm , 0.76~0.90 μm 这几个波段来对这几种材料的亮度特征、对比度等进行分析比较。图 6 是经过大气传输探测器所能接收到这几种材料的亮度,图 7 是天空背景辐射,可以看出在大气顶和地面观测到的材料亮度有很大不同。这是因为太阳作为 5777 K 的黑体,辐射出来的光谱峰值在 0.65 μm 附近。而天空背景主要以散射光为主,由于大气中的粒子大小与光波波长在一个数量级内,天空散射光的强度与波长的四次方成反比。蓝色与紫色的短波散射明显大于红光的长波散射。在 0.45~0.52 μm , 0.52~0.60 μm , 0.63~0.69 μm 波段太阳光谱能量大,所以图 5 中目标的固有亮度在这三个波段大,但是大气散射在这几个波段也很强,天空背景亮度大,而在 0.76~0.90 μm 目标亮度相对要小,但是大气散射在这个波段的散射较弱,天空背景亮度很小。所以经过大气传输后目标的亮度在 0.45~0.52 μm , 0.52~0.60 μm , 0.63~0.69 μm 波段比 0.76~0.90 μm 波段衰减的厉害。

图 8 是计算所得的对比度。从图 7 和图 8 可以看出,对比度高的地方主要集中在 0.6 μm 和 0.9 μm ,而这些波段在天空背景辐射中是处于低值区域,这主要是由于大气中氧、臭氧、水汽等气体的吸收作用,一般遥感探测器选择探测波段都会避开这几个吸收带,选择大气窗口进行探测。表 1 中总结了将要具体分析黄色镀铝聚酯薄膜和银色镀铝聚酯薄膜接收到的平均视亮度与对比度。随波长的增加,银色镀铝聚酯薄膜视亮度下降,对比度在 0.52~0.60 μm 之间有个峰值,黄色镀铝聚酯薄膜视亮度上升,对比度上升。

为了探测目标,需要选择恰当的波段使目标信号较强、对比度大,同时也要兼顾大气窗口,以包含较强的光谱信号。有的时候需要采用多波段探测,将各个不同波段的信息共同融合在一起,可以增加空间目标识别的特征,提高对空间目标探测与识别的能力。经过对这几种材料的亮度特征以及对比度分析,对于包覆黄色镀铝薄膜的空间目标或碎片,在 0.76~0.90 μm 视亮度最大,对比度最大,因此选用 0.76~0.90 μm 是最合适的波段,对于包覆银色镀铝薄膜的空间目标或碎片,对比度最大值在 0.52~0.60 μm ,而视亮度最大值在 0.45~0.52 μm ,考虑到视亮度相差不到 8%,而对比度相差达 40%,综合考虑视亮度与对比度,采用 0.52~0.60 μm 是最佳波段。另外可以采用多波段探测提高其识别能力。

表 1 两种热控材料在四个波段的视亮度与对比度平均值

Table 1 Average value of these target radiance and target-background contrast in four bands

Sample	Radiance and contrast	Radiance and contrast	Radiance and contrast	Radiance and contrast
	at 0.45~0.52 μm	at 0.52~0.60 μm	at 0.63~0.69 μm	at 0.76~0.90 μm
Silver aluminium-coated polyester thin-film	$3.39 \times 10^{-5} / 35.2$	$3.13 \times 10^{-5} / 61.4$	$2.50 \times 10^{-5} / 60.1$	$1.38 \times 10^{-5} / 58.2$
Yellow aluminium-coated polyester thin-film	$5.69 \times 10^{-6} / 2.18$	$1.16 \times 10^{-5} / 14.7$	$1.38 \times 10^{-5} / 35.6$	$1.66 \times 10^{-5} / 70.8$

视亮度的单位为 $w / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

5 结 论

在野外测量了卫星常用几种材料的光谱反射率,计算了空间目标的固有亮度与视亮度,并结合太阳光谱能量特点以及大气散射对不同波长的影响,分析了探测不同类型材料的最佳波段。根据材料在不同波段的反射率与对比度特征,选用合适的波段探测空间目标,这对空间目标的探测与识别有重要的作用。该方法对其他时间也适用,但由于白天探测空间目标时,背景非常强,目标相对背景是弱信号,除了考虑目标亮度与对比度之外,还需要研究从强噪声中提取弱信号的观测方法和数据处理技术,这个工作需要更深入的研究。

参 考 文 献

- Xu Fuxiang. Satellite Engineering[M]. Beijing: Chinese Space Navigation Press, 2003. 183~185
徐福祥. 卫星工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003. 183~185
- Shen Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. Atmosphere Physics [M]. Beijing: Peking university Press, 2003. 449~453
盛裴轩, 毛节泰, 李建国 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 449~453
- Meng Fansheng, Xu Feng, Xiong Rensheng. Application and research of multi-waveband measuring technology in space object detection[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**: 96~98
孟凡胜, 许峰, 熊仁生. 多波段测量技术在空间目标探测中的应用研究[J]. *光学技术*, 2005, **31**: 96~98
- Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinghua *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901
吴振森, 谢东辉, 谢品华 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 897~901
- Jörgen Karlholm, Ingmar Renhorn. Wavelength band selection

- method for multispectral target detection[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(32): 6786~6795
- Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178~1182
张己化, 姚东升, 谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1178~1182
- Wang Hongyuan, Zhan Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on *N*th cosine scattering distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 593~598
汪洪源, 张伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 593~598
- Li Daoyong, Wang Yunqiang, Gong Yanjun *et al.*. Research on light scattering from spatial objects[J]. *J. Yantai University Natural Science and Engineering Edition*, 2004, **17**(3): 183~187
李道勇, 王云强, 宫彦军 等. 空间目标的光散射特性研究[J]. *烟台大学学报*, 2004, **17**(3): 183~187
- Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外散射[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- San Siwu, Xu Younan, Liu Xianhua *et al.*. Space-based optoelectronic visibility and prediction of space objects [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2006, **3**(3): 271~274
桑思武, 许尤楠, 刘艳华 等. 空间碎片地基光电光学可见条件与预报[J]. *天文研究与技术*, 2006, **3**(3): 271~274
- Liao Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Beijing: Meteorologic Press, 2004. 27~35
廖国男. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004. 27~35
- Wang Yi, Rao Ruizhong. Slant visibility; multi-factor analysis [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(10): 945~950
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
- Chen Xinjin, Yuan Yan, Li Liying. Analysis of energy for target detection[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, **7**(7): 1422~1424
陈新锦, 袁艳, 李立英. 目标探测的能量计算[J]. *科学技术与工程*, 2007, **7**(7): 1422~1424