

# 机载光电雷达性能测试系统的设计

王芳<sup>1\*</sup>, 寇人可<sup>2</sup>, 罗寰<sup>1</sup>, 王海晏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038;

<sup>2</sup>中国人民解放军 95084 部队, 广东 佛山 528226

**摘要** 机载光电雷达随着使用频次的增加,其探测距离会与出厂时的指标产生严重偏差。为此,分析了机载光电雷达的工作原理,以及光电雷达的最大探测距离受目标辐射强度、大气条件、光学系统等影响;根据光电雷达的探测原理,提出了新型便携式光电雷达测试系统的设计思路,利用黑体和特制平行光管模拟无穷远目标红外辐射强度,将衰减片与步进电机、传动齿轮结合起来模拟不同的大气条件,最终确定其样机,并完成了红外衰减片的计量测试;阐明了新型便携式光电雷达测试系统的使用方法 & 测试结果。该测试系统便于携带,测试效率较高,适用于极端恶劣的环境条件,并可推广至各种类型的红外探测系统的性能测试中。

**关键词** 大气与海洋光学; 光电雷达测试系统; 黑体; 组合式衰减片; 伺服系统

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.010101

## Design of Airborne Photoelectric Radar Performance Test System

Wang Fang<sup>1\*</sup>, Kou Renke<sup>2</sup>, Luo Huan<sup>1</sup>, Wang Haiyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University,  
Xi'an, Shaanxi 710038, China;

<sup>2</sup>Unit 95084 of Chinese People's Liberation Army, Foshan, Guangdong 528226, China

**Abstract** With the increasing usage frequency of airborne photoelectric radar, its detection distance seriously deviates from the factory indicators. Thus, the working principle of airborne photoelectric radar and the influences of the radiation intensity of the target, atmospheric condition and optical system on the maximum detection distance are analyzed. According to the detection principle of photoelectric radar, the design idea of a new type of portable test system is put forward. The blackbody and parallel light pipes are used to simulate the infrared radiation intensity of targets at infinity and the attenuation feet, stepping motor and transmission gear are combined to simulate different atmospheric conditions. Thus its prototype is ultimately determined and the infrared attenuation measurement test is finished. In addition, the application method and test results of the novel portable photoelectric radar test system are described. As for this test system, it is easy to carry, its test efficiency is high, it is suitable for extremely harsh environmental conditions, and it can be extended to various types of infrared detection system performance tests.

**Key words** atmospheric and oceanic optics; photoelectric radar test system; blackbody; combined attenuation disc; servo-system

**OCIS codes** 010.1290; 010.1320; 130.3060

## 1 引言

在复杂电磁环境干扰下,机载光电雷达作为无源探测设备,具有信息共享快、抗干扰能力强、全天候工作等优势,被广泛应用于深空目标探测、高精度的目标定位、来袭导弹和飞机的威胁告警中,在火控

和瞄准、协同空战编队、隐蔽接敌、静默攻击、战场电磁隐身等方面也发挥着越来越重要的角色<sup>[1]</sup>。但随着机载光电雷达使用频次的增加,光学系统透射率、探测器灵敏度等都会严重下降,其探测距离将会与出厂时的指标产生严重偏差,导致在空战中飞行员无法充分了解光电雷达的有效探测距离,进而很难

收稿日期: 2018-05-11; 修回日期: 2018-06-13; 录用日期: 2018-07-18

\* E-mail: sase.ly@163.com

发挥出光电雷达的最佳探测性能。

为了有效检测光电雷达性能,目前国内外相关研究主要集中在两方面:一方面是针对系统性能的仿真预测。比如 Brewer 等<sup>[2]</sup>提出了红外搜索的动态性能预测模型,L-3 通信公司与美国空军实验室及海军航空司令部合作开发了基于系统分析、设计及评估的综合模型<sup>[3]</sup>,黄晓晴等<sup>[4]</sup>提出了采用基于虚拟仪器技术的检测平台;但这些仿真预测重在检测系统各部件的性能,并不能给出性能下降后的具体指标;另一方面是对光电雷达测试设备的研制。20 世纪初美国 SBIR 公司研制出红外热场景动态模拟发生器,王文娟<sup>[5]</sup>设计了动目标模拟系统,关志军<sup>[6]</sup>设计了双光管新型动态靶标模拟空间目标。可

