

文章编号: 1001-5078 (2006) 07-0531-03

激光远场直接探测系统探测器阵列靶板的设计

邢 晖, 曲卫东, 雷 萍, 刘 灵
(中国人民解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要:设计了一种激光远场直接探测系统,对系统中的两个关键问题进行了讨论,一、在探测器阵列靶板尺寸的确定问题上讨论了激光的衍射效应和大气湍流的影响;二、在探测器阵列靶板分辨率的确定问题上讨论了激光的衍射效应和大气湍流的影响;对第二问题讨论了对其有影响的三个方面:大气湍流引起激光碎斑尺寸,由采样定理决定的空间采样率,由阵列探测器的频谱函数引起的损失。这些影响都是在设计时必须予以充分考虑的因素。

关键词:探测器阵列靶板;大气湍流;空间采样率;光束漂移;激光碎斑

中图分类号: TJ06 **文献标识码:** B

Design for Detector Array Target of Laser Far Field Detect System

XING Hui, QU Wei-dong, LEI Ping, LIU Ling
(No. 63880 Units of People's Liberation Army, Luoyang 471003, China)

Abstract: A detector array target of laser distant-field detect system is designed, and two key factors are analyzed. To determine the size of the array target, the laser diffract effect and the influence of atmospheric turbulence are discussed, three factors that influence the resolution of the array target are analyzed. Three factors are the dimension of laser speckle resulted by atmospheric turbulence, space sampling frequency based on sampling theory and the loss of the frequency spectrum function of the array detector. All of these must be matured in design.

Key words: detector array target; atmospheric turbulence; space sampling frequency; beam shift; laser speckle

1 引 言

大功率激光是对精确制导武器、光电侦察告警、跟踪测量设备进行干扰、致盲甚至摧毁的重要手段。激光对抗武器系统的作战效能与到达被干扰对象有效部位的远场激光能量及光斑质量密切相关。本文设计的激光直接探测系统,目的主要就是为了测量能量为焦耳级的强激光束经过长距离大气介质作用后形成的光束截面能量场分布数据,并进一步探索激光与大气介质相互作用深层次规律,为激光对抗武器系统作战效能的定量评估提供依据。该系统的工作原理为,由均匀分布在靶板上的激光能量探测器阵列直接探测数公里外发射的强激光光斑,然后经数据采集与处理系统记录和处理测量数据得到激光光束总能量、空间能量密度、光斑能量中心等参

数。本文主要讨论设计中的两个关键问题:探测器阵列靶板的尺寸和分辨率的确定。

2 探测器阵列靶板尺寸的设计

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。

激光对抗武器系统多采用强激光,为在远端获得更高的激光能量密度,一般设计有望远镜激光准直系统,出光口径一般在 30 ~ 60cm,光束发散角一般在 0.5mrad 以下。不考虑衍射效应和大气介质影

作者简介:邢 晖 (1972 -),男,工程师,学士学位,主要从事光电对抗系统测试与评估。

收稿日期: 2006-02-08;修订日期: 2006-03-21

响时,激光光斑的大小为:

$$\sigma_0 = 2L \arctan(\sigma_0/2) + D \quad L_0 + D \quad (1)$$

式中, L 为激光传输距离; σ_0 为光束发散角; D 为出光口径。

大气介质对激光光斑的影响主要为光束扩展和光束漂移,光束扩展分为长期扩展和短期扩展,对脉冲激光,主要考虑的是短期光束扩展,对准直激光束,其光束扩展的方差^[11]为:

$$\sigma_1^2 = \frac{16L^2}{k^2} [1 - 0.62(\tau/D)^{1/3}] f^{6/5} \quad (2)$$

其中, τ 为大气湍流相干长度^[11]为:

$$\tau = \left[1.46k^2 \int_0^L C_n^2(z) \left(1 - \frac{z}{L}\right)^{5/3} dz \right]^{-3/5} \quad (3)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$ 为波数; C_n^2 为湍流结构常数。上式为大气传输路径上的积分。

由于光斑短期扩展造成的光斑大小变化范围为 $\sigma_0 \pm 3\sigma_1$, 大气对激光光斑的调制,不仅可以使光束变宽,也有可能使光束变窄。

光斑漂移的幅度一般用光斑中心漂移的均方差来表示。对于准直激光束,光斑漂移方差的理论计算公式^[12]为:

$$\sigma_2^2 = 6.08L^2 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z) dz \quad (4)$$

