

文章编号: 1001-3806(2008)03-0252-03

对光纤阵列激光告警器定向算法的改进

陈 蔚¹, 曹益平^{1*}, 龚赤坤², 曾钦勇², 甘春泉²

(1. 四川大学 光电科学技术系, 成都 610064 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了在不增加光学接收窗口数目的情况下提高光纤阵列激光告警器的定向精度, 采用了一种新的告警定向算法, 该算法将光纤延迟波形图从二维扩展到三维, 并基于幅值强度矩阵进行角度解算, 同时加入了虚警抑制。实际测试中对定向算法改进前后的告警角度分辨率进行对比, 其绝对误差由 5° 改善到了 2° 。结果表明, 该改进算法可以显著地提高告警器的定向精度。

关键词: 激光技术; 激光告警; 定向算法; 角度分辨率; 光纤延迟线

中图分类号: TN971 **文献标识码:** A

Improvement of the directional detection algorithm of fiber-array laser warning receivers

CHEN Wei¹, CAO Yiping¹, GONG Chi-kun², ZENG Qin-yong², GAN Chun-quan²

(1. Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract In order to improve the accuracy of directional detection with the same number of optical channels in the fiber array laser receiving antenna, a new directional detection algorithm was proposed, in which the two-dimension waveform data of time delay was expanded into three-dimension data and the angles were calculated based on the matrix of echoed laser intensity, and the suppression of false alarm was also considered. Comparing the angular resolution with this algorithm before and after, its absolute accuracy was improved significantly from 5° to 2° . It is seen that this algorithm can obviously improve the accuracy of directional detection.

Key words laser technique; laser warning; directional detection algorithm; angular resolution; fiber delay lines

引 言

采用光纤阵列体制的激光告警器方案最早由 HALLDORSSON, POISEL 等人提出^[1,3], 之后 BAI 等人^[4]在此编码技术基础之上, 通过比较相邻光学窗口接收到的激光信号幅值来判定来袭激光的方位角^[4]。该算法实现起来比较简单, 但是存在两大问题, 一是要想提高告警器的定向精度必须增加光学窗口的个数, 结构上更复杂; 二是该方法仅适用于单排窗口的水平角度定向, 而对于俯仰角度定向则无能为力。

为解决上述问题, 在之前的研究基础之上, 作者结合数字图像处理技术提出了一种新的定向算法, 在不增加光学窗口数目情况下, 提高光纤阵列激光告警器的定向精度。

1 系统组成及工作原理

光纤阵列激光告警器的告警天线为半球形, 最高点设有一个中心光学接收窗口, 零延迟接收半球空域内任何方向的来袭激光, 即为告警天线中心窗口。余下的半球表面设置 216 个光学接收窗口, 分 6 排, 每排 36 个, 每个光学接收窗口加光阑设计为矩形视场, 水平、俯仰视场均为 25° , 间隔 10° 排列, 组成告警天线测向窗口。光纤输入端作为激光信号的入射平面置于光学接收窗口的焦平面上。光学接收窗口与光纤一一对应, 相邻窗口对应光纤的长度按 5m 递增, 以构成光电探测器接收时间延迟, 形成所谓光纤延迟线。所有的光纤进行集束, 出射端面对准共用光电探测器的光敏面。系统单排测向窗口的组成局部简图及其视场分割如图 1、图 2 所示。告警天线单列测向窗口的组成与视场分割与单排原理相同。

首先考虑单排测向窗口的定向原理。当激光脉冲到达告警天线时, 在告警器接收动态范围内^[5], 假设有 3 个测向窗口接收到激光信号, 可以得到如图 3 所

作者简介: 陈 蔚 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光信息处理和三维传感技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