以看出,这些测试设备重点关注于对目标的模拟,而对辐射传输衰减考虑得较少。因此本文基于以上问题,设计了新型便携式光电雷达测试系统,重点设计了辐射衰减模块。该系统便于携带,测试效率较高,适用于极端恶劣的环境条件,且可推广至各种类型的红外探测系统的性能测试当中。

## 2 机载光电雷达的探测原理

机载光电雷达先由红外搜索跟踪(IRST)系统搜索、发现、截获和跟踪目标,并在自动跟踪时进行激光主动探测,以获取目标距离、速度、方位等全面精准的目标信息。IRST 系统的作用距离是衡量机载光电雷达性能的重要指标。其理论模型<sup>[7]</sup>为

$$R_{\max} = \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon [I_t(\lambda_1 \sim \lambda_2) + I'_t(\lambda_1 \sim \lambda_2)] \tau(\lambda, R) d\lambda \right\}^{1/2} \cdot \left[ \frac{\pi}{4} D_0^2 (NA) \tau_0 \right]^{1/2} \left( \frac{D^*}{\sqrt{A_d}} \right)^{1/2} \left[ \frac{\delta}{\left( \frac{V_s}{V_n} \right)} \sqrt{\frac{2n\omega T_f \eta_{sc}}{\Omega(1-q)}} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中: $I_t(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 为目标总体辐射强度; $I'_t(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 为目标反射背景辐射强度; $\tau(\lambda, R)$ 为大气透射率; $\tau_0$ 为光学系统透射率; $D_0(NA)$ 为孔径; $D^*$ 为比探测率; $A_d$ 为探测器光敏面积; $V_s/V_n$ 为探测器的信噪比,其取值为 1 时,作用距离取到最大值; $\delta$ 为信号过程因子; $q$ 为扫描再重叠率; $n$ 为光敏元数; $\Omega$ 为扫描总视场; $T_f$ 为扫描周期; $\omega$ 为瞬时立体角; $\eta_{sc}$ 为扫描效率。

距离受目标辐射、大气条件、光学系统、探测器件以及工作模式和信号处理等多种因素的影响。

## 3 测试系统的设计

### 3.1 设计原理

根据机载光电雷达的探测原理,为了有效测试出光电雷达的探测距离,需要对目标辐射、大气条件进行模拟。其设计总体方案如图 1 所示,主要分为目标辐射模拟和辐射衰减模拟两个子模块。

