

一种新型可见光无线通信可调复眼光学接收系统

吴俊峰, 朱娜, 江晓明

(江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)

摘要: 在可见光无线通信系统中,接收端需具备小型化、大视场、高增益等特点。本文设计了一种基底可活动、由塑料光纤代替晶椎的复眼结构光学接收系统。和传统复眼透镜相比,最大视场角增加了 92° 。光纤代替晶椎使得光损耗降低了 0.3457dB ,实现了可见光无线通信接收端大视场、高增益的目的。

关键词: 复眼透镜; 曲率半径; 光耦合效率

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 1003-8329(2012)04-0048-04

A New Type of Adjustable Compound Eye Optical Array Antenna for Visible Light Communication

WU Jun-feng, ZHU Na, JIANG Xiao-ming

(School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: People have put forward higher requirements on the performance of the receiver of visible light communication system. Just as miniaturization, large field of view and high gain. We propose a compound eye structure which has a movable substrate, and crystal vertebral replaced by plastic optical fiber in this paper. Compared with the traditional compound eyes lens, the maximum field of view angle of the new type of compound eyes increase by 92° . Using optical fiber replace the crystal vertebral make light loss reduce 0.3457dB , and achieve the goals of large field of view and high gain of the visible light communication receiver.

Key words: compound eye lens; radius of curvature; optic coupling efficiency

1 引言

可见光无线通信因其无电磁干扰、节能、绿色等优点引起了广泛的关注和研究。随着可见光无线通信技术的发展,人们对接收机提出了类似于无线通信中天线所具备的小型化、大视场、高增益等要求。在传统可见光通信接收系统中,用作光信息采集的透镜多为不可活动的单孔径结构,其接收视场角较小,接收方向不易调整。复眼透镜作为光学系统中

的仿生透镜,与其它光学透镜相比,其体积小、重量轻、视场大^[1]、灵敏度高,同时对运动目标敏感。因此,将复眼结构接收端引入到可见光通信光学接收系统中,可以实现多个小眼从不同角度来捕获光信号^[2],扩大视场角。传统复眼透镜也多为单孔径结构。其视场角大小通常由微透镜和基底结构决定。一般情况下,基底分为平面型和曲面型^[3-4]两种。曲面型基底比平面型基底的复眼透镜有更大的视场角,最大可达 88° ^[5]。但对于曲面基底结构的复眼透镜来说,其边缘微透镜焦点常常处于离焦状

*基金项目:国家自然科学基金项目(60702056)资助。

作者简介:吴俊峰(1986-),男,硕士研究生,从事可见光通信光方向的研究。

态^[6]在复杂的通信环境下,通信性能会因此受到局限。本文通过改变复眼基底结构、用塑料光纤代替晶锥等方法,设计了一种基底可调、低损耗、大视场角的光学接收端系统。

2 可调型复眼结构光学接收系统

2.1 可调复眼接收系统模型

可调型复眼接收系统模型主要由前端复眼透镜、光纤、套管与光电探测器组成,如图1所示。

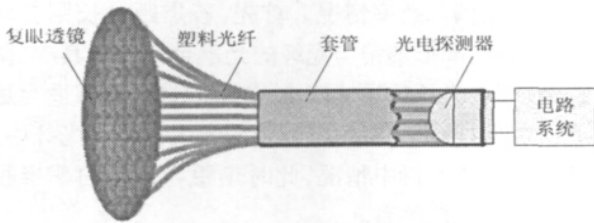


图1 可调型复眼接收系统模型图

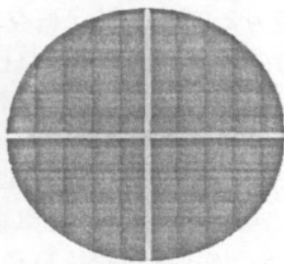


图2 可调型复眼透镜基底结构

本文将复眼基底设计为四部分可活动结构,每部分都可以绕着相邻的转轴转动。在光辐射不均匀同时又可能会存在定向背景光干扰的情况下,通过基底调节,可调整接收面积和接收方向,达到最佳的接收效果,另外,这种结构将会在自适应光学接收中得到更多应用。

应用领域的人工复眼多为一体、多层结构。外界光线进入透镜时需逐层聚集,光能损失较大,同时小眼中晶锥的加工也存在难点。针对光信号不能一次聚焦造成的光损失,以及晶锥的制作困难等缺点,本文选择用塑料光纤代替了晶锥,减少光能损失,提高接收效率。同时塑料光纤又有加工方便、不易损坏等优点。具体是从复眼透镜中小眼结构即微透镜与光纤结合结构入手,如图3所示。

