

文章编号: 1672-8785(2013)07-0001-04

临近空间目标飞行器地基探测技术研究

梁国龙 何 昕 魏仲慧 王方雨

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘 要: 临近空间领域的探测对未来战争将发挥无法估量的作用。提出了利用地面光学无源探测设备对临近空间的目标飞行器进行探测的设计方案。文中对临近空间目标的光谱特性做了细致分析, 给出了系统应用多谱段进行探测的必要性。给出了探测系统的硬件架构。从光学系统的焦距和对比度两个方面详细分析了系统的设计指标。假设目标的直径为 20 m, 太阳高角为 15° , 当光学系统的焦距大于 280 mm 时, 目标与背景之间的对比度为 0.33。从理论上证明该系统方案是有效可行的。

关键词: 临近空间; 多谱段; 光学探测; 焦距; 对比度

中图分类号: TN74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.07.01

Study of Ground-based Detection Technology of Target Aerocrafts in Near Space

LIANG Guo-long, HE Xin, WEI Zhong-hui, WANG Fang-yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Detecting the targets in near space will play a very important role in the future wars. A design scheme for detecting the target vehicles in near space by using a ground-based passive optical detection system is proposed. The spectral characteristics of the target vehicles in near space are analyzed in detail. The necessity of using multispectral means to detect the target vehicles is indicated for the system. The structure of the detection system is given. The design specifications of the detection system are analyzed in both the focal length of the optical system and the contrast. It is assumed that the diameter of a target is 20 m and the sun angle is 15° . When the optical system has its focal length of 280 mm, the contrast between the target and the background is 0.33. It shows theoretically that this system scheme is effective and feasible.

Key words: near space; multispectral; optical detection; focal length; contrast

0 引言

临近空间^[1]是指以航空器可控飞行的最低高度和最高高度作为临界边的区域。这个区域通常指距地面 20 ~ 100 km^[2]的范围, 又常被称作空天过渡区。

临近空间的目标飞行器指遵从一定原理在

临近空间区域执行特殊任务的设备。这个区域受周围环境的影响很小, 而且由于高于航空区域, 受到地面打击的几率较航空器要小许多。这个区域离地球比卫星更近, 可提供更多更精确的信息。在军事上临近空间的应用前景非常广阔, 对未来世界的作战体系将产生重大的影响。

收稿日期: 2013-05-15

作者简介: 梁国龙 (1984-), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为数据通信及视频图像处理。

E-mail: lianggl1984@sina.com

目前世界各军事强国都把目光放在了临近空间区域,投入了大量的资金进行临近空间飞行器研究以及基于各种平台探索临近空间目标的研究。随着科技的飞速发展,国家的安全边境不再是国土和海岸边界,还有空中和空间的边界。以美国为首的军事强国已研制出多种用途的近空间飞行器,并在这些飞行器上配备了频谱监测仪和通信接收机等电磁监测载荷,用以获取想要的信息情报。这使得中国等很多国家的军事目标长期被监视。这种信息获取的非对称性给我国及其他国家带来了严重威胁。因此,研究探测临近空间目标的相关技术迫在眉睫。

1 临近空间目标飞行器的光谱特性分析

飞艇和悬浮空气球之类的临近空间飞行器的主要特点是在近空间区域驻留的时间长、能耗相对较低和自身辐射很少。飞行器对太阳光的反射^[3,4]是地面光谱辐射的主要来源,因此飞行器的光谱特性和太阳光谱基本相同^[5]。图1是临近空间的目标从不同角度反射太阳光和地面探测设备对其进行接收的示意图。