从(1)式可以看出,机载 IRST 系统的最大探测

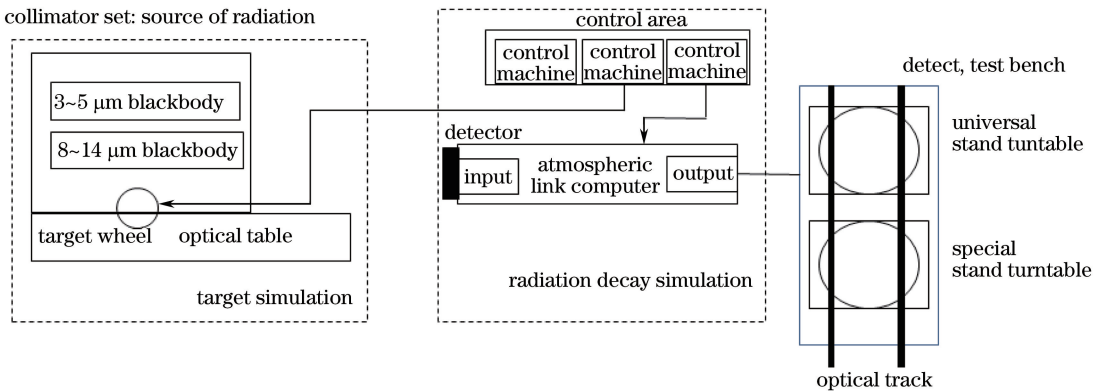


图 1 光电雷达测试系统总体方案图

Fig. 1 Overall plan of photoelectric radar test system

通过分析机载光电雷达通常的作用对象,将目标模块分为红外辐射目标、红外反射目标两类分别

设计。采用黑体、自适应通光孔和平行光管组合方式来实现,具体布局如图 2 所示。将目标飞机在不

同飞行条件、不同观察角度下的辐射量数据作为黑体温度控制的主要依据,通过不断改变其温度,模拟不同条件下的目标辐射特性。考虑到测试系统的便

捷性,平行光管选用反射式卡塞格林系统,且平行光管与黑体之间通过加装聚光透镜<sup>[8]</sup>、偏振片<sup>[9]</sup>来增强有效光强,提高黑体辐射利用率。

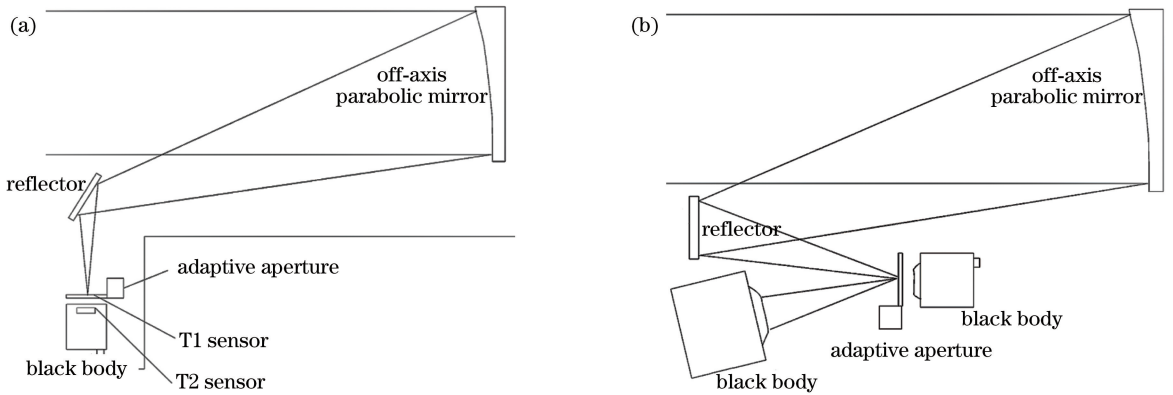


图2 目标辐射模拟系统示意图。(a)红外辐射目标;(b)红外反射目标

Fig. 2 Schematic of target radiation simulation system. (a) Infrared radiation target; (b) infrared reflection target

辐射衰减模拟主要由衰减片组和伺服控制系统组成。衰减片组由10个不同衰减倍率的衰减片组成,用于实现目标5~50 km距离的离散模拟。伺服控制系统由步进电机与减速传动齿轮组成,其控制结构如图3所示。计算机先把输入的大气透射率

值转化为二进制码经过I/O接口发送至单片机;单片机作为步进电机的驱动程序,向步进电机发送两条命令,用于控制其转动方向和转动角度;步进电机控制传动齿轮旋转,齿轮带动衰减片组旋转,从而保证相应透射率的衰减片选入光路中。

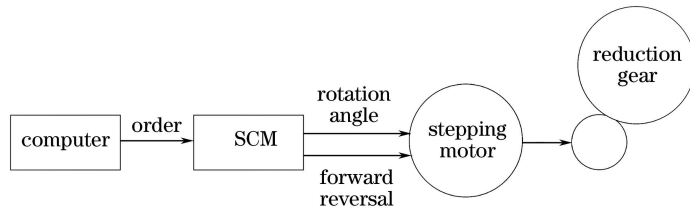


图3 步进式衰减片组伺服系统控制结构

Fig. 3 Control structure of stepper attenuation disc servo-system

### 3.2 关键技术

#### 3.2.1 红外平行光管的设计

红外平行光管主要功能是将点光源变为平行光,提供不同视场的无穷远目标。测试系统选用离轴抛物面反射式平行光管,主要为了满足不同波段的红外光学系统要求。其具体的光路图如图4所示。

