

基于光电探测器的激光章动定位算法

陈果¹,吴浩瀚¹,赵明²

(1.国网广安供电公司,四川 广安 638000; 2.四川大学 电子信息学院,成都 610065)

摘要:在激光通信系统中,激光光斑的检测精度对于通信系统具有重要意义。为了提高光斑定位精度,提出采用基于光电探测器的激光章动定位算法,分析了空间光到单模光纤耦合基本原理,研究了横向偏移对耦合效率的影响,推导了章动定位算法的表达式,利用 Matlab 仿真分析了章动算法的定位精度和影响章动扫描的参数。仿真结果表明:章动定位算法得到的光斑定位精度为 $0.04\ \mu\text{m}$,满足通信系统对于光斑检测的要求。

关键词:光电探测器;激光章动;光通信;光斑检测

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)12-0042-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Laser nutation positioning algorithm based on photodetector

CHEN Guo, WU Haohan, ZHAO Ming

(1.State Grid GuangAn Power Supply Company, Guang'an Sichuan 638000, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In the laser communication system, the detection accuracy of the laser light spot is of great significance to the communication system. In order to improve the accuracy of light spot positioning, a laser nutation positioning algorithm based on photodetector is proposed, the basic principle of space light to single mode fiber coupling is analyzed, and the effect of lateral offset on coupling efficiency is studied, and the expression of the nutation positioning algorithm is derived. In this paper, the positioning accuracy of nutation algorithm and the parameters affecting nutation scanning are analyzed by Matlab simulation. The simulation results show that the positioning accuracy of the nutation positioning algorithm is $0.04\ \mu\text{m}$, which meets the requirements of the communication system for light spot detection.

Key words: photodetector; laser nutation; optical communication; light spot detection

0 引言

近年来,激光通信已经广泛应用在航天、激光雷达等通信领域中。对于通信系统来说,决定通信性能的主要因素为通信过程中激光光斑的检测精度。在激光通信系统中,为了完成空间光的接收,常选用单模光纤进行耦合。但是,在实际通信时,由于受到大气湍流、大气衰减或接收平台抖动等因素的影响,造成通

信接收端在空间光到单模光纤耦合时出现模场不匹配的情况,使接收光斑出现偏移的现象,从而影响通信系统的性能。

2009年,王强等人^[1]采用基于时间序列的预报补偿算法,对随机振动的耦合效率最大可提高至63.73%;2014年,韩琦琦等人^[2]以电荷耦合器件(CCD)相机作为接收端,闭环控制偏转振镜,最大耦合效率改善率达到54.73%;2019年,朱世伟等人^[3]分析了倾斜像差对耦合效率的影响,并对其影响参数进行了仿真分析^[3]。以上3种方法虽然都实现了光纤耦合效率的闭环补偿,但是补偿系统比较复杂,不利于激光系统小型化设计,且在补偿时未考虑光斑的定位精度问题。为此,本文基于模场匹配的基本原理,采用激光章动扫描技术,推导激光章动算法计算光斑脱靶量的流程,并仿真分析各影响参数对光斑定位精度和耦合效率的影响。

收稿日期:2020-03-10。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:78865567)资助;国网广安供电公司(批准号:521916160001)资助。

作者简介:陈果(1975—),男,四川南充人,高级工程师,国网广安供电公司副经理,主要研究方向是电力系统及自动化。分管企业基础管理工作,累计开展各类项目108项,获得国网四川省电力公司表彰65项,其中国家级1项,省部级6项。



1 单模光纤耦合原理

通信系统的激光发射端将激光发射后,经过远距离传输到达光学系统接收端时,可以看作是平面波,通过透镜聚焦到单模光纤端面上,形成艾里斑。图1为光纤耦合的基本原理框图。其中, D 为入射光束的直径, f 为透镜的焦距, w_0 为单模光纤的模场半径, E_A 为入射光瞳面处的平面波场, E_0 表示平面波会聚到后焦面所形成的艾里斑模场, F_A 为单模光纤反向传输到入射光瞳面处的模场, F_0 为焦平面上的单模光纤传输模场。

