

# 三通道非成像氧气吸收被动测距系统中 光电倍增管光谱特性测量

余皓<sup>1\*\*</sup>, 刘秉琦<sup>1\*</sup>, 鲁军<sup>2</sup>, 胡文刚<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 张帅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

<sup>2</sup>石家庄铁道大学电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043

**摘要** 在设计三通道非成像氧气吸收被动测距系统过程中, 确定各通道光电倍增管的绝对光谱响应率对确保系统测距精度具有重要意义。为了克服光电倍增管灵敏度高、易饱和而导致的单色光功率测量困难的问题, 提出了一种光电倍增管绝对光谱响应率测量方法。在该方法中, 利用积分球与可调狭缝构建通量可调的系统光源, 利用响应率已知的标准探测器测量单色光源辐射功率。搭建了光电倍增管绝对光谱灵敏度测量系统, 并对三根滨松 H10722-01 型光电倍增管模块进行绝对光谱响应率测量。同时, 为了检验该测量方法的有效性, 在外场条件下开展了近程被动测距实验, 将测量得到的光电倍增管绝对光谱响应率作为三通道被动测距系统各通道的光谱响应率参数。实验结果表明: 在 60~300 m 范围内, 测距平均相对误差为 6.25%。实验结果证明了该绝对光谱响应率测量方法的有效性。

**关键词** 测量; 绝对光谱响应率; 光电倍增管; 氧气 A 吸收带; 被动测距

**中图分类号** O432.1; TN219

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201845.0804002

## Spectral Characteristics Measurement of Photomultiplier Tube in Three-Channel Non-Imaging Passive Ranging System Based on Oxygen Absorption

Yu Hao<sup>1\*\*</sup>, Liu Bingqi<sup>1\*</sup>, Lu Jun<sup>2</sup>, Hu Wengang<sup>1</sup>, Li Gang<sup>1</sup>, Zhang Shuai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Optics Engineering, Shijiazhuang Campus of the Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

<sup>2</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China

**Abstract** In designing a three-channel non-imaging passive ranging system based on oxygen absorption, determining the absolute spectral sensitivity of the photomultiplier tubes is of great significance to ensure the ranging accuracy of the system. In order to overcome the difficulty of monochromatic light power measurement caused by high sensitivity and saturation of photomultiplier tube, we propose a measurement method of absolute spectral sensitivity of photomultiplier tubes. In this method, a system light source with adjustable flux is constructed using an integrating sphere and an adjustable slit, and a standard detector with known spectral sensitivity is used to measure the radiant power of the monochromatic light source. An absolute spectral sensitivity measurement system for photomultiplier tube is established, and the absolute spectral sensitivity of three H10722-01 photomultiplier tubes is measured with this method. In order to test the effectiveness of the proposed measurement method, a short-range passive ranging experiment is conducted in external field, the measured absolute spectral sensitivity of the photomultiplier tubes is used as the spectral sensitivity parameter of the passive ranging system. The experimental results show that in the range of 60-300 m, the average relative error of distance measurement is 6.25%. The experimental results prove the validity of this absolute spectral sensitivity measurement method.

**Key words** measurement; absolute spectral sensitivity; photomultiplier tube; oxygen A absorption band; passive ranging

**OCIS codes** 120.4800; 040.5250; 010.1030

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-03-14; 录用日期: 2018-03-18

基金项目: 河北省自然科学基金 (F2016506014)

\* E-mail: whelmmail@sina.com; \*\* E-mail: csujianyuoptic@163.com

# 1 引 言

在设计三通道非成像氧气吸收被动测距系统<sup>[1]</sup>过程中,光电倍增管(PMT)以其高灵敏度、宽线性动态范围和快速响应等特点成为理想的系统探测器<sup>[2-5]</sup>。由于系统各光谱通道相互独立,且对应的光谱波段不同,因此,确定各通道光电倍增管的绝对光谱响应率对保证系统测距精度具有重要意义。通常,一种型号的光电倍增管在出厂时,厂家会提供其绝对光谱响应率的参考曲线,然而由于光电阴极的制造工艺并不是绝对标准化的<sup>[6-7]</sup>,即使是同一型号的光电倍增管,其绝对光谱响应率亦不会完全相同<sup>[8-9]</sup>。因此,在使用前需对绝对光谱响应率进行测量,避免直接使用参考曲线而引入测量误差。由于光电倍增管灵敏度高,易饱和,目前研究中大多是测量其相对光谱响应率<sup>[10]</sup>,生产家在测试其绝对光谱响应率时,一般是在暗室环境下利用标准微弱单色光源进行直接测量,这种方法对测量设备有较高要求。

