

室内可见光通信系统中菲涅尔透镜接收天线的设计研究

李湘 蓝天 王云 王龙辉

Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system

Li Xiang Lan Tian Wang Yun Wang Long-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双小凹光学成像系统设计

[Design of dually foveated imaging optical system](#)

物理学报.2015, 64(3): 034201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034201>

基于压缩感知超分辨鬼成像

[Super-resolution ghost imaging via compressed sensing](#)

物理学报.2014, 63(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224201>

线照明并行谱域光学相干层析成像系统与缺陷检测应用研究

[Line-field parallel spectral domain optical coherence tomography and its application in defect inspection](#)

物理学报.2014, 63(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194201>

双向使用高非线性光纤实现同时解复用出两路 10 Gbit/s 信号

[Simultaneous demultiplexing into two 10 Gbit/s using a bidirectionally operated highly nonlinear fiber](#)

物理学报.2014, 63(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024201>

用于轴对称的两级光学聚光器的非成像二次反射镜

[Non-imaging secondary \(NIS\) for axial symmetrical two-stage optical concentrator](#)

物理学报.2013, 62(13): 134209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134209>

室内可见光通信系统中菲涅尔透镜接收天线的设计研究*

李湘 蓝天[†] 王云 王龙辉

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2014年7月7日收到; 2014年8月18日收到修改稿)

针对基于白光LED室内可见光无线光通信技术的应用需求, 设计了等齿距平面菲涅尔透镜. 相比常规透镜光接收天线, 菲涅尔透镜具有聚焦能力强、焦距短、透镜厚度薄、重量轻、成本低等优点. 利用Trace pro软件对设计进行了模拟仿真, 分析了透镜不同设计参数对接收天线光学增益、光学效率及光斑尺寸的影响, 讨论了透镜在平行光斜入射时的会聚情况. 结果表明, 平面点聚焦菲涅尔透镜的光学效率可达92.1%, 适用于小视场、高增益接收光学系统前端.

关键词: 可见光通信, 接收天线, 菲涅尔透镜, 等齿距

PACS: 42.15.Eq, 42.79.Bh, 42.15.-i

DOI: 10.7498/aps.64.024201

1 引言

室内可见光通信是一种在白光发光二极管(LED)技术上发展起来的新兴的无线光通信技术, 它以白光LED作为室内照明光源, 同时把信号调制到白光LED上, 以光信号为载体, 构建无线光网络, 是对现有射频技术的有效补充. 从2000年开始, 日本Keio大学的Nakagawa等^[1-3]开始从事基于室内照明灯和室外交通灯的低速率可见光通信技术(visible light communication, VLC)研究. 近年来, 随着世界范围对白光LED照明技术的大规模应用与推广, 使得基于白光LED的可见光通信迅速成为未来无线通信发展的热点, 有着极大的应用前景^[4-6].

目前, 对可见光通信系统的研究涵盖光源布局及通信系统信道模型研究, 还包括系统调制解调技术、信道编码技术, 以及可见光接收技术等^[7]. 对于可见光接收技术而言, VLC系统接收端的设计都非常简单, 由透镜会聚光信号到光电探测器, 为了提高传输速率, 透镜前还会放置滤光片, 文

献^[8-10]研究了路-车通信系统中的车载接收器, O'Brien等^[4]应用经典配置仿真分析了VLC系统, 讨论了系统接收端光学滤光片的作用. 为了克服VLC系统中码间干扰的影响, 孔梅梅等^[11]提出了在半球上分布多个朝向不同的光锥作为光学接收天线的新方法, 给出了具体布局设计方案. 英国诺桑比亚大学的Burton等^[12]也对VLC多角度接收器进行了设计与分析.