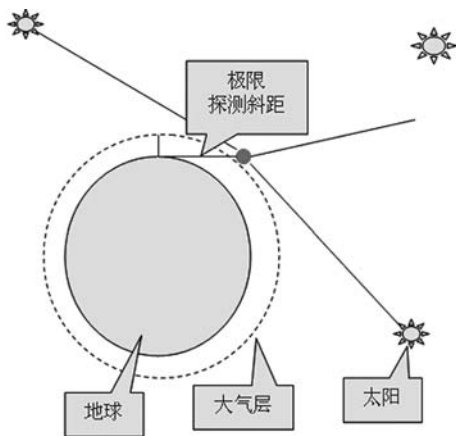


图1 临近空间的目标地基探测示意图

基于地面的光学设备探测近空间目标飞行器时,飞行器所反射的太阳光通过大气层传送到地面,因此目标飞行器在地面的光谱特性分布和太阳光的地面光谱分布基本相同。可以用太阳光在地面的光谱代替目标在地面的光谱。图2所示为太阳光辐射到地面的光谱的相对光

通量曲线。

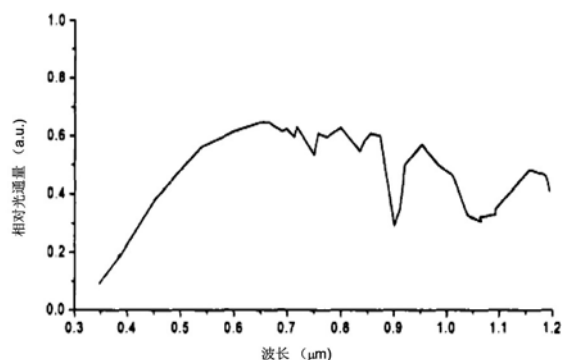


图2 透过大气传输到地面的太阳光谱的相对光通量

临近空间的目标飞行器的光谱特性与目标的形状、大小、表面发射率,它与太阳、探测系统三者之间的相对位置和大气状况等都有关。

假设太阳光谱辐照度^[6]为 $E(\lambda)$,空间目标在单位像元 ds 上接收到的太阳辐照度为

$$dF_R = \int_{\lambda} E(\lambda) \cdot ds \cdot \cos \phi d\lambda \quad (1)$$

式中, ϕ 是太阳光入射方向和像元法线方向的夹角。假设像元的漫反射系数是 $\sigma(\lambda)$,则像元发射的光通量为

$$dF_S = \int_{\lambda} \sigma(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot ds \cdot \cos \phi d\lambda \quad (2)$$

把像元作为全扩散面,其与法线方向成 θ 角方向的发光强度为

$$I = d(\phi)/\pi = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda} \sigma(\lambda) E(\lambda) \cdot ds \cdot \cos \phi d\lambda \quad (3)$$

与目标反射面的法线方向成 θ 角、距离为 r 的地面接收像元 ds' 所接收的光通量为

$$dF = I \cdot \cos(\theta) ds' / r^2 \quad (4)$$

对目标的被照射面积积分,得到目标的地面照度为

$$E = \frac{\sigma E_0}{\pi r^2} \int_s \cos(\phi) \cos(\theta) ds \quad (5)$$

这里 E_0 是太阳光到达地面的照度。将各个参数代入式(5),即可计算出目标反射太阳光时所产生的地面照度,为地面探测光学系统和电子学成像系统的选择提供依据。

2 临近空间目标飞行器的探测方案设计

2.1 多谱段探测

根据分析, 可以认为目标飞行器的光谱特性与太阳光谱相同, 涵盖了整个电磁波谱。因此可选择如可见光或者红外^[7]等多种方法进行探测。目前, 越来越多的目标飞行器采用了基于某个频段光谱屏蔽的隐身措施, 使探测处于盲区。值得注意的是, 一种飞行器一旦对一个波段实现了隐身, 就会给其它波段提供探测机会, 因为一个目标飞行器不可能对所有波段都具有隐身功能。可见光传感器成像受天气的影响很大, 有云和夜晚等时候很难工作, 但在天气晴朗的情况下其成像清晰, 对比度高, 成像质量好。红外传感器主要工作在波长为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 的近红外区域、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外区域或 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 的远红外区域。近红外区域主要对太阳的反射光和目标飞行器本身的高温辐射敏感, 中红外区域主要对目标飞行器的高温辐射敏感, 远红外区域主要对目标飞行器的低温辐射敏感。红外传感器提供景物的热辐射图像, 将不可见的热辐射转变

