

基于 AOTF 的可见光多光谱成像系统测试平台 靶标辐亮度标定测试

高鲜妮, 王小兵, 豆建斌, 耿顺山, 杨红坚, 李晓阳

(中国华阴兵器试验中心 制导武器试验鉴定仿真技术重点实验室, 陕西 华阴 714200)

摘要: 为了对多光谱成像系统性能进行测试评价, 本文搭建了多光谱成像系统性能测试平台, 并对平台的靶标辐亮度进行了标定测试, 计算分析了辐亮度传输效率。最后, 利用该测试平台对一组靶标进行了 MRC 测试, 对该平台进行了测试验证。该测试平台搭建及分析思路对红外多光谱成像系统测试具有很强的指导与借鉴意义。

关键词: 多光谱成像系统; 测试平台; 辐亮度; AOTF

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)07-0610-05

Calibration and Test of Radiance for an AOTF-based Visible Multi-spectral Imaging System

GAO Xianni, WANG Xiaobing, DOU Jianbin, GENG Shunshan, YANG Hongjian, LI Xiaoyang

(China HuaYin Ordnance Test Center, Key Lab of Guided Weapons Test and Evaluation Simulation Technology,
Huayin 714200, China)

Abstract: In order to test and evaluate the performance of multi-spectral imaging system, this research built the multi-spectral imaging system test platform. The each link output radiance of the visible light multi-spectral imaging system test platform based on AOTF is analyzed, and it's calculated the output radiance transmissible efficiency. The platform has been tested and verified, when the MRC is tested in this test platform. The building method and analysis of this test platform maybe has reference meaning for infrared multi-spectral imaging system test.

Key words: multi-spectral imaging system testing, testing platform, radiance, AOTF

0 引言

多光谱成像系统就是在不同的光谱范围内有两个或多个敏感通道的成像系统。通过同时获得多个光谱波段的场景信息, 并利用一定的信号处理算法和融合算法完成多通道图像信息的相互补充, 实现对复杂背景的抑制, 从而显著降低虚警率, 提高系统的目标获取(探测、识别和辨认)性能和抗干扰性能^[1]。多光谱成像技术使系统获取二维空间信息加光谱维信息的多维图像, 提高了系统实现目标获取任务的准确性, 但另一方面, 多光谱成像系统实现方法多样、系统集成复杂^[1-2], 如何对系统性能进行准确描述、测试与评价, 为系统优化设计、改进与使用提供指导, 是值得关注的问题。

目前, 国内关于成像系统性能的测试与考核, 主要侧重于单一宽波段成像系统的物理建型及性能评

价。因此, 搭建多光谱成像系统性能测试平台, 分析测试平台的靶标辐照度误差传递特性及规律, 建立测试系统全链路辐照度误差传递模型及不确定度分析模型, 保证辐照度量值传递准确性和可比性, 为多光谱成像系统性能的定量表征、测量以及探测识别目标战术性能客观、定量评价等提供数据理论和技术基础具有重要的意义。本文从基于 AOTF 的可见光多光谱成像系统性能测试平台的光路传递过程入手, 对测试平台的靶标辐亮度进行了标定测试, 并计算分析辐亮度的传输效率, 为系统性能测试验证提供客观、准确的数据支撑。

1 光路传递原理

AOTF (Acousto-optic tunable filter, 简称 AOTF) 是一种基于各向异性晶体在声光相互作用下的布拉格衍射效应制成的声光可调谐滤光器, 通过改变施加

收稿日期: 2016-05-09; 修订日期: 2016-08-16.