作为室内可见光系统的接收前端, 光学天线的主要功能是会聚信号光, 提高光接收信号的信噪比, 保证传输带宽, 这就需要设计相应的光学接收系统. 但常规透镜很难满足系统对光学天线尺寸和重量的要求. 最早的菲涅尔透镜是由法国物理学家Augustine Fresnel发明的, 他在1822年最初使用这种透镜设计建立一个灯塔透镜^[13]. 菲涅尔透镜与传统透镜相比, 具有会聚能力强、体积小、重量轻、量化生产成本低等优势, 现阶段主要应用于包括投影及太阳能光伏领域^[14-16]. 基于上述优点, 本文探索小型高精度菲涅尔透镜在可见光通信领域的应用.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB329202)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lantian@bit.edu.cn

本文首先介绍了菲涅尔透镜的成像原理和结构参数, 给出了等齿距平面菲涅尔透镜的设计算法, 对该算法设计的菲涅尔透镜进行几何聚光比的理论分析, 在此基础上, 对不同参数下的菲涅尔透镜进行了仿真分析, 结合理论分析, 讨论不同设计参数对菲涅尔透镜光学效率、光斑尺寸、视场等的影响.

2 菲涅尔透镜的光学原理

菲涅尔透镜一般是其中一面刻有一系列同心棱形槽的超轻薄光学透镜, 其每一个环带都相当于一个独立的折射面, 这些环带都能将入射平行光线(或有一定倾斜角度)会聚于某一共同焦点处. 根据外形结构的不同, 可分为曲面菲涅尔透镜和平面菲涅尔透镜; 按聚焦方式不同可分为点聚焦和线聚焦菲涅尔透镜^[16]. 与曲面菲涅尔透镜相比, 平面菲涅尔透镜聚光效率稍低, 但易于加工和安装. 本文对平面菲涅尔透镜开展深入研究, 图1给出了平面点聚焦菲涅尔透镜. 与常规透镜相同, 菲涅尔透镜有孔径 D 、焦距 f , F 数等参数, 还包括一些特殊结构参数: 工作侧面角 α 、棱镜宽度 d 等^[13]. 图2为菲涅尔透镜的棱镜结构图.

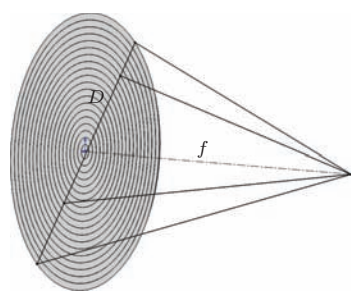


图1 平面点聚焦菲涅尔透镜

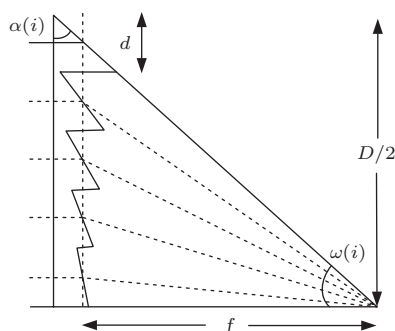


图2 平面菲涅尔透镜的棱镜结构图

3 菲涅尔透镜设计算法

在室内可见光通信系统的接收端, 菲涅尔透镜作为光学接收天线, 其目的是将空间光信号聚焦在光电探测器的光敏面上. 因此, 设计菲涅尔透镜时不需考虑像质像差, 属于非成像光学系统设计.

菲涅尔透镜的设计步骤是基于线性棱镜结构的, 每一个棱镜的角度都需要经过准确设计, 使得所有棱镜都能将平行入射的光线会聚于透镜后焦点处, 得到与常规透镜相同的会聚效果.

为方便进行几何光学分析, 用于聚光的菲涅尔透镜设计为等齿距, 焦距及透镜孔径在设计前确定. 三维菲涅尔透镜由棱镜结构图绕光轴旋转得到. 图2中, 各棱镜的斜边中点处主光线平行于光轴方向且是等间距的, 每一个棱镜有相同的宽度 d , 工作距离为 f , 聚光口径为 D , 成像光学系统的 F 数定义为 $F/\# = f/D$. 当给定透镜 F 数和棱镜数 $p(2pd = D)$ 时, 会聚角 $\omega(i)$ 为第 i 个棱镜的中心光线与光轴的夹角, 可以由(1)式计算:

$$\omega(i) = 90^\circ - \arctan\left(\frac{2pF/\#}{i - 1/2}\right). \quad (1)$$

而后, 第 i 个棱镜的工作侧面角 $\alpha(i)$ 可以由(2)式得到, 其中透镜的材料折射率在某一确定波长下为 n .

$$\alpha(i) = \arccos\left(\frac{n - \cos \omega(i)}{(1 + n^2 - 2n \cos \omega(i))^{1/2}}\right). \quad (2)$$

以上公式都是基于同轴照明得到的.

