

锥形光纤在多窗口激光告警系统中的应用研究

周 瑞¹, 张记龙^{1,2}, 王志斌^{1,2}, 王艳超¹, 景 宁¹

(1. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 为了实现激光告警系统的抗干扰性及宽视场, 文章提出应用锥形光纤进行光学探头的设计。该方法是采用端面有锥角的光纤并与光电二极管直接耦合连接实现光电转换, 通过测量电压值来表示入射光的能量。文章根据激光告警系统设计要

关键词: 激光告警; 多窗口探测; 锥形光纤

中图分类号: TN24

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2012)02-0023-04

Study on applications of tapered fibers in multi-window laser alarming systems

Zhou Rui¹, Zhang Jilong^{1,2}, Wang Zhibin^{1,2}, Wang Yanchao¹, Jing Ning¹

(1. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to realize laser alarming systems with high anti-jamming property and wide field of view, this paper proposes a design scheme for the optical probe by applying tapered fibers. It implements the photovoltaic conversion by the direct coupling of a tapered fiber with a photodiode and indicates the energy of the incident light by measuring the voltage value. It analyzes the selection of the angle of the tapered fiber and the received fiber energy and conducts the relevant experiments according to the alarming system design requirements. The experimental data show that this method can amplify the detection field of the alarming system.

Key words: laser alarming; multi-window detection; tapered fiber

0 引言

激光技术的广泛应用,特别是激光设备和激光武器(如激光测距机、激光目标指示器、激光架束制导武器和激光致盲武器等)在军事领域的大量应用,极大地提高了武器在战场上的命中率和杀伤力。面对这些激光威胁,光电对抗技术成为业界关注和研究的重点。准确、快速、大范围地掌握入射激光的方向、波长等特征是及时有效地做出反应的重要前提,所以研究开发大视角快速响应技术,从而提高激光告警设备的识别能力、分辨力、探测范围、反应速度及抗干扰能力是非常必要的^[1-2]。目前用于激光告警系统的激光方向测量方法可分为4种类型:多窗口探测型、成像型、掩膜型和相干探测型。为了大范围、快速获取入射激光的方向,本文采用多窗口探测方法对激光告警系统进行了设计^[3]。

1 方案设计

1.1 激光告警系统接收机设计

单个窗口的视场与所需窗口数有关。我们通过

实验计算得知12个窗口就可以满足探测视场水平0~360°、垂直0~90°的要求^[4]。多窗口激光告警系统原理示意图如图1所示。

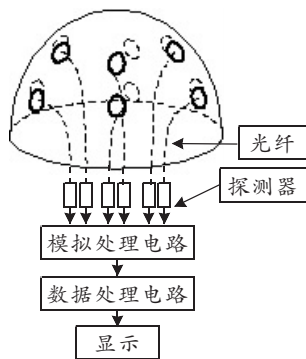


图1 多窗口激光告警系统原理示意图

图中,无论来袭激光从那个方向入射,总能被一个或者多个探测窗口所接收,我们在每个窗口前端放置了滤光片,对接收到的激光信号进行光学滤波,去除无用波长上的光干扰,再由光纤将信号传递给探测器,探测器接收到激光信号后产生响应电流,电流转换成电压信号,经滤波、放大和比较处理后再将电平信号传递给单片系统处理,最后通过程序分析判断出激光的入射方向。

1.2 视场分析

该系统设计的水平视场分为上下两层,每层由

收稿日期:2011-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61040062);科技部国际合作项目(2010DFR10520);山西省科技平台建设项目(2010091013);山西省国际合作计划项目(2010081038);山西省研究生创新项目(20081017);山西省青年科技研究基金资助项目(2010021015-2)

作者简介:周瑞(1983-),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事光电信息处理的研究。

6个探测窗口组成。如图2所示, T_1 、 T_3 为水平方向的两个相邻的探测窗口, 每个窗口对应的独立视场为 75° , 左右相邻窗口重叠的角度为 15° , 6个窗口覆盖 360° 。将该视场 90° 范围内分成3个区域, 则对应的是 T_1 有响应、 T_3 无响应, T_1 、 T_3 都有响应和 T_1 无响应、 T_3 有响应等3种情况, 实现最小 30° 的角分辨率。 T_1 、 T_2 为垂直方向的两个探测器, 分别在 30° 和 60° 的位置, T_1 、 T_2 两探测器单个的视场为 30° , 重叠的视场为 30° , 这样就覆盖了 90° 的区域^[4]。

