

文章编号: 0253-2239(2009)09-2368-06

直线运动型无线光通信中振动对光接收功率的影响分析

付兴虎 陈振宜 郭 强 庞拂飞 王廷云

(上海大学,特种光纤与光接入网省部共建重点实验室,上海 200072)

摘要 对直线运动型无线光通信中的光束偏转进行了分析,给出了不同运动距离与光斑半径、光接收功率的关系;不同偏转角度与光接收功率、像点偏移量的关系。在直线轨道上,进行了发射端静止、接收端运动,发射端运动、接收端静止两种情况下的光功率接收实验,并分别比较大孔径光纤和实心耦合光锥的空间光接收性能,提出采用实心光锥作为空间光耦合接收元件。实验结果表明:在运动距离最远为 80 m 的情况下,实心耦合光锥能有效接收光束偏移后的聚焦光信号,适用于直线运动型无线光通信。

关键词 无线光通信;直线运动;振动;光束偏移;实心光锥

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2368

Influence of Vibration on Optical Receiving Power in Rectilinear Mobile Wireless Optical Communication

Fu Xinghu Chen Zhenyi Guo Qiang Pang Fufei Wang Tingyun

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract The beam offset in rectilinear mobile optical communication is investigated thoroughly, and the relation between mobile distance and spot radius, optical receiving power and the relation between angle offset and optical receiving power, image offset are presented. The experiments on optical receiving power are done at the rectilinear orbit with immobile optical transmitter and mobile optical receiver, and with mobile optical transmitter and immobile optical receiver. The space light receiving performance is compared between big aperture optical fiber and solid optical taper. The optical taper is presented as the space light coupling receiving component. The result of the experiment shows that the solid coupling optical taper can receive the focused light signal effectively when the beam is deflected, and suitable to the rectilinear mobile wireless optical communication with the mobile distance scope of 80 m.

Key words wireless optical communication; rectilinear mobile; vibration; beam offset; solid optical taper

1 引 言

在大型港口,自动化码头是实现高效率集装箱装卸的重要场所,它主要是利用在直线轨道上运行的智能化电动小车将集装箱在起重机和堆场之间运送,极大地提高港口的装卸速度。而智能化电动小车的通信系统是自动化码头正常运转的命脉,是整个系统的技术核心。现有的通信系统主要包括光纤通信、微波通信等,实际应用中均存在着一定的不

足。如高速运动通信中的大量线缆来回拖拉容易造成通信线缆的不同程度磨损;微波通信的信息传输容量和传输速率有限,同时它还需要申请微波通信许可证,价格昂贵,无法在自动化码头中推广应用。

根据自动化码头中智能化电动小车具有直线运动轨道的特点,本文提出一种直线运动型无线光通信系统,它以激光作为载波,大气作为传输介质,不仅避免了大量线缆反复拖拉带来的不便,而且具有

收稿日期: 2008-10-30; **收到修改稿日期**: 2008-12-18

基金项目: 上海市科委重大攻关项目(075305101)、上海市科委省部共建重点实验室专项(08DZ2231100)和上海市重点学科建设项目(S30108)资助课题。

作者简介: 付兴虎(1981—),男,博士研究生,主要从事运动光通信方面的研究。E-mail: fxhyanshan@163.com

导师简介: 王廷云(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事特种光纤及光电测试技术等方面的研究。

E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn

通信容量大、安全保密性高、抗电磁干扰能力强等优点^[1~5],适用于高速直线运动场合的通信。在运动通信过程中,能够保持光收发天线之间的信号畅通是该通信系统正常运行的关键,但是,轨道的不平整或者宏弯导致的系统振动会影响光束在大气中的正常传输^[6],使到达光接收天线的光束方向发生偏转,进而引起会聚后的像点偏移,这将直接影响光接收透镜和接收光纤之间的耦合效率,甚至导致通信链路中断。常规的解决振动带来影响的措施^[7~13]主要有:采用 APT (Acquisition, Pointing and Tracking,即捕获、瞄准、跟踪)装置或利用大面积探

