

激光二极管与单模光纤自动对准搜索算法*

淳 静 吴宇列 戴一帆 李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院 ,湖南 长沙 410073)

摘 要 针对激光二极管与单模光纤的自动对准 ,从搜索路径规划和参数选择出发 ,给出五自由度自动对准搜索算法解决方案 ,为了提高搜索效率 ,提出新的指数函数拟合算法应用到 XY 平面的搜索过程中 ,给出了算法的基本原理和实现方法。实验证明 ,与爬山法相比 ,这种算法由于减少了采样点数而缩短了搜索时间 ,从而提高了自动对准的速度。

关键词 激光二极管 ;单模光纤 ;对准算法

中图分类号 :TN929. 11 文献标识码 :A

The Searching Algorithm for Alignment Automation between a Laser Diode and a Single-mode Fiber

CHUN Jing , WU Yu-lie , DAI Yi-fan , LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

Abstract :The five-dimension searching algorithm is presented for the alignment automation between a laser diode and a single-mode fiber. The searching path and the parameters are discussed in detail. The novel exponential function approximation algorithm for XY plane searching is also presented first. The experimental results with these algorithms are finally presented. It is confirmed that the searching efficiency of the exponential function approximation algorithm is better than the hill-climbing algorithm. The main reason is that the sample points are reduced. Thus the alignment speed is improved notably.

Key words laser diode ;single-mode fiber ;alignment algorithm

在光纤通信系统中 ,为提高信号传输能力与保真度 ,一方面需要降低光纤的传输损耗 ,另一方面必须提高光源与光纤的耦合效率。随着光纤加工工艺与制造技术的日益提高以及新型光纤的出现 ,光纤传输损耗已经达到很低的水平 ,而光源与光纤的耦合损耗问题越来越显得突出。由于单模光纤带宽上的优势和激光光源良好的相干特性、优异的调制性能等原因 ,实用的光纤通信系统主要由半导体激光器和单模光纤组成。激光器与单模光纤的对准是提高耦合效率的关键问题和影响光纤器件封装性能的主要因素。

激光二极管 (LD)与单模光纤 (SMF)的自动对准过程一般分为两个阶段 :粗对准与精密对准^[1]。粗对准的任务是找到初始的光功率耦合 ,所以又称盲目搜索 ,主要有光栅扫描和外螺旋两种方法 ,比较而言 ,采用外螺旋方法更加有效 ,速度也更快。精密对准即峰值功率搜索一般为 2D 或 3D 搜索 ,算法原理主要基于美国 Newport 公司提出的爬山法^[3]。但是爬山法存在搜索时间较长和可能找不到耦合功率最大点的缺陷 ,而且仅仅是 2 维或 3 维的搜索没有考虑到角度对准误差引起的耦合损耗。本文基于 LD 与 SMF 单透镜耦合模型 ,给出以爬山法为基础的五自由度自动搜索解决方案 ,并在此基础上 ,提出基于指数函数拟合的自动对准搜索算法 ,这种搜索算法的最大特点就是减少采样点数 ,从而提高搜索效率。

* 收稿日期 2004 - 06 - 12

基金项目 :国家自然科学基金重点资助项目(50235040)

作者简介 :淳静(1972—) ,男 ,博士生。

1 激光二极管与单模光纤耦合对接平台

1.1 耦合模型

人们对 LD 与 SMF 的耦合方法进行了大量的研究,主要包括直接端面耦合、透镜耦合、光纤微透镜耦合三种类型。LD 与 SMF 直接端面耦合的最大耦合效率一般不超过 20%,这不仅与 LD 与 SMF 的模式不匹配有关,而且还和 LD 的近场发光宽度以及发射波长有关。透镜耦合通过在 LD 管芯端面和光纤端面之间放上凸透镜、自聚焦透镜或柱面透镜来提高耦合效率,可以使用单透镜,也可以用透镜组,耦合效率为 40%~60%。光纤微透镜方法通过光蚀、研磨或拉锥等技术,在光纤端面形成微透镜与 LD 耦合,其中以在 SMF 表面上制作双曲面微透镜与 LD 耦合得到的耦合效率最高,可达 80% 以上,但是成本很高,且对准容差较小。不管采用何种耦合方法,其实质都在于 LD 到 SMF 之间的模式耦合。本文对搜索算法的研究基于 LD 与 SMF 单透镜耦合模型,即在 LD 与 SMF 之间放置一个聚焦透镜的耦合形式,如图 1。

