

空间散射光到单模光纤的耦合

李 卡, 谭中伟

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 空间散射光到光纤的耦合在许多领域都得到广泛的应用。然而, 当被测物体较大时, 如何有效地将空间散射光有效地耦合到光纤的研究还较少。耦合效率和接收视场是空间散射光耦合到光纤接收装置的两个重要的特性参数。文中通过理论分析和软件仿真, 分析了在径向移动、轴线移动和不同入射角的情况下, 改写耦合效率的变换, 比较了在满足一定的耦合效率时, 光纤接收装置的几种透镜耦合方式接收视场的大小。最后, 通过实验对仿真内容进行了验证。

关键词: 光纤光学; 耦合效率; 单透镜耦合; 透镜组耦合

中图分类号: O431.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0122005

Coupling of scattering light in space into single mode optical fiber

Li Ka, Tan Zhongwei

(Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Light Wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Coupling of scattering light in space into fiber has also been used widely in many fields. However, when the scattering objects is big, how to coupling of scattering light in space into fiber efficiently is seldom studied. Considering that coupling efficiency and the field of view are important parameters of a fiber optic based receiver, the coupling efficiency with different axial and racial offsetting or different input angles was analyzed, then the coupling efficiency and field of view of the fiber optic receiver was compared by theoretical analysis and emulation.

Key words: fiber optics; coupling efficiency; single lens coupling; lenses coupling

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61177012); 北京高等学校“青年英才”计划(YETP0529)

作者简介: 李卡(1989-), 女, 硕士, 主要从事光纤通信方面的研究。Email: 12120092@bjtu.edu.cn

0 引言

由于光纤具有体积小、重量轻,便于采用相关检测提高其灵敏度等优点,且拥有高灵敏度和高放大倍数的放大器,使得光纤能够改善空间光接收装置的性能。随着光纤技术的发展,空间光-光纤的耦合技术如今被广泛应用于各个方面,如拾光型器光纤传感^[1]、生物光子学^[2-3]、天文学^[4]和激光雷达^[5-6]等领域,改善接收系统的耦合性能可以在很大程度上优化整个系统。由于单模光纤的性能好,而且大部分光器件都是基于单模光纤的,因此将空间光耦合到单模光纤中便于实现高灵敏度的相干接收、低噪声的光放大以及高性能的光滤波。但是,单模光纤的模场直径和数值孔径都很小,很难将空间光直接耦合到单模光纤中,需要考虑的问题主要包括耦合效率^[4,7]和接收视场。目前的研究主要集中在激光器光源输出光束以及准直光束的耦合,空间散射光到光纤的耦合相关研究较少。虽然这种耦合的信号很大,但对于某些应用,如激光雷达、光谱成像、光学相干断层成像术等技术其被检测的就是散射光。如果将光纤技术应用到这些领域,就需要考虑空间散射光到单模光纤的耦合问题。

将空间光耦合进光纤的方法可以分为直接耦合和透镜耦合,直接耦合的效率很低,因此大多采用透镜耦合。文中对透镜耦合效率影响因素进行了分析,比较单透镜和透镜组耦合结构,利用 ZEMAX 软件进行仿真实验,并主要讨论在满足一定的耦合效率,光纤接收装置耦合空间散射光时,其接收视场或发散角的大小。

1 理论分析

空间散射光耦合到光纤的基本结构如图 1 所示,主要的损耗包括散射损耗、空间损耗和耦合损耗三部分。光在反射过程中会不可避免地引入能量损耗,根据被测物不同,物体表面的散射效率也有较大差别,这种差别主要由材料性质和表面光滑程度决定,因此一旦选定了被测物体,这部分损耗就确定了。空间损耗是由于接收装置的有限孔径决定的,而对于散射光而言,由于光被散射到各个方向,当距离较大时空间中的损耗会非常大。