收稿日期: 2007-05-24 收到修改稿日期: 2007-07-06

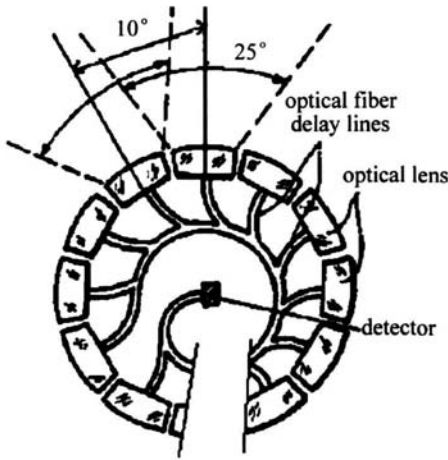


Fig. 1 Diagrammatical sectional view of fiber-array laser receiving antenna

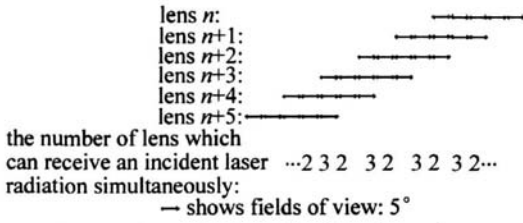


Fig. 2 The overlapping fields of the adjacent lens

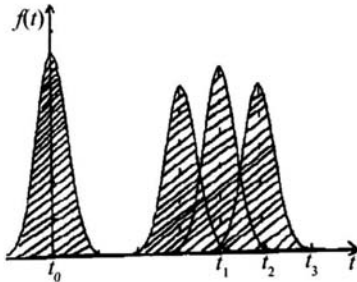


Fig. 3 Waveform diagram of the time delay

示的波形图, t_0 为零延迟中心窗口接收到激光脉冲的时刻, t_1, t_2, t_3 分别为测向窗口对应的激光脉冲到达时间。延迟时间 Δt_i 为: $\Delta t_i = t_i - t_0$ ($i = 1, 2, 3$) (1) 按波形图面积比重法求解各延迟激光脉冲的波形权重系数 ε_i :

$$\varepsilon_i = A_i / \sum_{i=1}^m A_i \quad (2)$$

式中, A_i 为 t_i 对应的波形面积, m 为除中心窗口波形外的波形数。

由于 $\Delta t_1, \Delta t_2$ 和 Δt_3 分别与相应光学窗口的水平区域覆盖角 Φ_1, Φ_2, Φ_3 成正比, 则加权延迟时间可由下式得出:

$$\Delta t = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i t_i - t_0 \quad (3)$$

根据 Δt 与来袭激光入射水平角的一一对应关系, 由内插法求出该角度值^[4]。同理, 来袭激光俯仰角度的确定算法与此类似。

2 对定向算法的改进

2.1 光纤延迟波形图从二维到三维的扩展

图 3 所示的光纤延迟波形图为 $v = f(t)$ 二维函数,

计算来袭激光角度时是分别考虑单排、单列位置的测向窗口, 然后计算水平及俯仰角。现将这两个步骤结合起来考虑, 视光纤阵列即测向窗口为 6×36 的二维矩阵 M , 矩阵的每一个元素对应一个测向窗口, 也就对应其矩形视场。根据 Δt_i 、光纤延迟线长度 l_i 和测向窗口位置 (行、列对应编号为 p, q) 的一一对应关系, 对采集到的二维光纤延迟波形图进行数据还原。

由于激光告警器对来袭激光脉冲的波形不做识别, 可以近似认为激光脉冲波形面积为 $A_i = \tau \cdot v_i$, τ 为脉冲半峰全宽, v_i 为脉冲幅值, 代入 (2) 式可得:

$$\varepsilon_i = v_i / \sum_{i=1}^m v_i \quad (4)$$

则波形图面积比重法与幅值比重法等效。由于与各测向窗口耦合的光纤长度不同, 对应的光纤透过率则各不相同。并且激光信号的接收是采用透镜聚焦的方式, 存在机械加工及人为装配误差, 各窗口的光纤耦合效率是不一样的。上述两个因素导致各测向窗口对应光学通道的衰减量不一致, 采用实测法来确定各测向窗口的衰减因子。

将各测向窗口对应的激光脉冲幅值 v_{pq} 通过相应的衰减因子修正后依次对应填入矩阵 M , 得到幅值矩阵 M' :

$$M' = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & \dots & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & \dots & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $m = 6, n = 36$ 。这样相当于将采集到的光纤延迟信号由二维函数 $v = f(t)$ 转换为三维函数 $v = f(m, n)$, 实现了光纤延迟波形图从二维到三维的扩展。