作者简介: 高鲜妮 (1982-), 女, 陕西礼泉人, 硕士, 工程师, 研究方向为制导武器仿真鉴定。E-mail: xianni0201@163.com。

的射频 (RF) 信号频率, 从而对入射宽波段光源进行衍射, 得到特定波长的单色光^[3-5], 如图 1 所示。本文基于 AOTF 设计的静态性能测试平台主要包括: 标准光源、光电调制器、靶标、平行光管及控制系统等组成。标准光源提供多光谱成像系统测试需要的光源, 辐射强度和光亮度可调。AOTF 实现光谱的细分, 模拟目标的窄带光谱反射特性。靶标提供四杆靶、三角靶等标准靶标。平行光管起到准直光路作用, 使靶标成像于无穷远, 保证测试精度。该测试平台通过调整积分球光源亮度模拟不同光谱反射率差值系数, 调整 AOTF 调制幅度及调制波长, 实现对不同波长下的可见光多光谱成像系统最小可分辨对比度 (MRC) 的测试。

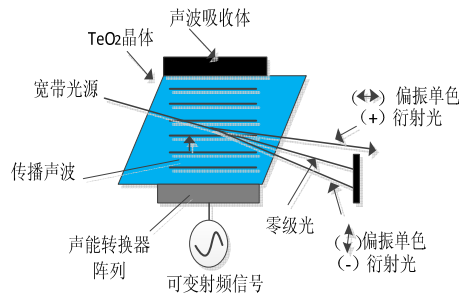


图 1 非线性 AOTF 工作原理

Fig.1 Operational principle of nonlinear AOTF

搭建的测试平台光路如图 2 所示, 积分球光源经 500 mm 准直光管准直, 再经 AOTF 调制选择窄波段光照射靶标, 进入 2546.1 mm 离轴平行光管, 形成不同波段的靶标图像。假设光全部透过四杆靶标, 整个链路中不考虑光在大气传输及其他的损耗, 根据光路传递过程可得到:

$$L_{总} = L_{光源} \times P_1 \times P_{AOTF} \times P_2 \tag{1}$$

式中: $L_{总}$ 为光路最终输出的辐亮度; $L_{光源}$ 为光源输出的辐亮度; L_1 、 P_1 为 500 mm 平行光管输出的辐亮度及传输效率, $P_1 = L_1 / L_{光源}$; L_{AOTF} 、 P_{AOTF} 为 AOTF 调制后辐亮度及传输效率, $P_{AOTF} = L_{AOTF} / L_1$; L_2 、 P_2 为 2546.1 mm 平行光管的辐亮度及传输效率, $P_2 = L_2 / L_{光源}$ 。

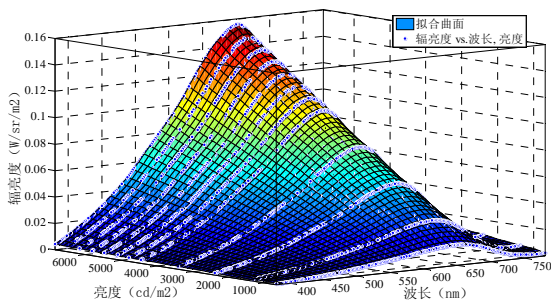


图 3 积分球光源自身辐亮度输出

Fig.3 Radiance of integrating sphere

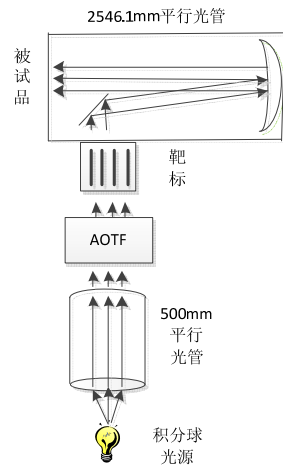


图 2 测试平台光路图

Fig.2 Light path of test platform

2 可见光多光谱成像系统测试平台辐亮度标定测试

按照测试平台光路传递过程, 将积分球光源、500 mm 平行光管、AOTF (型号为 TEAFI10-0.4-1.0S-MSD, 波长调整范围为 0.4~1.0 μm)、靶标、2546.1 mm 平行光管部件搭建测试平台, 采用 PR-670 型亮度色度计对平台主要测试部件进行了辐亮度测试。