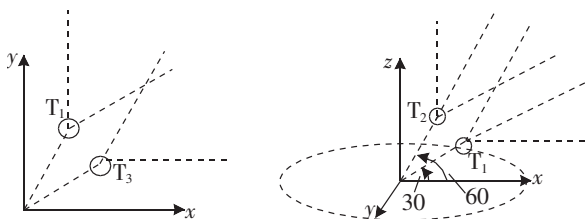


图2 水平、俯仰角示意图

2 光学探头的设计

2.1 锥形光纤角度分析

根据要探测的 0.85 、 1.06 和 $1.54 \mu\text{m}$ 波长激光在光纤中的衰减系数的不同, 本设计选用了 Polymicro 公司的双石英光纤 (型号: FIP400-440), 该光纤的材料为 SiO_2 (石英玻璃), 光谱传输范围为 $0.38 \sim 2.40 \mu\text{m}$, 根据石英光纤参数得知 3 个波长处的衰减系数都 $< 4 \text{ dB/km}$ 。但该光纤的 NA (数值孔径) 为 0.22 ± 0.02 , 所以视场为 $-12 \sim 12^\circ$, 无法满足该系统的视场要求, 因此需要对光纤进行视场增大设计。本系统采用锥形光纤设计来改善视场。

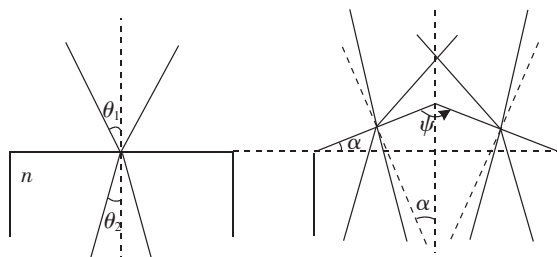
图3(a)所示为 $\text{NA} = 0.22$ 的普通光纤, θ_1 为所对应的视场角, 由 $\text{NA} = \sin\theta$ 得到

$$\theta_1 = \arcsin(\text{NA}) = 12.5^\circ. \quad (1)$$

光纤的折射率 n 大于空气的折射率, 对应的 $\theta_1 > \theta_2$,

$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right)$ 为光入射到光纤中时可以有效传输的最大角度。如果入射光角度 $> \theta_2$, 则会发生外泄, 光强会衰减, 所以在设计锥形光纤时要求入射光的角度 $\leq \theta_2$ 。

图3(b)所示为端面有一定锥角的光纤。当光纤锥角为 α 时, 原来垂直入射光纤表面的光相当于以 α 角入射, 以右侧入射为例, 入射后的光由于折射更加偏右侧, 则左侧的角度小于原 NA 对应入射光纤后的 θ_2 角度, 由此可以得出进一步增大入射光的向右偏转, 当向右偏转到入射光纤角度 $\theta = \theta_2$ 时, 达



(a) 普通光纤

(b) 有一定锥角的光纤

图3 普通光纤与锥形光纤视场示意图

到入射光在右边入射角度极限。

图4给出了光线入射过程的角度变化, 假设入射光平面与入射端平面平行。

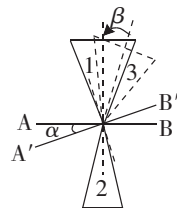


图4 光纤表面角度改变而引起视场的变化

当光纤端面为平面时, 以 $\triangle 1$ 形成的视场区域 θ_1 入射到光纤 AB 平面后对应 $\triangle 2$ 形成的视场区域 θ_2 。由于所选光纤是一定的, 所以折射率不变。无论光纤端面如何变化, 入射视场区域不变的情况下, 出射视场区域是一定的, 由此将视场区域 $\triangle 2$ 作为入射光, 入射到光纤的视场则由入射光视场 $\triangle 3$ (虚线) 表示, 从而可以得知入射光视场 3 与原光视场 1 的关系是端面偏转角度 α 。当角度 $\beta = 0.5\theta_1$ 时, 视场是由 1 和 3 区域视场构成, 而且是原来视场的两倍。

当探测视场大于所选 NA 的光纤对应的视场的两倍时, 探测视场 $\phi = \varphi + 2\theta_1$, φ 为视场变量。那么所对应的 $\beta = \frac{1}{2}\varphi + \frac{1}{2}\theta_1$, 由法线垂直的关系得: $\alpha = \beta, \phi = 180^\circ - 2\alpha$, 则有

$$\phi = 180^\circ - 2 \left[\frac{1}{2}(\phi - 2\theta_1) + \frac{1}{2}\theta_1 \right] = 180^\circ - (\phi - \theta_1).$$