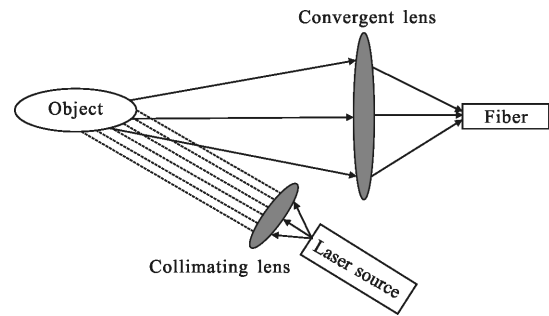


图 1 单透镜耦合系统

Fig.1 Coupling system with single lens

这两种损耗从光源到透镜的部分可以由激光雷达方程来计算:

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \times \Gamma \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_{Ac} \eta_{Sys} \quad (1)$$

式中: P_R 为接收激光功率; P_T 为发射激光功率; G_T 为发射天线增益; Γ 为目标散射截面; D 为接收孔径; R 为激光雷达到达目标的距离; σ 为单程大气传输系数; η_{Ac} 为接收器光学系统效率; η_{Sys} 为激光雷达的发射器光学系统效率。

除此之外,就是单模光纤的耦合损耗。将光束耦合进单模光纤,除了应尽量满足在光纤端面激光束腰小于光纤半径外,还应满足远场发散角的条件: $\theta \leq 2\arcsin NA$ 。根据该条件,会聚透镜与光纤端面的距离 l 应满足:

$$l = r / \tan(\theta/2) \leq r / \tan(\arcsin NA) \quad (2)$$

式中: r 为会聚透镜的半径; NA 为单模光纤的数值孔径。然而在实际耦合中,由于透镜不可避免地存在像差,因此汇聚光斑的尺寸必然会大于光纤的纤芯。为了提高系统的耦合效率,应尽量减小汇聚光斑的尺寸。而且,当被测物体较大时,光斑的尺寸很难被汇聚的很小,因此,需要考虑如何增大接收视场。

光纤耦合效率被定义为耦合进光纤的光功率与耦合系统接收平面上接收的光功率之比,可表示为:

$$\eta = \frac{\left| \iint E_{i,b}^* E_{f,b} ds \right|^2}{\iint |E_{i,b}|^2 ds \cdot \iint |E_{f,b}|^2 ds} \quad (3)$$

式中: $E_{i,b}$ 为光纤端面的光场; $E_{f,b}$ 为单模光纤的电磁场,积分遍及焦平面。由公式(3)可以看出, $E_{i,b}$ 和 $E_{f,b}$ 越匹配,光纤的耦合效率越大,这种匹配包括振幅匹

配和相位匹配；其中振幅匹配由会聚光斑的大小来体现，而相位匹配则由系统的像差来体现。在理想情况下，即系统不存在像差时，就不存在相位失配问题。此时光纤的耦合效率可以看作光纤端面的光斑与单模光纤尺寸的匹配问题，耦合效率的高低取决于二者的匹配程度^[8]。

常用的透镜耦合方式有单透镜耦合和透镜组耦合两种。单透镜耦合方式损耗小，结构简单，但是视场较小；透镜组耦合方式可以通过合理选择各透镜的焦距得到较大的视场，但是这样会使得系统的耦合效率降低。为了便于分析，通过径向移动点光源来计算在一定的耦合效率范围内，可以用光纤接收的被测物体的最大有效半径，从而获得光纤耦合装置最大接收视场。

2 单透镜耦合系统

耦合系统将点光源所发出的发散球面波变为会聚于一点的会聚球面波，由于孔径光阑的存在，将对会聚球面波起到一种限制作用，使得光学系统所成的像是会聚球面波在孔径光阑上的衍射斑，即夫琅和费衍射图样。入射光束经单透镜耦合系统变换后，会聚光斑半径为^[9]：

$$r_1 = \frac{r_0 f_3}{\sqrt{(l_0 + f_3)^2 + \left(\frac{\pi r_0^2}{\lambda}\right)^2}} \quad (4)$$