图 3~图 6 为积分球自身、积分球光源通过 500 mm 平行光管及经 AOTF 调制后与积分球光源通过 2546.1 mm 平行光管后在不同积分球亮度下的亮度色度计测出的数据拟合曲面。可以看出, 随着积分球光源亮度逐渐增大, 光路各个环节的辐亮度增大; 在 620 nm 与 660 nm 附近输出辐亮度峰值, 这点与平台所选的积分球光源有关; 积分球光源通过 2546.1 mm 平行光管后的输出辐亮度高于通过 500 mm 平行光管后辐亮度值, 这是由于 2546.1 mm 平行光管的入射口径大, 光源利用率高造成的; 经 AOTF 调制分光, 在 620 nm 与 660 nm 附近输出辐亮度峰值约为 0.015 W/(sr·m²)。

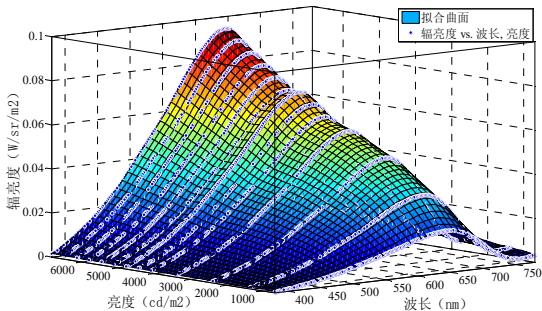


图 4 积分球光源通过 500 mm 平行光管后辐亮度输出

Fig.4 Radiance of integrating sphere through 500 mm collimator

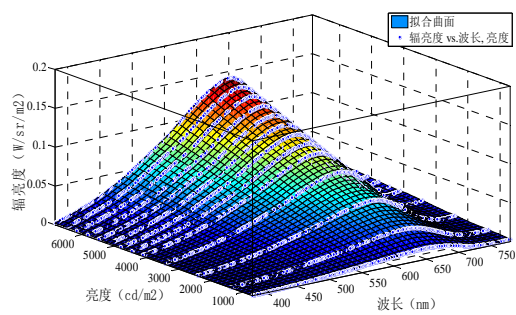


图5 积分球光源通过 2546.1 mm 平行光管后辐亮度输出
Fig.5 Radiance of integrating sphere through 2546.1 mm collimator

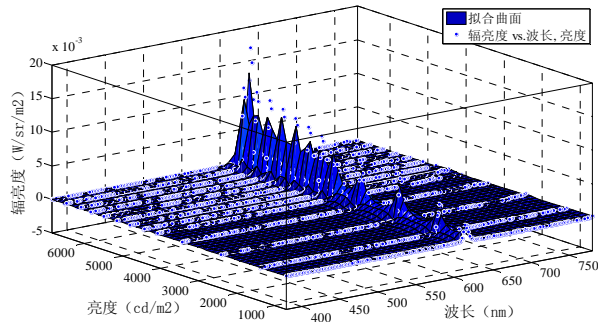


图6 积分球光源通过 500 mm 平行光管及 AOTF 调制后辐亮度输出
Fig.6 Radiance of integrating sphere through 500 mm collimator and AOTF modulation

积分球光源亮度选取典型值 6852 cd/m², AOTF 调制幅度设置为 100%, 输出峰值波长分别从 538 nm 到 718 nm 改变, 测试光路各个主要环节的辐亮度变化, 测试结果如表 1、图 7 所示。

从表 1 可看出, 亮度色度计测试的积分球光源输出辐亮度峰值在波长 656 nm 处, 峰值为 0.1536 W/(sr·m²)。在图 7 中, 积分球光源自身及分别通过 500 mm 平行光管、AOTF 调制和 2546.1 mm 平行光管后, 光路辐亮度传递效率逐渐减小。测试光路各主要环节的辐亮度传递效率计算结果如表 2 所示。将表 1、表 2 中的数据带入公式(1), 可计算出测试平台最终辐亮度, 同时, 测试平台整个光路辐亮度传递效率约为