测器阵列、光纤阵列等增加光信号接收面积,这些方法由于受到技术复杂、成本昂贵、传输带宽小、传输速率低等因素的限制,不宜在直线运动型无线光通信中使用。在分析运动中振动所导致的光接收功率变化的情况下,提出采用实心光锥接收光束偏移后的聚焦光信号,并在直线轨道上进行了实验,获得了良好的接收效果。

2 振动对光束传输影响的理论分析

如图 1 所示为典型无线光通信系统的光学天线。

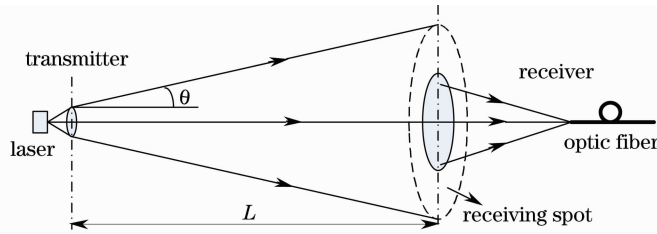


图 1 无线光通信系统

Fig.1 Wireless optical communication system

发射天线以一定发散角 θ 发射光信号,光信号在大气中传输,到达光接收天线处呈一定大小的光斑,经过光接收透镜聚焦后耦合入光纤。当该系统应用到直线运动型通信系统时,其发射、接收天线分别置于移动体上,并随移动体的运动而沿直线往返运动。当发射天线和接收天线的轴共线时,轴系统的接收效率最高。但是,在运动过程中,轨道的不平整或者宏弯等因素将导致天线振动,使得光束在各个方向上随机抖动,同时这将对透镜接收和光纤耦合效率产生影响。一方面,由于接收光斑的光

功率密度分布不均匀,接收到的光功率也不断变化,如图 2(a)所示。如果振动幅度较大,光斑还有可能偏出接收透镜,导致通信链路中断。另一方面,在接收透镜的会聚焦点处,振动将导致光轴偏离一定的角度,引起聚焦后的像点偏移,使得光纤接收的光功率减小,如图 2(b)所示。光束偏转引起的像点偏移可近似看作整个光学接收系统倾斜时引起的像点偏移,如图 3 所示,因此可以通过分析发射光束偏转引起的像点偏移来分析运动通信中的像点偏移情况。

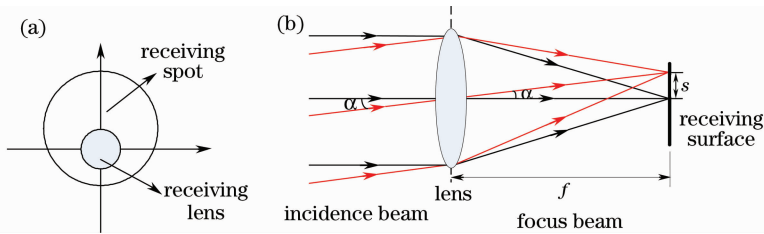


图 2 光束振动。(a)发生振动;(b)光束偏移

Fig.2 The receiving beam vibration. (a) Vibration; (b) Beam offset

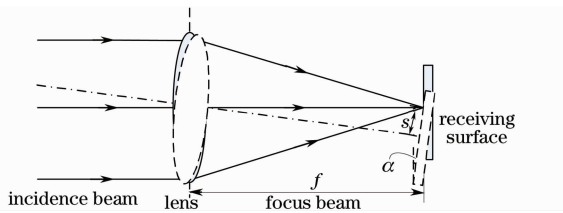


图 3 整个光学接收系统倾斜

Fig.3 The inclination of whole optical receiving system

设发射光束的光强呈高斯分布,则由高斯光束特性可知^[14]

$$U = \frac{U_0 \omega_0}{\omega(L)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{\omega^2(L)}\right], \quad (1)$$

其中 U 为接收面上任一点的光振幅, U_0 为发射光束的总振幅, ω_0 为光腰半径, $\omega(L)$ 为发射光束在光接收透镜所在平面的光斑半径,其随传输距离而发生变化, ρ 为光接收透镜的中心点距接收端光斑中心

