

·测试、试验与仿真·

基于探测器阵列的激光远场特性测量误差分析

叶宗民

(91404部队,河北 秦皇岛 066001)

摘要:激光在大气传输中,受湍流、热晕和消光等的影响,远场功率密度分布相对于激光器出口有较大变化,精确测量远场激光光斑能量、光束质量和质心漂移等重要参数,对于分析激光的大气传输效应具有重要意义。重点讨论了探测器点阵法激光远场特性测量技术中测量误差的组成与产生原因,定量分析了误差的大小,并提出了减小测量误差的有效方法,为进一步探索激光与大气介质相互作用规律提供依据。

关键词:激光远场;测量误差;探测器阵列

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-01-0081-05

Error Analysis of Laser Far Field Characteristics Measurement Based on Detector Array

YE Zong-min

(91404 Army Unit of PLA, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: During laser propagating in atmosphere, the power density distribution in far field changes greatly relative to laser exit due to the turbulence affection, the thermal blooming and extinction. Accurate measuring important parameters such as laser facula energy, beam quality and centroid shifting in the far field are important to analyze laser atmospheric transmission effect. The measurement error and causes in detector lattice array method laser far field characteristic measurement technology are discussed. The errors are analyzed quantitatively and an effective method to reduce the measurement error is proposed, which provides the basis for further exploring the interaction law between laser and atmospheric medium.

Key words: laser far field; measurement error; detector array

检测激光远场的能量分布是当前研究的重要技术难点。一般的测量设备接收口径有限,只能检测到部分光斑的激光能量,不能满足激光远场特性测量要求。因此,对远场激光的测量通常采用CCD成像法或探测器点阵法。CCD成像法是一种非接触式的间接测量方法,将远场激光照射到漫反射板上,用图像记录设备(近红外CCD摄像机或热像仪)记录漫反射板上激光光斑的反射图像,测量激光光斑的相对能量分布;探测器点阵法是直接接触式测

量,中间环节少,但其测量精度受探测器个数、阵列布阵方式影响很大,系统复杂、成本高。文中重点讨论探测器点阵法激光远场特性测量技术的测量误差分析与评估。

1 系统误差分析

探测器点阵法基本原理是:利用一定数量的激光探测器按阵列安置在靶板上,首先由分布在靶板

收稿日期:2016-12-14

作者简介:叶宗民(1982-),男,江苏溧水人,毕业于南京理工大学,硕士研究生,工程师,主要研究方向为光学目标特性测量与分析、光电工程和电磁计算。

上的激光能量探测器直接探测数公里外发射的激光光斑,然后将光斑信号转换为与探测器阵列分布一致的二维数字信号,并根据探测器的光敏面积处理得到该点对应的激光能量密度,最后根据各点的能量密度,采用一定的插值方法给出整个光斑的能量密度分布。探测器阵列靶板的大小取决于远场激光光斑的大小,远场激光光斑的大小主要取决于激光器出光口径、光束发散角、光的衍射效应及大气介质的影响。测试采用9个探测器的阵列靶板,分别对3.7 μm、10.6 μm两个典型波长的激光远场能量进行测试,分别代表中波和长波两个波段的激光远场特性。

1.1 检测标定原则

激光远场特性的测量由于受激光大气传输特性限制,以及激光入射角度不同,测量能量值不同,对系统进行标定时需要以下原则:(1)所标定的激光功率为到达检测面处的激光功率,不考虑其在大气传输过程中的衰减;(2)所标定的激光功率均为激光垂直入射到检测面的量,即当激光有角度入射到检测面时,测试值仅为其垂直方向分量;(3)规定波长的激光功率标定使用标准激光源,在实验室环境中,在校校台内进行标校,避免外界光干扰。

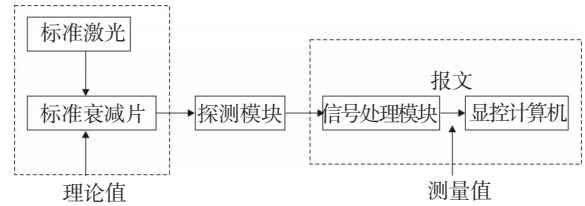
1.2 系统误差组成

采用探测器点阵法的测量设备系统的误差主要有:(1)探测模块是通过安装接口安装于靶板上,原则上与入射光垂直,但是受靶板定位精度、安装精度的影响,将引入外部安装误差,影响测量精度。(2)探测模块是测试靶面的基本组成单元,其精度是设备的内部静态误差,是系统精度的保证,主要受探测器、放大电路、运算电路等方面的影响。(3)在插值建模过程中,实测点精度会很高,虚拟点只能反映其变化趋势和相对功率,模型引入误差较大,因此实际采样点(探测单元)分布密度越大测量误差越小,密度越小测量误差越大,具体情况根据实际布局 and 模型引入有关。下面就对这几个方面的系统误差进行实测分析(仅以采用的9个探测器系统为例)。