本文提出了一种光电倍增管绝对光谱响应率的测量方法,采用该方法对三通道非成像氧气吸收被动测距系统选用的滨松 H10722-01 型光电倍增管

模块的绝对光谱响应率进行测量。同时,通过开展近程被动测距实验,对使用厂家参考光谱响应率和绝对光谱响应率测量值所计算的测量结果进行对比,验证了该绝对光谱响应率测量方法的有效性。

# 2 三通道非成像氧气吸收被动测距系统简介

三通道非成像氧气吸收被动测距系统是一种利用大气中氧气 A 吸收带对目标近红外辐射吸收衰减来反演目标距离的被动测距系统<sup>[11-17]</sup>,其结构示意图如图 1 所示。利用 3 个透过波段分别位于氧气 A 吸收带及其左、右带肩波段内的窄带滤光片,分别获取目标相应波段的辐射强度值,并由各光谱通道的光电倍增管将光信号转换为电信号进行输出。由氧气 A 带左、右两个非吸收带肩内的目标辐射强度值  $I_1$ 、 $I_3$  插值拟合计算出非吸收基线强度值  $I_b$ ,再由吸收带内接收目标强度值  $I_2$  与非吸收基线强度值  $I_b$  的比值计算出平均氧气透过率  $\tau_{O_2} = I_2/I_b$ ,进而结合比尔吸收定律  $\tau_{O_2} = \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L]$  解算出目标距离信息  $L$ <sup>[18-21]</sup>。其中,  $\alpha(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的吸收系数;  $\lambda$  为吸收带内对应的波长。

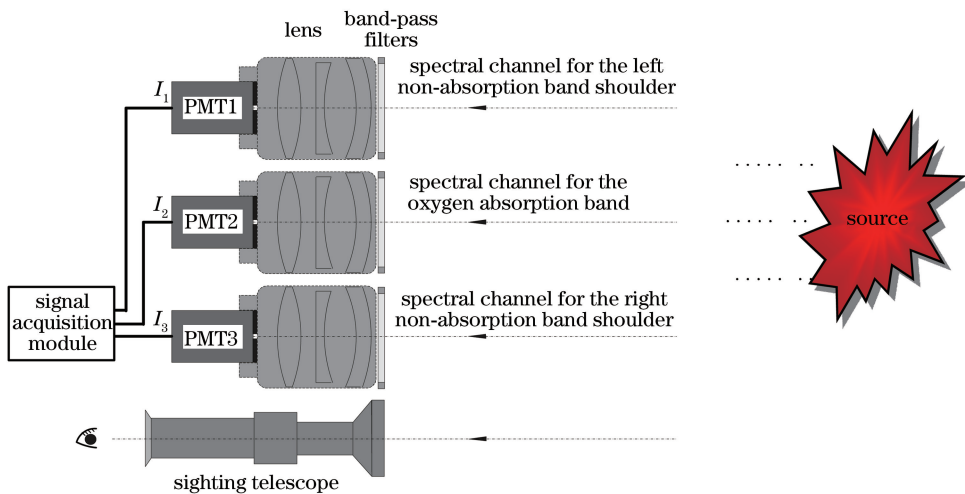


图 1 三通道非成像氧气吸收被动测距系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of the three-channel non-imaging passive ranging system based on oxygen absorption

氧气 A 吸收带及其左右带肩的波长范围为 745~785 nm, 根据响应波长范围, 选用滨松 H10722-01 型光电倍增管模块作为测距系统各通道的光电探测器。H10722-01 型光电倍增管模块的主要性能参数如表 1 所示。

# 3 测量原理

光电倍增管的绝对光谱响应是在给定波长的单

位辐射功率照射下产生的阳极电流:

$$S_{(\lambda)} = \frac{I_{(\lambda)}}{P_{(\lambda)}}, \quad (1)$$

式中:  $S_{(\lambda)}$  为光电倍增管的绝对光谱响应率, 单位为 A/W;  $I_{(\lambda)}$  为该辐射功率下产生的阳极电流;  $P_{(\lambda)}$  为照射在光阴极上的单色光辐射功率。  $S_{(\lambda)}$ 、 $I_{(\lambda)}$ 、 $P_{(\lambda)}$  均是波长  $\lambda$  的函数,  $S_{(\lambda)}$  与  $\lambda$  的关系曲线称为绝对光谱响应曲线<sup>[22]</sup>。

