

·光电系统与amp;设计·

## 戈壁地区天空背景光谱研究

谭碧涛, 李艳娜, 刘玮峰, 尹 飞, 景春元

(新疆乌鲁木齐 21 信箱 189 分箱, 新疆 乌鲁木齐 841700)

**摘要:**利用天空背景测量设备测量了西北戈壁地区的天空背景光谱亮度,对该地区典型时刻的背景光谱分布进行了研究;针对相应背景光谱下的滤波技术对光电系统探测能力的提高进行了仿真研究.研究结果表明:该地区的背景光谱分布相对于理论分布来说,600~900 nm 光谱波段背景亮度所占的比重较大,且随着方位角、天顶角的变化光谱分布变化不大;在天空背景为  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{Sr}^{-1}$  条件下,在该地区采用 600~900 nm 滤波方式光电系统的探测能力只得到约 0.1 等星提高.

**关键词:**天空背景;测量;光电;光谱;仿真

**中图分类号:** P422

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)04-0001-04

## Research on Sky Background Spectrum in Desert Region

TAN Bi-tao, LI Yan-na, LIU Wei-feng, YIN Fei, JING Chun-yuan

(P. O. Box 21, 189 Branch, Urumchi 841700, China)

**Abstract:** The sky background brightness has been measured with sky background brightness measurement equipment in desert region of northwest china, the spectrum distributing of background brightness of the region is researched, and the detecting ability of the Electro-Optical system is also researched and simulated through the filtering technology in the region under the spectrum distributing. The research results indicate that the background spectrum distributing is obvious different to the theory spectrum, the proportion of the 600~900 nm band is bigger relative to theory, and it varies slowly with the variety of azimuth angle and zenith angle. The detecting ability can only improve 0.1 magnitude through filtering technology when the background brightness is  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{Sr}^{-1}$ .

**Key words:** sky background; measurement; electro-optical; spectrum; simulation

随着航空、航天、红外成像、制导以及对空观测的广泛应用和技术的快速发展,光电系统对空间目标捕获、跟踪的精度要求越来越高,而在大气背景中探测目标的光学特性时,系统除接收到目标自身的辐射外,还接收到天空背景辐射,使得捕获、跟踪目标过程中受到很大的干扰,从而降低了系统的捕获、跟踪精度以及探测能力.白天天空的背景亮度随天顶距、时间以及与太阳的夹角而变化,大气光学提供的资料表明,晴朗天空的亮度变化为 1 熙提.

多数文献在对空间目标白天探测技术进行研究

时,只针对理论太阳光谱特性和背景光谱特性进行分析,得出采用光谱滤波技术可以提高光电系统的探测信噪比<sup>[1-4]</sup>,从而提高系统的探测能力.但是对于利用国内西北戈壁地区天空背景亮度光谱分布特征及其相应光谱下的滤波技术进行提高光电系统的探测能力的研究还未见报道,该课题使用天空背景亮度测量设备,在西北戈壁地区进行了多次的全天空背景光谱亮度测量.以晴朗天气为例,对一天中上午、中午、下午 3 个不同时刻的天空背景光谱分布进行了研究,对该地区的天空背景光谱分布特征有

收稿日期:2010-05-18

基金项目:国家 863 计划项目资助课题(2008AA8060018)

作者简介:谭碧涛(1983-),男,江西丰城人,硕士,工程师,主要从事光电跟踪测量技术研究.

了初步的认识.同时,结合某光电系统对该地区采用600~900 nm、700~900 nm、800~900 nm三种滤波方式下对光电系统探测能力的提高进行了研究,并与理论光谱条件下的滤波方式进行了对比分析.

## 1 理论基础

### 1.1 测量系统

天空背景测量设备主要用于全天空空域范围内的连续光谱辐射亮度扫描,完成0.38~1.1 μm波段内准实时、高精度的天空散射辐射亮度参数测量,设备主要技术指标如下:

光谱范围:	0.38~0.9 μm
测量范围:	$10^{-2} \sim 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
λ分辨率:	0.1λ
不确定度:	<10%
观测视场:	1.5°