的距离。因此,信号光经过距离 L 后在光接收透镜所在平面的光强分布为

$$I(\rho) = \frac{I_0 \omega_0^2}{\omega^2(L)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{\omega^2(L)}\right], \quad (2)$$

式中 I_0 为光接收透镜所在平面中心点的光强。当发射光束的偏转角度为 α 时,接收透镜中心偏离光斑中心的距离为 $\rho = L\alpha$ 。为增强无线光通信系统的抗振动能力,需增大光发射角以扩大接收面上光斑的尺寸,在这种情况下,接收透镜的口径相对于光斑直径比较小,可以近似认为在接收透镜的口径内光强分布是均匀的。于是,可以得到接收透镜所接收到的光功率与整个信号光功率的比值为

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{(\pi D^2/4)[I_0 \omega_0^2/\omega^2(L)] \exp[-2\rho^2/\omega^2(L)]}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\omega(L)} [I_0 \omega_0^2/\omega^2(L)] \exp[-2\rho^2/\omega^2(L)] \rho d\rho d\varphi}, \quad (3)$$

式中 D 为光接收透镜的直径,分子部分是光接收透镜接收到的光功率,分母部分是发射光束总的光功率。对上式化简后得到,

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{(\pi D^2/4) \exp[-2\rho^2/\omega^2(L)]}{\pi \omega^2(L)/2} = \frac{D^2}{2\omega^2(L)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{\omega^2(L)}\right], \quad (4)$$

高斯光束的光斑半径为

$$\omega(L) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi \omega_0^2}\right)^2\right]^{1/2}, \quad (5)$$

将 $\rho = L\alpha$ 和(5)式代入(4)式中,并考虑到光发射天线的效率 η_t 和光接收天线的效率 η_r ^[15],可得接收透镜所接收到的光功率为

$$P_r = \frac{P_t \eta_t \eta_r D^2 \pi^2 \omega_0^2}{2(\pi^2 \omega_0^4 + \lambda^2 L^2)} \exp\left(-\frac{2L^2 \alpha^2 \pi^2 \omega_0^2}{\pi^2 \omega_0^4 + \lambda^2 L^2}\right), \quad (6)$$

上述光束偏转引起的像点偏移量或整个光学接收系统倾斜时引起的像点偏移量^[16],由图 2(b)和图 3 可得

$$s = \alpha f, \quad (7)$$

其中 f 是透镜焦距。

如果接收光纤的直径为 d ,那么其与像点偏移量 s 必须满足以下关系才能保证接收到光信号:

$$d \geq 2s. \quad (8)$$

3 光接收效率的仿真计算

在实际应用的直线运动型无线光通信系统中,其运动距离通常比较短。当系统在直线轨道上往返运动时,在接收端接收到光斑半径随发射端和接收端的间距变化而变化。发射端和接收端相距越远,其接收端接收到的光斑半径越大。根据实际中应用

的轨道长度,在 200 m 运动范围内进行仿真研究。轨道的振动情况决定光束发散角。振动幅度越大,发散角越大,接收端的光斑半径越大。因此,在运动间距 $L=5\sim 200$ m 时,选取 $\omega_0=0.05\sim 0.30$ mm,波长 $\lambda=1550$ nm,根据(5)式,得到运动距离 L 、光斑半径 $\omega(L)$ 和光腰半径 ω_0 的变化关系,如图 4 所示。

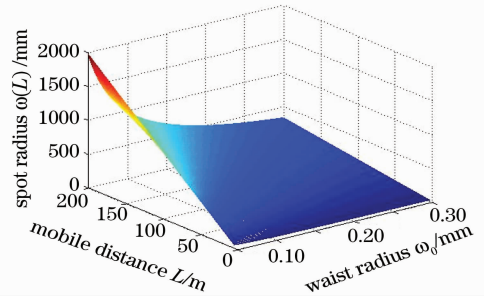


图 4 运动距离、光斑半径和光腰半径的关系

Fig. 4 Relation between mobile distance, spot radius and waist radius

由图 4 可以看出,随着光腰半径 ω_0 的增加,光斑半径 $\omega(L)$ 逐渐变小;随着运动距离 L 的增加,接收端的光斑半径 $\omega(L)$ 逐渐变大。当光斑直径小于光接收透镜直径 D 时,发射光功率完全进入光接收透镜中;当光斑直径大于光接收透镜直径 D 时,光接收透镜接收到部分光功率。因此,主要对光接收透镜接收部分光功率的情况进行分析。