表 1 H10722-01 型光电倍增管模块的主要性能参数

Table 1 Main parameters of H10722-01 PMT module

Parameter	Value
Effective area diameter /mm	8
Spectral response range /nm	230-870
Peak wavelength /nm	400
Recommended supply voltage /V	500-1100
Typical gain (1000 V supply voltage)	$2.0 \times 10^6$
Maximum dark current /nA	10
Current-to-voltage conversion factor /( $V \cdot \mu A^{-1}$ )	1
Transit time /ns	2.7
Number of dynodes	10

由(1)式可知,若要测量光电倍增管在某一波长处的响应率,首先需要对照射在光电阴极上的单色光辐射功率进行定量测量。由于光电倍增管的灵敏度极高,测量时所用的光源必须十分微弱才能避免光电倍增管饱和,而过于微弱的光源则会导致单色光辐射功率难以测量。为了解决上述难题,提出一种光电倍增管绝对光谱响应率测量方法,利用积分球与可调狭缝构建辐射通量可调的光源系统,将进

行过能量响应绝对标定的 DSi200 硅光电探测器作为次级标准探测器,并设计了光电倍增管绝对光谱响应率测量系统。

## 4 光电倍增管绝对光谱响应率测量系统设计

### 4.1 光电倍增管绝对光谱响应率测量系统的组成

光电倍增管绝对光谱响应率测量系统主要包括光源系统、标准光电探测器和数据采集系统,其系统结构如图 2 所示。其中,光源系统由 75 W 溴钨灯光源、积分球、狭缝和分光谱仪构成。溴钨灯辐射出 350~2500 nm 的连续复色光,由直流稳流电源供电,以确保光通稳定。溴钨灯发出的非均匀光经积分球转换成出射度均匀的光,再经由分光谱仪前限光狭缝后进入光谱仪,光谱仪内部的光栅在计算机软件控制下根据设置的波长数据转到相应的角度位置,使光谱仪出射的光为指定的单色光。通过调整光谱仪前限光狭缝的宽度可以定量控制进入光谱仪的复色光通量,狭缝宽度在 10  $\mu m$ ~3 mm 连续可调,高度为 14 mm。

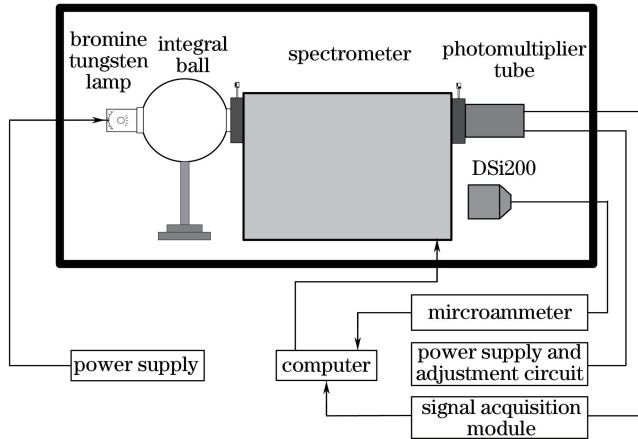


图 2 光电倍增管光谱响应率测量系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of PMT spectral sensitivity measurement system

将已进行过能量响应绝对标定的 DSi200 硅光电探测器作为标准探测器,其在 740~790 nm 范围内的光谱响应率如图 3 所示。由于 DSi200 硅光电探测器的感光面直径为 11.28 mm,为了与待测光电倍增管感光面直径保持一致,在 DSi200 感光面上贴附一个孔径为 8 mm 的镀黑薄金属环片。同时设计专用支架,确保待测光电倍增管与 DSi200 硅光电探测器固定在分光谱仪出射狭缝的同一位置。

数据采集系统为用于采集光电倍增管输出电压信号的 YAV USB 8 路 12 位数据采集卡,其测量量程为 0~5 V,测量精度为 5 mV;另外还有用于测量

DSi200 标准探测器输出信号的 SP5-DA 200  $\mu A$  数字直流微安表,其测量量程为 0~200  $\mu A$ ,测量精度为 0.2  $\mu A$ ,将测量所采集的数据传输至计算机。整个实验系统搭建在定制的暗箱中,暗箱外部使用黑色尼龙布遮挡,以便更好地隔绝外部杂散光的干扰。