图3是微透镜与光纤结合结构图, D 为微透镜口径, n_0 、 n_L 、 n_1 和 n_2 分别为空气、透镜、纤芯和包层的折射率。透镜前后面曲率半径分别为 r_1 和 r_2 。平行入射光线汇聚到光纤内部且刚好在光纤内发生全反

射时的焦距为 f 。根据光纤数值孔径、透镜口径等参数,结合SNELL定律可得出透镜的焦距和曲率半径。从而确定透镜形状。

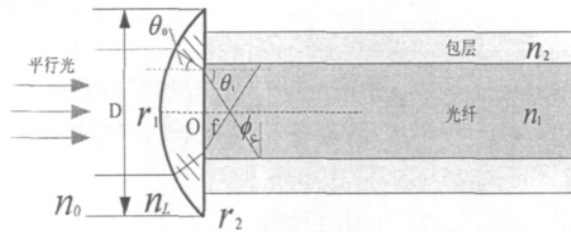


图3 微透镜与光纤结合结构图

2.2 参数设计

1) 理论依据

在光学中,数值孔径是表示光学透镜性能的参数之一。若平行光线照射在透镜上,并经过透镜聚焦于焦点处时,对从焦点到透镜边缘的仰角取正弦值,即为该透镜的数值孔径。由SNELL定律,可求出光线在光纤内全反射临界角 ϕ_c 。如果光线以小于 ϕ_c 的入射角入射到纤芯包层的界面上,光线将折射出纤芯并进入包层而损失掉。将SNELL定律应用于透镜-光纤端面边界,由下式可以得到透镜中光线的最大入射角 $\theta_{0,max}$ 所满足的关系式:

$$\sin\theta_{0,max} = \frac{n_1}{n_L} \sin\theta_1 = \frac{1}{n_L} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

式中 n_L 、 n_1 与 n_2 分别为透镜、纤芯和包层的折射率,其中纤芯与包层折射率平方差的平方根值为光纤数值孔径 NA_c 。将上式 $\sin\theta_{0,max}$ 定义为微透镜的数值孔径 NA_B ,即有

$$NA_B = \frac{NA_c}{n_L} \quad (1)$$

由于透镜的折射率大于1,可知透镜数值孔径 NA_B 小于光纤数值孔径 NA_c 。为了使 NA_B 更大,透镜折射率应尽量小些。透镜边缘入射的平行光折射光线路径如图2中所示。近似有 $\tan\theta_1 \approx D/2f$,由于 $\theta_1 = \pi/2 - \phi_c$,光纤内入射光线正好发生全反射时,透镜焦距 f 与光纤数值孔径 NA_c 关系式为:

$$\begin{aligned} f &\approx \frac{D}{2\tan\theta_1} = \frac{D}{2 \frac{\sin\theta_1}{\sqrt{1-\sin^2\theta_1}}} = \frac{D}{2 \frac{NA_c}{\sqrt{n_1^2 - NA_c^2}}} \\ &= \frac{D}{2 \frac{NA_c}{n_2}} = \frac{n_2 D}{2NA_c} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 D 为微透镜口径。当入射光线为平行线时,通过微透镜的光线交点到透镜的距离即为透镜的焦距,公式为

$$f = \frac{n_1}{\frac{n_L - n_0}{r_1} - \frac{n_L - n_1}{r_2}}$$

式中 n_0 、 n_L 与 n_1 分别为空气、透镜和塑料光纤的折射率, r_1 、 r_2 分别为凸透镜凸面和平面的曲率半径,由于 r_2 为无穷大,简化后得