2.2 结合数字图象处理方法的定向算法

对于单次来袭激光脉冲, 总会得到 (5) 式所示的一个 6×36 的幅值矩阵 M' 。为简化分析, 考虑到激光告警天线设计上的对称性, 将告警天线一分为二, 先对水平角度覆盖为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的半系统进行分析。这样幅值矩阵 M'' 维数为 6×18

$$M'' = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n'} \\ v_{21} & \dots & \dots & v_{2n'} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & \dots & \dots & v_{mn'} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $m = 6, n' = 18$

实际应用中, 对光电探测器输出波形进行后续处理时要先设置阈值电平, 以抑制噪声干扰引起的虚警。将光电探测器视作匹配滤波器, 其输出噪声电流为高斯型, 则阈值电流 I_{th} 为:

$$I_{th} = I_n \cdot \sqrt{-2 \ln(2\sqrt{3}t_p r_{\text{FAR}})} \quad (7)$$

式中, I_n 为噪声电流, t_p 为激光脉冲宽度, r_{FAR} 为激光告警器允许的虚警率^[6]。对于低于阈值的电信号, 其电压以 0V 代替处理。所以矩阵中至少有 4 至 9 个元素为有效值, 大部分元素的数值为 0 其余为少部分超过阈值电平噪声干扰值。

由前面分析可知, 同一时刻最多有 3×3 个测向窗口能够接收到信号, 这些信号反映到 6×18 的光学窗口矩阵中就是一个 3×3 的子矩阵。将 M'' 视为一幅 6×18 像素的图像, 元素值 v_{pq} ($1 \leq p \leq m, 1 \leq q \leq n', p \in N, q \in N$) 为对应像素的灰度值。为了进一步滤出干扰信号, 结合数字图像处理中空间滤波的方法^[7], 构造一个 3×3 的系数值全为 1 的矩阵 ω 作为掩膜矩阵:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

计算掩膜矩阵与幅值矩阵 M'' 的卷积, 对 M'' 代表的图像进行平滑线性滤波, 产生一 6×18 的滤波响应矩阵。保留该响应矩阵的 9 个大值元素, 其余作为噪声元素剔除, 设其中最大值在第 x 行, 第 y 列, 则该 3×3 矩阵为:

$$N = \begin{bmatrix} v_{(x-1)(y-1)}' & v_{(x-1)y}' & v_{(x-1)(y+1)}' \\ v_{x(y-1)}' & v_{xy}' & v_{x(y+1)}' \\ v_{(x+1)(y-1)}' & v_{(x+1)y}' & v_{(x+1)(y+1)}' \end{bmatrix} \quad (9)$$

这 9 个元素所在的位置也就是接收到信号的测向窗口所在的位置:

$$W = \begin{bmatrix} v_{(x-1)(y-1)} & v_{(x-1)y} & v_{(x-1)(y+1)} \\ v_{x(y-1)} & v_{xy} & v_{x(y+1)} \\ v_{(x+1)(y-1)} & v_{(x+1)y} & v_{(x+1)(y+1)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据测向窗口的视场 25° 及视场间隔 10° , 可得出来袭激光水平角 α 俯仰角 β 值:

$$\begin{cases} \alpha = 185 - 175 \times (18 - y) / 17 \\ \beta = 65 - 55 \times (6 - x) / 5 \end{cases} \quad (11)$$

这是利用光学窗口的视场交叠得出的来袭激光入射角度值, 所计算出的角度分辨率为 5° 。为了在不增加测向窗口个数的条件下进一步提高告警器的角度分辨率, 可以通过计算矩阵 W 的二维重心, 对水平角和俯仰角进行修正。矩阵 W 的二维重心为:

$$\begin{cases} G_x = \sum_{u=1}^3 \sum_{v=1}^3 ([-1 \ 0 \ 1] \times W^T) / \sum_{u=1}^3 \sum_{v=1}^3 W \\ G_y = \sum_{u=1}^3 \sum_{v=1}^3 ([-1 \ 0 \ 1] \times W) / \sum_{u=1}^3 \sum_{v=1}^3 W \end{cases} \quad (12)$$

式中, W^T 是 W 的转置矩阵。 G_x 和 G_y 为 W 二维重心的坐标, 分别对应水平角和俯仰角的修正值。则修正后的水平角和俯仰角为:

$$\begin{cases} \alpha' = \alpha + G_x \\ \beta' = \beta + G_y \end{cases} \quad (13)$$