### 4.2 测量方法

根据氧气 A 吸收带及其左右带肩的波长范围,将分光谱仪的波长扫描范围设置为 740~790 nm,设置光谱仪的扫描步长为 1 nm,扫描间隔时间为 60 s,调整光谱仪的出射狭缝宽度,使光谱仪的光谱分辨率为 1 nm。首先将待测光电倍增管的窗口对

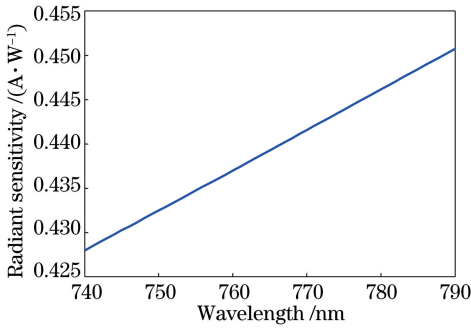


图3 DSi200型硅光电探测器的光谱响应率

Fig. 3 Spectral sensitivity of DSi200 silicon photodetector

准分光谱仪的出射狭缝,设置光电倍增管的工作电压为最低(500 V,此时对应的增益也最低,约为 $4.8 \times 10^3$ ),将分光谱仪的前限光狭缝宽度设置为 $10 \mu\text{m}$ ,并适当调整积分球入射孔内的可调光阑大小,确保光电倍增管信号强度在其线性响应范围内,进行波长扫描,记录光电倍增管的输出信号。然后将光电倍增管移出光路,将DSi200硅光电探测器移入光路,并将分光谱仪的前限光狭缝宽度调整为3 mm,再次进行波长扫描,并记录DSi200硅光电探测器的输出信号。对每个波长单色光在扫描间隔时间内的输出信号取均值,作为探测器对该单色光的输出信号。

由DSi200硅光电探测器的输出信号值及其光谱响应率可以得到光源的不同单色光辐射功率:

$$P_\lambda = \frac{I_{\text{Si},\lambda}}{R_{\text{Si},\lambda}}, \quad (2)$$

式中: $P_\lambda$ 为单色光辐射功率; $I_{\text{Si},\lambda}$ 为DSi200硅光电探测器的输出信号值; $R_{\text{Si},\lambda}$ 为DSi200硅光电探测器的光谱响应率。

根据两次测量中分光谱仪的前限光狭缝宽度比值,可近似认为测量DSi200标准探测器时光谱仪的入射光通量为测量光电倍增管的300倍,因此得到被测光电倍增管的绝对光谱响应率为

$$R_{\text{PMT},\lambda} = \frac{300V_\lambda}{P_\lambda} = \frac{300V_\lambda R_{\text{Si},\lambda}}{I_{\text{Si},\lambda}}, \quad (3)$$

式中: $R_{\text{PMT},\lambda}$ 为被测光电倍增管的绝对光谱响应率; $V_\lambda$ 为被测光电倍增管的输出电压信号值。

## 5 实验及结果分析

### 5.1 光电倍增管绝对光谱响应率测量实验

在进行光电倍增管光谱响应率测量之前,首先验证系统光源辐射通量与前限光狭缝宽度是否呈线性关系。将积分球入射孔内可调光阑孔径调整至最大,并将DSi200硅光电探测器感光面对准分光谱仪

出射狭缝。设置分光谱仪波长的扫描步长为1 nm,扫描间隔时间为5 s,光谱分辨率为1 nm。分别设置前限光狭缝宽度为1,2,3 mm进行光谱扫描,记录DSi200硅光电探测器输出信号(图4),同时将不同狭缝宽度对应的DSi200探测器输出信号作比值计算,计算结果如图5所示。从图5可以看出,探测器输出信号比值随波长变化虽有较小起伏,但系统光源辐射通量与前限光狭缝宽度仍近似为线性关系。