$$f = \frac{n_1 r_1}{n_L - n_0} \quad (3)$$

上式即为图 3 中微透镜焦距 f 和曲率半径 r_1 之间的关系。当透镜及光纤材料选定,即相关折射率值一定时,则焦距和透镜面曲率半径呈线性关系。

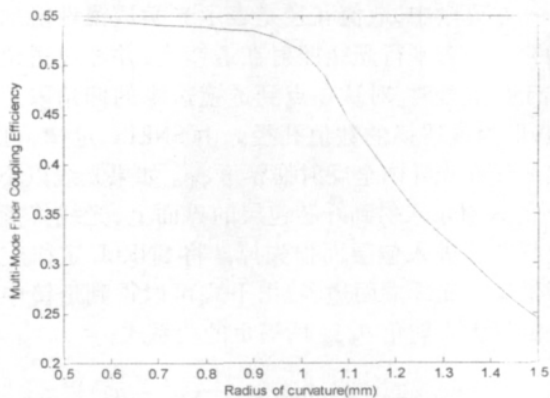


图 4 微透镜焦距和曲率半径呈线性关系时的光耦合效率图

文中仿真以塑料光纤纤芯 FK5 折射率 n_1 为 1.48749,包层折射率 n_2 为 1.403,塑料光纤直径为 1mm,选透镜材料为 BK7 折射率为 1.5168 为基础,由 ZEMAX 软件来分析焦距或透镜口径 D 选择的不同对光耦合效率的影响。首先选择微透镜口径与光纤直径比为 1:0.7,透镜口径 D 为 1.43 mm。由公式(2)、(3)可分别得出焦距 f 为 2.003 mm,曲率半径 r_1 为 0.696 mm。在 ZEMAX 软件中设置相关参数后,用相同孔径半径的接收平面来模拟光纤端面^[8],由仿真得出耦合效率为 54.535%。由仿真计算可知透镜曲率半径应至少大于 0.5 mm,否则透镜口径将小于光纤直径,汇聚光线部分会入射到光纤包层内,光能利用率低。在光纤数值孔径 NA_c 及包层折射率 n_2 给定的情况下,由公式(2)可知焦距 f 和透镜口径 D ,焦距与曲率半径均呈线性关系。逐渐改变微透镜口径 D 的大小,由公式(2)和(3)得出对

应的焦距和曲率半径,仿真得光耦合效率如图 4 所示。由图可以看出,当微透镜焦距和曲率半径呈线性关系时,透镜曲率半径在 0.5mm 到 1mm 内时,光耦合效率没有明显变化,效率值基本保持在 54% 左右。若曲率半径继续增大,光耦合效率将会明显下降。

2) 优化设计

焦距 f 的选择参考光纤数值孔径,即微透镜焦距和曲率半径呈线性关系时,耦合效率值基本保持在 54% 左右。实际情况下,必须要考虑到微透镜与光纤的光耦合效率情况。首先,若焦距过长则会增加光损耗,降低透镜与光纤的光耦合效率。其次,微透镜、塑料光纤的尺寸较小,焦距的选择也应适当短些,这可以使更大视角范围内的光线耦合到光纤中。即参数选择的折中情况,此时焦距与透镜曲率半径取值呈非线性关系。

透镜与光纤口径比为 1 比 0.7 时,透镜口径为 1.43mm,焦距为 2.003mm,为了研究较短焦距即折中时的光耦合效率,下面将微透镜口径 D 固定为 1.2mm,焦距为 1.681 mm。保持焦距不变,观察光耦合效率随曲率半径的变化情况。仿真结果表明,随着曲率半径增大,光耦合效率整体呈增大趋势。曲率半径为 0.705mm 时,耦合效率最高可达 78.881%。如图 5。依次选择透镜口径为 1.1mm、1.3mm、1.4mm 时,分析透镜焦距与曲率半径呈非线性关系时的光耦合效率情况。

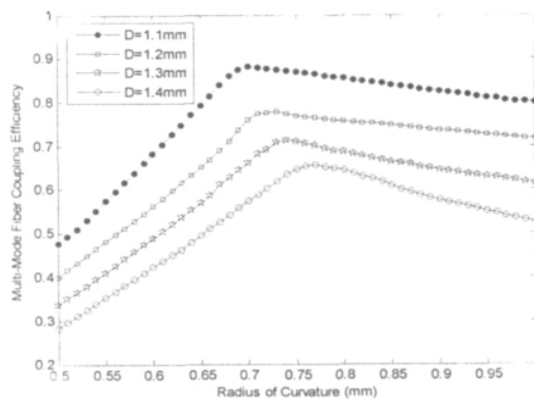


图 5 透镜焦距与曲率半径呈非线性关系时的光耦合效率图

图 5 为不同口径的透镜焦距与曲率半径呈非线性关系时的光耦合效率图。四种情况中光耦合效率均随着曲率半径增大而增大,同时 D 越小,对应耦合效率越高。 D 为 1.1 mm,曲率半径为 0.69 mm 时,

有最大耦合效率 88.132%； D 为 1.2 mm，曲率半径为 0.73 mm 时，有最大耦合效率 77.845%； $D = 1.3$ mm，曲率半径为 0.74 mm 时，有最大耦合效率 72.338%； $D = 1.4$ mm，曲率半径为 0.76mm 时，有最大耦合效率 65.914%。和线性关系时光耦合效率相比，非线性关系时最大光耦合效率提高了 34%。

3 讨论分析

大视场和低损耗是可见光无线通信光学接收端的重要评价指标。传统复眼透镜视场角最大为 88° ，如文献 [5] 中曲面基底复眼透镜。本节将对新型复眼与传统复眼的视场角与光损耗进行比较。