(1)探测模块静态误差

探测模块静态误差的测试采用标准激光器发射重频激光,观测记录功率解算情况,通过统计大

量测试数据,计算误差。测试布局如图1所示。



其中,3.7 μm标准衰减片误差:4%;3.7 μm标准激光器误差:5%;
10.6 μm标准衰减片误差:5%;10.6 μm标准激光器误差:5%。

图1 静态误差测试布局图

通过大量实测数据统计得到3.7 μm激光探测模块综合误差为7.2%。

根据 $\phi = \sqrt{\delta^2 + 4\% + 5\%}$, 得到3.7 μm激光探测模块静态误差 $\delta = \sqrt{7.2\%^2 - 4\%^2 - 5\%^2} = 3.3\%$ 。

通过大量实测数据统计得到10.6 μm激光模块综合误差为12.11%。

根据 $\phi = \sqrt{\delta^2 + 5\% + 5\%}$, 得到10.6 μm激光探测模块静态误差 $\delta = \sqrt{12.11\%^2 - 5\%^2 - 5\%^2} = 9.83\%$ 。

(2)探测模块安装误差

在实际安装过程中会出现一系列的误差,先通过测角准直仪获得探测模块安装的最大偏差角,然后通过统计大量测试数据,计算安装整体误差值。根据测角准直仪获得的数据,3次测量中最大的正偏差角为8号探测模块的0°58'54",最大的负偏差角为4号探测模块的-0°57'48",则可得模块间的不平行度为1°56'42",小于结构设计的最大不平行度2°,根据公式

$$\Delta_{3.7/10.6 \mu m} = \tan 1^\circ 56' 42'' = 3.39\% \quad (1)$$

取偏差角的正切值可折合探测模块安装最大误差为3.39%。

(3)模型误差

模型误差的测试采用保持激光入射与靶板相对位置稳定不变的前提下,观测记录功率解算情况,通过统计大量测试数据,计算误差。根据测试数据可以获得靶板相对激光器在不同位置时模型给出的测试值,相对标准值进行计算得到平均误差分别为

$$\Delta_{(3.7 \mu m)} = (0.186 + 0.251 + 0.249) / 3 = 22.8\% \quad (2)$$

$$\Delta_{(10.6 \mu m)} = (0.15 + 0.15 + 0.11) / 3 = 13.7\% \quad (3)$$

以上三种误差构成了文中测试用测量系统的

固有误差,系统固有误差为

$$\Delta_{3.7\mu\text{m}} = \sqrt{(3.3\%)^2 + (3.39\%)^2 + (22.8\%)^2} = 23.29\% \quad (4)$$

$$\Delta_{10.6\mu\text{m}} = \sqrt{(9.83\%)^2 + (3.39\%)^2 + (13.7\%)^2} = 17.2\% \quad (5)$$

2 外场测试

分析完系统本身固有的误差,下面就根据外场测量情况进行测试误差分析。测试布置如图2所示。

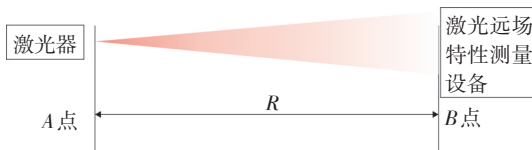


图2 激光远场特性测量布置图

2.1 测试步骤

- (1)选择通视距离 $R=3.8\text{ km}$ 的 A 、 B 两点作为测试场地;
- (2)记录天气情况;
- (3)在 A 点架设激光器, B 点架设激光远场特性测量设备;

(4)测量设备载车需停靠在平整的测量场地,设置车辆调平机构,在一定范围里微调测试测量,设置水平仪检测靶面与水平面相对位置情况;

(5)保证靶板正面对着激光器发射方向,瞄准方式首先采用瞄准镜互相瞄准的方式,在大概方面确定后;

(6)通过三脚架架设准直激光器进行瞄准;

(7)检测电源连接情况,设备开机,检查设备工作状态;

(8)激光器开机发射激光;

(9)测量时保证靶板上每个激光信号采集点都可以接收到激光信号,采集接收到的激光数据并记录每个数据点对应的靶板坐标值;