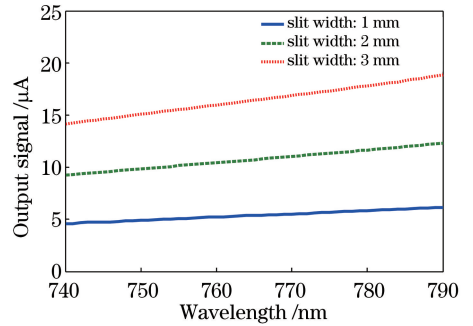


图4 不同狭缝宽度时DSi200探测器的输出信号

Fig. 4 Output signal of DSi200 detector with different slit widths

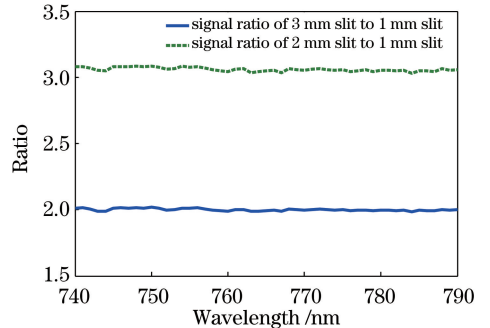


图5 DSi200探测器输出信号比值

Fig. 5 Ratio of DSi200 detector output signal

利用上述绝对光谱响应率测量方法对构建三通道非成像氧气吸收被动测距系统的三根H10722-01型光电倍增管模块进行绝对光谱响应率测量,测量得到光电倍增管和DSi200探测器的输出信号值,如图6所示。

将DSi200探测器输出电流值代入(2)式,得到单色光辐射功率 $P_\lambda$ ,再将其代入(3)式,就可得到三根被测光电倍增管在500 V工作电压下的绝对光谱响应率,如图7所示。由测量结果可以看出:在740~790 nm范围内,相同型号的三根H10722-01型光电倍增管模块的光谱响应率各不相同,且均不等于厂家提供的响应率参考曲线;2号管与厂家参考光谱响应率曲线的偏离最大,最大相对偏离量可达14.86%;2号管与1号管之间存在最大偏差,



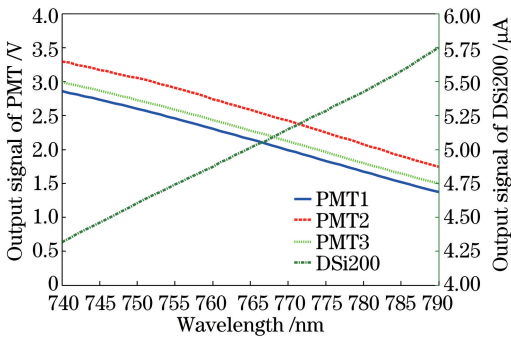


图 6 光电倍增管和 DSi200 探测器的输出信号值  
Fig. 6 Output signals of PMTs and DSi200 detector

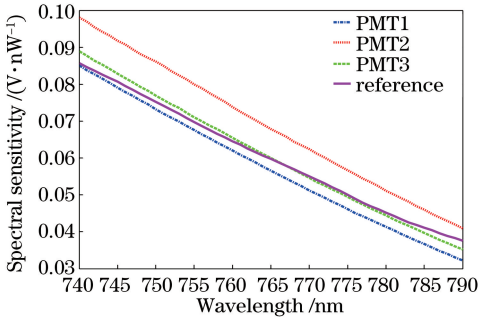


图 7 500 V 工作电压下光电倍增管绝对光谱响应率测量结果  
Fig. 7 Measurement results of the absolute spectral sensitivity of PMTs at 500 V operating voltage

表 2 各位置点的温度和压强

Table 2 Temperature and pressure of each position point

Parameter	Measurement distance /m					
	60	100	150	200	250	300
Temperature /K	274.5	274.5	277.4	277.1	278.4	278.6
Pressure /hPa	1009.3	1009.3	1019.5	1019.9	1020.7	1020.0
Lens aperture	8	5.6	4	4	2.8	1.8

由计算结果可以看出:在 60~300 m 范围内,利用测量得到的绝对光谱响应率计算得到的氧气 A 带平均透过率随距离增大而减小,并随着采样次数的变化在一定范围内波动;利用光谱响应率参考曲线计算的结果均出现了透过率大于 1 的情况,说明利用参考光谱响应率计算的结果无效。

同时,利用逐线积分模型(LBL)<sup>[11]</sup>构建氧气 A 带平均透过率与距离关系模型曲线,模型计算所需的大气温度和压强信息取各测量点处温度和压强的平均值。利用各目标位置点测量得到的氧气 A 带平均透过率插值计算出的目标距离如图 9 所示。

从图 9 可以看出,利用测量得到的各光电倍增管模块的绝对光谱响应率作为系统响应率参数,在 60,100,150,200,250,300 m 这 6 个实验点上的氧气 A 带平均透过率误差带中心均接近模型曲线,测