考虑到直线运动型无线光通信的实际运动距离,在运动距离 L 为 5~200 m 范围内进行仿真计算。光接收透镜的焦距 f 为 160 mm,系统其它参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

P_t /mW	D /mm	η_t	η_r	λ /nm
100	80	0.9	0.9	1550

以发射端和接收端相距 100 m 为参考点,当接收端的光斑半径 $\omega(L)$ 分别为 250, 300, 350, 400, 500 和 600 mm 的时候,选取偏转角度 $\alpha=0\sim 0.010$ rad,计算运动间距 L 、偏转角度 α 、光接收功率 P_r 三者之间的关系。结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随着运动间距 L 的增加,接收透镜所接收到的光功率逐渐减小;随着偏移角度 α 的增加,光接收透镜接收到的光功率也逐渐减小;由(8)式可以看出,随着偏转角度的增大,像点偏移量逐渐增大。当像点偏移量变化剧烈时,会偏出普通光纤的直径范围,无法正常接收光信号,因此需要一种特殊的光学元件来接收偏移后的聚焦光信号。

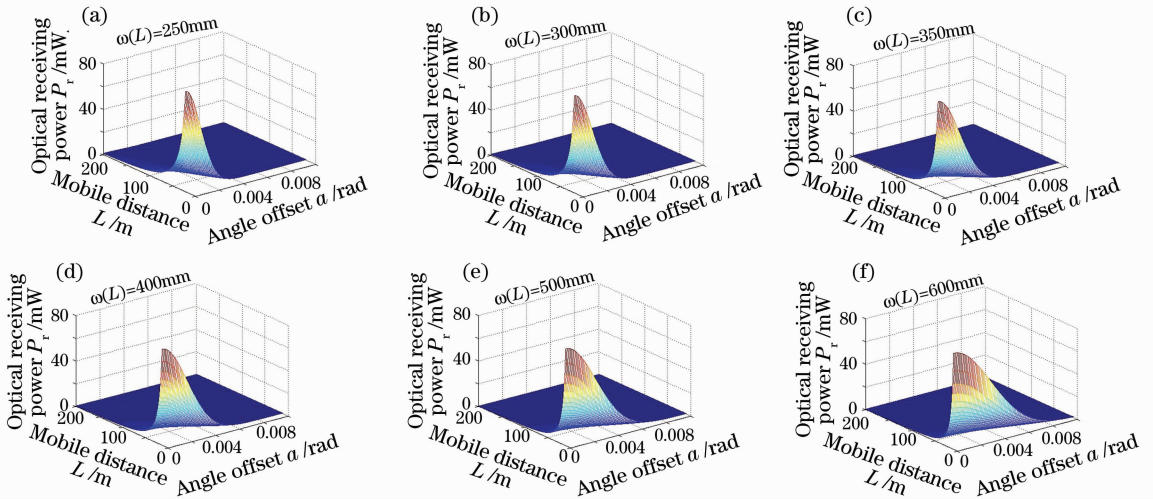


图 5 运动间距、偏转角度与光接收功率的关系

Fig. 5 Relation between mobile distance, angle offset and optical receiving power

4 实验研究

为了研究直线运动型无线光通信系统的性能，搭建了一个小型的直线运动双轨系统，同时设计了一个四轮的运动平台，如图 6 所示。轨道的宽度为 50 cm，由于受到实验环境所限，轨道铺设长度为 10 m。实验中，将光学发射天线或接收天线置于运动平台上面，光学接收天线或发射天线沿轨道方向

置于地面，它与轨道的最大距离为 80 m。这样，一方面可以通过改变发射或接收天线与轨道的相对位置来模拟不同的运动距离，另一方面可以使光发射天线或接收天线沿 10 m 轨道运动来模拟动态运动通信情况，如图 7 所示。光发射天线透镜的直径为 20 mm，焦距为 40 mm；光接收天线透镜的直径为 80 mm，焦距为 160 mm。