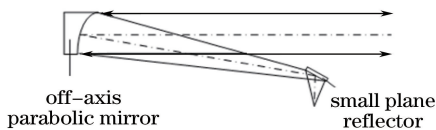


图4 红外平行光管设计示意图

Fig. 4 Schematic of infrared parallel light pipe

主反射镜采用离轴抛物面反射镜,实现轴上的无像差成像,次镜采用小平面反射镜,其口径保证光源组件离焦±20 mm时不挡光,两镜契合要求波面变形峰谷(PV)值小于 $\lambda/5$ (测试系统中 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ )。

对于测试系统而言,离轴光学系统要求具有较好的抗杂光及产品热辐射的干扰性能,平行光管组件应采用消杂散光的封闭式结构,并配有调整机构和可拆装的外盖,便于周期性的光路校准和调整。

#### 3.2.2 辐射衰减模拟的设计

综合考量系统复杂性、加工工艺与精度等,新型便携式光电雷达测试系统的透射率组片包括10个不同倍率的透射率片、两个转盘、定位活动转轮和伺服控制系统,用于实现目标5~50 km距离的模拟。该衰减片的光谱范围在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ ,衰减倍率为0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%,如图5所示。

伺服控制系统将四相步进电机与减速传动齿轮相结合,实现了衰减片的自动选取,缩短了红外光电探测系统的研制周期,降低了成本。计算机通过数模转换将对应的透射率值传送给单片机,单片机根

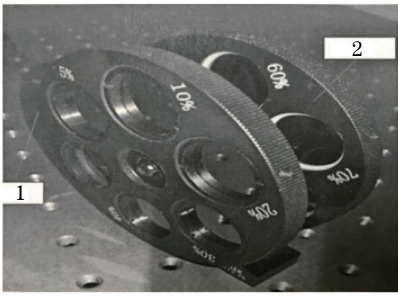


图5 衰减片组

Fig. 5 Attenuation disc unit

据接收到的二进制码产生不同的脉冲驱动信号,驱动步进电机旋转。

根据齿轮传动经典公式:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1}, \quad (2)$$

式中: $N_1$  为齿轮 1 的齿数; $N_2$  为齿轮 2 的齿数; $\theta_1$  为齿轮 1 转过的角度; $\theta_2$  为齿轮 2 转过的角度。由于衰减片为 10 个不同的倍率,则每一衰减片占用的角度为  $36^\circ$ ,步进电机为四相电机,故测试系统选取传动比为  $2/5$  的传动齿轮装置,达到四相电机每转  $90^\circ$ 、被动大齿轮旋转  $36^\circ$ 、恰好将一片衰减片选入光路中的要求。

根据不同的透射率需求,步进电机可以旋转不同的角度,从而选取出所需的衰减片。亦可以根据不同精度要求,在光路中设计  $2\sim 4$  个衰减片组,采用上边的设计方案,对不同的衰减片组配以不同的传动比,实现更精确的透射率模拟。

### 3.3 红外衰减片的计量测试

根据图 1 的总体方案,结合其关键技术,经过调试,最终确定样机。为了保证红外衰减片的精度,在国防科技工业光学一级计量站实验室进行了红外衰减片的计量测试,如图 6 所示。



图6 红外衰减片的计量测试

Fig. 6 Measurement test of infrared attenuation disc

将光电雷达测试系统放置在红外光谱辐射度计(型号 MR254)的光路中,将黑体温度设置为 500

$^\circ\text{C}$ ,光栏调节为  $\Phi 2\text{ mm}$ ,黑体温度稳定后,将不同的衰减片及其组合放置在光栏座上,通过 MR254 测量由黑体辐射经过衰减片引起的电压响应信号和噪声电压值,从而实现光电雷达测试系统红外衰减片的计量测试,如表 1 所示。

表 1 红外衰减片的计量测试的部分数据

Table 1 Partial data of measurement test of infrared attenuation disc

Attenuation piece	Hole voltage /V	After voltage /V	Initial noise voltage /V
$0.05 \times 0.1$	1.205	0.065	0.045
$0.05 \times 0.2$	1.204	0.067	0.045
$0.1 \times 0.2$	1.207	0.079	0.045
$0.1 \times 0.3$	1.207	0.103	0.045