最大相对偏差可达 21.2%。可见,若直接使用厂家给出的参考曲线,可能会在最终测距结果中引入较大误差。

### 5.2 近程被动测距实验

为了检验该绝对光谱响应率测量方法的有效性,利用三通道非成像氧气吸收被动测距系统开展近程被动测距实验。选取一个 1000 W 的卤钨灯作为被测目标,其辐射光谱类似于 3600 K 左右的黑体辐射,光谱范围和光谱辐射强度均满足实验需要。为了降低其他杂散光的干扰,选择在中纬度地区冬季晴朗的夜晚进行实验,实验场地为一条笔直的无人马路。实验由远及近分别设置 6 个目标位置点,其与起点的距离分别为 60,100,150,200,250,300 m。设置各通道光电倍增管的工作电压为 500 V,为确保各通道探测器有效响应且不发生饱和,设置镜头光圈数随目标距离增大而减小,每个位置点分别采集 200 组数据,同时利用数字温压表测量各实验点的温度和压强,结果如表 2 所示。分别利用光谱响应率参考曲线和 4.1 节实验测量得到的绝对光谱响应率曲线作为系统各通道探测器的光谱响应率参数,利用基线拟合算法<sup>[1]</sup>计算氧气 A 吸收带平均透过率,计算结果如图 8 所示。

距相对误差在 4.33%~16.8%之间,平均相对误差为 6.25%,测量不确定度为 -49.5%~51.2%。实验结果证明了光电倍增管绝对光谱响应率测量方法的有效性。

造成如此大的测量不确定度的主要原因是探测器的接收信噪比偏低,在 60 m 和 100 m 距离上,系统接收目标辐射较强,信噪比高,测量不确定度较小;随着目标距离增大,接收信噪比减小,测量不确定度增大,尤其在 200 m 位置点上。为了避免探测器饱和而选取镜头光圈数为 4(与 150 m 处的光圈数相同),导致探测器接收目标辐射较弱,信噪比偏低,因此在 200 m 位置点处,其测量不确定度较其他位置点更大。此外,由于目标自身辐射不稳定,大气湍流和散射也会导致探测器接收目标辐射不稳定,从而增加了系统的测量不确定度。

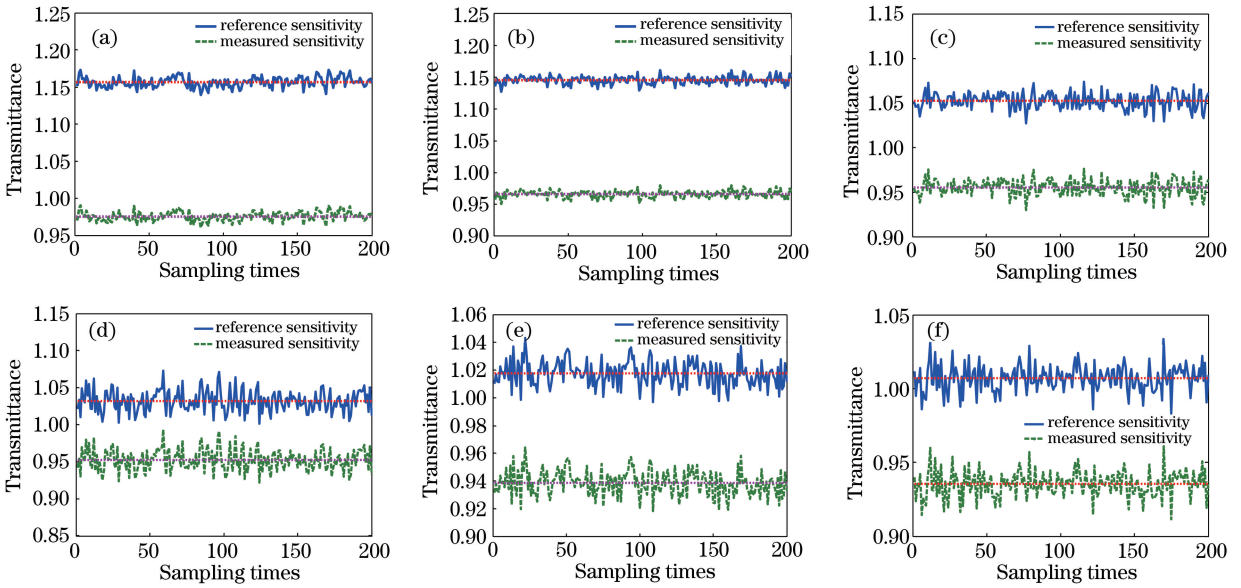


图 8 氧气 A 吸收带平均透过率的计算结果。(a) 60 m; (b) 100 m; (c) 150 m; (d) 200 m; (e) 250 m; (f) 300 m  
 Fig. 8 Calculated average transmittance of oxygen A absorption band.  
 (a) 60 m; (b) 100 m; (c) 150 m; (d) 200 m; (e) 250 m; (f) 300 m