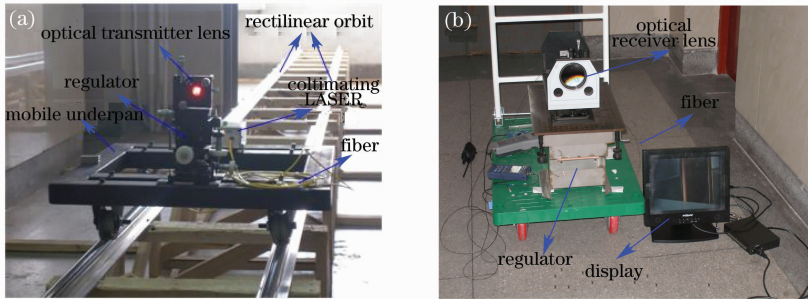


图 6 实验装置(a)光发射装置;(b)光接收装置

Fig. 6 Experimental equipment (a)Optical transmitter equipment; (b)Optical receiving equipment

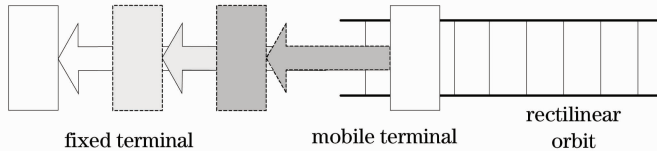


图 7 实验示意图

Fig. 7 The schematic diagram of experiment

在实验中，根据轨道振动情况，调整发射光束使其在 $L=100\text{ m}$ 处成半径为 300 mm 的光斑。在运动传输过程中，我们发现光束会聚的像点偏移量随振动偏离较大，为了提高接收效率，设计了一种实心光锥以增大光的接收面积，再与光纤进行连接。为了对比接收性能，实验中还采用了利用大孔径光纤直接接收

的方案，光纤直径为 1 mm，数值孔径为 0.37。

图 8 所示为实心石英光锥示意图，光锥有两个直径大小不等的端面，锥体母线可以是任意平滑曲线，如直线、抛物线、双曲线等，光锥的母线不同，其损耗也不同；大端直径大小由光接收端的像点偏移情况决定；小端直径大小要与后续的传输光纤直径

相匹配;锥体长度主要根据锥体两端面直径大小和光接收装置体积大小而定。实心光锥采用熔融拉锥技术制备,它是将石英棒放在光纤拉丝塔上加热使其熔融拉制而成,如图 9 所示(光锥照片),光锥的入射大端直径为 5.6 mm,出射小端直径为 0.3 mm,长度为 45 mm。为了进一步提高光传输效率,在实心光锥侧表面涂覆一层低折射率薄膜材料,使光锥和薄膜构成光波导,以降低光的折射损耗。

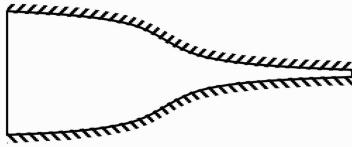


图 8 实心光锥示意图

Fig. 8 Schematic diagram of solid optical taper

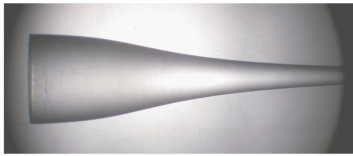


图 9 实心光锥

Fig. 9 Picture of solid optical taper

利用该系统,我们进行了发射端静止、接收端运动,发射端运动、接收端静止两种情况下的光功率接收实验,光发射功率为 100 mW。

由于直线轨道铺设条件的影 响,轨道存在一定的偏差。通过测量轨道,沿轨道运动方向的轨道横向偏移量最大为 13 mm,对应的光束偏移角度 α 为 7.8746 mrad,这样偏移光束经过光接收透镜聚焦后的像点偏移量为 $s = \alpha f = 7.8746 \times 10^{-3} \times 160 = 1.26$ mm。