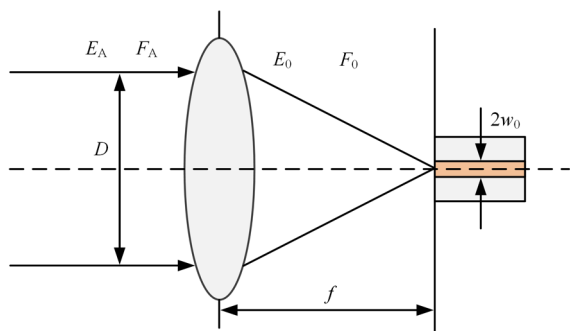


图1 光纤耦合原理

在入射光瞳面上计算空间光到单模光纤的耦合效率与在焦平面上计算耦合效率是等价的^[4],本文得到在入射面上推导耦合效率的计算公式,耦合效率的表达式为:

$$\eta_c = \frac{\left| \iint E_A^*(r_a) F_A(r_a) ds \right|^2}{\iint |E_A(r_a)|^2 ds \cdot \iint |F_A(r_a)|^2 ds} \quad (1)$$

其中, ds 为二重积分的微元, $E_A(r_a)$ 为入射光在入射焦平面上的光斑模场,*表示复共轭。入射光瞳面上 r_a 处的单模光纤后向传输模场 F_A 的表达式为:

$$F_A(r_a) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r_a^2}{\omega_a^2}\right) \quad (2)$$

其中, ω_a 为后向传输模场半径。

通过对式(1)进行化简,可以得到发生横向偏移时耦合效率的表达式为:

$$\eta_c = \frac{1}{\pi R^2} \left| \int_0^R \sqrt{\frac{8\pi}{\omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r_a^2}{\omega_a^2}\right) J_0\left(\frac{2\pi}{\lambda f} r_a r_b\right) r_a dr_a \right|^2 \quad (3)$$

其中, λ 为波长, R 为透镜的半径, r_b 为光斑横向偏移量, J_0 为贝塞尔函数。

为了分析横向偏移对耦合效率的影响,对化简后的耦合效率的公式进行了仿真,得到耦合效率随横向偏移的变化曲线如图2所示。可以看出,随着偏移量的增大,耦合效率呈现一直下降的趋势。

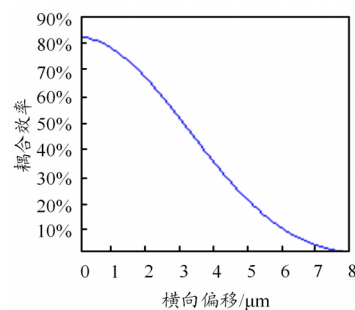


图2 耦合效率随横向偏移的变化曲线

2 章动系统原理与定位算法

2.1 章动系统原理

激光经过远距离传输后,受到大气湍流、衰减和天空背景光等因素的影响,使光斑发生破碎或者能量衰减,从而造成光斑检测误差增大^[5]。为了提高跟踪精度,需要优化光斑检测算法,本文采用激光章动技术实现光斑脱靶量的计算。激光章动系统原理框图如图3所示。

