

# 自由空间光 - 布拉格光纤耦合效率仿真分析

严一民, 杨华军, 陈伟军, 李 东  
(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要:**根据电磁场模场匹配理论,分析了自由空间光-布拉格光纤的耦合效率。通过对空间光-布拉格光纤耦合效率的计算可以知道,耦合效率与布拉格光纤纤芯半径、焦点光斑光腰半径和纤芯波矢有关。通过优化合理选择空间光聚焦后光腰半径与布拉格光纤纤芯半径以及纤芯波矢可以有效提高耦合效率。本文还对外界振动造成耦合透镜与布拉格光纤对接不正而对空间光-布拉格光纤耦合效率影响进行了分析。这对光纤激光雷达系统以及空间光通信系统的空间光-布拉格光纤耦合效率分析具有极其重要的参考价值。

**关键词:**耦合效率;布拉格光纤;光纤激光雷达;自由空间光

**中图分类号:**TN247;TN29.11 **文献标识码:**A

## Simulation analysis for coupling ratio of spatial light to Bragg fiber

YAN Yi-min, YANG Hua-jun, CHEN Wei-jun, LI Dong

(College of physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Based on the mode matching theory of electromagnetic field, the coupling efficiency of light from free space to Bragg fiber has been analyzed. It shows that the coupling efficiency is related to the core radius of Bragg fiber, the radius of focused facular and wave vector of the core. By optimizing the value of these parameters appropriately, the coupling efficiency can be improved. Simultaneously, the displacement between coupling lens and Bragg fiber is caused by the external vibration. The changed coupling efficiency caused by it has been analyzed. It plays an important role in analyzing the coupling efficiency of Bragg fiber, which can be applied to the fiber lidar system and optical communication system.

**Key words:** coupling efficiency ratio; Bragg fiber; fiber lidar; free space light

### 1 引言

自由空间光通信(free space optical communication, FSOC)技术结合了传统微波通信和光纤通信的优势,其具有通信容量大、结构较简单、抗干扰能力强、保密性强、组网灵活等优点,又不需要铺设光纤,因此将成熟的传统光纤通信技术应用在自由空间光通信系统中会有许多优势。但在将传统的光纤通信技术应用于自由空间光通信系统中会面临着空间光耦合进入光纤的一大技术挑战<sup>[1]</sup>。随着三维成像光纤激光雷达的高速发展以及激光雷达中光纤扫描技术的出现,更急需解决空间光与光纤的接口技术上所存在的各种问题,尤其是解决空间光与光纤之

间进行高效耦合的问题<sup>[2-3]</sup>。一般来说自由空间光通信系统以及三维成像光纤激光雷达系统接收到的激光信号强度往往十分微弱,因此,空间光与光纤耦合所关注的焦点就是提高耦合效率。由于布拉格光纤与普通光纤相比具有诸多优势,如特殊的色散特性、无休止的单模特性等<sup>[4]</sup>,以及现在对布拉格光纤理论和实验研究的成熟<sup>[5-6]</sup>,特别是大模场布拉格光纤的制备<sup>[7]</sup>,把新型的布拉格光纤应用在空间

基金项目:预研项目(No. G020104PJ09DZ0246)资助。

作者简介:严一民(1960-),男,工程师,研究方向为光通信技术。E-mail: yanymed@163.com

收稿日期:2011-03-06;修订日期:2011-03-29

光通信和光纤激光雷达中可以大大提高整机系统的性能。目前,研究空间光-布拉格光纤耦合特性的文献资料很少,为了充分发挥布拉格光纤的优越性,所以更应该重点关注从空间光到布拉格光纤能否进行高效耦合的问题。

使用聚焦耦合透镜将自由空间激光耦合进入布拉格光纤,采用模场匹配理论来进行耦合特性的分析,通过合理选取布拉格光纤纤芯半径、焦点光斑光腰半径和纤芯波矢的值,可以获得最大的耦合效率。

### 2 空间光-布拉格光纤耦合效率计算

空间光-布拉格光纤耦合示意图如图 1 所示,空间平行光波经过远距离真空传输到达接收透镜的时候,可以将其看作平面波,平面波在接收透镜焦点上聚焦,其光斑电场分布为:

$$E_i = \exp(-r^2/r_o^2) \quad (1)$$

其中,  $r$  为焦点激光光斑截面上任意一点到光斑中心的径向距离;  $r_o$  为焦点光斑光腰半径。聚焦光斑的电场分布如图 2 所示。

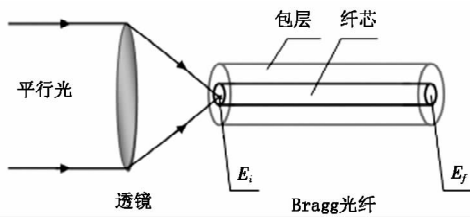


图 1 空间光-布拉格光纤耦合示意图  
入射光光斑电场分布

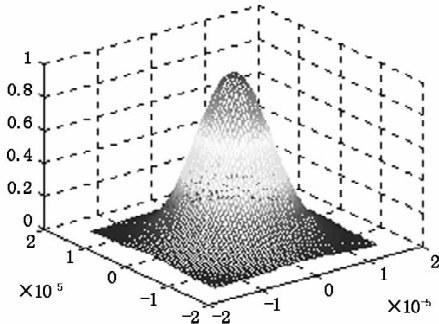


图 2 聚焦光斑电场分布

激光在布拉格光纤中传播时,电场分布为<sup>[8-9]</sup>:

$$\begin{aligned} E_{z1} &= a_c J_1(k_c r) \quad 0 < r < \rho_1 \\ E_{z2} &= a_n \exp[ik_1(r - \rho_n)] + \\ &\quad b_n \exp[ik_1(r - \rho_n)] / \sqrt{k_1 r} \\ &\quad \rho_n < r < \rho_n + l_1 \\ E_{z3} &= a'_n \exp[ik_2(r - \rho'_n)] + \\ &\quad b'_n \exp[ik_2(r - \rho'_n)] / \sqrt{k_2 r} \\ &\quad \rho'_n < r < \rho'_n + l_2 \end{aligned}$$

其中,  $k_c = [n_c^2 (w/c)^2 - \beta^2]^{\frac{1}{2}}$ ,  $k_1 = [n_1^2 (w/c)^2 -$

$$\beta^2]^{\frac{1}{2}}, k_2 = [n_2^2 (w/c)^2 - \beta^2]^{\frac{1}{2}}.$$

由于  $E_{z1} \gg E_{z2}, E_{z1} \gg E_{z3}$ , 为了分析问题的方便,在这里我们主要考虑激光在布拉格光纤芯中的场分布,因此,可以取  $E_f = E_{z1}$ , 可得布拉格光纤出纤(光纤端面)的激光的光场分布为:  $E_f = E_{z1} = a_c J_1(k_c r)$ 。布拉格光纤的激光电场分布如图 3 所示。

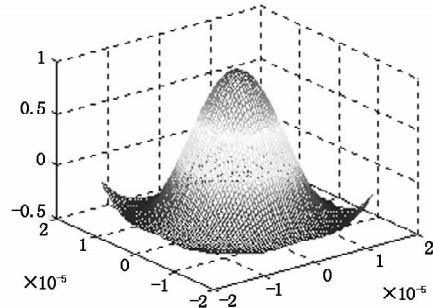


图 3 布拉格光纤出纤电场分布

根据模场匹配原理,当耦合进入布拉格光纤的激光的电磁场与布拉格光纤出纤的激光的电磁场分布相同时,即可获得最大的耦合效率。

根据以上原理可知,提高空间光到布拉格光纤耦合效率的方法之一就是通过改变聚焦点光斑光场与布拉格光纤端面模场进行比较,通过改变激光光斑光腰半径,布拉格光纤纤芯半径等参数使得聚焦点光斑光场与布拉格光纤端面模场的差异最小,也即两个模场相似度大,从而获得最佳的耦合效率。我们已经知道,空间光-光纤耦合效率计算公式为:

$$\eta = \frac{|\iint E_i E_f^* ds|^2}{\iint |E_i|^2 ds \cdot \iint |E_f|^2 ds} \quad (2)$$

其中,  $E_f$  为光纤端面模场分布;  $E_i$  为激光聚焦点光斑光场。把  $E_i, E_f$  的表达式代入式(2)并将式(2)改写成极坐标的形式,可得空间光-布拉格光纤耦合效率为:

$$\eta = \frac{|\int_0^{r_c} \exp(-r^2/r_o^2) J_1(k_c r) r dr|^2}{\int_0^{\infty} \exp(-2r^2/r_o^2) r dr \int_0^{r_c} J_1^2(k_c r) r dr} \quad (3)$$

从式(3)可以看出布拉格光纤纤芯半径  $r_c$ 、焦点激光光斑光腰半径  $r_o$  和纤芯波矢  $k_c$  直接影响空间光-布拉格光纤耦合效率  $\eta$ 。我们可以通过对以上参数进行合理的优化设计来获得最佳的耦合效率。

### 3 空间光-单模布拉格光纤耦合效率数值分析

单模光纤就是对于给定的工作波长只有主模式(基模)才能传播的光纤。激光模式的归一化频率或截止参数是  $l$  阶 Bessel 函数的根,即:  $U_c = V_c =$