3.8%:
$$L_{总} = L_{光源} \times P_{光源} \times P_1 \times P_{AOTF} \times P_2 = 0.1536 \times 0.6 \times 0.07 \times 0.91 = 0.0059 (W/(sr \cdot m^2)) \quad (2)$$
为了验证该测试平台中 AOTF 的调制分光效果, 将积分球光源设置到 13088 cd/m², AOTF 调制幅度为 100% 不变, 输出峰值波长从 550~768 nm 之间变化, 将积分球光源亮度值代入到光源自身与波长的拟合函数中, 得到不同波长下输出的辐亮度拟合值。并亮度色度计测试搭建的可见光多光谱测试平台最终输出的辐亮度值, 将积分球光源辐亮度输出值与平台最终测试值比较, 并利用 Matlab 进行拟合。其拟合曲线函数为:

表 1 测试平台光路各环节的辐亮度 (积分球光源亮度为 6852 cd/m²)

波长/nm	辐亮度输出/(W/(sr·m ²))			
	积分球光源自身 ($L_{光源}$)	积分球光源通过 500 mm 平行光管后 (L_1)	积分球光源通过 500 mm 平行光管及 AOTF 调制后 (L_{AOTF})	积分球光源通过 2546.1 mm 平行光管后 (L_2)
538	0.0797	0.0515	0.000548	0.0716
576	0.1086	0.07	0.0053	0.0989
616	0.144	0.0902	0.0119	0.1317
656	0.1536	0.0921	0.00674	0.1393
686	0.1246	0.0717	0.0154	0.1117
718	0.0676	0.0369	0.00792	0.0599

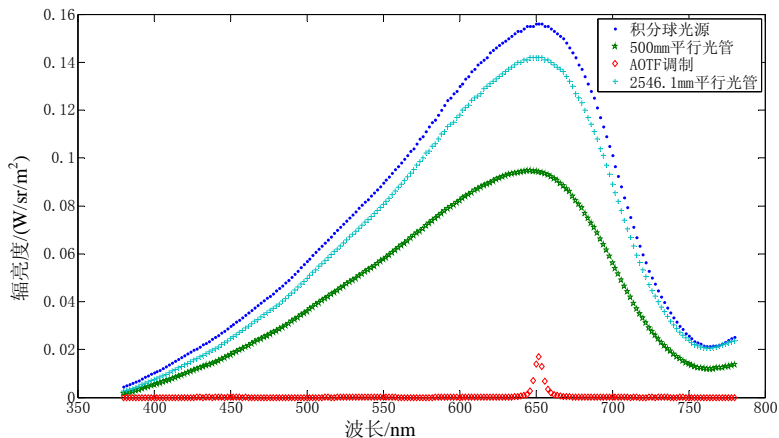


图7 光路传递各环节辐亮度变化
Fig.7 Changes of radiance in each link of optical path transmission

$$y=a/(x+b)+c \tag{3}$$

式中： $a=2038.9$ ， $b=-545.2536$ ， $c=2.5423$ 。

积分球光源为 13088 cd/m^2 时，辐亮度峰值波长为 618 nm ，峰值为 $0.2671\text{ W/(sr}\cdot\text{m}^2)$ ，按照公式(1)计算：

$$L_{\text{总}}=L_{\text{光源}}\times P_{\text{光源}}\times P_1\times P_{\text{AOTF}}\times P_2=0.2671\times 0.6\times 0.07\times 0.91=0.0102(\text{W/(sr}\cdot\text{m}^2)) \tag{4}$$

计算值 $0.0102\text{ W/sr}\cdot\text{m}^2$ 与亮度色度计在 618 nm 处的测试值 $0.01016565\text{ W/(sr}\cdot\text{m}^2)$ 相吻合。