式中： r_0 为入射光束束腰半径； l_0 为入射光束束腰与耦合系统接收透镜的距离； f_3 为会聚透镜的焦距。

如果光源不在耦合系统的光轴上，耦合系统在光纤端面形成的艾里斑也会发生相应的偏移，如图 2 所示。在理想情况下，即耦合系统不存在球差和彗差

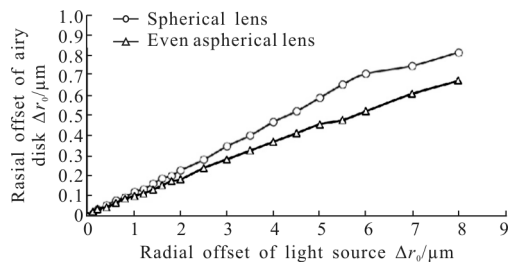


图 2 单透镜耦合系统光源径向偏移量 Δr_0 与光纤端面艾里斑径向偏移量 Δr_1 的关系

Fig.2 Relationship of the radial offset between the light source Δr_0 and the Airy disk at the fiber end surface Δr_1

时，光源的偏移并不会造成艾里斑衍射光强分布的变化。根据物像方焦距比以及高斯物像公式，单球面透镜耦合系统艾里斑中心的径向偏移量可以表示为：

$$\Delta r_1 = -\Delta r_0 f / (l_0 - f) \quad (5)$$

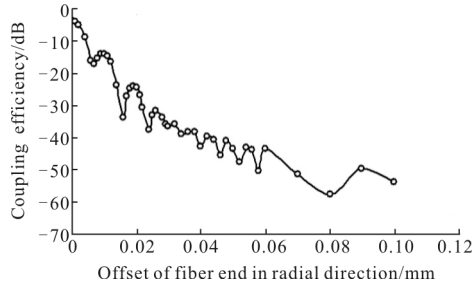
式中： f 为耦合系统的等效焦距； Δr_0 为光源径向偏移量； Δr_1 为艾里斑径向偏移量。由公式(5)可以看出，在单透镜耦合系统中，当光源与耦合系统的距离保持恒定时，对于相同的光源径向偏移量，会聚透镜的焦距越大，光纤端面艾里斑的偏移量越大。然而，为了获得较好的耦合效率，会聚透镜的焦距不可能很小；因此单透镜耦合系统的耦合效率对于光源径向位置会很敏感。

论文是研究较大物体的散射光到光纤的耦合，所以在进行仿真的时候是将物体分成许多点光源，分别考虑各个点光源的耦合特性。对于非相干光源，最终的耦合系数等于各个点光源的耦合功率的代数和。根据对公式(1)的分析和实验发现，由于有限的接收孔径引起的损耗和单模光纤的耦合损耗是损耗产生的主要来源。在 2.5 m 的距离上产生的总损耗超过 50 dB。而光散射本身引起的损耗较小，常见材料的散射损耗都在 10 dB 以内，一般可以在相关文献中查到。因此，文中的主要目标是研究接收系统的损耗和单模光纤的耦合损耗，仿真时是直接将散射点作为点光源进行仿真的。由于入射光在很大范围内散射，而只有进入接收端会聚透镜的光才可能被耦合到光纤中，仅考虑点光源发出的在接收端会聚透镜的孔径之内的光束，而且假设能量是均匀分布的。文中的仿真中，单透镜耦合系统选用直径 1 in (1 in=2.54 cm) 的会聚透镜，其曲率半径为 46.5 mm，所有的仿真均采用数值孔径为 0.14 的单模光纤，入射波长 λ 为 1550 nm，光源与耦合系统接收透镜的距离 l_0 为 2.5 m。

根据图 2 中的两条曲线的走势不难发现，当光源偏离光轴时，会聚透镜焦平面上的艾里斑也会发生偏移，并且与光源的径向偏移量基本呈线性，与公式(5)中的分析相吻合。并且非球面透镜的偏移量比球面透镜的要小，而且随着偏移量的增大，这种现象更加明显。因为非球面透镜可以修正球面透镜在准直和聚焦系统所带来的球差，通过调整曲面常数和球面系数，非球面透镜可以最大限度地消除球差。