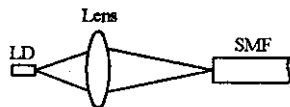


图 1 LD-SMF 单透镜耦合模型
Fig. 1 Optical coupling model between LD and SMF

1.2 对接平台

图 2 给出了自行研制的 LD 与 SMF 耦合对接试验平台的系统框图,图 3 是六自由度对接平台的照片。运动平台采取粗精结合的方式,以丝杠平台为主,在关键自由度叠加柔性铰链微位移机构,从而满足光纤对接大行程、高精度的要求。在对准过程中,横向、纵向以及角度的对准偏差都会影响到耦合效率,增加损耗,因此,光纤对准需要多个自由度的运动,以实现横向、纵向以及角度的精密调整。横向(垂直于光轴)定义为 X 轴和 Y 轴,纵向定义为 Z 轴(光轴),角度偏差包括绕 X 轴的倾斜(θ_x)、绕 Y 轴的偏转(θ_y)以及绕 Z 轴的旋转(θ_z)。为了试验方便,使用六自由度调整平台,由于光纤模场分布的对称性,实际不需要旋转运动,耦合对准的调整为五自由度自动对准。研究结果表明,光纤对准时横向偏移会导致最严重的功率损耗^[5],所以,低损耗的耦合要求在横向运动上有极高的机械精度,为此,在 X 和 Y 方向叠加两个柔性铰链微位移机构,图 2 中标为 X1 和 Y1,这两个微位移机构可以达到 0.05 μm 的准确度,从而可以实现很高的对准精度。整个系统基于光功率反馈对平台进行运动控制,对准算法是控制软件的核心,通过算法找到 LD 与 SMF 最佳耦合位置,实现最大的光耦合。