4.1 远端发射端静止、接收端运动情况

将发射端置于远端保持静止,接收端在直线轨道上做往返运动,发射端与接收端最远距离为 80 m,最近为 70 m,分别采用 1 mm 直径光纤直接接收和实心光锥进行光接收实验。每间隔 0.6 m

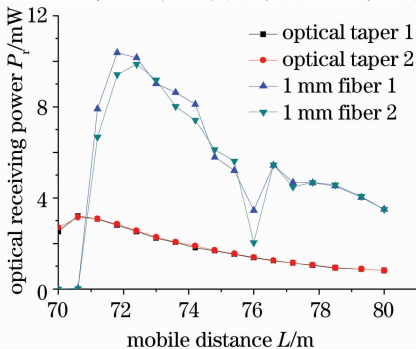


图 10 光纤和光锥结果比较

Fig. 10 Comparison results of fiber and solid optical taper

记录 1 次光接收功率,重复两次实验,并比较接收效果,如图 10 所示。

由图 10 可见,横轴表示运动中的光收发间距,纵轴表示实心光锥小端的输出光功率和 1 mm 直径光纤的输出光功率。在光收发两端距离较近时,1 mm 直径光纤和光锥的光接收功率差别很大,主要是轨道不平整引起的光束偏转造成的。尤其是在较近距离处,1 mm 直径光纤的接收输出光功率几乎为零。虽然其它位置处 1 mm 直径光纤的输出光功率比较大,但是受运动中的振动影响比较明显;而在整个实验过程中,光锥的输出光功率近似线性变化,接收稳定。因此,使用 1 mm 直径光纤进行接收时,像点已经明显偏出光纤半径,无法完成正常光信号接收。而光锥入射大端直径为 5.6 mm,能够正常接收到偏移的聚焦光信号。