$u_{ln}, l=0,1,2,3,\dots; n=1,2,3,\dots$ , 其中,  $U_c, V_c$  即为导波光纤维的截止参数。上式中  $l$  为 Bessel 函数的阶数,  $n$  是  $l$  阶 Bessel 函数根的序号。由  $l$  阶 Bessel 函数的第  $n$  个根所确定的 EH 模称为  $\text{EH}_{ln}$  模<sup>[10]</sup>。激光在大模场单模布拉格光纤中传输, 那么激光的主模为  $\text{EH}_{ln}$  模, 其所对应的截止参数是  $l$  阶 Bessel 函数  $J_l(u_{ln})$  的第  $n$  个根:  $u_{ln}$ , 其中,  $l=0; n=1$ , 而  $u_{ln}$  在数值上就等于  $k_c r_c$ 。在这里, 取  $u_{01}$  等于 2.405。因此, 式(3)变为:

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{r_c} \exp(-r^2/r_o^2) J_0\left(\frac{2.405}{r_c}r\right) r dr \right|^2}{\int_0^{r_c} \exp(-2r^2/r_o^2) r dr \int_0^{r_c} J_0^2\left(\frac{2.405}{r_c}r\right) r dr} \quad (4)$$

从式(4)可以看出空间光-单模布拉格光纤耦合效率  $\eta$  与焦点光斑光腰半径  $r_o$ 、布拉格纤芯半径  $r_c$  有关。可以通过计算机数值计算软件来画出对于任意的布拉格光纤半径  $r_c$ 、焦点光腰半径  $r_o$  与能量耦合效率  $\eta$  之间的关系曲线。

图4描述了当  $u_{01} = 2.405$  时, 耦合效率随激光聚焦光腰半径与布拉格纤芯半径比值  $a$  变化的关系。由图可知, 空间光到布拉格光纤的耦合效率随激光聚焦光腰半径与布拉格纤芯半径比值  $a$  增大呈先增大后减小的趋势。当激光聚焦光腰半径与布拉格纤芯半径比值  $a$  等于 0.64 时, 仿真结果表明: 空间光-布拉格光纤耦合效率的最大值为 98.07%。

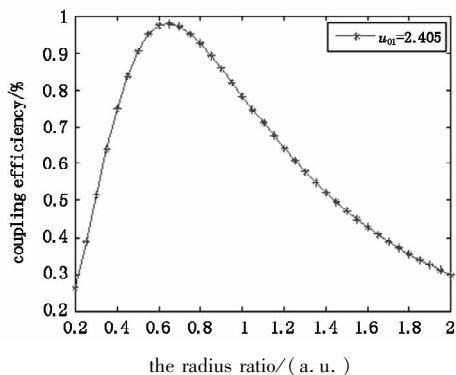


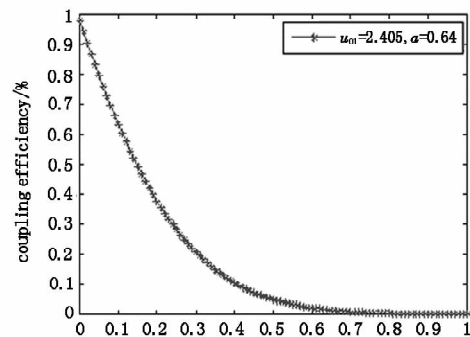
图4 对于单模布拉格光纤,  $u_{ln} = 2.405$  时, 耦合效率随半径比的变化关系

#### 4 激光光斑横向偏移对耦合效率的影响

在工程设计过程中, 激光光斑和布拉格光纤纤芯对接往往有偏差, 这会对耦合效率造成一定的影响。下面我们将分析激光光斑在光纤端面移动造成聚焦光场与光纤端面光场匹配程度降低, 损耗增加。激光光斑在光纤端面移动的距离用  $\Delta r$  表示, 则空间光-布拉格光纤耦合效率计算公式(4)变为:

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_c} \exp\left(-\frac{(r^2 + 2\Delta r r + \Delta r^2)}{r_o^2}\right) J_0\left(\frac{2.405}{r_c}r\right) r \cos(2\theta) dr d\theta \right|^2}{4 \times \pi^2 \int_0^{r_c} \exp(-2r^2/r_o^2) r dr \int_0^{r_c} J_0^2\left(\frac{2.405}{r_c}r\right) r dr} \quad (5)$$