4 几何聚光比性能分析

基于上述的菲涅尔透镜设计算法, 在透镜的 F 数和棱镜数已确定的前提下, 针对一个理想的菲涅尔透镜模型, 即不考虑透镜的反射和吸收损失, 根据几何光学原理, 分析光线经过透镜棱镜结构的会聚光斑情况, 分别考虑棱镜宽度 d 、光源半发散角 $\theta_{\max}$ (透镜入射角)对系统聚光比的影响^[17].

1) 假设光源是理想的同轴照明, 不考虑光源发散角. 图3(a)是平行光垂直入射时菲涅尔透镜中某一个棱镜的折射光线图, 边缘折射光线、接收面和棱镜斜边构成一梯形. 接收面上呈现一定大小的第 i 个棱镜的特征点尺度 $D_p(i)$, 经几何推导可得

$$D_p(i) = \frac{D \cos \beta(i)}{2p \cos(\beta(i) - \alpha(i)) \cos \alpha(i)}. \quad (3)$$

(3)式可以通过菲涅尔透镜孔径 D 进行归一化,表示为无量纲的特征点比 $D_p(i)/D$.特征点比的倒数可表征透镜的几何聚光性能,易知特征点比越小,透镜的几何聚光比越大,聚光性能越好.棱镜工作面侧角 $\alpha(i)$ 可由(1)和(2)式推出,折射角 $\beta(i)$ 由Snell定律计算.对于均匀照明情况下,特征点也具有均匀照度分布.

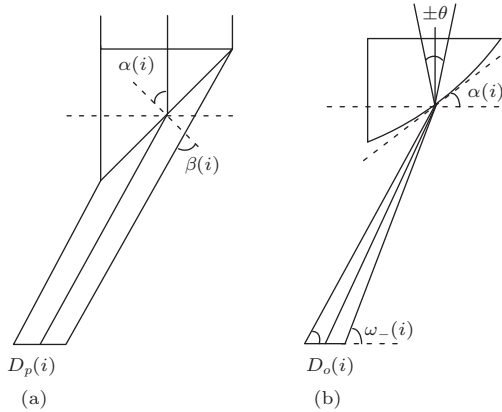


图3 菲涅尔棱镜光线折射图 (a) 平行光入射; (b) 有一定发散角度入射

2) 考虑光源发散角度的影响. 假定棱镜斜边为双曲型轮廓, 此时同轴照明光线可以理想会聚于焦点中心处, 特征点的扩展主要由于光源的发散角. 如图3(b)所示, 两束最大发散角度 $\pm\theta$ 的光线入射到双曲棱镜表面, 特征点的大小可以表示为

$$D_o(i) = D \left(\frac{F}{\#} - \frac{1}{4p} \tan \alpha(i) \right) \times (\tan \omega_+(i) - \tan \omega_-(i)). \quad (4)$$

两个会聚角 $\omega_{\pm}(i)$ 由入射角 $\alpha(i) \pm \theta$ 推导得出:

$$\omega_{\pm}(i) = -\alpha(i) + \arcsin(n \sin(\alpha(i) \pm \theta)). \quad (5)$$

同样, 我们用归一化无量纲的特征点比 $D_o(i)/D$ 来分析透镜的聚光性能. Snell定律的正弦性导致特征点的非均匀性强度分布, 但对于小的光源发散角来说, 可近似视为均匀强度分布.

下面对以上两种情况, 分别分析棱镜数和光源发散角对菲涅尔透镜几何聚光比的影响. 图4所示在 $F/\# = 1$ 条件下, 特征点比 D_p/D 和 D_o/D 相对于会聚角 ω 的变化趋势. 虽然此结果不能表明菲涅尔透镜的三维会聚能力, 但可以很好地评估设计参数对透镜几何聚光比的限制. 我们选择三种菲涅尔透镜, 其棱镜数依次递增, 分别为 $p = 10, 20, 50$. 结果显示: 由菲涅尔透镜的中心到边缘, 特征点比

逐渐减小; 棱镜数越多, 在接收面的特征点尺寸越小, 几何聚光比越大; D_o 曲线表明透镜在接收具有一定发散角的光线时, 由透镜中心向外, 接收面特征点比会越来越大.