### 1.2 系统标定方法

天空背景测量设备测量天空背景亮度前在实验室内用大口径积分球对测量系统进行标定.标定方法是利用已知光谱辐射亮度的积分球光源模拟均匀的天空背景辐射照明系统的整个视场,通过改变积分球光源输出辐亮度等级来定标系统的辐射响应函数.即建立光谱辐射亮度 $L(\lambda)$ 和测量系统的数字化输出 $DN(\lambda)$ 之间的函数关系

$$DN(\lambda) = A_0 + A_1 L(\lambda) + A_2 L(\lambda)^2 + A_3 L(\lambda)^3 + \dots + A_n L(\lambda)^n \quad (1)$$

在不同亮度等级 $L_1, L_2, \dots$ ,测量系统对应的输出 $DN_1, DN_2, \dots$ .在实际拟合过程中,通常只保留式(1)当中的前两项.

利用设备测量天空背景辐射亮度的过程是与设备标定过程相反的过程:由测量设备测量得到的输出 $DN$ ,经式(1)所定标的函数,得到背景亮度.

天空背景测量设备的输出信号是经过模拟放大和A/D转换后的数码值,需要除以测量系统响应系数,才能获得天空背景辐射亮度光谱数据 $L(\lambda)$ ,在只考虑式(1)当中的线性项的情况下

$$L(\lambda) = DN(\lambda)/R(\lambda) \quad (2)$$

式(2)中, $DN(\lambda)$ 设备输出的数码值; $R(\lambda)$ 为设备的响应系数.

对光谱数据进行积分获得 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内积分亮度

$$L_{\lambda_1, \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (3)$$

式(3)中, $L_{\lambda_1, \lambda_2}$ 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的积分亮度; $d(\lambda)$ 为测量系统带宽.

### 1.3 理论光谱

空间目标体辐射在到达地球表面之前,由于大气层中的分子散射和气溶胶散射,导致透射光谱分布朝红区移动,色温也降低.天空背景辐射包括对太阳辐射的散射和大气辐射,对太阳辐射的散射和大气辐射在光谱分布上是有差别的.对太阳辐射的散射主要分布在波长小于3 μm的范围内;而大气辐射由于大气本身温度较低,其有效温度在200~300 K内,因而在小于4 μm的波长范围内的辐射量很小.天空背景辐射可以认为是上述2种辐射的叠加,在可见光和近红外波段的天空辐射可近似为太阳辐射被分子和气溶胶的散射,因此天空辐射显示出光谱分布朝蓝波漂移.太阳的色温近似为5900 K,非自发光空间目标光来自太阳,其光谱特性与太阳辐射的光谱特性近似,目标和背景光谱的光照特性见图1,不同滤波方式时的大气光和星光的理论透过率见表1<sup>[5]</sup>.

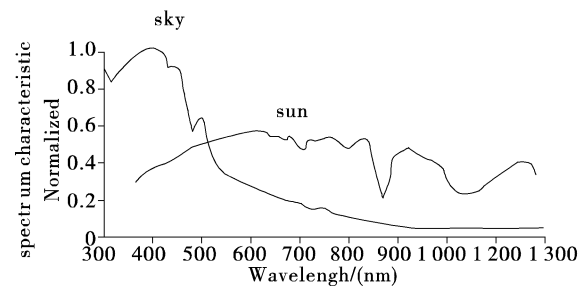


图1 目标和背景理论光谱特性

表1 不同滤波方式时大气光和星光透过率

滤光片/nm	600~900	700~900	800~900
天空光	0.22	0.15	0.04
太阳光	0.71	0.53	0.23

## 2 测量数据

在11月上旬共观测了15天,以晴朗天空为主,部分为有薄云出现的情况.为消除观测过程中太阳位置移动和偶然误差,天空背景测量设备先自地平

螺旋式扫描至天顶,然后反方向再测一遍,取对应位置的平均值作为测量值.针对典型时刻天空背景亮度光谱分布及光谱透过率进行了研究,中午时刻不同天顶角下的背景光谱亮度分布见图 2a,上午、中午、下午时刻天顶角为 45°时不同方位角下对应的天空背景亮度光谱分布见图 2b、图 2c、图 2d;典型时刻不同滤波方式下的光谱透过率见表 2.