利用 MATLAB 软件计算仿真可以知道  $a = 0.64, u_{01} = 2.405$  时空间光-布拉格光纤耦合效率  $\eta$  与激光光斑在光纤端面移动的偏移量  $\Delta r$  的关系。由图5可以知道, 对于单模布拉格光纤,  $a = 0.64$  时空间光-布拉格光纤耦合效率  $\eta$  随着激光光斑在光纤端面移动的偏移量的增大而变化关系。



the margin between focused facular and Nragg fiber core/( a. u. )

图5 耦合效率与偏移量的变化关系

#### 5 结论

本文通过对空间光-布拉格光纤耦合效率的仿真分析得出以下结论: 对于确定的布拉格光纤, 空间光-布拉格光纤耦合效率与焦点光斑光腰半径、布拉格光纤纤芯半径和纤芯波矢有直接的关系。通过合理优化设计上述参数, 可以有效提高空间光-布拉格光纤的耦合效率。经分析, 仿真结果表明: 当  $u_{01} = 2.405$ , 焦点光斑光腰半径与纤芯半径的比值  $a = 0.64$  时, 耦合效率就可以达到最大值为 98.07%。同时, 本文还分析由于工程设计造成激光光斑和布拉格光纤纤芯对接不正而对耦合效率的影响, 得出了耦合效率与激光光斑在光纤端面移动的偏移量的变化关系。空间光-布拉格光纤耦合的研究是空间光通信技术和三维成像激光雷达光扫描技术发展中的一个必不可少的环节, 相信随着各种先进技术的进一步发展, 空间光通信和三维成像激光雷达光纤扫描技术将变得更为切实可行。

#### 参考文献:

[1] Ke Deng, Bingzhong Wang, Xu Wang, et al. Analysis of spatial light to single mode fiber coupling efficiency[J]. Univ. Electron. Sci. Technol. China, 2007, 36(5):

- 889 - 891. (in Chinese)
- 邓科,王秉中,王旭,等. 空间光 - 单模光纤耦合效率分析[J]. 电子科技大学学报,2007,36(5):889 - 891.
- [2] Christian Seidel,Christian Samuelis,Matthias wegner. Novel approaches to helicopter obstacle warning[C]. SPIE, 2006,6214:0601 - 0611.
- [3] K R Schulz,S Scherbarth,U Fary. Hellas:Obstacle warning system for helicopter[C]. SPIE,2002,4723:1 - 8.
- [4] Liying Chen,Junqiang Sun. The analysis of photonic crystal fiber coupling[J]. Opt. Optoelectron. Technol,2006,1(3):6 - 9. (in Chinese)
- 陈丽颖,孙军强. 光子晶体光纤耦合分析[J]. 光学与光电技术,2006,1(3):6 - 9.
- [5] Xiao Liuping, Yang Huajun, Yan Yimin, et al. Research for light propagation characteristics of Bragg fiber with film optics theory[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(11): 1121 - 1124. (in Chinese)
- 肖柳平,杨华军,严一民,等. 用薄膜光学理论研究布拉格光纤的传输特性[J]. 激光与红外,2008,38(11): 1121 - 1124.
- [6] Xu Yongzhao,Zhang Xia,Huang Yongqing,et al. Theoretical and experimental investigation of all-optical regeneration base on photonic crystal fiber[J]. Laser & Infrared, 2009,39(1):55 - 58. (in Chinese)
- 徐永钊,张霞,黄永清,等. 基于光子晶体光纤的全光再生理论和实验研究[J]. 激光与红外,2009,39(1):55 - 58.
- [7] Pan Rong,Ning Ding,Liu Xiaodong,et al. Fabrication and performance testing of large mode area Yb - doped photonic crystal fiber[J]. Laser & Infrared,2010,40(10): 1080 - 1082. (in Chinese)
- 潘蓉,宁鼎,刘笑东,等. 大模面积掺镱光子晶体光纤的制备与性能测试[J]. 激光与红外,2010,40(10): 1080 - 1082.
- [8] Yong Xu,Reginald K Lee,Amnon Yariv. Asymptotic analysis of Bragg fibers [J]. Opt. Lett, 2000, 25(24): 1756 - 1758.
- [9] Huajun Yang, Yu Hu, Jingxian Liu, et al. The analysis of Bragg fiber transmission characteristics[J]. Optoelectron · Laser,2007,18(12):1410 - 1413. (in Chinese)
- 杨华军,胡渝,刘静娴,等. 布拉格光纤传输特性研究[J]. 光电子·激光,2007,18(12):1410 - 1413.
- [10] Yuquan Li, Yong Zhu, Jiangping Wang. Theory and technology of optical communication [M]. Beijing : Science Press,2006:38 - 40. (in Chinese)
- 李玉权,朱勇,王江平. 光通信原理与技术[M]. 北京: 科学出版社,2006:38 - 40.