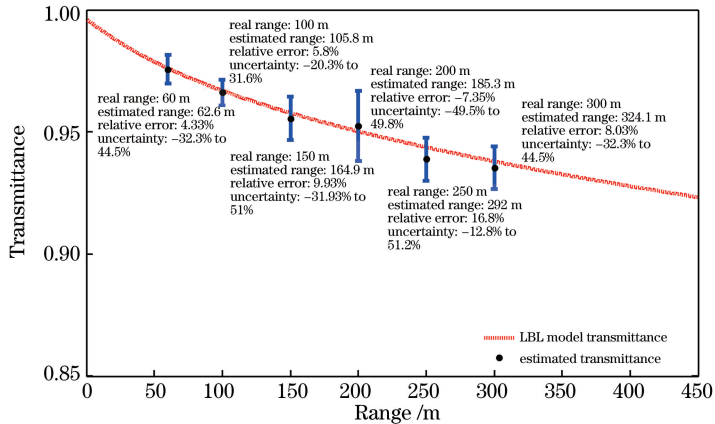


图 9 近程被动测距实验结果

Fig. 9 Experimental result of short-range passive ranging

系统测距误差的来源主要有两方面。一是模型误差。利用逐线积分模型构建的氧气 A 带平均透过率与距离关系模型是该温度和压强条件下的一种理想的大气模型,而真实的大气是开放和时刻变化的,因此模型计算的平均氧气 A 带的透过率可能与真实值存在一定偏差;另外,温度、压强的测量误差也会导致模型计算误差。二是平均氧气 A 带透过率测量误差。在测量光电倍增管绝对光谱响应率过程中,将分光仪器入射光通量与前限光狭缝近似为线性关系,以及在标准探测器感光面上贴附镀黑金属环片,均会引起光电倍增管绝对光谱响应率的测量误差,进而导致测距系统的平均氧气透过率测量误差。此外,从测距结果可以看出,除 200 m 组实

验点外,其他测距点测量结果均大于真实目标距离,说明被动测距系统可能存在系统误差。在后续研究工作中,需要对系统测距误差进行进一步分析和抑制消除。

## 6 结 论

针对三通道非成像氧气吸收被动测距系统设计过程中各通道光电倍增管光谱响应率不一致的问题,提出了一种光电倍增管绝对光谱响应率测量方法。设计光电倍增管绝对光谱响应率测量系统,并对三根滨松 H10722-01 型光电倍增管模块进行了绝对光谱响应率测量。同时,为了检验该测量方法的有效性,利用测量得到的绝对光谱响应率作为系

统探测器的光谱响应率参数,开展了近程被动测距实验。实验结果表明,在 60~300 m 范围内,测距平均相对误差为 6.25%,具有较好的测距精度,证明了该绝对光谱响应率测量方法的有效性,为研制三通道非成像氧气吸收被动测距系统奠定了基础。在后续的研究中,还需要对光电倍增管光谱特性测量误差进行进一步分析与修正,以进一步提高三通道氧气吸收被动测距系统的测距精度和测距实用性。