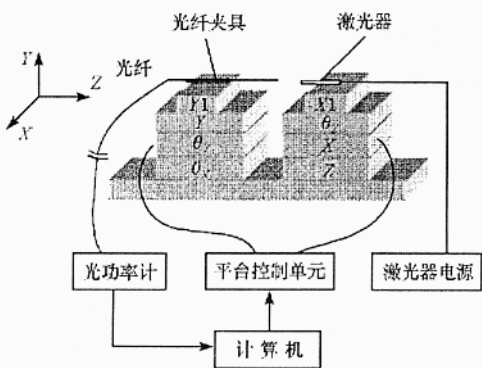


图 2 LD 与 SMF 耦合对接试验系统框图
Fig. 2 Block diagram for LD-SMF coupling

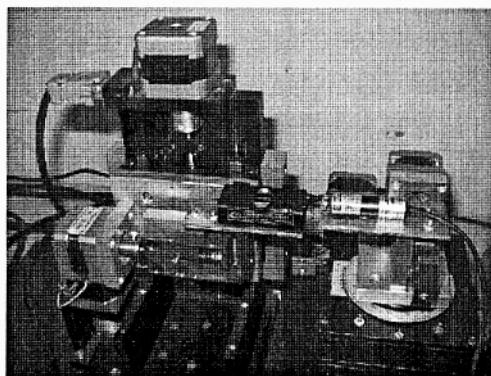


图 3 六自由度精密调整平台照片
Fig. 3 Photograph of 6D precision stages

2 五自由度自动对准搜索

由于各个自由度的偏差都会降低耦合损耗,而且,各个自由度存在交叉耦合,所以,为了找到激光二极管与单模光纤最佳耦合位置,必须进行多自由度的寻优。

2.1 搜索路径规划

合理的功率搜索路径规划是能否找到耦合功率峰值点的关键,而且在一定程度上影响搜索速度。

搜索路径规划的主要依据是 LD 光辐射的远场分布特性, 光纤的接收性能以及平台的运动特性。同时这也是搜索算法参数选择的依据。LD 光辐射的远场分布为椭圆形状的高斯光束, 虽经透镜聚焦, 其光束在 X 和 Y 方向的发散角并不相同, 从试验数据看, 功率耦合对 Y 方向的位置变化更为敏感。单模光纤的接收性能主要取决于其模场直径, 单模光纤的模场直径很小, 只有几个微米, 所以 LD 与 SMF 耦合对接时 X 和 Y 方向的对准容差很小。上述因素决定了功率搜索时应该在以 XY 平面为主的基础上, 采取单自由度轮换寻优的方法进行峰值功率搜索, 并且算法在各个自由度进行时, 参数的选择应有所不同。

算法首先通过外螺旋法进行粗对准, 目的是找到超过一定噪声水平的光功率, 从而为第二阶段的精密对准做好准备。粗对准使用丝杠平台, 在 XY 平面进行。精密对准时 X 和 Y 自由度使用柔性铰链微位移机构, Z 方向使用丝杠平台, 角度寻优使用角度平台。精密对准首先从 X 轴开始, 沿 $X-Y-Z-\theta_x-\theta_y-X-Y$ 的路径搜索, XY 平面的搜索始终是重点, 一方面它对耦合效率的影响最大, 另一方面为了消除各个自由度运动交叉耦合, 在 Z 自由度和角度搜索后要再次进行 XY 平面的搜索。首次 XY 平面搜索时的初始步距要比后来的 XY 平面搜索时的大一些。单个自由度的寻优都使用爬山法, 对于 X 轴和 Y 轴, 则根据 X 和 Y 方向功率耦合分布特点, 提出函数拟合算法。

2.2 参数选择

粗准时, 关键参数是功率噪声水平的设置, 如果选得太大, 搜索时间会显著增加, 而且粗对准完成任务也很困难, 如果选得太小, 在精密对准过程中又很容易脱离耦合区而导致搜索失败。应该根据激光器的发射功率和试验结果确定这个参数。另外要限定的两个参数是搜索步距和最大搜索次数, 因为单模光纤的模场直径只有 $8.3\mu\text{m}$, 所以此粗对准搜索步距设定为 $2.5\mu\text{m}$ 。最大搜索次数的设定主要是防止无休止的迭代循环。

在精密对准过程中, 单个自由度的寻优用爬山算法, 有三个关键参数需要仔细考虑: 初始步距、迭代次数以及检验点数。初始步距是每个自由度搜索时走步的初始大小, 因为每个自由度的对准容差不同, 而且考虑到 LD 高斯光束的椭圆形状, 各个自由度搜索时初始步距的选择有很大差别。为了防止陷入局部最大点, 算法在越过最大值后再继续沿当前方向走几步, 以判断耦合功率是否确实不再增加, 确定走步多少的参数就是检验点数。一旦峰值区域确定, 算法要实现的就是确保最后耦合位置尽可能精确地停留在峰值点, 这是通过一系列迭代实现的, 每次迭代运动步距减半, 迭代次数受限于平台运动分辨率, 同时要考虑到搜索时间。

3 指数函数拟合搜索算法

3.1 基本原理

指数函数拟合搜索算法主要用于 XY 平面的峰值功率搜索。假定不存在角度偏差, 根据模式耦合理论, 利用重积分方法, LD 与 SMF 耦合时, 在光纤端面处耦合功率可以表示为

$$P = P_0 \exp(-ax^2 - by^2) \quad (1)$$

其中 P_0 是不存在横向偏移时接收到的功率, a 和 b 是与 LD 高斯光束“束腰”以及传播距离有关的系数。因此, 最佳耦合位置的寻优是一个二元函数求极值的问题。进一步简化, X 和 Y 方向分开处理, 即先假定不存在 Y 轴偏移 ($y=0$), 那么