为人眼可见的图像。它可以工作在完全漆黑的夜晚, 具有全天时特性。

基于以上考虑, 单一波段的传感器无法胜任探测近空间目标任务。因此在地面平台上可用多谱段相机来探测临近空间目标飞行器, 以尽可能多地提取空间目标的有用信息。

2.2 系统组成

根据前面的分析, 本文提出一种临近空间地基光学探测方案。这个方案根据功能组成将系统划分为四个分系统^[8]: 机械控制分系统、成像分系统、图像传输及控制分系统和数据处理分系统。具体如图 3 所示。

机械控制分系统主要由跟踪架、伺服驱动单元、控制单元和编码器等组成, 用于系统主体支撑和姿态精确控制。成像分系统由光学单元和成像单元组成。成像单元包含紫外、可见光以及红外等覆盖多个波谱的传感器。图像传输及控制分系统主要由光纤传输单元和系统控制单元组成。数据处理分系统由图像采集处理模块和主控计算机处理平台组成, 用于后续的图像数据处理和目标识别。

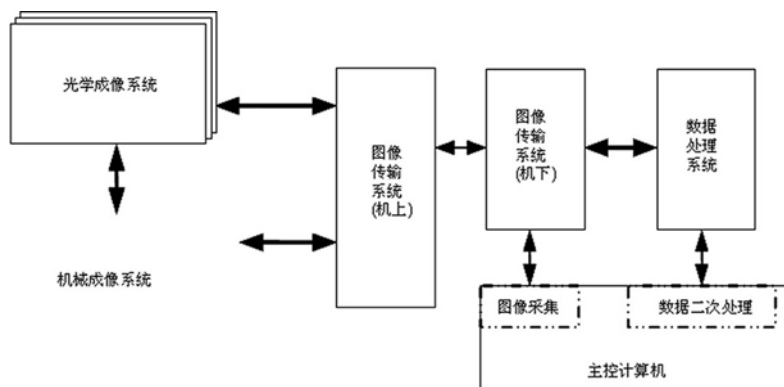


图 3 系统组成

3 方案指标分析

下面具体分析光学系统的焦距^[9]、传感器像面的对比度以确定系统的设计指标。

3.1 焦距分析

假设在近空间 100 km 处有一个目标飞行器。假设该目标飞行器的尺寸是 20 m, 为了能可靠地提取目标, 在探测器靶面上成像的目标的

最小尺寸应满足:

$$N_{min} \geq [N_{min}] \quad (6)$$

式中, N_{min} 为目标在探测器靶面上成像的最小尺寸所占用的像元数; $[N_{min}]$ 表示有效提取目标最少占的像元, 即 $[N_{min}]=4$ 。取直径 20 m, 其几何像外廓最小尺寸所覆盖的 CCD 相机靶面

的像元数 N_{min} 为

$$N_{min} = D_{min} \frac{f'_c}{R_c \cdot \Delta X_c} \quad (7)$$

式中, D_{min} 为目标的直径, $D_{min}=20$ m; f'_c 为相机光学系统的焦距; R_c 为相机作用距离; ΔX_c 为探测器靶面的像元尺寸。假设探测器像元的尺寸是 0.014 mm, $D_{min}=[D_{min}]=20$ m, $R_c = 100$ km, $\Delta X_c = 0.014$ mm, $N_{min} = 4$, 得到:

$$\begin{aligned} f'_c &= \frac{R_c \cdot \Delta X_c \cdot N_{min}}{D_{min}} \\ &= \frac{100\text{km} \times 0.014\text{mm} \times 4}{20\text{m}} = 280\text{mm} \end{aligned}$$