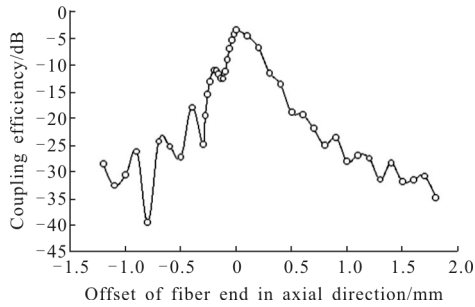
光纤端面在会聚透镜的焦距位置附近，由于经过会聚透镜后光斑很小而发散角很大，光纤的耦合

效率对光纤端面的径向和轴向位置都很敏感, 需要根据实际情况进行微调。光纤的耦合效率与光纤端面径向和轴向偏移量的关系如图 3 所示。



(a) 仿真得到的光纤耦合效率与光纤径向偏移量的关系

(a) Relationship between the coupling efficiency and the offset in radial direction of fiber by simulation



(b) 仿真得到的光纤耦合效率与光纤轴向偏移量的关系

(b) Relationship between the coupling efficiency and the offset in axial direction of fiber by simulation

图 3 光纤的耦合效率与光纤端面径向和轴向偏移量的关系

Fig.3 Relationship between the coupling efficiency and the offset in radial and axial direction of fiber

根据文中的分析可知, 当光源偏离光轴时, 光纤端面的艾里斑必然会发生径向偏移, 这种偏移使得系统的耦合效率会发生大幅度的衰减。对于球面透镜, 光纤径向偏移 ΔR 时, 系统耦合效率 $\eta_{\Delta R}$ 可以表示为^[7,10]:

$$\eta_{\Delta R} = 8\beta^2 \left| \frac{1}{R_1^2} \int_0^{R_1} \exp(-\beta^2) J_0 \left(2\beta \frac{r\Delta R}{\omega_0 R_1} \right) r dr \right|^2 \quad (6)$$

式中: $\beta = \pi R_1 \omega_0 (\lambda f)$ 为耦合系数; R_1 为接收孔径半径; ω_0 为单模光纤模场半径; λ 为入射光波波长。当光纤中心未偏离而光纤端面会聚光斑的中心径向偏移了 ΔR 时, 系统的耦合效率与 $\eta_{\Delta R}$ 相等, 结合公式(5)可以得出当光源径向移动 Δr_0 时, 系统的耦合效率:

$$\eta_{\Delta r_0} = 8\beta^2 \left| \frac{1}{R_1^2} \int_0^{R_1} \exp(-\beta^2) J_0 \left(2\beta \frac{r\Delta r_0 f}{\omega_0 R_1 (l_0 - f)} \right) r dr \right|^2 \quad (7)$$

仿真采用和图 2 同样的参数, 当光源径向移动

时, 系统的耦合效率如图 4 所示。由于光纤端面很小, 即使焦平面上艾里斑的偏移量很小, 耦合进光纤的光能也会变化很多, 造成耦合效率的大幅度降低。当光源偏离光轴时, 由于会聚透镜形成的艾里斑也会发生偏移, 因此光纤的耦合效率也会随着这种偏离呈下降趋势。然而由于透镜孔径的衍射作用, 光纤的耦合效率并非单调下降。

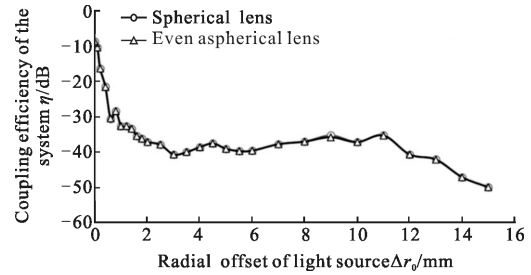


图 4 单透镜耦合系统光源径向偏移量 Δr_0 与系统耦合效率 η 的关系

Fig.4 Relationship between the radial offset of light source Δr_0 and the efficiency η of coupling system with single lens

图 4 所示耦合效率的波动是由透镜孔径的衍射作用产生的, 光纤端面艾里斑上点 P 的光强可表示为:

$$I_p = I_0 \left[\frac{2J_1(\pi D \sin \theta / \lambda)}{\pi D \sin \theta / \lambda} \right]^2 \quad (8)$$