$$P_x = P_0 \exp(-ax^2) \quad (2)$$

粗对准完成后, 设当前 X 坐标为 x_0 , 对应功率值为 P_1 , 沿 X 轴正反向分别移动 Δx , 再获得两个点 $(\Delta x, P_2)$, $(-\Delta x, P_3)$, 列成方程组

$$\begin{cases} P_1 = P_0 \exp(-ax_0^2) \\ P_2 = P_0 \exp[-a(x_0 + \Delta x)^2] \\ P_3 = P_0 \exp[-a(x_0 - \Delta x)^2] \end{cases} \quad (3)$$

可以计算出

$$P_0 = P_1 \exp\left[\frac{(\ln P_3 - \ln P_2)^2}{8(\ln P_1 - \ln P_2 - \ln P_3)}\right] \quad (4)$$

$$a = \frac{2\ln P_1 - \ln P_2 - \ln P_3}{2\Delta x^2} \quad (5)$$

$$x_0 = \frac{(\ln P_3 - \ln P_2)\Delta x}{2(2\ln P_1 - \ln P_2 - \ln P_3)} \quad (6)$$

从而,根据计算出的偏差 x_0 ,就可以确定到 X 轴最大点需要移动的距离。同理可以计算出 Y 轴需要移动的距离。

3.2 实现方案

将粗对准完成后的光纤停留位置设为参考点 (x_0, y_0) ,此时耦合功率值为 P_1 ,以距离 Δx 和 Δy 分别沿 X 和 Y 轴取四个点,测量相应的耦合功率值,然后根据指数函数拟合计算出到最佳耦合位置需移动的距离 (x_0, y_0) 。第一次拟合完成后,将新的位置设为参考点,再次进行指数函数拟合算法,直到计算出的耦合功率值与实测的最佳耦合位置功率值满足收敛条件,或者已经达到最大搜索次数。为防止平台位移过大这种异常情况,当位移 $x_0 > \Delta x$ 时,可以将 $(\Delta x, P_2)$ 和 $(-\Delta x, P_3)$ 中功率值较大的点设为参考点,重新进行指数函数拟合。

4 实验与讨论

粗对准用外螺旋法,精密对准分别用爬山法和指数函数拟合法,进行了多次自动对准试验。实验中使用普通单模光纤,截止波长为 1310nm,激光器型号为 LM-6301NA,发射波长为 630~710nm 的红光,最大输出功率为 1mW,由于波长不一致以及光纤端面制备等原因,实验中光纤接收的耦合功率不是很高,但是对于算法研究已经足够。实验使用 JW3202 双通道光功率计测量功率,计算机通过串口采集光功率测量信号,当光功率计测量接收光纤功率值到最大时,认为获得最佳耦合位置。

图 4 给出了自动对准搜索时几个有代表性的功率耦合跟踪曲线,都是对准过程中实时跟踪测量得到的曲线。图中,横坐标指采样点,纵坐标表示耦合功率值,单位是纳瓦,所以图中最后耦合功率值是 6~7mW。图 4(a)、(b)精密对准使用爬山法进行五自由度自动对准,图 4(a)搜索结果比较满意,图 4(b)最后停留位置与曾经出现的最大值有明显差距,这也说明爬山法有错失最大值的可能;图 4(c)用指数函数拟合进行峰值搜索,其采样点数明显比用爬山法要少,虽然它只应用在 XY 平面的搜索,但总的搜索时间还是比用爬山法要短。用爬山法时,搜索时间一般在 60s 左右,而用函数拟合时,搜索时间在 30s 左右。

5 结论

以爬山法为基础,进行五自由度搜索,实现了激光二极管与单模光纤的自动对准,搜索时间在 60s 左右,为了提高搜索效率,提出基于指数函数拟合的搜索算法,实验证明,这种算法搜索速度比爬山法更快,搜索时间缩短,对于激光二极管的自动化封装具有很大的应用价值,也可以借鉴应用到光波导或光纤阵列等其他需要光纤光学对准的场合。