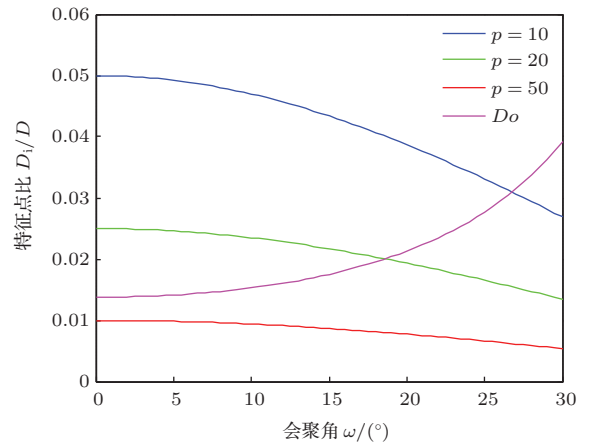


图4 (网刊彩色) 特征点比随透镜会聚角的变化

5 菲涅尔透镜建模及仿真

Trace pro软件是一套普遍用于照明系统、光学分析、辐射度分析及光度分析的光学仿真软件, 是第一套以ACIS固体模型为核心的光学仿真软件^[16]. 本文采用Solid works软件建立菲涅尔透镜模型, 利用Trace pro软件进行光线追迹.

5.1 棱镜数对聚光性能的影响

本文的第4部分讨论了不同棱镜数的菲涅尔透镜在接收面的特征点比, 为此我们设计了一定参数要求的等齿距平面菲涅尔透镜, 通过光学仿真, 分析比较棱镜数对透镜聚光性能的影响. 设计参数取菲涅尔透镜口径 D 为40 mm, 透镜焦距 f 为40 mm, 棱镜数分别设置为10, 20, 50. 设定菲涅尔透镜的材质为PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)^[18], 选定546 nm为模拟光线的主波长(此时材料折射率 n 为1.4935), 模拟光源采用可见光垂直入射, 在Trace pro中距离透镜40 mm处定义一个接收面. 光学仿真后, 菲涅尔透镜的聚光效果如图5所示, 接收面上的辐照度分布如图6所示. 由图可见, 棱镜数为10, 20, 50时, 中心辐照度值分别为 2.85×10^{11} , 5.05×10^{11} , $1.2 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 说明棱镜数越大, 接收面的光斑越小, 中心辐照度值越大; 经计算, 特征点尺寸与理论分析结果一致.