(10)利用液压杆调整靶板的水平位置,得到最强的中波激光能量接收位置,停止;

(11)利用液压杆调整靶板的俯仰位置,得到最强的中波激光能量接收位置,停止;

(12)经过以上步骤可以使激光尽可能的垂直入射靶板;

(13)开始激光能量测试,记录该过程所有激光采集点采集的激光功率值,通过相应的软件算法,得到远场激光能量分布特性。

(14)多次测量,记录数据。表1为激光远场特性测量结果列表。

表1 激光远场特性测量结果列表($3.7\mu\text{m}$)

测试距离/km	能见度情况/km	通道数	输出功率密度值/ $\mu\text{W}/\text{mm}^2$								
			位置	1 500	1 800	2 100	2 400	2 700	3 000	3 300	3 600
3.8	7	1	211	541	1 019	789	657	780	1 019	541	189
		2	157	345	954	754	775	887	954	445	236
		3	131	557	855	652	952	952	855	753	347
		4	172	325	1 312	1 012	1 412	1 312	1 312	325	157
		5	256	642	1 231	1 131	1 241	1 431	1 231	682	246
		6	278	367	1 544	1 014	1 874	1 214	1 544	547	348
		7	393	412	1 344	1 524	1 571	1 667	1 344	672	403
		8	455	359	1 633	1 778	1 334	1 878	1 524	289	545
		9	697	752	1 573	1 873	1 524	1 773	1 573	632	847

2.2 试验数据及结果

考虑到试验成本,本次测试只采用了9个探测器,测试结果不能精确反映激光远场光斑的整体性

能,但其采用的外场激光光斑测试的基本方法和试验数据处理方式是科学有效的,通过理论分析,其结果误差分析方法也是可行的。

根据采集数据可以看出远场光斑成的高斯分

布,根据每个不同坐标点不同时刻采集电路输出的功率密度值,可以描绘出光斑三维图。

10.6 μm 测试方法和步骤与 3.7 μm 一致,将中

波红外激光器换为 10.6 μm 激光器即可。测试数据如表 2。

表 2 激光远场特性测量结果列表(10.6 μm)

测试距离/km	能见度情况/km	通道数	输出功率密度值/ $\mu\text{W}/\text{mm}^2$								
			位置	1 500	1 800	2 100	2 400	2 700	3 000	3 300	3 600
3.8	7	1	31	41	69	59	67	80	59	41	21
		2	47	35	74	64	75	87	54	45	36
		3	31	47	85	102	92	92	85	73	37
		4	72	55	82	111	112	112	112	325	57
		5	556	32	101	121	121	141	131	682	26
		6	68	67	104	122	174	124	144	57	38
		7	43	62	111	131	151	167	134	672	43
		8	75	89	115	133	134	188	154	289	55
		9	77	82	124	137	124	173	173	632	47

同样,根据采集数据可以看出远场光斑成高斯分布,根据每个不同坐标点不同时刻采集电路输出的功率密度值,可以描绘出光斑三维图。

根据获得数据,测试激光器发射光斑中心位置在 8 通道所处的水平位置,造成光斑中心位置附近 6~9 通道收到的光功率值相对较高,而 1~5 通道探测模块接收到的光功率值较小;数据采集过程中,受到大气湍流及靶面抖动的影响,同一探测模块偶尔出现有光功率密度陡变的现象。

3 测试误差分析

3.1 误差产生原因

在进行远场实际测试中,整个测量系统会引入一定的误差,该类型误差属于随机误差,跟测试环境、测试方法以及操作人员相关,引入环节及相关消除方法如下:

(1) 测试系统外界地理条件

测试车辆处于抖动、不平整、运动结构运动状态等均可能引入误差。消除方法:首先尽量选择平整的测量场地,其次设置车辆调平机构,在一定范围里微调测试测量,设置水平仪检测靶面与水平面相对位置情况。

(2) 机构运动引入误差

当外场测量时,靶面受风的影响会造成机械抖动,影响测量精度,机械抖动越大,测量误差越大,测量时最好是选择无风或微风的气象条件。如果

靶面采用的是扫描时结构,探测器扫描运动时也会产生机械抖动,影响测量精度,消除方法是采用驻点扫描方式,即当靶板运动到一个位置点时,稳定工作一段时间后的数据认为有效。

(3) 入射角度引入误差

该误差是测量系统最大误差引入量,也是最难消除的误差,这是远场测量系统都面临的一个难点,其根本原因是,在远场测量时,由于测试设备与被测设备很难处于同一个水平面上,所以无法确保被测激光发射光轴与测量系统的光学入射光轴两轴一致。图 3 为入射角度误差形成示意图。