同时，从表 3 及图 8 可看出，积分球光源辐亮度输出值、测试平台最终辐亮度输出测试值均在 $618\sim 690\text{ nm}$ 之间较大，随之减小。两者比值和波长是反比例函数关系，随着波长增大，比值减小。采用该测试平台进行可见光多光谱成像系统静态性能测试时，其在 $618\sim 690\text{ nm}$ 分光效果最好，与光源自身测试效果一致。

3 应用举例

将测试平台中的 AOTF 调制频率为 105 MHz ，调制幅度由 $10\%\sim 100\%$ 变化，控制靶标轮转到空间频率为 2.64 cy/mrad 的四杆靶测试图案处。观察在 AOTF 固定调制频率、不同调制幅度下，输出靶标辐亮度变

化特性，并观察靶标的图像变换情况，最终测出该靶标空间频率下的 MRC。

由图 9~图 10 可以看出，频率一定时，峰值波长在 654 nm ，随着 AOTF 调制幅度的减小，图像变暗，输出靶标辐亮度减小，其值由 $3.5\times 10^{-3}\text{ W/(sr}\cdot\text{m}^2)$ 减小到约 $2.5\times 10^{-4}\text{ W/sr}\cdot\text{m}^2$ 。测试时背景光谱辐亮度约为 $1.64\text{ W/(sr}\cdot\text{m}^2)$ ，故在 AOTF 波长为 654 nm 、调制幅度 10% 下， 2.64 cy/mrad 空间频率靶标的 MRC 约为 52% 。

4 结论

本文针对搭建的基于 AOTF 可见光多光谱成像系统测试平台，在实验室分别对平台中光源、 500 mm 平行光管、AOTF 调制后及 2546.1 mm 平行光管输出的辐亮度进行了标定测试，并计算得到各传输环节的传输效率，同时对整个测试平台进行测试比对分析，AOTF 调制后的数据与光源趋势一致。最后，利用本文搭建的测试平台对一组靶标进行了 MRC 测试。从本文的分析可以得出：

1) 多光谱成像系统与传统宽波段成像系统在性能测试平台搭建上存在较大差异；

表 2 测试平台光路各环节的辐亮度传递效率（积分球光源亮度为 6852 cd/m^2 ）

Table 2 Radiance transfer efficiency of light path from test platform in each link(the luminance of integrating sphere: 6852 cd/m^2)

波长/nm	光路传递中辐亮度利用效率		
	积分球光源通过 500 mm 平行光管后 (P_1)	光源通过 500 mm 平行光管及 AOTF 调制后 (P_{AOTF})	积分球光源通过 2546.1 mm 平行光管后 (P_2)
538	0.65	0.01	0.90
576	0.64	0.08	0.91
616	0.63	0.13	0.91
656	0.60	0.07	0.91
686	0.58	0.21	0.90
718	0.55	0.21	0.89

表 3 积分球光源为 13088 cd/m^2 时辐亮度输出

Table 3 Radiance when the luminance of integrating sphere is 13088 cd/m^2

波长/nm	输出辐亮度/($\text{W}\cdot\text{sr}^{-2}$)		积分球光源输出/测试平台最终输出
	积分球光源输出	测试平台最终输出	
550	0.1883	0.000440931	427.0514
578	0.2304	0.003947432	58.36706
618	0.2671	0.01016565	26.27476
654	0.263	0.01355181	19.407
690	0.2172	0.01563761	13.88959
722	0.1453	0.01313297	11.06376
732	0.1187	0.01178078	10.07573
738	0.1023	0.01127284	9.074909
746	0.0802	0.01085923	7.385422
754	0.0582	0.01082276	5.377556
762	0.0367	0.009852499	3.724943
768	0.0213	0.01054006	2.020861

2) 测试平台中加入 AOTF, 将光谱维引入到系统性能测试中;

3) 通过整个测试光路传输链路的分析, 为建立测试系统全链路 MRC 不确定度分析模型提供各环节的拟合与测试数据, 保证辐照度量值传递准确性和可

比性;