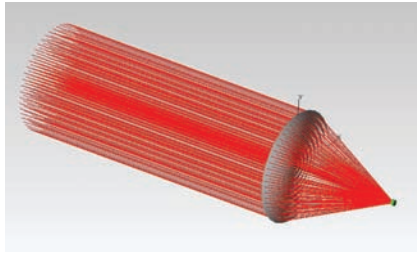


图5 (网刊彩色) 菲涅尔透镜聚光效果图

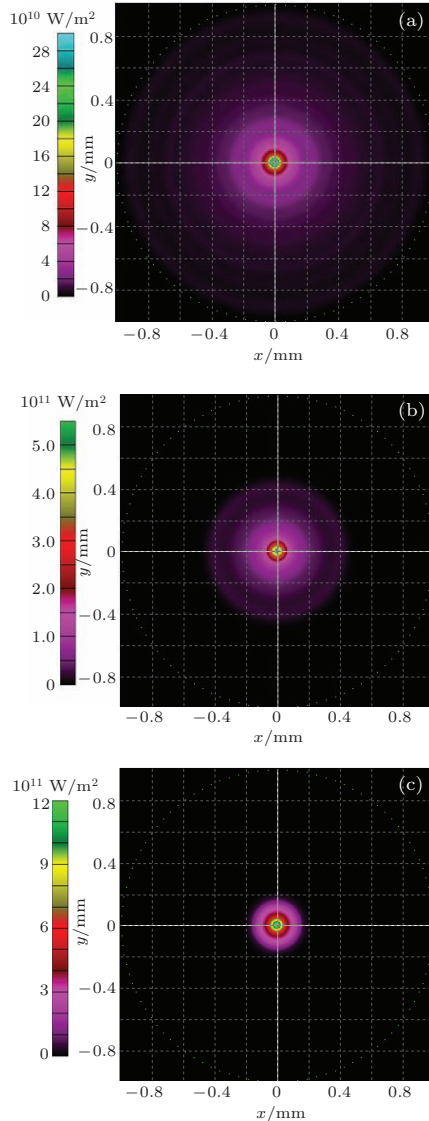


图6 (网刊彩色) 接收面辐照度分布 (a) $p = 10$; (b) $p = 20$; (c) $p = 50$

5.2 F 数对聚光性能的影响

为了分析菲涅尔透镜 F 数对聚光性能的影响, 我们设定: 透镜的棱镜为 20, 口径为 40 mm, 通过设计不同 F 数的菲涅尔透镜 (如表 1), 观察在接收面上的透镜会聚效果. 经 Trace pro 软件仿真得到

不同 F 数下的光学效率, 如图 7 所示.

表 1 菲涅尔透镜设计参数

F 数	f/mm
0.5	20
0.7	28
1	40
1.3	52
1.5	60
1.7	68
2	80

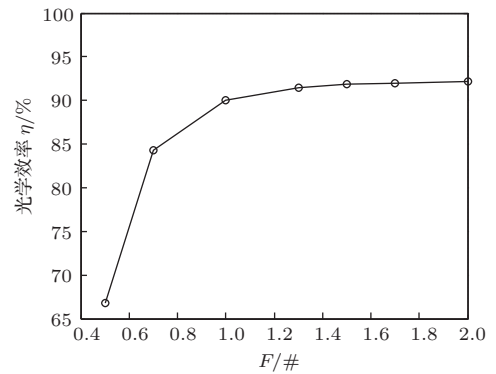


图7 透镜 F 数与光学效率的关系

在透镜其他参数不变的条件下, 透镜的 F 数越大焦距越大. 对于室内可见光通信接收天线的应用需求而言, 用于聚光的菲涅尔透镜焦距不能过长, 仿真数据表明透镜的光学效率随着 F 数的增大而增大, 最终趋于平缓, 如图 7. 不同焦距下透镜的棱镜结构会发生微小变化, 这是造成不同 F 数菲涅尔透镜光学效率不同的原因, 因此要满足一定的光学效率, 所设计透镜的 F 数不能过小. 上述的仿真结果表明, F 数大于 1 后, 光学效率大于 90%; 在 F 数等于 1 时, 棱镜数的改变不影响透镜的光学效率.

5.3 光学增益及视场

接收天线的几何聚光比是指聚光透镜入射面面积 A 与接收面面积 A_{rec} 的比值, 用 C_{geo} 来表示. 光学效率是探测器接收光通量 ϕ' 与光学天线接收光通量 ϕ 之比, 用 η_{opt} 表示. 光学增益定义为光学天线几何聚光比与光学效率的乘积, 用 C_{opt} 表示. 三者关系如下 [19]:

$$C_{\text{opt}} = \eta_{\text{opt}} C_{\text{geo}} = \frac{\phi'}{\phi} \frac{A}{A_{\text{rec}}}. \quad (6)$$

根据所设计的菲涅尔透镜, 透镜的几何聚光比为 $400\times$, 棱镜数为 20, 不同 F 数的菲涅尔透镜光学增益在 267—368 范围内. 因此, 菲涅尔透镜作为接收天线, 可以有效地将光信号会聚, 光能利用率高, 具有很好的应用价值.

在光学接收系统中, 接收角是评价光学天线性能的一个重要指标. 现分析菲涅尔透镜的光学接

收角, 分别模拟接收角在 0° , 0.5° , 1° , 1.5° 时平面点聚焦菲涅尔透镜的光斑照度, 如图 8 所示. 菲涅尔透镜在入射角度 i 越大时, 离焦越严重, 最佳像点位置偏离焦平面越远, 像点弥散斑越大, 光学效率减小. 因此, 平面等齿距菲涅尔透镜对入射光角度变化非常敏感, 适用于高增益小视场 (点对点) 环境下.