式中: I_0 为中心点光强; θ 为 P 点对应的衍射角; D 为透镜的孔径直径。对于单个的透镜, 其孔径不可能很小, 因此耦合效率会随着对准的偏差而相应地波动。当光源距离耦合系统并不十分远 (接收光线不能近似为平行光线) 时, 如果入射光源不在光轴上, 耦合得到的光斑中心也并不在光轴上, 拥有大视场可以减小由焦平面的会聚光斑偏离光轴带来的耦合效率过低, 可以使用望远镜系统来改善光纤耦合的特性。

3 透镜组耦合系统

透镜组耦合系统将接收到的发散光线压缩得到较为准直的光线, 再经会聚透镜会聚到光纤中。文中所用到的透镜组耦合系统是由一个开普勒望远镜加上会聚透镜构成。开普勒望远镜分为倒置和正置两种。正置的开普勒望远镜拥有较大入瞳直径, 可以拥有较高的耦合效率。倒置的开普勒透镜则具有较大的视场, 降低了耦合效率对光源位置的敏感度。在透镜组耦合系统中, 光线先通过望远镜, 将入射的散射光线变为平行光, 再由会聚透镜会聚入光纤。图 5 为

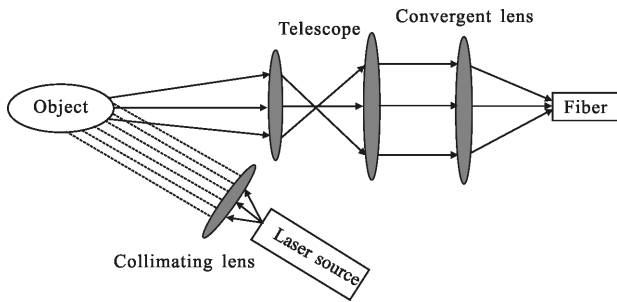


图 5 透镜组耦合系统

Fig.5 Coupling system with lenses

对于理想的透镜组耦合系统，当入射光束的束腰与耦合系统的距离远大于耦合系统接收透镜的焦距时，根据 q 参数和 ABCD 定律可得入射光束经透镜组耦合系统变换后的会聚光斑半径可表示为^[9]：

$$r_1 = \frac{\lambda f_3}{\pi r_0 \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda l_0}{\pi r_0}\right)^2}} \quad (9)$$

式中： f_1 和 f_2 分别为望远镜系统前后两透镜的焦距。由公式(9)可以看出，在入射光确定的情况下，可以通过选择望远镜系统的放大倍数以及会聚透镜的焦距来获得合适大小的会聚光斑。

对于透镜组耦合系统，光源的径向偏移量与光纤端面艾里斑的径向偏移量的关系与单透镜耦合系统略有不同^[11]：

$$\Delta r_1 = \Delta r_0 \frac{f_{12} f_3 / \Delta_{123}}{l_0 - f_1 - f_1' / \Delta_{12} - f_2 f_2' / \Delta_{123}} \quad (10)$$

式中： $\Delta_{123} = f_2' d_1 / \Delta_{12} + d_2 + f_1' f_2' / \Delta_{12} + f_3$ 为望远镜等效系统与会聚透镜的光学间隔； $f_{12} = f_1 f_2' = f_1 f_2 / \Delta_{12}$ 为望远镜系统的等效焦距； $\Delta_{12} = d_1 - f_1' + f_2$ 为望远镜系统两透镜的光学间隔； d_1 为望远镜两透镜之间的距离； d_2 为望远镜后透镜与会聚透镜之间的距离， f_1' 和 f_2' 分别为望远镜系统前后两透镜的像方焦距。因此当光源偏移时，透镜组耦合系统的耦合效率可结合公式(6)和公式(10)分析。在透镜组耦合系统的仿真中，倒置望远镜的前后透镜分别为 1 in 和 2 in，曲率半径分别为 27 mm 和 120 mm，会聚透镜为两英寸，曲率半径为 90 mm；正置望远镜的前后透镜分别为 1 in 和 0.5 in，曲率半径分别为 130 mm 和 33.5 mm，会聚透镜为 0.5 in，曲率半径为 24 mm。