4) 对红外多光谱成像系统进行性能测试与评价时, 同样可借鉴本文的分析, 调整改变本文测试平台中的测试部件为黑体、红外 AOTF、红外靶标及平行光管。

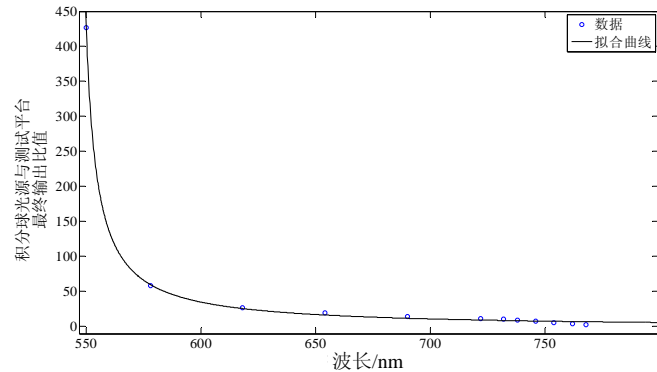


图 8 积分球光源/测试平台最终输出与波长的关系 Fig.8 Relationship between the ratio of final output and wavelength

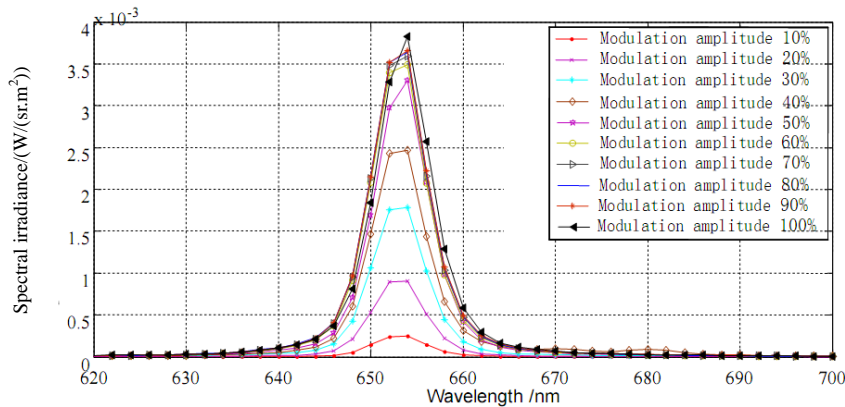


图 9 AOTF 频率固定时, 光源输出辐亮度变化 Fig.9 Output radiance change, when the AOTF frequency is fixed



图 10 AOTF 频率固定, 靶标图像随调制幅度增大的变化 Fig.10 The change of the target image, when the AOTF frequency is fixed

参考文献:

[1] 刘鑫. 光谱红外成像系统性能表征方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
LIU Xin. Research on the Methods of Multispectral Infrared Imaging System Performance Characterization[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.

[2] 黄士科, 张天序, 李丽娟, 等. 空空导弹多光谱红外成像制导技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 16-20.
HUANG Shike, ZHANG Tianxu, LI Lijuan, et al. IR guiding technology based on multispectral imaging for air missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 16-20.

[3] 张辉. 基于 AOTF 技术的近红外光谱分析系统的研制[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2005.
ZHANG Hui. Research and Development of NIR Spectrometers Based on AOTF Technology[D]. Beijing: Chinese Agricultural Mechanization Sciences, 2005.

[4] 张国铮. 声光可调谐滤波器驱动及光路设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
ZHANG Guozheng. The Driving and Optical Design of Acousto-optic Tunable Filter[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.

[5] 高志帆, 张红平, 吴琼水, 等. AOTF 高光谱成像系统的标定及性能测试[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 711001-1-0711001-7.
GAO Zhifan, ZHANG Hongping, WU Qiongshui, et al. Calibration and characterization of an AOTF-based hyperspectral imaging system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 711001-1-0711001-1.