(1) 接收视场角

在光学仪器中，以光学仪器的镜头为顶点，以被测目标的物象可通过镜头的最大范围的两条边缘构成的夹角，称为视场角。结合图 3 由 SNELL 定律可计算出透镜汇聚光线刚好在光纤内发生全反射时的光纤光接收角为 $\psi = 2\theta_1 = 39.28^\circ$ 。复眼基底沿垂直方向的转轴调节方向，理论上在水平或垂直方向上可调节角度为 0 到 360° ，这可以保证复眼透镜时刻保持有最大的接收面积。同时满足了复眼结构光学接收机前端的大视场要求。

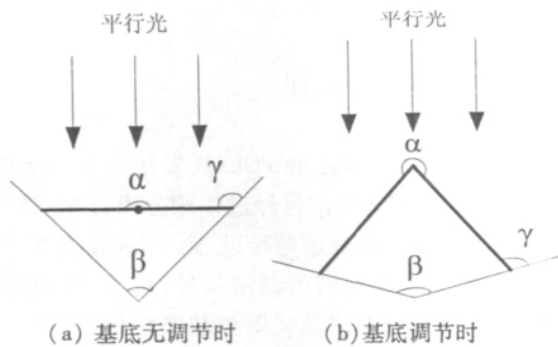


图 6 视场角 β

由光纤数值孔径可推知光纤接收角 ψ 为 39.28° 。如图 6 所示。微透镜与基底夹角 $\gamma = 90^\circ + \psi/2 = 109.64^\circ$ 。当基底为没有调节时视场角 β 等于光纤接收角 ψ ，即为 39.28° ，如图 6(a) 所示。当基底调节角度 α ，复眼透镜视场角随之改变，当 α 为 320.72° 时，有最大视场角 β 为 180° ，如图 6(b) 所示。和传统复眼相比，最大视场角增加了 92° 。但此时等效接收面积并非最大。

(2) 光损耗

复眼中晶锥最关键的作用就是对光束进行约束，普通人工复眼中制作晶锥常用材料为 SU-8 胶，它主要由双酚 A 型环氧树脂组成，需经过预处理、软烘、曝光等制作流程 [7]。仿真中用 F15 模拟环氧树脂，其折射率为 1.605651。新型复眼透镜中由塑料光纤取代晶锥，光纤纤芯 FK5 折射率为 1.48749。设两种复眼透镜中小眼透镜曲率半径、焦距、口径及所处外界环境均相同。 $D = 1.1$ mm，焦距为 1.541mm。由晶锥结构可知它类似于高度为 1.541mm，锥底直径等于 1.1mm 的圆锥体。设光源功率为 1W，透镜与光源距离为 1 米，光纤长度为 100mm，晶锥长度等于微透镜焦距即 1.541mm。

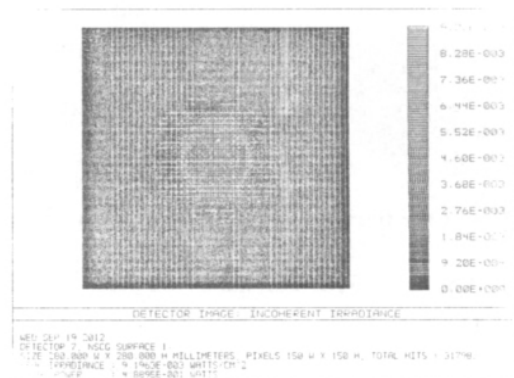


图 7 光纤传输到光电探测器端的光功率

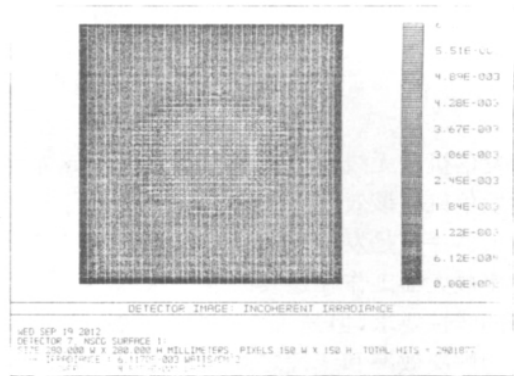


图 8 晶锥汇聚到光电探测器端的光功率

以上两图分析了光源信号经两种复眼结构传输所产生的光损耗情况。由仿真可知透镜处光功率值为 $4.9710E-001$ W，即为 -3.0356 dB。光信号经过光纤后衰减到 -3.10736 dB。光功率损耗为 0.07176 dB，如图 7 所示。经晶锥后衰减到 -3.45304 dB，光损耗为 0.41744 dB，如图 8 所示。由此可知光纤代替晶锥使得光损耗降低 0.3457 dB。