## 参 考 文 献

- [1] Yu H, Liu B Q, Yan Z Q, *et al.* Passive ranging using a filter-based non-imaging method based on oxygen absorption [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(28): 7803-7807.
- [2] Chen P, Zhu F R, Min Z, *et al.* The performance exploration of photomultiplier tube [J]. *Electronic Science & Technology*, 2016, 3(3): 212-216.  
陈鹏, 祝凤荣, 闵振, 等. 光电倍增管的性能研究 [J]. *电子科学技术*, 2016, 3(3): 212-216.
- [3] Tang K P, Li R H, Chen Y Q. Application of gated photomultiplier tube in signal detection of LIBS [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1115004.  
唐坤鹏, 李润华, 陈钰琦. 门控光电倍增管在激光诱导击穿光谱信号检测中的应用 [J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1115004.
- [4] Zhang N, Shen X H, Ye L, *et al.* Stray light coefficient testing and analysis by using new type photomultiplier tube module [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(8): 1203-1209.  
张宁, 沈湘衡, 叶露, 等. 应用光电倍增管模块的杂光系数测试与分析 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(8): 1203-1209.
- [5] Li Y Z, Zheng J H, Gui K, *et al.* Experimental study on fluorescence microscope with multi-channel frequency division multiplexing based on digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006007.  
李云章, 郑继红, 桂坤, 等. 基于数字微镜器件多路频分复用荧光显微镜的实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1006007.
- [6] Liu J H, Liu J Y, Guan X Y. Measurement of linearity and time response parameters for photomultiplier tube [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2005, 25(6): 768-771.  
刘君红, 刘俊勇, 管兴胤. 光电倍增管线性特性、时间特性参数调试 [J]. *核电子学与探测技术*, 2005, 25(6): 768-771.
- [7] Ge M M. PMT array research for the wide field of view Cherenkov/fluorescence telescope array of the LHAASO [D]. Kunming: Yunnan University, 2016.  
葛茂茂. 大型高海拔宇宙线观测站广角契伦科夫/荧光望远镜光电倍增管阵列研制 [D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [8] Zao X K. Study on performance of large dynamic range photomultiplier tube for LHAASO [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
赵晓坤. LHAASO 实验中动态范围光电倍增管性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [9] Cao C F. The calibration of pointing direction and gain consistency of photomultiplier tubes for CRTNT prototypes [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.  
曹成芳. CRTNT 样机指向标定和光电倍增管增益一致性标定 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [10] Chen S, Zhang S P, Wu J, *et al.* Experiment design for spectral characteristics of photomultiplier tube [J]. *Physical Experiment of College*, 2013, 26(1): 27-29.  
陈森, 张师平, 吴疆, 等. 光电倍增管光谱特性实验设计 [J]. *大学物理实验*, 2013, 26(1): 27-29.
- [11] Yu H, Liu B Q, Zhang Y, *et al.* Multi-spectral non-imaging measurement for average transmission of oxygen A absorption band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0401003.  
余皓, 刘秉琦, 张瑜, 等. 氧气 A 吸收带平均透过率的多光谱非成像测量 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401003.
- [12] Zhang Y, Liu B Q, Wei H L, *et al.* Study on cloudless sky background radiation characteristic in passive ranging based on oxygen spectral absorption [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 298-304.  
张瑜, 刘秉琦, 魏合理, 等. 基于氧气光谱吸收的被动测距中无云天空背景辐射特性研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 298-304.
- [13] Yan Z Q, Liu B Q, Hua W S, *et al.* Application of CKD method to passive ranging by oxygen absorption [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 667-676.  
闫宗群, 刘秉琦, 华文深, 等. 相关 K 分布法在氧吸收被动测距中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 667-676.
- [14] Fu X N, Shan L X, Wang R. A new ranging formula for oxygen absorption based passive ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1201001.  
付小宁, 单兰鑫, 王蕊. 一个新的氧气吸收法被动测距公式 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1201001.
- [15] Wei H L, Dai C M, Wu P F, *et al.* The calculation

- of the atmospheric absorption of oxygen A band for passive ranging [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2015, 38(5): 409-413.
- 魏合理, 戴聪明, 武鹏飞, 等. 用于被动测距的氧气 A 带大气吸收仿真计算 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(5): 409-413.
- [16] Zhang Y, Liu B Q, Hua W S, *et al.* Experimental research of passive ranging in extreme winter weather [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0613002.
- 张瑜, 刘秉琦, 华文深, 等. 冬季极端天气条件下被动测距实验 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0613002.
- [17] Yan Z Q, Xie Z H, Chen J, *et al.* Parametric analysis of spectral channels in monocular multispectral passive ranging system based on oxygen absorption [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001002.
- 闫宗群, 谢志宏, 陈剑, 等. 单目多光谱氧气吸收被动测距系统光谱通道参数分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001002.
- [18] Michael R H. Passive ranging using atmospheric oxygen absorption spectra [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [19] Anderson J R. Monocular passive ranging by an optical system with band pass filtering [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [20] Wang Z B, Zong P F, Li X. Oxygen 'A' absorption band simulation of infrared distance inversion algorithm and experimental research [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0815002.
- 王志斌, 宗鹏飞, 李晓. 氧气 A 带目标红外距离反演算法仿真及实验研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0815002.
- [21] Zhang Y, Liu B Q, Yan Z Q, *et al.* Influence of background radiation on the precision of passive ranging [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 034216.
- 张瑜, 刘秉琦, 闫宗群, 等. 背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(3): 034216.
- [22] Zhang S Q, Huang X B, Ouyang K, *et al.* Sensitivity calibration method for photoelectric tubes and photomultiplier tubes applied in Z-pinch diagnostics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 044003.
- 张思群, 黄显宾, 欧阳凯, 等. 用于 Z 箍缩物理实验中光电管与光电倍增管相对灵敏度标定方法 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 044003.