表 2 不同的滤波方式时的透过率

滤光片/nm		600~900	700~900	800~900
天顶角	0°	0.49	0.30	0.15
	30°	0.48	0.30	0.15
	60°	0.46	0.28	0.14
	75°	0.50	0.30	0.14
方位角 40°	上午	0.42	0.27	0.15
	中午	0.46	0.29	0.15
	下午	0.40	0.25	0.13
方位角 80°	上午	0.45	0.28	0.14
	中午	0.47	0.28	0.14
	下午	0.41	0.25	0.13
方位角 120°	上午	0.51	0.31	0.15
	中午	0.47	0.28	0.14
	下午	0.43	0.26	0.13
方位角 160°	上午	0.48	0.29	0.14
	中午	0.60	0.37	0.18
	下午	0.48	0.29	0.14

从图 2 可以看出,随着方位角逐步靠近太阳位置,天空背景亮度逐渐变强,且变化速度加快;中午时刻的光谱亮度最强,上午和下午时刻的光谱亮度相当,但是上午时刻不同仰角下的光谱亮度强弱层次分明.综合图 1、图 2,可以看出:西北戈壁地区的天空背景光谱分布与理论背景光谱分布有一定的区别,分布相对来说变化缓慢.从表 2 可以看出,该地区的天空背景亮度能量主要集中在光谱段 600 nm 以前,光谱段越往后背景亮度所占的比重越少,上午、中午、下午时刻的光谱能量分布基本一致,与方位角和天顶角的关系不是很大;600~900 nm 波段约占 45%,700~900 nm 波段约占 28%,800~900 nm 波段约占 14%,与表 1 中的理论光谱分布的能量所占比重区别较大,为此,理论的背景光谱对该地区不是很适用.

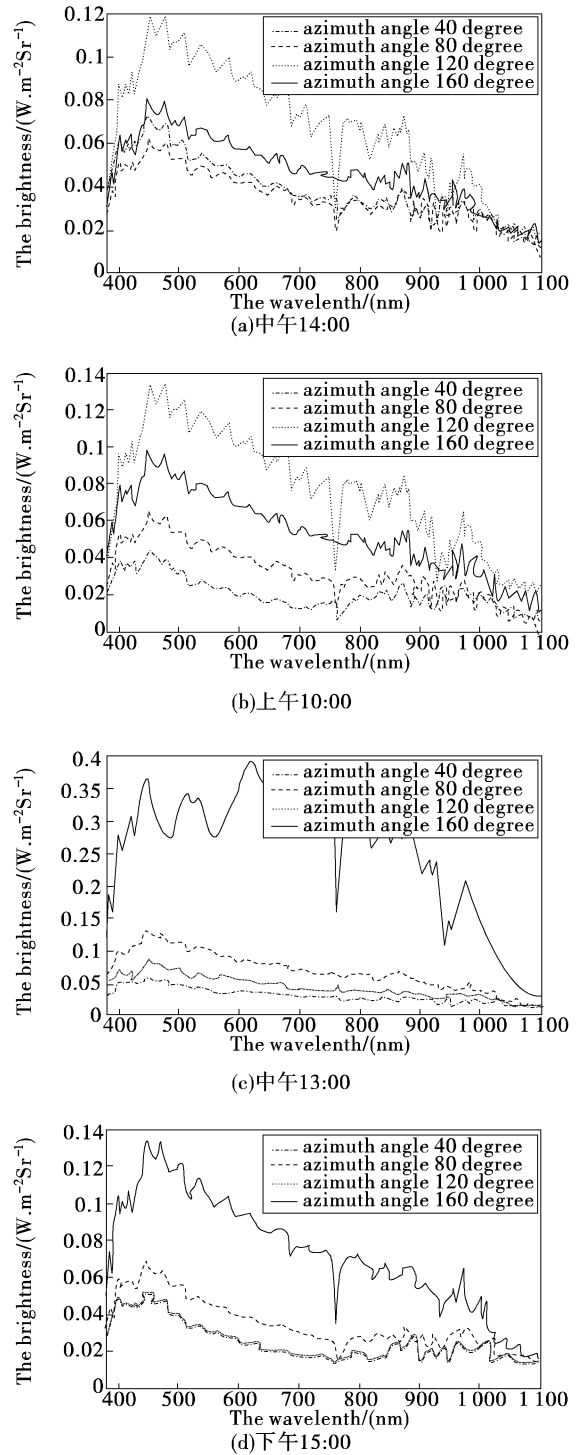


图 2 典型背景亮度光谱分布曲线

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真实验

光电系统的探测能力一般用输出信号的信噪比

来评定,信噪比定义为输出信号大小比上系统探测噪声的均方根值.考虑目标成像在 CCD 像面  $n_{pix}$  个像素上,则系统的信噪比可以表达为<sup>[6]</sup>

$$S/N = \frac{St}{\sqrt{(S + Bn_{pix} + I_d n_{pix})t + I_r^2 n_{pix}}} \quad (4)$$