将 (11) 式、(12) 式代入 (13) 式便可计算出来袭激光的入射角度值。

3 测试数据及分析

光纤阵列激光告警器样机由告警天线、光纤盒、信息处理机及显示器 4 部分组成, 其中半球形告警天线底面直径为 317mm, 高度为 147mm。由告警天线结构可知, 同一激光脉冲到达各光学窗口的时间不同, 即各测向窗口与中心窗口有一个固有的时间差, 该时间差最大为 $\frac{317\text{mm}}{2} \cdot \frac{1}{c} \approx 0.53\text{ns}$ (c 为真空中光速), 相对于 5m 光纤造成的 25ns 时延在分析计算时可以忽略。为减少系统体积和降低成本, 采用多通道组合技术对光纤长度进行优化, 将 216 根光纤分为 8 组光纤 (每组 27 根, 长度均由 5m 开始递增), 每组光纤采用 Y 型集束耦合至单个探测器并统一编码, 同时进行 8 路数据采集。

参照 GJB3684-99《激光侦察告警设备通用规范》中对激光告警器角度分辨率的测试方法, 在室外对样机的角分辨率进行了实验测试, 部分水平方向的测试结果如表 1 所示。

Table 1 Result of angle measurement

actual angle	test angle I	angular error I	test angle II	angular error II
45°	45.4°	0.4°	45.6°	0.6°
38°	39.6°	1.6°	39.7°	1.7°
22.5°	22.3°	-0.2°	22.3°	-0.2°
11.5°	9.8°	-1.7°	10.1°	-1.4°
7.5°	7.7°	0.2°	7.7°	0.2°

通过对 30 个激光威胁源共 90 次的角分辨测试数据, 计算出角度分辨的绝对误差最大值为 2° , 这是根据激光告警中概略定向的角度分辨误差计算方法所得到的结果。到目前为止, 还没有明确的对精定向激光告警器的角度分辨率的测试方法^[8], 只能参照针对战场侦察雷达的相关检测条例。依据 GJB1289-91《战场侦察雷达战术性能试验方法》, 设备系统误差 $M_0 = 0.5267^\circ$, 随机误差 $\sigma_0 = 0.9401^\circ$ 。

4 结 论

由实测结果可知, 改进定向算法后, 光纤阵列激光告警器在水平、俯仰方向上能同时定向, 且角度分辨的绝对误差由 5° 改善到了 2° , 系统误差及随机误差更是小于 1° , 有效地提高了系统处理效率及定向精度。并且在定向解算的过程中加入了对虚警的抑制, 使得告

(下转第 258 页)

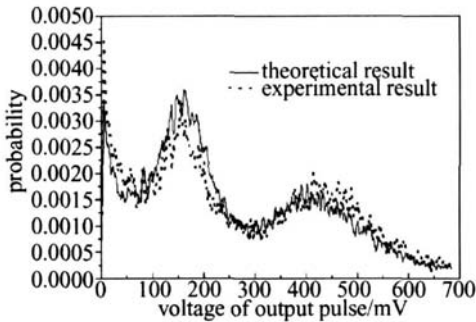


Fig 5 Comparison between signal amplitude response function of experiment and theory of mixed particles group

线是根据(10)式计算出的理论值 σ_t , 虚线为实际测量值 σ_e 。用同样的方法计算两条曲线的相关系数:

$$P_{1e} = \frac{\langle \sigma_t(V), \sigma_e(V) \rangle}{\| \sigma_t(V) \|_2 \| \sigma_e(V) \|_2} = 0.976 \quad (12)$$

可以看出, 理论和实验结果吻合度非常高, 说明了混合粒子群的信号幅度响应函数是由其中所包含的单径粒子群所产生的信号幅度响应函数的线性叠加组成, 其权重为该粒子在总粒子群中所占的比重。

4 结 论

分析了单粒子在尘埃粒子计数器中的信号传输特性, 包括其散射光收集特性、光电转换特性, 在此基础上分析了单径粒子群信号分布的统计特性。指出当粒径发生变化时, 信号幅度响应函数的形状不变, 但展宽和峰值的位置会发生变动; 同时指出展宽的大小主要由传感器的性能所决定。另外分析了混合粒子群在传感器中的信号传输特性, 指出混合粒子群的信号幅度响应函数是由其中所包含的单径粒子群所产生的信号幅度响应函数的线性叠加组成, 其权重为该粒子在总