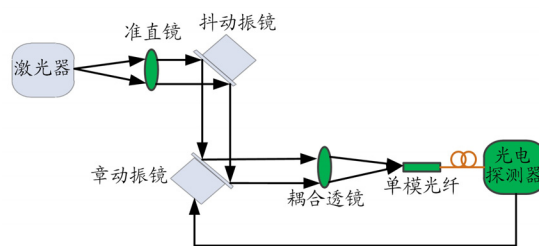


图3 激光章动系统原理框图

激光章动系统主要有激光器、准直镜、抖动振镜、章动振镜、耦合透镜、单模光纤和光电探测器组成。激光器发射的激光束经过准直镜后扩束成平行光,经过抖动振镜和章动振镜反射后,在耦合透镜的作用下汇聚到单模光纤中。光电探测器用于检测光电流的大小,并输出电压信号。章动的基本工作原理是通过改变章动振镜的两轴电压值,从而改变激光束的方向,使其围绕光纤端面做圆周扫描运动。当聚焦光斑运动到光纤中心处时,根据上节中的理论推导可知,此时的单模光纤的耦合效率最大。当周期扫描到其它位置时,耦合效率就会出现周期性变化。激光章动系统在闭环反馈控制下,光电探测器计算出的光斑坐标信息会控制章动振镜完成跟踪收敛。即使光斑发生了抖动或偏移,但是在章动扫描一周后,探测器输出电压值总会有最大值。这样,在闭环反馈控制下,系统控制章动振镜的扫描步长,使光斑不断向光纤中心处收敛。

2.2 章动定位算法

实验前,首先需要对光路进行调节,保证经过抖动振镜和章动振镜反射后的光束聚焦在单模光纤上。为了找到最佳耦合位置点,本文采用光栅式扫描寻找聚焦光斑的位置;确定好最佳耦合点后,对振镜的两轴分别输入正弦和余弦电压,使聚焦光斑沿这光纤端面做半径为 R_0 的圆周扫描运动。在光纤输出端,采用光电探测器接收光信号,实现光信号到电信号的转换。

光电探测器的负载电阻为 R_L ,扫描后检测到的最大输出电压为 $V_{\max}$,则最大光电流为:

$$i_{\max} = \frac{V_{\max}}{R_L} \quad (4)$$

根据响应度的定义,可以得到最大光电流下接收光功率表达式为:

$$P_{\max} = \frac{i_{\max}}{R} \quad (5)$$

假设信号光经过通信系统的精跟踪子系统后,接收到的光斑发生了偏移,偏移后的光斑点为 A_1 ,激光章动扫描示意图如图 4 所示。采用章动扫描后,光电探测器的输出电压值也会出现周期性变化。本算法的关键是寻找电压最大值,如果已经找到扫描后的电压最大值,就会得到进入到光电探测器内相应的光功率值。当通信系统接收到的光斑的能量为 P_i ,利用式(4)和式(5)

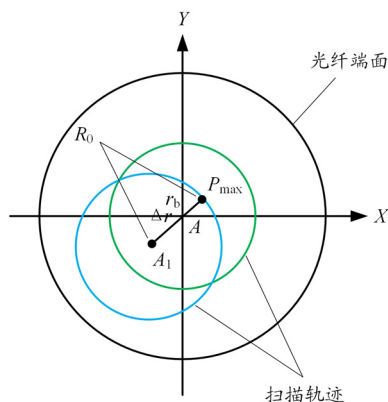


图4 激光章动扫描示意图

计算得到的光功率的最大值为 $P_{\max}$,则耦合效率的计算公式可以表示为:

$$\eta(r_b) = \frac{P_{\max}}{P_i} \quad (6)$$

本文通过式(3)的逆运算得到横向偏移量 r_b 。根据图4中的几何关系,可以得到光斑发生偏移的相对量为:

$$\Delta r = R_0 - r_b \quad (7)$$

在控制振镜产生周期性扫描时,注意优化选取章动半径,防止半径过大使光斑移出接收端面外,产生其它误差,降低光斑检测精度。当检测到探测器输出电压最大值时,记录扫描到该点的时间,得到对应的坐标值为:

$$x_0 = R_0 \cos(wt_1) \quad (8)$$

$$y_0 = R_0 \sin(wt_1) \quad (9)$$

其中, w 为圆周运动的角速度,可表示为 $w = 2\pi f_1$, t_1 为扫描的时间, f_1 为扫描时的频率。当光斑发生 β 角度偏转时,光斑中心 A_1 的相对脱靶量为:

$$\Delta x = \Delta r \cos \beta \quad (10)$$

$$\Delta y = \Delta r \sin \beta \quad (11)$$

$$\beta = \arctan(y_0 / x_0) \quad (12)$$

本文利用章动定位算法实现了光斑偏移量的计算,其计算流程如图5所示。该算法的关键是寻找每一个扫描周期时光电探测器的输出最大电压值,控制章动振镜对经过章动扫描后计算出来的光斑坐标进行逐级补偿,进一步优化章动扫描的半径,提高光斑检测精度和跟踪精度。因此,对通信接收端的电路设计要求比较高,需要综合考虑探测器的接收灵敏度和响应度。