## 4 系统测试结果

### 4.1 测试系统的使用方法

1) 将新型便携式光电雷达测试系统对准光电雷达,在光电雷达的目视系统或显示屏上看到测试系统的光栏像。

2) 对光栏位置进行设定,根据测试需要,通过定位活动轮转,将光栏转到合适的位置,使选定光栏对应黑体前面板的标志线。

3) 根据实际情况,设定黑体温度。

4) 根据测试需要,通过转动活动轮转选用不同衰减率的衰减片,直至光电雷达所接收到的信号电压接近噪声电压值,则此时衰减片的衰减倍率所对应的探测距离即为该光电雷达的实际探测距离。

### 4.2 测试结果

以某机载雷达为例,验证了测试系统的便捷、高效性。首先选用某一机型为目标对象,借用 AutoCAD 软件计算得其正视面积  $S_{zs} = 9.284\text{ m}^2$ ,测视面积  $S_{cs} = 36.621\text{ m}^2$ ,俯视面积  $S_{fs} = 107.145\text{ m}^2$ ,进一步根据热辐射定律及辐射强度定义仿真得出其不同方位角的强度分布图,如图 7 所示( $\beta$  为俯仰角)。依据图 7 的不同数值,给黑体选择不同的温度范围如表 2 所示。

表 2 黑体温度设置

Table 2 Blackbody temperature setting

Azimuth /( $^\circ$ )	$I /(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$T /\text{K}$
0	0.4925	54.29
45	1.5939	72.81
90	17.6160	132.76
135	448.6000	298.24
180	632.6500	325.00



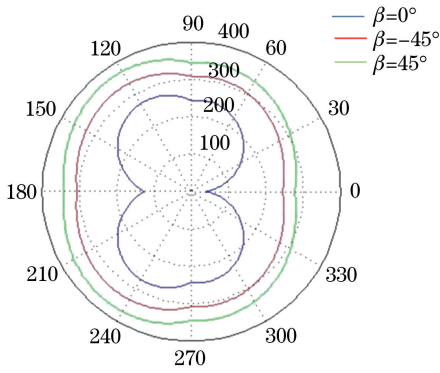


图 7 目标水平方向红外辐射强度分布图  
Fig. 7 Distribution map of infrared radiation intensity in horizontal direction of target

然后以我国酒泉地区一月份天气状况为例,其 3 km 高度处大气透射率值如图 8 所示<sup>[10]</sup>。将不同的透射率值输入所设计的辐射衰减系统,可得步进电机及传动齿轮的旋转角度,部分数据如表 3 所示。

采用光电雷达测试模拟目标,图 9 为连接示意图,当光电雷达接收的信号电压值接近噪声电压值时,对应透射率的探测距离即为其实际探测距离。需要说明的是,借用国际通用软件LOWTRAN7以

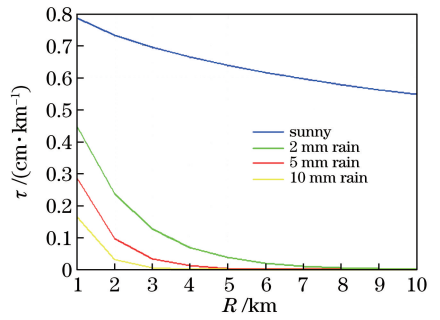


图 8 酒泉一月份大气透射率与作用距离关系图  
Fig. 8 Relationship between atmospheric transmittance and detection distance at Jiuquan in January

表 3 伺服系统旋转角度  
Table 3 Rotation angle of servo-system

Transmittance	Rotation angle of stepper motor / (°)	Rotation angle of passive gear / (°)
0.319	270	108
0.528	450	180
0.730	630	252