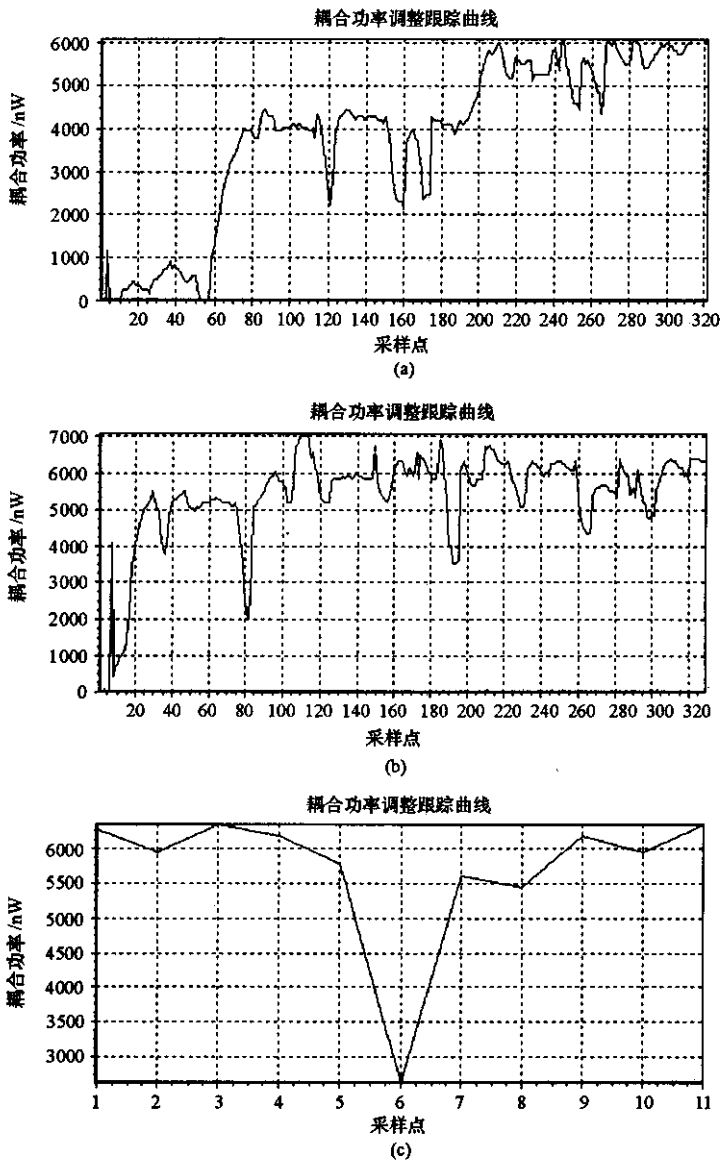


图4 耦合对准功率跟踪曲线

Fig.4 The resultant alignment process for LD-SMF coupling

参考文献:

- [1] Jang S. Packaging of Photonic Devices Using Laser Welding[J]. SPIE, 1996, 2610: 138-149.
- [2] Tang Z, Zhang R, Shi F G. Effects of Angular Misalignments on Fiber-optic Alignment Automation[J]. Optics Communications, 2001, 196: 173-180.
- [3] Mobarhan K S, Hagenbuechle M, et al. Fiber to Waveguide Alignment Algorithm[R]. Application Note, No. 6, Newport Inc. <http://www.newport.com>.
- [4] 聂刚, 李宝红, 刘雪峰, 等. 半导体激光器到单模光纤的高效耦合技术[J]. 光通信技术, 1996, 20(2): 161-165.
- [5] Gerd K. 光纤通信(第三版)[M]. 李玉权, 崔敏, 蒲涛, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [6] 韦春龙, 郭平生, 丁峥, 等. 半导体激光器与单模光纤耦合实验研究[J]. 光学仪器, 1996, 18(6): 11-14.