(下转第 54 页)

信号出现了明显的失真 此时发信机输出 $EVM = 2.4\%$ 。通过提高采样速率可以改善相位调制的性能, 64 倍符号采样速率下, 发信机 $EVM = 1.5\%$ 随着采样速率的继续提高, EVM 会不断减小, 变化曲线如图 6 所示。

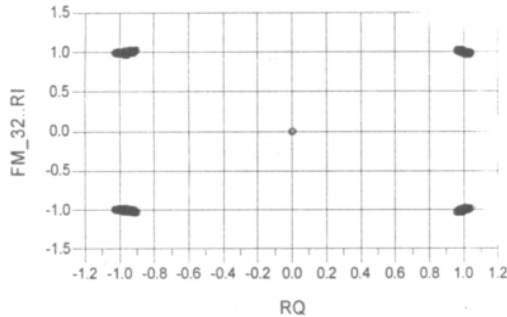


图 5 32 倍符号采样速率下 QPSK 调制星座

6 结 论

POLAR 发信机的相位调制是通过直接对锁相环频率合成器进行频率调制实现的, 相位调制到频率调制的变换不理想, 引入了失真, 本文分析了失真对 EVM 的影响。实际上这种失真是一种非线性失真, 不仅会增大发信机的 EVM , 还会引起发信机输出频谱出现寄生边带, 导致邻道抑制比的恶化, 需要

(上接第 51 页)

4 结 论

本文设计了基底可调并由光纤代替晶锥的复眼结构光学接收端。对透镜曲率半径选取进行了优化, 提高了光耦合效率。与传统单孔径曲面基底复眼相比有更大的视场角, 最大可达 180° , 可实现可见光无线通信接收机前端的大视场功能。光纤的使用使得光信号能一次聚焦, 光功率损耗与晶锥中光损耗相比降低 0.3457dB , 同时整个光学接收端系统具有尺寸小, 轻便、不易损坏、加工方便等特点。今后, 将进一步对如何根据接收光强弱自适应调节^[7]进行深入的研究。

参考文献

[1] 陈明君, 刘业胜. 仿生光学复眼设计及其制造技术研究新进展 [J]. 机械工程学报, 2011 年 1 月, 第 47 卷

进一步的研究。

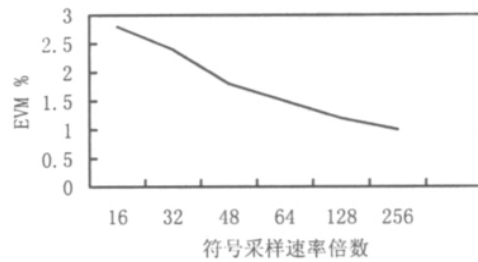


图 6 符号采样速率对输出 EVM 的影响

参考文献

[1] 李铭祥. 微波功放的线性化技术 [J]. 微波学报, 2002 (3): 83 - 87.
 [2] Jinsung Choi, Jounghyun Yim, and Jinho Yang. A Digitized Polar RF Transmitter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 2007, 55(12): 2679 - 2690.
 [3] Takashi OSHIMA, Masaru KOKUBO. A Dual - Mode Bluetooth Transceiver with a Two - Point - Modulated Polar - Loop Transmitter and a Frequency - Offset - Compensated Receiver [J]. IEICE Transactions on Fundamentals, 2007, 90(8): 1669 - 1677.
 (收稿日期: 2012-09-18)

第 1 期: 161 - 162.

[2] 张红鑫, 卢振武, 李凤有. 基于 ZEMAX 软件的重叠复眼的模拟与分析 [J]. 光学技术, 2006 年 8 月第 32 卷增刊: 125 - 126.
 [3] Andreas Bruckner. Artificial compound eye applying hyperacuity [J]. OSA, 2006, 14: 12076 ~ 12084.
 [4] Ryoichi Horisaki, Satoru Irie, Yusuke Ogura and etc. Three - dimensional information acquisition using a compound imaging system, Optical Review [J]. 2007, 14 (5): 347 - 350.
 [5] 张红鑫, 卢振武. 曲面复眼成像系统的研究 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 346 ~ 350.
 [6] 邱思, 杜如虚. 单层曲面复眼成像系统的优化设计 [J]. 光电工程, 2010, 37(2): 27 - 31.
 [7] 刘浩. 基本微透镜阵列的仿生复眼结构研究 [D]. 华中科技大学, 2008.
 (收稿日期: 2012-10-08)