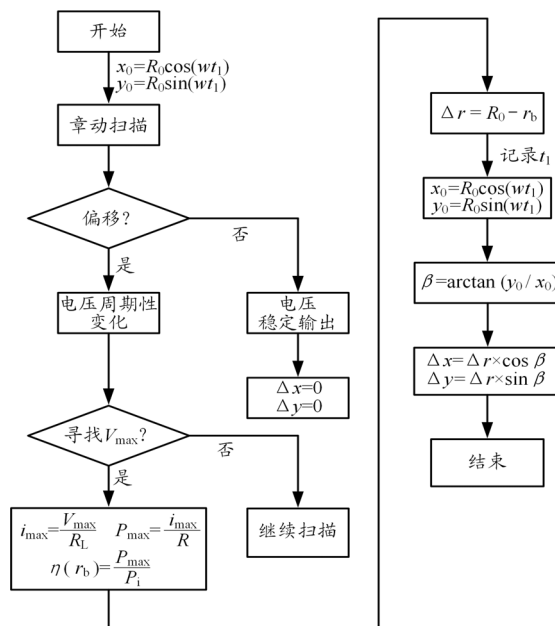


图5 章动定位算法流程图

3 算法仿真

为了验证章动定位算法的可行性与跟踪精度,本文采用 Matlab 进行仿真。在仿真时,预先使光斑发生已知偏移量,然后采用章动定位算法计算偏移后的坐标点,算出坐标点与原坐标的误差值,观察定位精度是否在可允许的范围内,仿真参数如表1所示。

光电探测器选用滨松公司的 G8931-04 型雪崩光电二极管(APD),用于接收单模光纤输出端的光信号。考虑到仿真结果的可行性,将光电探测器内的噪声信号(如暗电流噪声、附加噪声、散粒噪声和热噪声)也加入到仿真环境中。章动半径可根据耦合效率的损失

表 1 章动算法仿真参数

参数类型	参数	性能指标
光电探测器	波长	1550 nm
	暗电流	40 nA
	光敏面	0.04 mm
	增益	10
	响应度	0.9 A/W
	负载电阻	3 k Ω
章动参数	波长	1550 nm
	单模光纤半径	4.5 μm
	采样点	40
	章动半径	2 μm
	输入光功率	-30 dBm

量来选择,本算法仿真时选用半径为 2 μm 进行扫描。在实际应用时,需要综合考虑通信信噪比和角度误差要求来优化选取。

仿真时,本文假设光斑偏移的后坐标为(2.5 μm , 1.5 μm),一个章动周期内的采样点数为 40 个,扫描一个周期需要 10 ms,扫描 3 个周期后分别找出 3 个周期内电压值的最大值,按照图 5 的计算流程,得到计算后的光斑偏移量,仿真得到的曲线图如图 6 所示。图 6(a)为扫描后的电压值的变化曲线,在 3 个周期内,电压值是呈现周期性变化的,其中最大值都为 7.03 mV。这也说明了章动定位扫描的稳定性良好。由于采用的接收探测器是 APD,雪崩增益为 10,利用式(4)可以得到相应的光电流值,变化曲线如图 6(b)所示,可以看出