及大量实测数据,编制了衰减倍率与探测距离的一一对应实用手册,供测试时使用,就某型光电雷达的试飞结果,手册准确率达 98% 以上。

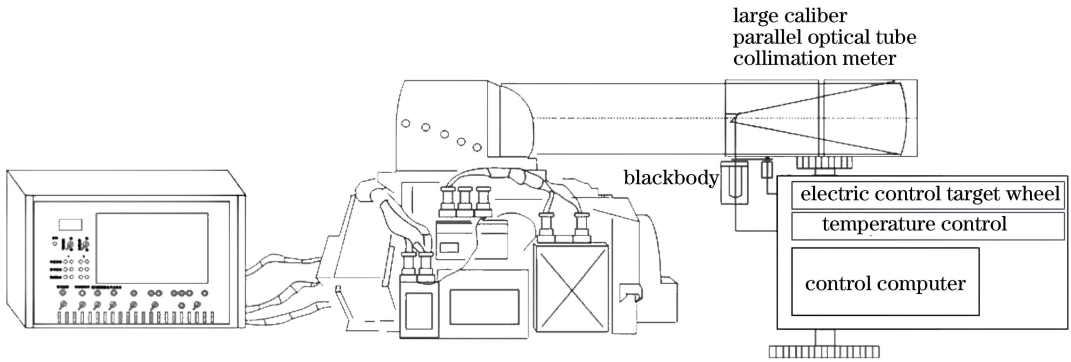


图 9 实测连接图  
Fig. 9 Measured connection diagram

## 5 结 论

为了便捷有效地测试出机载光电雷达的探测性能,首先分析了机载光电雷达的工作原理,并得出IRST系统的探测距离为衡量机载光电雷达性能重要指标。通过数学模型可以看出,机载IRST系统最大探测距离受目标辐射、大气条件、光学系统、探测器件以及工作模式和信号处理等多种因素的影响。其次,根据光电雷达的探测原理,提出了新型便携式光电雷达测试系统的设计思路,在设计中利用黑体来模拟目标红外辐射强度,用光栏和平行光管来模拟无穷远处的点目标,将组合式衰减片与伺服

机构配合实现不同大气条件的自动选择,确定其样机,并进行了红外衰减片的计量测试。最后阐明了新型便携式光电雷达测试系统的使用方法。该测试系统便于携带,测试效率较高,适用于极端恶劣的环境条件,且可推广至各种类型的红外探测系统的性能测试当中。

## 参 考 文 献

[1] Kou R K, Wang H Y, Wu X M. Optimum threshold noise ratio of airborne infrared search and track system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (3): 0304001.

- 寇人可, 王海晏, 吴学铭. 机载红外搜索跟踪系统的最佳阈噪比[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0304001.
- [2] Brewer R D, Richard J V, McGlynn J D, *et al.* Infrared seeker/sensor dynamic performance prediction model [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2470: 89-98.
- [3] Olson C, Theisen M, Pace T, *et al.* Model development and system performance optimization for staring infrared search and track (IRST) sensors[J]. Proceedings of SPIE 2016, 9820: 98200B.
- [4] Huang X Q, Miao Y S, Yu S L. Application of testability design in the equipment for detection of synthetic photovoltaic radar parameters [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(3): 161-164.  
黄晓晴, 缪永生, 于盛林. 可测试性在光电雷达检测设备中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(3): 161-164.
- [5] Wang W J. Research on testing technology of infrared search tracking [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 3-4.  
王文娟. 红外搜索跟踪的测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 3-4.
- [6] Guan Z J. Study on new dynamic target [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.  
关志军. 新型动态靶标的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [7] Kou T, Wang H Y, Wu X M, *et al.* Detection probability envelope of airborne photoelectric system in complex condition[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0304002.  
寇添, 王海晏, 吴学铭, 等. 复杂环境下机载光电系统探测概率包线研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304002.
- [8] Wang L, Yu L, Kou T, *et al.* Evaluation and calibration of operational capability to airborne IRST system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 192-198.  
王领, 于雷, 寇添, 等. 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 192-198.
- [9] Luo J, Liu D, Xu P T, *et al.* High-precision polarizing beam splitting system based on polarizing beam splitter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1210001.  
罗敬, 刘东, 徐沛拓, 等. 基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1210001.
- [10] Kou R K, Wang H Y, Wu X M. Atmospheric transmittance at infrared band in low latitude areas [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010102.  
寇人可, 王海晏, 吴学铭. 低纬度地区红外波段大气透射率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010102.