因此光学系统选择焦距 $f'_c \geq 280$ mm。

3.2 像面处目标和背景的对比度

依然假设目标尺寸为 20 m, 太阳高角大于或等于 15° 。

(1) 目标在像面上的照度^[9]:

$$E'_C M = \frac{1}{4} E_0 \rho \tau_1 \tau_2 \tau_3 a \cos(\theta) \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (8)$$

式中, E_0 为太阳照度, 当太阳高角等于 15° 时, $E_0 = 1.86 \times 10^4 \text{ lx}$ 。 ρ 为目标的反射系数 $\rho = 0.2$; D/f 为相机光学系统的相对孔径, D 是光学系统的直径, f 是光学系统的焦距; τ_1 为系统的光学透过率 $\tau_1 = 0.5$; τ_2 是大气透过率; τ_3 是相机对目标的滤光系数 $\tau_3 = 0.6$; θ 是观测方向和太阳的夹角取 $=45^\circ$; a 是弥散系数, 它与光学系统的成像质量、大气抖动等有关, 取 $a = 0.5$ 。取相机光学系统的相对孔径 $D/f=1/2$, 目标距离为 100 km, 太阳高角为 15° , 取 $\tau_2 = 0.2$ 。根据公式可得出 $E'_C M = 4.93 \text{ lx}$ 。

(2) 背景在像面上的照度:

$$E'_{CB} = \frac{\pi}{4} B_b \cdot (D/f)^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 \quad (9)$$

式中, B_b 是背景的亮度, 取 $B_b=0.05 \times 10^4 \text{ cd/m}^2$; τ_1 是相机光学系统的相对孔径, $D/f=1/2$; τ_1 是系统的光学透过率 $\tau_1 = 0.5$; τ_3 是相机对背景的滤光系数 $\tau_3=0.2$ 。由此可计算出背景在像面上的照度:

$$E'_{CB} = 9.81 \text{ lx}$$

目标与背景之间的对比度为

$$C_M = \frac{E'_{CM} - E'_{CB}}{E'_{CM} + E'_{CB}} \quad (10)$$

根据式 (10) 得 $C_M = 0.33$ 。当像面目标与背景的对比度大于 5% 时, CCD 探测器即能稳定地提取目标。

4 结论

临近空间无国界限制, 世界各强国都在加紧临近空间的研究, 以争取近空间的主导权。目前少数强国已经研制出如飞艇、气球和无人机等临近空间侦查设备, 使得包括中国在内的多数国家都处于被监视状态。文中提出了一套近空间目标的地面光学探测方案, 设计了包括可见光和红外等多个谱段的传感器。对系统的设计指标进行了演算推理。当目标直径为 20 m、太阳高角为 15° 和光学系统焦距大于 280 mm 时, 目标与背景之间的对比度为 0.33 , 大于一般像面目标与背景对比度的 5% , 证明该系统方案是有效可行的。如果这套系统能够立项生产, 在军事领域将产生重要作用。

参考文献

- [1] 施发树. 中国需要自己的亚轨道载人飞船吗 (上) [J]. 中国航天, 2004, 9: 15-23.
- [2] 李怡勇, 沈怀荣. 临近空间飞行器发展与应用分析 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2): 52-55.
- [3] 高思峰. 飞行器红外特征分析与红外热成像系统作用距离的预估算方法 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [4] 李奇, 林衍庆. 新型红外探测技术的研究 [J]. 自动驾驶仪与红外技术, 2003, 13(3): 2-8.
- [5] Zhensen Wu, Anan Liu. Scattering of Solar and Atmospheric Background Radiation from a Target [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(6): 907-917.
- [6] 刘建斌, 吴健. 空间目标的光散射研究 [J]. 宇航学报, 2006, 17(4): 802-805.
- [7] 姜景山, 王文魁, 都亭. 空间科学与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量 [M]. 北京: 装备指挥技术学院出版社, 2001.
- [9] 刘晨. 应用光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.