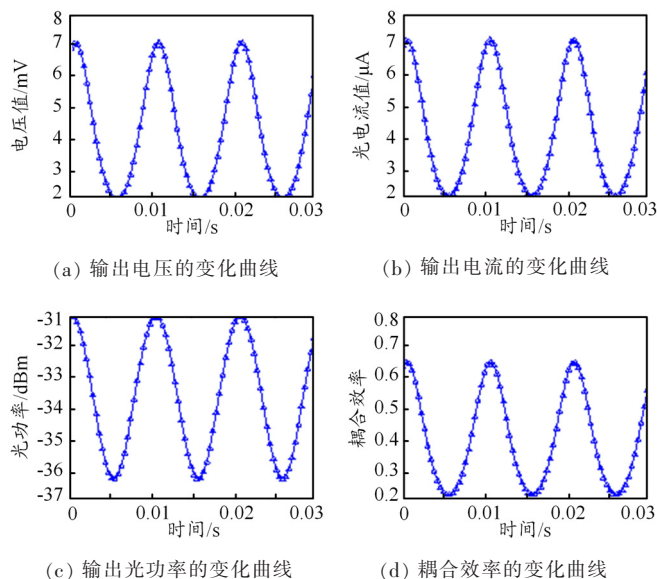


图 6 章动扫描曲线变化

光信号转换后的光电流也呈现周期性变化。图 6(c)为光功率的曲线变化,图 6(d)为耦合效率的变化曲线。经过计算得到,耦合效率的最大值为 0.78。利用式(6)的逆运算得到光斑横向偏移量 r_b 为 0.915 μm ,光斑坐标为 (2.482 μm , 1.525 μm),与原坐标的计算误差在 0.02 μm 左右。

为了进一步验证章动定位算法的精确度,另取 4 个坐标点,利用章动定位算法进行仿真,仿真结果如表 2 所示。可以看出,在不同偏移量下,采用章动定位算法计算得到的光斑定位精度在 0.04 μm ,完全满足通信系统对于光斑定位精度的要求。

表 2 不同偏移量下章动定位算法计算结果

偏移量/ μm	计算结果/ μm	定位精度/ μm
(3.5, 1.5)	(3.518, 1.457)	0.04
(-2.5, 2)	(-2.486, 1.823)	0.02
(-1.7, -1.5)	(-1.725, -1.473)	0.02
(2, -4)	(1.939, -4.045)	0.04

通过对式(8)和式(9)的分析,可以发现章动半径的选择决定了圆周扫描的路径。如果选择的章动半径过大,会造成扫描时光斑移出单模光纤的接收端面,探测器接收到的光功率会出现不连续的现象,无法准确检测光斑位置。对于章动半径的选择,需要根据检测到的耦合效率的损失量来优化选取。本文在 Matlab 中仿真分析了选择不同的章动半径时探测器输出电压值和耦合效率的变化情况,分别如图 7 和图 8 所示。表 3 为不同章动半径下所得到的定位结果。可以看出,章动半径的选择会影响光斑定位精度,当半径取 1.5 μm 时,得到的光斑定位精度为 0.02 μm ;随着章动半径的增大,其定位精度值也会变大。这是因为半径的增大导致接收到的光功率降低,光斑信噪比下降造成定位精度值增大。