式(4)中, $S$  为目标单位时间内产生的光电数; $B$  为背景单位时间内产生的光电数; $t$  为积分时间; $I_d$  为暗电流噪声单位时间内产生的光电数; $I_r$  为读出噪声单位时间内产生的光电数; $n_{pix}$  为目标成像光斑覆盖像元数.

考虑系统白天探测,则为背景噪声受限探测,其 SNR 表达式可近似表达如下

$$S/N = \frac{S\sqrt{t}}{\sqrt{Bn_{pix}}} \quad (5)$$

在工程应用上,针对已知口径( $D$ )、目标星等( $m$ )、背景亮度( $B_b$ )等参数可以简便计算  $S_0$  和  $B_0$ <sup>[7]</sup>

$$S = a \cdot q_s \cdot (\bar{\lambda}/hc) \cdot \tau \cdot f \times 3.9 \times 10^{-9} \times 2.512^{-m} \quad (6)$$

式(6)中, $\bar{\lambda}$  为平均波长; $h$  为普郎克常数  $6.63 \times 10^{-34}$ ;  $c$  为光速; $a$  为系统通光口径面积( $m^2$ ); $q_s$  为对目标光谱平均量子效率; $f_s$  为对目标信号光谱透过率系数.

$$B = \frac{\pi^2}{16} d^2 q_b (\bar{\lambda}/hc) n_{pix} B_b \cdot (1 - \epsilon^2) (D/f)^2 \cdot \tau \cdot f_b \quad (7)$$

式(7)中, $D$  为系统通光口径; $f$  为光学系统焦距; $\epsilon$  为光学系统的遮拦比; $f_b$  为对背景光谱透过率系数; $d$  为单个像元尺寸.

由于大气湍流的影响,通常目标成像都不在单个像素之内,对目标成像光斑覆盖像元数进行计算,长期曝光点光源图像的角半径为

$$\theta_{1/2} = \sqrt{(1.22\lambda/D)^2 + (1.22\lambda/r_0)^2 + \sigma_{tilt}^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{tilt}^2 = 0.184(D/r_0)^{5/3}(\lambda/D)^2 \quad (9)$$

式中, $\sigma_{tilt}^2$  为湍流引起的倾斜方差; $D$  为系统的口径; $r_0$  为大气相干长度.

则可求得目标成像光斑覆盖像元数  $n_{pix}$  为

$$n_{pix} \approx \left(\frac{2\theta_{1/2}}{\alpha}\right)^2 \quad (10)$$

式(10)中: $\alpha$  为 CCD 一个像元对应的空间立体角元 ( $rad \cdot s$ ).

工程应用上以 SNR 为 6 为稳定探测跟踪标准,取 SNR 阈值为 6,则可得到极限探测星等为

$$m \approx -21.03 - 2.51 \lg \left[ \frac{hc}{S_0 \eta \lambda t_0 \tau_0} \sqrt{B} \cdot 6 \right] \quad (11)$$

### 3.2 仿真分析

设光电系统的口径为 0.5 m,结合表 2、表 3 光谱透过率,利用式(11)进行了仿真研究,特定天空背景下的探测能力提高比对分析结果见表 3.

从表 3 的分析结果可以看出,在天空背景为  $10 W \cdot m^{-2} Sr^{-1}$  条件下,从 SNR 模式出发,采用光谱滤

表 3 特定天空背景下的极限探测能力

天空背景亮度/( $W \cdot m^{-2} Sr^{-1}$ )		159	63	25	10	4	1.6	0.6
恒星星等(理论计算)		5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
初始		4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6	7.2
理论背景光谱 (SNR 为 6)	600~900 nm	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8	7.3
	700~900 nm	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.6
	800~900 nm	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6	7.0	7.5
实测背景光谱 (SNR 为 6)	600~900 nm	3.6	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6
	700~900 nm	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6	7.2
	800~900 nm	4.2	4.7	5.2	5.7	6.2	6.7	7.2

波技术,理论光谱分布下 600~900 nm 滤波方式光电系统的探测能力得到约 0.5 等星提高;该地区 600~900 nm 滤波方式光电系统的探测能力只得到约 0.1 等星提高.虽然探测能力提高不是很大,但是探测时相机的对比度还是得到了提高,探测跟踪的稳定性可以得到提高.