(2)

由式(2)可知, 光纤锥角角度 ϕ 与探测视场 ϕ 和光纤 NA 所对应的入射角 θ_1 是线性关系, 因此为了满足系统需要的探测视场, 可以通过改变光纤锥角大小及改变光纤 NA 的方法来实现。本告警系统光纤已经选定, 故 NA 是一定的, 所以增大视场的主要手段为改变锥形光纤锥角的大小。当然, 视场也不是越大越好, 随着视场的增大会造成入射的光能量衰减, 因此在达到系统探测范围的基础上选择光纤的锥角角度是非常必要的^[5]。

2.2 锥形光纤能量分析

我们对曲面所接收的光能量进行分析,如图 5(a)所示。设锥角为 ψ , 光纤芯径为 L , 光入射角为 γ , 光入射到不同位置 X 时对应的夹角为 σ 。

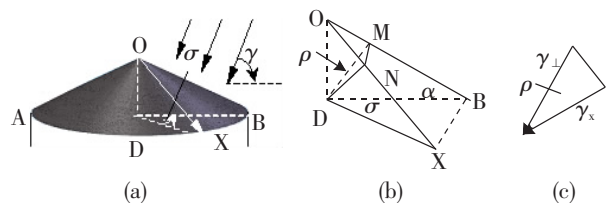


图 5 光以任意位置入射到光纤示意图

入射光角度 γ 可以分解为垂直 OB 边和平行 OB 边的两个分量,则垂直分量 $\gamma_{\perp} = 90^{\circ} - \angle OBA$ 。

入射光在 OB 边上是入射光平面与入射端平面平行的特殊情况,如图 5(b)所示,而一般的入射情况是在 OX 上,得

$$\cos \rho = \frac{DM^2 + DN^2 - MN^2}{2DM \cdot DN}, \quad (3)$$

因为 OB 、 OX 的垂线在同一个高度,所以 $DM = DN$, 则有 $DM = DB \sin \alpha = L \sin \alpha / 2$, 得出

$$MN = \sqrt{(1 - \cos \rho) L \sin \alpha / 2}. \quad (4)$$

根据余弦定理得 $BX = DX^2 + DB^2 - 2DX \cdot DB \cos \sigma$, 因为 $MN / BX = OM / OB$, $OB = OD / \sin \alpha$, $OE = OD \sin \alpha$, 得

$$MN = \frac{1}{2} L^2 (1 - \cos \sigma) \sin^2 \alpha. \quad (5)$$

由公式(4)和(5)得

$$\cos \rho = 1 - \frac{1}{2} L^3 (1 - \cos \sigma)^2 \sin^3 \alpha. \quad (6)$$

由图 5(c)可知, $\gamma_{\perp}$ 在 OX 上产生的分量是关于 ρ 的函数,设分量值为 γ_x , 有 $\gamma_x = \gamma_{\perp} \tan \rho$, 其中 γ_x 表示 OB 转角度 σ 在 OX 切面上的垂直分量,它直接反映入射光能。由于角度 σ 在 $0 \sim 360^{\circ}$ 之间线性变化,因此

$$\gamma_{\text{总}} = \gamma_{\perp} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tan \left\{ \arccos \left[1 - \frac{1}{2} L^3 (1 - \cos \sigma)^2 \sin^3 \alpha \right] \right\} d\sigma. \quad (7)$$

3 光学探头入射光角度能量实验

为实现光能的测量,我们把光纤与光电二极管直接耦合连接进行光电转换,通过测量电压值来表示光能。耦合连接能使光电二极管最大程度地接收入射到光纤中的光信号以达到更好的响应效果。

根据该系统的设计要求,入射光以 30° 入射时,光纤探测器有响应。我们对 12 组光纤探头进行了实验。先将光纤探头固定在圆形转台的中心位置,用功率为 5 mW 的激光器做光源,从正对光纤的位置开始旋转,记录入射角度改变时出射光纤光强的变化,由于光强与响应电流成正比,故采用电阻转变成电压来探测电压的值。表 1 为其中 6 组光纤的测试数据。由表 1 可见, $-30 \sim 30^{\circ}$ 内的电压全部在 3.3 V 以上,最高电压为 5.299 V。在视场内相应的电压值变化比较缓和,能够达到该激光告警系统的响应电压。