为了验证系统对动态扰动下的光斑坐标计算精

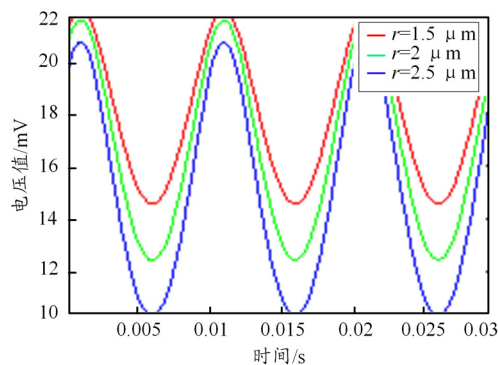


图 7 不同章动半径下电压值变化

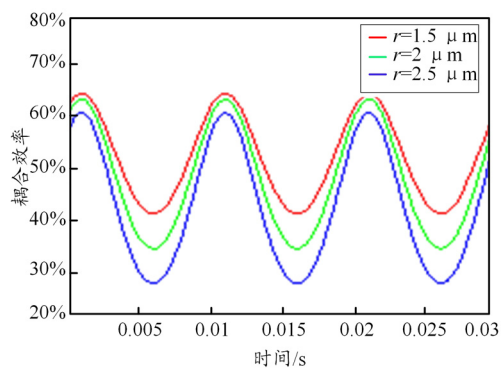


图8 不同章动半径下耦合效率变化

表3 不同章动半径下章动定位算法计算结果

偏移量 / μm	章动半径 / μm	电压值 / mV	计算结果 / μm	定位精度 / μm
(1,1)	1.5	21.95	(0.08,1.02)	0.02
(1,1)	2	21.61	(1.03,0.793)	0.03
(1,1)	2.5	20.77	(1.049,1.038)	0.04

度,在抖动振镜处引入了由 Matlab 生成的符合正态分布的随机信号,用来模拟光斑位置的随机抖动现象。仿真时选用扫描半径为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、采样点数为 100 个进行章动扫描,得到抖动状态下耦合效率曲线如图 9(a)所示。图中左侧为开环状态下引入随机抖动信号后章动扫描得到的耦合效率曲线图,其平均耦合效率为 54.24%。可以看出,在随机抖动情况下,单模光纤的耦合效率变化比较大。在章动扫描后,按照图 5 的章动算法流程图,计算得到光斑坐标后,启动闭环控制,通过优化章动扫描的半径,使光斑在坐标点附近运动,耦合效率提高到 62.4%。图 9(b)为扫描半径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、采样点数为 100 个时的耦合效率曲线图,虽然闭环控制下耦合效率也在逐渐收敛,但由于扫描半径过大,导致了耦合效率波动幅度过大的现象,抑制效果较差。

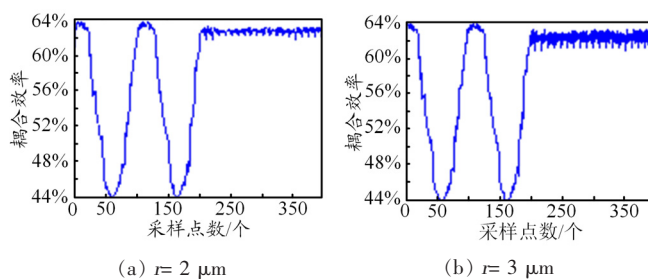


图9 抖动状态下耦合效率曲线

4 结束语

激光通信系统由于大气湍流、平台振动等影响,使光斑出现偏移,降低了光斑检测精度。为了提高跟踪精度,根据单模光纤耦合原理,采用以光电探测器为接收系统的激光章动定位算法。本文仿真分析了章动定位算法计算光斑的定位精度,提高了单模光纤的耦合效率。但同时也存在一些问题,比如该算法可以对静态光斑横向偏移、一定频率内的动态干扰进行光斑检测;一旦扫描半径超出范围后,会使耦合效率波动幅度过大,其抑制效果并不好;在周期扫描内采样点数的增加会使系统的响应速度下降。在实际应用时,需要综合考量光斑脱靶量计算精度要求、单模光纤的耦合效率和系统的响应速度等。

参考文献:

- [1] 王强. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [2] 韩琦琦,王强,马晶,等. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿实验研究[J]. 红外与激光工程,2014,43(3):933-939.
- [3] 朱世伟,盛磊,刘永凯,等. 基于能量反馈的单模光纤激光章动耦合算法[J]. 中国激光,2019,46(2):165-170.
- [4] 罗文. 基于自适应光纤耦合器的单模光纤耦合技术研究[D]. 成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2014.
- [5] 张世强,张政,蔡雷,等. 基于单透镜的空间光-单模光纤耦合方法[J]. 强激光与粒子束,2014,26(3):41-45.