4.2 远端发射端运动、接收端静止

同理,在相同的距离内,发射端在直线轨道上运动,接收端置于远端保持静止,利用光锥进行光功率接收,重复记录两次实验数据,如图 11 所示。

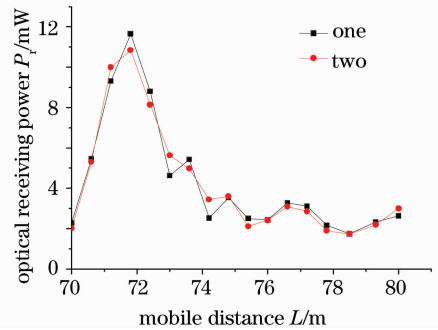


图 11 远端实心光锥实验结果

Fig. 11 Experimental result of solid optical taper at the far end

4.3 近端发射端静止、接收端运动

将发射端置于近端保持静止,接收端在直线轨道上做往返运动,发射端与接收端最远距离为

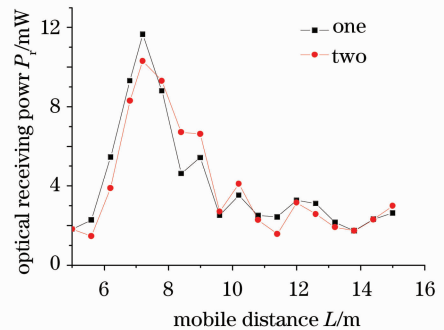


图 12 近端实心光锥实验结果 1

Fig. 12 Experimental result 1 of solid optical taper at the near end

15 m,最近为 5 m,如图 12 所示。

4.4 近端发射端运动、接收端静止

同理,在相同的距离内,发射端在直线轨道上运动,接收端置于近端保持静止,利用光锥进行光功率接收,重复记录两次实验数据,如图 13 所示。

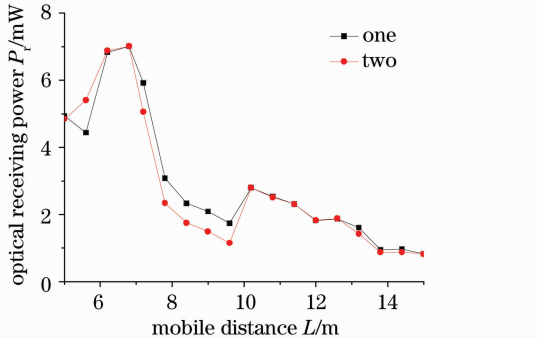


图 13 近端实心光锥实验结果 2

Fig. 13 Experimental result 2 of solid optical taper at the near end

从以上图中可以看出,在实验过程中,由于系统是在直线轨道上运动,轨道振动造成的光束偏转是随机的,因此光束偏移角度和光接收功率的变化也是随机的。在发射端静止、接收端运动,发射端运动、接收端静止两种情况下,无论是在远端(70~80 m)还是近端(5~15 m),光锥都能有效接收光束偏移后的聚焦光信号,在中间运动距离(15~70 m)范围内,情况基本相似,不再一一列举。因此,实心光锥作为光接收元件适合用于振动比较剧烈的直线运动型无线光通信中。

5 结 论

在对直线运动型无线光通信中的振动情况进行分析的基础上,为了能够在运动中正常接收光信号,分别比较了大孔径光纤和实心光锥的光接收性能,提出采用实心光锥作为直线运动型无线光通信的光接收元件。实验结果表明:实心光锥能有效接收光束偏移后的聚焦光信号。但是如何优化光锥形状,提高接收性能,需要进一步深入研究。

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所方祖捷研究员和瞿荣辉研究员对本工作的支持和帮助。

参 考 文 献

1 Juan C. Juarez, Anurag Dwivedi, A. Roger. Hammons *et al.*. Free-space optical communications for next-generation military networks [J]. *Communications Magazine*, 2006, **44** (11): 46~51

2 Peter Crabtree, Charles L. Woods, Jed Khoury *et al.*. Binary phase-only filtering for turbulence compensation in fiber-coupled free-space laser communication systems [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(34): 8335~8445

3 Liu Qingchong, Qiao Chunming, Gregory Mitchell *et al.*. Optical wireless communication networks for first-and last-mile broadband access [J]. *J. Optical Networking*, 2005, **4**(12): 807~828

4 Denis Bushuev, Shlomi Arnon. Analysis of the performance of a wireless optical multi-input to multi-output communication system [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(7): 1722~1730

5 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (8): 1020~1024

马东堂,魏急波,庄钊文. 大气激光通信中的多光束传输性功能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024

6 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 499~502

丁涛,许国良,张旭苹等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 499~502

7 Philip Gatt, Thomas P. Costello, Dean A. Heimmermann *et al.*. Coherent optical array receivers for the mitigation of atmospheric turbulence and speckle effects [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(30): 5999~6009

8 Kamugisha Kazaura, Kazunori Omae, Toshiji Suzuki *et al.*. Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 4958~4968

9 Steve Hranilovic. A pixelated MIMO wireless optical communication system [J]. *IEEE J. Selected Topics In Quantum Electronics*, 2006, **12**(4): 859~874

10 Marius Aharonovich, Shlomi Arnon. Performance improvement of optical wireless communication through fog with a decision feedback equalizer [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(8): 1646~1653

11 Stuart Shaklan, Francois Roddier. Coupling starlight into single-mode fiber optics [J]. *Applied Optics*, 1988, **27** (11): 2334~2338

12 Zhang Leihong, Yang Yan, Hu Shanjiang *et al.*. The moving characteristics of directional driving motor in space tracking system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 233~237

张雷洪,杨艳,胡善江等. 空间激光跟踪中指向驱动电机运动特性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 233~237

13 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical bell labs layered space-Time [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **35**(6): 974~978

王惠琴,柯熙政. 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信[J]. *中国激光*, 2007, **35**(6): 974~978

14 Tan Liying, Ma Jing. Satellite optical communication technology [M]. Beijing: Science press, 2004: 183

谭立英,马晶. 卫星光通信技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 183

15 Brian R. Strickland, Michael J. Lavan, Eric Woodbridge *et al.*. Effects of fog on the bit-error rate of a free-space laser communication system [J]. *Applied Optics*, 1999, **38** (3): 424~431

16 Li Zhengzhi. Infrared optical system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986: 111

李正直. 红外光学系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 111