不考虑激光束对探测器阵列靶板的瞄准误差,考虑正态分布理论的 3 σ 规则^[13]: 其值落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 内的概率为 0.9974。探测器阵列靶板的尺寸为:

$$D_b \geq \sigma_0 + 3\sigma_1 + 6\sigma_2 \quad (5)$$

假定出光口径为 30cm, 光束发散角 0.2mrad, 激光波长为 10.6 μ m, 传输距离为 3km, 传输路程为地面水平传输, C_n^2 沿传输路径水平均匀分布, 取值为 10^{-13} 。经计算 $\sigma_0 = 0.9$ m, $\sigma_1 = 0.158$ m, 斑漂移方差 $\sigma_2 = 0.157$ m, 因此在不考虑激光瞄准误差的情况下, 对本例的激光器和传输距离, 探测器阵列靶板的尺寸不小于 1.997m。若激光波长变为 1.06 μ m, 其它参数不变, 则阵列靶板尺寸应不小于 2.17m。

上面的计算和分析说明, 靶板尺寸的设计中, 湍流引起的光束扩展和漂移对光斑大小的影响较大, 都须加以考虑。

3 探测器阵列靶板分辨率的设计

阵列靶板分辨率的设计主要考虑激光光斑信息损失。设计中使用激光探测器阵列来探测激光光斑能量分布, 由于各探测器光敏面之间间隔的存在, 必会造成激光光斑信息的损失。探测器间隔决定了探测器阵列靶板的分辨率, 所以需要考虑在保证能基

本恢复激光光斑的前提下, 选择合适的探测器阵列靶板分辨率, 以便尽可能少用探测器, 节约经费。探测器阵列靶板分辨率的确定主要由三方面决定: 大气湍流引起的激光碎斑尺寸; 由采样定理决定的空间采样率; 由阵列探测器的频谱函数引起的损失。

3.1 大气湍流引起的激光碎斑尺寸

大气湍流对激光光斑的影响规律是该探测系统的主要研究对象, 大气湍流造成的激光强度起伏是影响激光对抗武器系统作战效能的重要因素。在局部接收 (即光斑尺寸远大于接收系统口径) 时, 在传输路径上湍流结构常数相对较稳定时, 激光强度起伏服从对数正态分布。对于准直激光束, 远场接收时, 可用下式计算对数强度起伏方差^[11]:

$$\sigma_{\ln I}^2 = 1.228 \left(\frac{2}{\lambda}\right)^{7/6} L^{11/6} C_n^2 \quad (6)$$

上式的适用条件是 $b \leq \sqrt{L} \leq L_0$, 其中 b 和 L_0 分别为大气湍流的内、外尺寸。物理概念上理解, \sqrt{L} 是从发射点向接收端看去的第一菲涅尔带尺寸, 也可称为强度闪烁的相干长度^[11]。在该尺寸范围内, 各点的强度闪烁相关, 并出现最大闪烁效应, 大于该尺寸时, 强度闪烁互不相关。我们将 \sqrt{L} 称为菲涅尔区尺寸, 记为 D_F 。

激光束经过大气介质传播距离后, 由于闪烁效应的影响, 光斑会分成很多小单元的非涅尔区, 即激光碎斑现象, 激光碎斑的平均直径即为 D_F 。图 1 是激光束传输 2km 后的激光光斑形状。



图 1 远场激光光斑图样示例

由上面分析可知, 在每个小单元的非涅尔区内必须有一个探测器单元, 以便保证测量数据基本可以复现该区域的激光能量。传输距离为 3km 时, 常用的 1.06 μ m 和 10.6 μ m 激光的非涅尔区尺寸分别为 56.4mm 和 178.3mm。

探测器阵列的信息损失还与布阵方式有关。据几何学原理, 蜂房式结构为最佳布阵方式, 常用的布阵方式还有均匀布阵, 如图 2 所示。

在同样大小的区域中, 若单元格径向尺寸相等, 蜂房式布局需要的探测器数量多于均匀布局, 但获

得的信息量同样多于均匀布局,其比值为 1 0. 86,即均匀布局的信息损失比蜂房式布局多 14%。

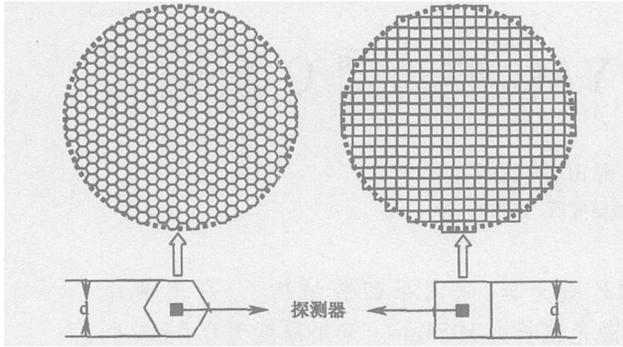


图 2 阵列探测器布阵方式示意图

假设激光碎斑尺寸的起伏很小,都集中在菲涅尔区尺寸附近,激光碎斑为严格的圆形光斑,其直径为 D_F ,面积为 S_F ,探测器阵列单元间距为 d ,单元格面积为 S_d ,则布阵方式引起的信息损失率为:

$$= (1 - \frac{S_F}{S_d}) \times 100\% \tag{7}$$

3.2 空间采样率

准直激光束通过直径为 D 的圆形孔径光阑在空间传播时,仅考虑衍射效应,其空间截止频率^[1]为:

$$v_0 = \frac{D}{2L} \tag{8}$$

大气光学传递函数的研究表明,一个从发射器或其它光源发出的具有高空间相干性的光波,由于大气湍流的作用,其波前的空间相干性大大降低,大气湍流相当于一个低通滤波器,大气湍流造成的空间截止频率^[1]为:

$$v_1 = \frac{r}{2L} \tag{9}$$

激光光斑的空间截止频率可取上两式中较小者,通常大气湍流造成的空间截止频率都小于衍射效应造成的空间截止频率。由信号分析理论可知,空间采样率必须大于其截止频率的 2 倍,才能使采样信号不失真地表示原信号,因此采样间隔应满足:

$$= \frac{1}{2m \ln(0, 1)} \tag{10}$$

仍按第 2 节中例子提供的参数计算, $1. 06\mu\text{m}$ 和 $10. 6\mu\text{m}$ 激光光斑的采样间隔分别至少为 $0. 574\text{m}$ 与 $0. 362\text{m}$ 。

3.3 探测器阵列频谱函数的影响

众所周知,光学系统的调制传递函数事实上是其传输函数的傅立叶变换的幅度频谱,设单元探测器为边长为 a 的矩形,响应均匀,则其幅度频谱函

数^[4]为:

$$H_0 = \left| \frac{\sin(af_x)}{f_x} \right| \left| \frac{\sin(af_y)}{f_y} \right| \tag{11}$$

探测器单元间距 b , $n \times n$ 规模阵列的幅度频谱函数为:

$$H = \left| \frac{\sin(af_x)}{f_x} \frac{\sin(nbf_x)}{\sin(bf_x)} \right| \left| \frac{\sin(af_y)}{f_y} \frac{\sin(nbf_y)}{\sin(bf_y)} \right| \tag{12}$$

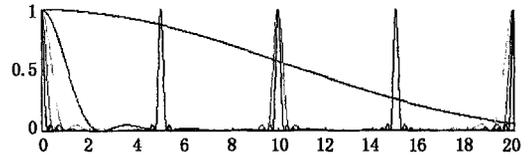


图 3 不同探测器间距所对应的频谱图

图 3 绘出了单元探测器 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、 20×20 阵列,以纵坐标为中心,从内到外间距分别为 20、10、5、2. 0. 2cm 时的频谱图,横坐标空间截止频率设为 20m^{-1} 。

从图 3 中可以看出:探测器间距越小,探测器面积越大,即占比空越大, H 函数的通带越宽,即失真越小,反之则失真越大。

经以上讨论可知:大气湍流引起的激光碎斑尺寸是确定探测器阵列靶板分辨率的主要影响因素。

4 结束语

在设计野外激光阵列靶板时,如果靶板尺寸大,空间分辨率高,则所需的探测器就多,经费也高。所以在能够保证基本恢复完整的激光光斑的前提下,尽可能地减小靶板尺寸,降低其空间分辨率。选用探测器时,在保证测试灵敏度的前提下,应选用探测面元较大的探测器。本文主要从这个角度出发,讨论了影响靶板尺寸和空间分辨率的各种因素,需要根据这些因素来确定靶板的最小尺寸和空间分辨率。这些影响因素都是在设计时必须予以充分考虑的。

参考文献:

- [1] Frederick G Smith Atmospheric Propagation of Radiation, Bellingham [J]. Optical Engineering, 1993: 159 - 229.
- [2] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春,等. 湍流大气中激光束漂移的试验研究 [J]. 中国激光, 2000, (11): 1011 - 1015.
- [3] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [4] 王仕. 信息光学理论与应用 [M]. 北京: 邮电大学出版社, 2004, 84 - 116