通过对比图 6 中的两条曲线可以看出，当光源位于系统的光轴上时，添加了正置开普勒望远镜的透镜组系统比倒置的耦合效率高很多，并且高于两

种单透镜系统的耦合效率；然而随着光源的径向偏移，拥有倒置开普勒望远镜的透镜组耦合效率的衰减远小于正置的，并且曲线的走势要比单透镜系统平稳许多。因此，在入射光源尺寸较大或者变动范围较大的情况下，添加了倒置开普勒望远镜的透镜组系统要更加适用于将空间光耦合入光纤。

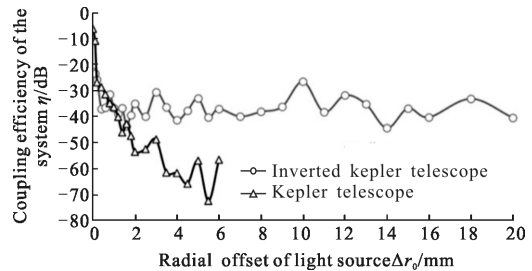


图 6 透镜组耦合系统光源径向偏移量 Δr_0 与系统耦合效率 η 的关系

Fig.6 Relationship between radial offset of light source Δr_0 and the efficiency η of coupling system with lenses

对图 4 和图 6 的仿真中所得数据进行分析比较不难发现，当耦合效率下降到 -40 dB 左右时，两种单透镜系统的光源最大偏移量为 12 mm。对于两种不同望远镜结构的透镜组系统，从图 6 可以明显看出倒置的开普勒望远镜结构其耦合效率在 -40 dB 左右时，光源的最大偏移量 30 mm，明显好过正置结构的 1.2 mm。如果有较好的光信号放大器来放大光纤接收到的空间光信号，那么各系统的可接收角度又会增大，非球面单透镜耦合系统和添加倒置开普勒望远镜的透镜组耦合系统都将适用于将空间中的散射光耦合进单模光纤中。

4 实验

为了验证上文的结论，根据图 1 和图 5 的结构建立了实验系统。其中，单透镜系统的会聚透镜采用的是 1 in 的非球面镜，焦距约为 80 mm。组成倒置望远镜的前后两个透镜直径均为 1 in，焦距分别为 35 mm 和 100 mm；组成正置望远镜的前后两个透镜直径分别为 2 in 和 1 in，焦距分别为 200 mm 和 70 mm；望远镜所用透镜为普通球面透镜。实验采用掺铒光纤的自发辐射谱作为光源通过准直器输出，光功率为 7 dBm，光斑直径接近 1 mm。光斑尺寸比散射面的颗粒大，因此，各点的散射特性差别很小。散射点到第一个透镜的距离约为 2.5 m，光探测器的灵敏度为 -70 dBm。

探测方向与平面基本垂直。改变入射点的位置,用单模光纤探测到的散射光功率 P_1 。分别将光源照射到墙面、纸面和塑料表面发生散射,对散射产生的损耗影响较小。最终选择一张 A4 纸进行散射实验。改变了入射光束的角度,来测试不同入射情况对耦合损耗的影响。为了避免入射光纤、准直器及其夹具的影响,没有从垂直入射开始测试。当入射角从 $10^\circ \sim 30^\circ$ 变化时,单透镜耦合的系统检测到的光功率如图 7 所示。