表 1 入射角度变化时对应的电压值

角度/ $^{\circ}$	光纤序号(对应电压/V)					
	1	2	3	4	5	6
30	3.425	3.356	3.539	3.377	3.425	3.459
25	3.629	3.981	4.135	3.754	3.762	3.712
20	4.745	4.765	4.651	4.635	4.691	4.631
15	5.134	5.282	5.156	5.074	5.051	4.945
10	5.138	5.231	5.264	5.177	5.176	5.145
5	5.148	5.257	5.284	5.258	5.138	5.227
0	5.087	5.165	5.211	5.267	4.784	5.041
-5	5.265	5.235	5.299	5.259	5.239	5.236
-10	5.232	5.149	5.256	5.157	5.156	5.138
-15	4.972	5.024	5.034	5.015	4.781	5.037
-20	4.451	4.658	4.758	4.678	4.647	4.671
-25	3.527	3.991	3.917	3.962	3.841	3.756
-30	3.365	3.542	3.547	3.638	3.435	3.471

4 结束语

激光告警系统应该具有视场大、抗干扰能力强、稳定性高和成本低等特点。针对以上特点,本文采用了多窗口的方法进行激光告警系统的整体设计,并且采用锥形光纤作为接收光信号的光学探头。对锥形光纤的锥角选取及锥形光纤能量计算进行了分析,并做了入射光角度能量实验,实验结果表明,锥形光纤能够满足大视场的要求。

(上接第16页)

况更平稳。主要原因是噪声的存在对ICA算法模型引入了强烈的非线性,从而使偏振解复用分离性能下降。只有在低噪声的情况下输出信号之间的互信息才能得到最小化。不过,我们可以把噪声也看成是一个独立的源信号,通过ICA算法将其分离出来。

3 结束语

本文针对偏振复用系统传输矩阵的特点,将基于互信息最小化的ICA算法应用到光纤偏振复用系统输出信号的分离中,通过星座图和眼图分析了基于互信息的ICA算法的解复用效果。仿真结果表明,该方法在无需任何先验知识的情况下,可以很好地分离出原始信号,解决了两个正交偏振态上的信号产生串扰的问题,达到了成倍提高系统容量和传输速率的目的。

参考文献:

- [1] Jutten C, Herault J. Independent component analysis versus PCA [M]. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1988. 287-289.
- [2] Comon P. Independent component analysis: a new concept [J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-

参考文献:

- [1] 付伟. 激光告警中的几种先进技术 [J]. 光电技术, 2000, 91(1): 5-10.
- [2] 张锦. 国外激光威胁告警器发展现状及评价 [J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 307-310.
- [3] 何武光, 吴健, 王仕璠. 激光探测光学系统设计 [J]. 光电工程, 2006, 33(7): 48-51.
- [4] 郭豪, 马娜, 王敏, 等. 法布里-珀罗型探测器激光入射角度的测量方法分析 [J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 280-282.
- [5] Gao Zhan. Static Fourier-transform spectrometer with spherical reflectors [J]. Applied Optics, 2002, 41(3): 560-563.
- 288.
- [3] Cichocki A, Amari S I. A daptive blind signal and image processing [M]. New York: Wiley, 2002.
- [4] Roberts S, Everson R. Independent component analysis: principles and practice [M]. UK: Cambridge University Press, 2001. 19-25.
- [5] 黄振川, 杨小牛, 张旭东, 等. 基于独立分量分析的通信侦察复信号盲分离 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(1): 86-91.
- [6] 付卫红, 杨小牛, 刘乃安, 等. 基于独立分量分析(ICA)的通信信号盲侦察技术 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2007, 44(6): 1245-1249.
- [7] 刁国影, 胡贵军, 李公羽, 等. ICA在模式群分集复用系统输出信号分离中的应用 [J]. 通信学报, 2010, 31(9): 118-121.
- [8] 杨福生. 独立分量分析的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [9] Cardoso J F, Laheld B. Equivariant adaptive source separation [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(12): 3017-3018.
- [10] Tsekrekos C P, Boer M de, Martinez A, et al. An experimental investigation of the mode group diversity multiplexing technique [A]. IEEE LEOS Benelux Symposium 2005 [C]. Mons, Belgium: Eindhoven University of Technology, 2005. 161-164.