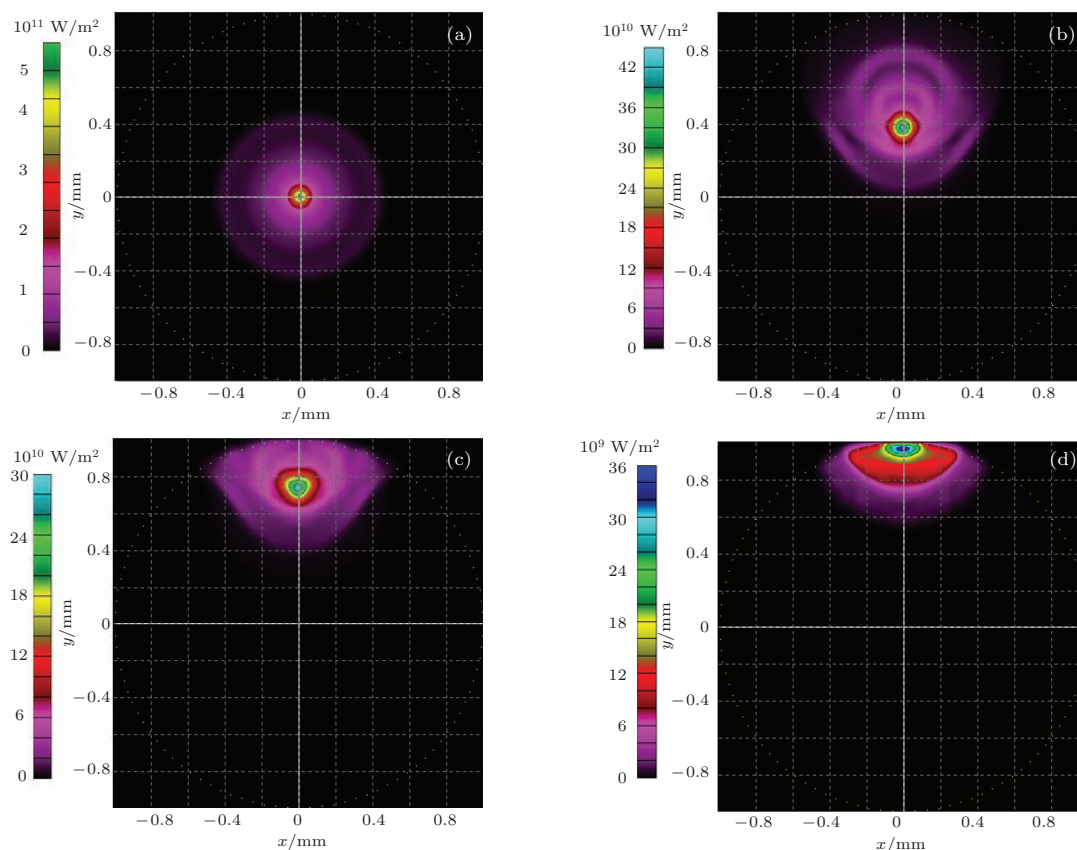


图8 (网刊彩色) 斜入射下菲涅尔透镜焦平面处的辐照度 (a) 入射角为 0° ; (b) 入射角为 0.5° ; (c) 入射角为 1° ; (d) 入射角为 1.5°

6 结论与展望

在基于白光LED技术的室内可见光通信中, 接收天线的使用有利于进一步提高对光信号的利用, 对其开展研究具有重要的应用价值.

本文利用Solid works和Trace pro软件对设计的点聚焦平面菲涅尔透镜进行建模仿真, 结果表明, 菲涅尔透镜棱镜数越大, 光斑尺寸越小, 而光学效率基本不变; 当透镜的棱镜数确定, F 数越大透镜的光学效率越大; 当 $F \geq 1$ 时, 光学效率变化缓慢, 最终趋于 92.1%. 从室内可见光聚光应用角度考虑, 菲涅尔透镜的 F 数越大, 接收系统体积就越大, 因此透镜 F 数应选取在 1.0—1.4 之间为宜. 综

上所述, 对于口径 40 mm, 焦距 40 mm 的菲涅尔透镜, 取棱镜数为 50, 探测器可选取直径 400 μm , 光学效率可达 90%, 满足最优设计要求. 需要指出, 由于绘图误差、仿真软件的理想化条件以及加工误差, 所设计透镜的实际光学效率和几何聚光比将低于仿真数据.