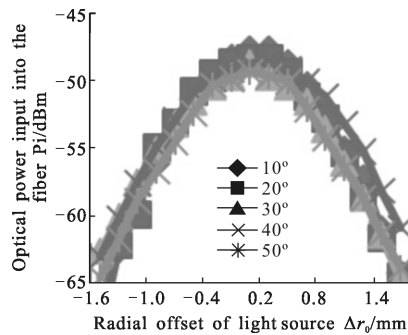
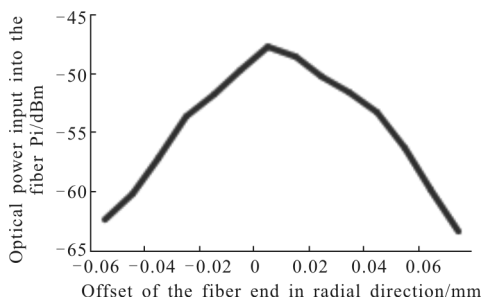


图 7 不同入射角度时耦合到光纤中的光功率

Fig.7 Optical power into the fiber with different angle of the input beam

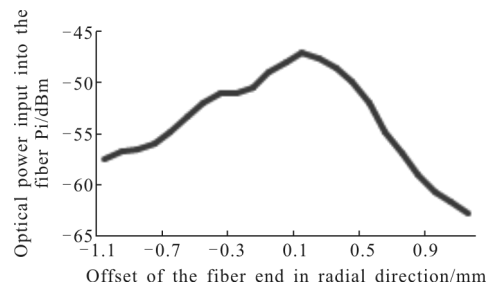
如图所示,随着入射角度的增大,耦合损耗有所增大,但由于散射面接近漫反射,对入射光的角度变化不是很敏感。而且,由于入射光斑随着入射角增大,可接收的径向移动的范围也有微小的增加。

固定入射光到散射平面大约为 30° 倾斜入射不变,探测方向与平面基本垂直,改变光纤端面的径向位置和轴向位置,得到的光功率如图 8 所示,与图 3 中仿真的结果基本保持一致,耦合损耗对光纤端面的径向位置极为敏感。



(a) 实验得到的光纤耦合效率与光纤径向偏移量的关系

(a) Relationship between the coupling efficiency and the offset in radial direction of the fiber end tested by experiment



(b) 实验得到的光纤耦合效率与光纤轴向偏移量的关系

(b) Relationship between the coupling efficiency and the offset in axial direction of the fiber end tested by experiment

图 8 实验得到的光纤耦合效率与光纤径向轴向偏移量的关系
Fig.8 Relationship between the coupling efficiency and the offset in axial direction of the fiber end

不同透镜组合的实验结果如图 9 所示。根据公式(1)计算空间损耗为 46 dB,单透镜的最小耦合损耗约为 10 dB,而倒置望远镜的耦合损耗约为 20 dB。由于照明的光斑尺寸较大,并且受到测量精度的限制,透镜孔径的衍射效应并未观测到。增加了倒置望远镜系统之后,耦合损耗的峰值有所增大,但是在满足一定耦合损耗的条件下,视场角变大了;而增加了正置望远镜的系统耦合损耗的峰值与单透镜相比稍有增大,这可能是由于望远镜系统对入射点位置过于敏感,光斑尺寸超过了最佳的接收面积,但是仍小于增加了倒置望远镜的系统,然而其视场角却是 3 个系统中最小的;与仿真结果的分析相符合。

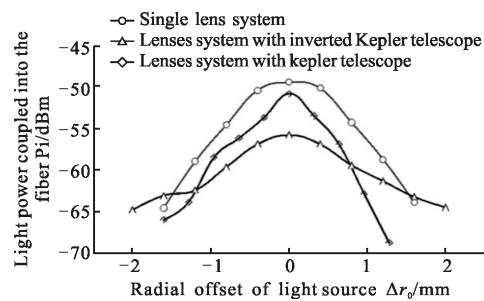


图 9 不同实验装置的实验结果

Fig.9 Experimental results with different setups

5 结论

将空间中的散射光耦合进单模光纤时,采用单透镜方式对透镜的成像质量和系统的容差要求都很高;相比之下,透镜组耦合系统容差相对较大、设计灵活、结构形式利于像差平衡。通过分析仿真的结果