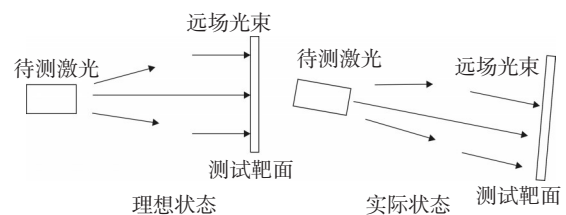


图 3 入射角度误差形成示意图

这样测试得到的结果仅为测试光束在一个方向的矢量分量。同时由于为了保证远场测量时准确测试光束入射至,一般测量靶板均为小视场设计,因此当误差大于视场角时入射光无法进入视场,探测单元无法探测。通过光学软件,设定光源功率 1 W,波长 2~12 μm ,建立光学系统模型进行仿真,分析探测器光敏面上的光功率密度分布,仿真结果如表 3。

表3 仿真结果

光束入射角度 θ (°)	光敏面上平均功率 密度/W/mm ²	与正入射比率 /%
0	0.028 90	100
2	0.028 87	99.9
4	0.025 94	89.8
6	0.018 89	65.4
7	0.015 25	52.8
8	0.011 09	38.4
9	0.004 53	15.7
10	0.000 008 0	2.8

如上述分析,入射角度与探测通道法线角度 6° 时,下降为垂直入射的65.4%, 7° 时下降为垂直入射的52.8%, 8° 时下降为垂直入射的38.4%, 9° 时下降为垂直入射的15.7%, 10° 时下降为垂直入射的2.8%。由于入射角度不可测定,因此入射角度的影响是试验的主要引入误差。

3.2 消除误差的方法

入射角度误差是系统主要引入误差,其根本解决途径只有一条:两轴重合法,即发射光轴与接收光轴重合一致,要取得该效果有以下解决方法。

(1)双方光学望远镜互相瞄准,优点结构简单、不增加额外设备;缺点精度较差。

(2)双方均安装一台可见激光器,小发散角度互相瞄准,优点精度较高;缺点:测试前进行事前校准。

(3)采用在靶板上安装可见激光器和CCD跟踪相机,其与靶板光轴,在发射端安装反射镜,反射镜与待测激光器光路同轴,通过CCD相机跟踪光点同时输出偏差量曲线,进行理论补偿。优点精度极高,操作方便;缺点:费用较高,技术难度大。

综合考虑,采用第一种方法与第二种方法结合的方式,同时在测试过程中应当微调靶板,进行反

复多次测量,由于入射光功率最大值为其垂直入射值,当斜入射时功率密度一定小于垂直入射值,因此在多次测量中选取稳定最大值作为其功率密度,第三种方法可以在后续的试验中验证。

4 结 论

文中将设备工作的各环节误差进行分解测试,准确测出定量静态测量精度,同时结合工作模式建立测量模型,得到分布误差,进而建立设备精度体系,为激光远场特性测量设备的研制提供测试方法。

参考文献

- [1] 贾养育,任劭.基于探测器阵列的激光远场光斑测量系统[J].激光与红外,2009,39(1):1324-1327.
- [2] 熊成钢,张海庄.探测器阵列法测量激光远场光斑能量密度算法研究[J].光学与光电技术,2012,10(3):22-24.
- [3] 邢晖,曲卫东.激光远场直接探测系统探测器阵列靶板的设计[J].激光与红外,2006,36(7):531-533.
- [4] 张合勇,郭劲.激光远场聚焦特性实验研究[J].中国激光,2011,38(3):1-6.
- [5] 李现勤,程兆谷.激光束在大气中远距离传输聚焦特性的研究[J].光学学报,2001,21(3):324-329.
- [6] 王飞,谢永杰,戢运峰,等.一种测量大面积激光束光强分布的复合阵列[J].中国光学,2012(6).
- [7] 段刘华,谢永杰,戢运峰,等.量热阵列式激光束能量分布测量系统研制[J].红外与激光工程,2010(6).
- [8] 徐光勇,吴健,杨春平,等.大气中的激光传输的光束漂移问题研究[C]//2007年光电探测与制导技术的发展与应用研讨会论文集,2007.
- [9] 陈志斌,刘羽翔,薛明晰,等.点阵式上转换板在激光光斑采集中的应用研究[J].应用光学,2011(6).
- [10] 冯国斌,杨鹏翎,王群书,等.强激光远场光斑强度分布测量技术[J].强激光与粒子束,2013(7).