粒子群中所占的比重。揭示了尘埃粒子计数器信号传输的本质是将粒子群的粒径分布描述方式按线性方式转换成相应的脉冲信号幅值分布描述方式, 从而建立起尘埃粒子计数器信号传输的完整的数学模型。

参 考 文 献

- [1] HUANG H J, ZHOU H X. Improvement on optics of optical particle counter [J]. *Optical Instruments*, 1994, 16(2): 10-14 (in Chinese).
- [2] LIANG Ch L, HUANG H J, REN B Q. Study of miniature optical sensor for laser particle counter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1260-1264 (in Chinese).
- [3] LI Z Y, LIU Zh Q, YE Y. Study on the effects of selection and process of the holography film for inline particles holography [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 617-620 (in Chinese).
- [4] BIAN B M, HE A Zh, WU D L. Reflexive speckle image of the point light source in the laser airborne particle counter for 0.1 μ m and its processing [J]. *Journal of Optoelectronics* Laser*, 1997, 8(4): 246-250 (in Chinese).
- [5] BIAN B M, HE A Zh, CHENG X F. Study of signal amplitude distribution for single particle in airborne particle counter [J]. *Journal of Southeast University*, 1999, 29(1): 145-149 (in Chinese).
- [6] YANG L, CHENG X F, BIAN B M. The study of transmission of light scattering signal of particles [J]. *Journal of Optoelectronics* Laser*, 2000, 11(1): 89-91 (in Chinese).
- [7] ZHOU L X, LI R, SHENG D F. PLC controlling stamping machine [J]. *Journal of Suzhou Institute of Silk Textile Technology*, 2005, 21(3): 45-49 (in Chinese).
- [8] GAO Y F, ZOU L X, HUANG H J. Influence of the light source in airborne laser particle counter on the flux of transducer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(3): 45-49 (in Chinese).
- [9] HAN G C, WANG Y W. The influence of two definitions for arbitrary particles on the shape-affecter [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 520-523 (in Chinese).
- [10] REN Zh B, LU Zh W, LIU Y L. Study of Mie normalized scattered intensity distributions [J]. *Journal of Optoelectronics* Laser*, 2003, 14(1): 83-85 (in Chinese).
- [11] position information U S 5025148 [P]. 1991-06-18
- [12] HALLDORSSON T, SEIFFARTH E A. Laser radiation warning sensor utilizing polarization U S 4682024 [P]. 1987-06-21.
- [13] BAIXM, ZHOU X J, ZENG Q Y. Measurement method of azimuth angle for laser beam [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 278-280 (in Chinese).
- [14] GE Q Sh, GONG Ch K. Research of vehicular laser passive reconnaissance warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 248-250 (in Chinese).
- [15] GE Q Sh, GONG Ch K. Reconnaissance performance analysis for vehicular laser warning device [J]. *Laser and Infrared*, 2003, 33(3): 176-177 (in Chinese).
- [16] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2002, 91-95 (in Chinese).
- [17] YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 98-102 (in Chinese).
- [18] YANG Y H, ZENG Q Y, LÜ B Ch. Optimization design of the length encoder of optical fiber delay lines [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 438-441 (in Chinese).

参 考 文 献

- [1] HALLDORSSON T, MANHART S, SEIFFARTH E A. Laser detection device U S 4674874 [P]. 1987-06-23
- [2] POISEL H, TROMMER G. Laser warning sensor with frequency-coded

(上接第 254 页)

警系统的虚警率指标更优。为了使光纤阵列激光告警器的定向更加精确、系统更加可靠, 考虑在如下几个方面进行更进一步的研究: (1) 在修正激光脉冲幅值时, 修正因子中涉及到的光纤衰减系数考虑为定值, 但实际测试中发现, 光纤衰减系数随着入射激光能量的强弱变化有一定的改变, 并不是一个固定值; (2) 对水平角和俯仰角的修正, 是通过计算测向窗口矩阵 W 的二维重心坐标, 该算法应该还有进一步改进的空间; (3) 光纤的长度直接影响告警天线的体积, 可以对光纤长度编码进行优化^[9], 用最短的光纤实现高精度光纤阵列激光告警。