在白光光谱 (380—780 nm) 范围, 由于菲涅尔透镜光学材料 PMMA 的材质特性, 不同波长的材料折射率不同, 造成会聚光线的色散, 波长越大焦距越大, 影响透镜的会聚性能. 另外, 菲涅尔透镜依靠各环带对光线的折射作用实现聚光, 在聚光过程中不可避免地产生一些能量损失, 如结构损失、反射损失、材料吸收等 [16], 同时, 透镜大于 2% 的衍射损失 [20] 也需要进一步考虑.

参考文献

- [1] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M 2000 *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on PIMRC* London, England, September 18–21 2000 p1325
- [2] Komine T, Nakagawa M 2003 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **49** 71
- [3] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **50** 100
- [4] O'Brien D, Minh H L, Zeng L, Faulkner G, Lee K, Jung D, Oh Y, Won E T 2008 *Proceedings of the 8th Conference on Free-Space Laser* San Diego, CA, Aug. 10–12, 2008 709106
- [5] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, Corsini R, Ciarabella E 2012 *Opt. Express* **20** B501
- [6] Wang Y Q, Chi N, Wang Y G, Li R L, Huang X X, Yang C, Zhang Z R 2013 *Opt. Express* **21** 27558
- [7] He S Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [何胜阳 2013 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [8] Okada S, Yendo T, Yamazato T, Fujii T, Tanimoto M, Kimura Y 2009 *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium* Xi'an, China, June 3–5, 2009 p1033
- [9] Hara T, Iwasaki S, Yendo T, Fujii T, Tanimoto M 2007 *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium* Istanbul, Turkey, June 13–15, 2007 p988
- [10] Lee I E, Sim M L, Kung F W L 2009 *IET Optoelectron.* **3** 30
- [11] Kong M M, Liang Z C, Zhang G H 2012 *Infrared and Laser Engineer* **3** 750 (in Chinese) [孔梅梅, 梁忠诚, 张国虎 2012 红外与激光工程 **3** 750]
- [12] Burton A, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, Liaw S K 2014 *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* **25** 591
- [13] Leutz R, Suzuki A 2001 *Nonimaging Fresnel Lenses* (Germany: Springer) pp67–72
- [14] Wang G, Hu P, Chen Z S, Cheng X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184216 (in Chinese) [王刚, 胡芑, 陈则韶, 程晓舫 2012 物理学报 **61** 184216]
- [15] Cheng Y 2009 *M. S. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [程颖 2009 硕士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [16] Liu Y Q 2012 *M. S. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [刘永强 2012 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [17] Duerr F, Meuret Y, Thienpont H 2010 *Appl. Opt.* **49** 2339
- [18] Kasarova S N, Sultanova N G, Ivanov C D, Nikdov I D 2007 *Opt. Mater.* **29** 1481
- [19] Languy F, Fleury K, Lenaerts C, Loicq J, Regaert D, Thibert T, Habraken S 2011 *Opt. Express* **19** A280
- [20] Hornung T, Nitz P 2014 *Opt. Express* **22** A686

Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system*

Li Xiang Lan Tian[†] Wang Yun Wang Long-Hui

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 7 July 2014; revised manuscript received 18 August 2014)

Abstract

Indoor visible light communication is a novel wireless communication based on white LED technology. For its application needs, equal-pitch flat Fresnel lens is designed. Compared with traditional lens, Fresnel lens has several advantages including strong focus ability, short focal length, thin thickness, light weight, low cost, etc. The optical concentration ratio, the optical efficiency and the spot size of these Fresnel lenses are analyzed respectively with different parameters by means of Trace pro. Furthermore, the concentration performance is discussed at different incident angles. The results indicate that this kind of Fresnel lens could be used as an antenna of high-gain and small field, and the optical efficiency could be obtained to be 92.1%.

Keywords: visible light communication, antenna, Fresnel lens, equal-pitch

PACS: 42.15.Eq, 42.79.Bh, 42.15.-i

DOI: 10.7498/aps.64.024201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB329202).

[†] Corresponding author. E-mail: lantian@bit.edu.cn