## 4 结 论

通过对西北戈壁地区不同时刻下的天空背景光谱亮度分布研究,可以得出以下结论,随着方位角逐 (下转 8 页)

选择不同的通信接口,完成跟踪过程中数据的传输和设备的控制。

(6)数据存储管理:完成一次实验,跟踪控制器需要从上位机读取转镜的控制序列,保存在 ARM 存储单元.在跟踪过程中从存储单元读取数据,保存采集到的控制数据和温度数据。

## 5 结 束 语

通过对镜反射式弹丸追踪摄影技术的研究,建立了跟踪过程的弹道方程,得到了转镜的控制规律和重要参数的设置.根据系统功能要求开发的控制软件和研制的转镜跟踪控制器,能够完成对弹丸运动过程的跟踪摄影.能够获取弹丸在跟踪区域的运动过程。

采用镜反射式弹丸追踪摄影技术,不需要额外的探测手段,拍摄成本较低.解决了固定高速摄像机

拍摄运动弹丸距离短等一系列问题,能够在不牺牲弹丸的解析度的情况下增大视场角.可以跟踪拍摄炮弹、穿甲弹、火箭弹等高速飞行的弹丸。

## 参考文献

- [1] 崔彦平,林玉池.运动目标姿态与速度测量的理论及实验研究[D].天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院,2006.
- [2] 朱新宏,张永生.某武器外弹道飞行姿态测试方法探讨[J].测试技术学报,1993,12(3).
- [3] 苏增立,高晰,王建军,等.高速摄像系统及其在靶场中的应用分析[J].飞行器测控学报,2003,22(3).
- [4] 杨夏.高速图像实时存储系统研制及目标三维姿态的光测研究[D].长沙:国防科学技术大学,2002.
- [5] 于纪言,王晓鸣,李文彬.基于测量预估高速弹丸随动摄影方法研究[J].探测与控制学报,2006,28(3).
- [6] 徐明友.现代外弹道学[M].北京:兵器工业出版社,1999.

(上接第 4 页)

步靠近太阳位置,天空背景光谱亮度逐渐变强,且变化速度加快;中午时刻的光谱亮度最强,上午和下午时刻的光谱亮度相当.西北戈壁地区的天空背景光谱分布与理论背景光谱分布有一定的区别,分布相对来说变化缓慢,600~900 nm 光谱波段背景亮度所占的比重区别较大,且随着方位角、天顶角的改变分布变化较小.在天空背景为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$  条件下,从 SNR 模式出发,采用光谱滤波技术,理论光谱分布下 600~900 nm 滤波方式光电系统的探测能力可得到约 0.5 等星提高;但该地区相同滤波方式光电系统的探测能力只得到约 0.1 等星提高.下一步对该地区进行全年 12 个月内多次测量,进行全天空背景光谱亮度数据库建模技术研究,可以根据不同的应用需求进行任意时刻和任意位置的天空背景光谱亮度值输出。

## 参考文献

- [1] 万敏,苏毅,杨锐,等.提高白天观测星体信噪比的方法

研究[J].强激光与粒子束,2003,15(12):1151-1154.

- [2] Rork E W, Lin S S, Yakutjs A J. Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight. AD-A 117 413[R],1982.
- [3] He C, Zhu Q X. A study of technology for detection of nonluminous artificial satellites in daylight[R]. USA: Air Force Research Laboratory,1996.
- [4] Lelièvre M, Lévesque M P, Buteau S. Measurement of artificial-satellite spectra with a small telescope[R]. Canada:Defence R&D Canada, 2007.
- [5] 王伟国.空间目标白天光电探测技术研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2005:22-23.
- [6] Pierre Y Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer-Verlag, 2003: 25-28.
- [7] 谭碧涛,景春元,张新,等.光电系统对空间目标成像仿真技术研究[J].计算机仿真,2009(6):240-243.

欢迎网上投稿 [www.gdjsyy.com](http://www.gdjsyy.com)