可以发现,当期望的耦合效率为 -40 dB 时,单透镜耦合系统可接收到的光源位置的角度为 0.275° ,添加正置开普勒望远镜的透镜组系统为 0.028° ,倒置开普勒望远镜的透镜组耦合系统为 0.688° ;实验得到的结果与仿真实验相符。不难发现,两种单透镜耦合系统的耦合效率以及当光源发生径向偏移时的衰减程度相差不大;而选取适当的倒置开普勒望远镜,可以大大地减小光源偏移对系统耦合效率带来的衰减,这使得在入射光为漫射光或者偏离光轴较远时,透镜组耦合系统更适合光纤的耦合。搭建了实验系统进行实验,实验结果与仿真结果基本符合。在光功率较大,系统允许较大损耗的时候,采用倒置望远镜系统能得到最大的接收视场角。还对不同入射角的耦合损耗进行了测试,随着入射角度的增大,耦合损耗有所增大,但由于散射面接近漫反射,对入射光的角度变化不是很敏感。散射光到光纤的耦合损耗对光纤端面的径向和轴向位置都比较敏感,而对光纤端面的径向位置极为敏感。

参考文献:

- [1] Ding Peng, Dong Xiaopeng. Theoretical and experimental research on fiber-optic microphone using multimode fiber lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060603-1-060603-5. (in Chinese)
丁朋,董小鹏.采用多模光纤透镜的光纤麦克风风理论与实验研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(6):060603-1-060603-5.
- [2] Liao Tianjun, Lin Bihong, Yang Zhimin. Temperature monitoring for concentrated photovoltaic power system based on optical fiber temperature sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050602-1-050602-5. (in Chinese)
廖天军,林比宏,杨智敏.基于光纤温度传感器监测的聚光光伏发电系统[J].激光与光电子学进展,2014,51(5):050602-1-050602-5.
- [3] Grulkowski I, Liu J J, Potsaid B, et al. High-precision, high-accuracy ultralong-range swept-source optical coherence tomography using vertical cavity surface emitting laser light source[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 673-675.
- [4] Bland-Hawthorn J, Ellis S C, Leon-Saval S. G, et al. A complex multi-notch astronomical filter to suppress the bright infrared sky[J]. *Nat Communication*, 2011, 2: 581.
- [5] Jiang Keli. The designing of optical receiving system in monostatic and bistatic lidar [D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 1-4. (in Chinese)
蒋克丽.单、双基地激光雷达光学接收系统设计[D].西安:西安电子科技大学,2008:1-4.
- [6] Vornehm J E, Schweinsberg A, Shi Z, et al. Phase locking of multiple optical fiber channels for a slow-light-enabled laser radar system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13094-13104.
- [7] Zhang R, Wang J, Zhao G, et al. Fiber-based free-space optical coherent receiver with vibration compensation mechanism[J]. *Opt Express*, 2013, 21(15): 18434-18441.
- [8] Deng Ke, Wang Bingzhong, Wang Xu, et al. Technology of coupling beam into single-mode fiber in free space optical communication system [J]. *Journal of University of Electronics Science and Technology of China*, 2007, 36(5): 889-891. (in Chinese)
邓科,王秉中,王旭,等.空间光-单模光纤耦合效率因素分析[J].电子科技大学学报,2007,36(5):889-891.
- [9] Zhou Cheng. Focusing properties of Gaussian beams through a telescope-lens compound system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1203-1207. (in Chinese)
周城.高斯光束经望远镜和薄透镜组合系统的聚焦特性[J].光学精密工程,2007,15(8):1203-1207.
- [10] Chen Haitao, Yang Huajun, Li Tuohui, et al. Influence of the fiber displacement on coupling light beam into single-mode fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 75-78. (in Chinese)
陈海涛,杨华军,李拓辉,等.光纤偏移对空间光-单模光纤耦合效率的影响[J].激光与红外,2011,41(1):75-78.
- [11] Chen Zhiyuan, Xiong Aihua. The cardinal point of tri-combination thin lens system in the air [J]. *Journal of Xianning Teachers College*, 2000, 20(6): 32-34. (in Chinese)
陈志远,熊爱华.空气中三薄透镜组合系统的基点[J].咸宁师专学报,2000,20(6):32-34.