

doi: 10.3788/gzxb20154403.0306004

基于全息反射镜的室内可见光通信光学接收天线

王龙辉, 蓝天, 沈振民, 李湘, 倪国强

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘 要:提出了一种新型光学接收天线的设计和制作方法,利用干涉和衍射原理在全息材料上制成具有聚集光束和滤除环境光双重功能的全息反射镜.通过耦合波理论与 k 矢量闭合法分析了这种光学接收天线的角度选择性、光谱选择性以及任意点的衍射效率,模拟结果表明:全息反射镜在不同点的视场角和光谱带宽分别为 $0.8^\circ \sim 13.4^\circ$ 和 $4.4 \text{ nm} \sim 7.4 \text{ nm}$,并且整体衍射效率在 95.3% 以上.与由聚光镜和滤波片组合成的传统光学接收天线相比,全息反射镜体积小、重量轻、成本低、能作为光学接收天线用于室内可见光通信系统中.

关键词:室内可见光通信;光学接收天线;全息反射镜;耦合波理论;角度选择性;光谱选择性;衍射效率

中图分类号:TN827.2;O438.1

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0306004-7

Optical Receiving Antenna for Indoor Visible Light Communication Based on Holographic Mirror

WANG Long-hui, LAN Tian, SHEN Zhen-min, LI Xiang, NI Guo-qiang

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Department of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A novel method for the design and production of the optical receiving antenna was proposed. The hologram called Holographic Mirror, which has the dual function of gathering beam and filtering ambient wave, is made from holographic material by using the principle of interference and diffraction. The angular selectivity, spectral selectivity and diffraction efficiency at any point of the novel optical receiving antenna have been analyzed by coupled wave theory and k vector closed legitimate, the results of simulation show that the field of view and spectral bandwidth at different points of the Holographic Mirror are $0.8^\circ \sim 13.4^\circ$ and $4.4 \text{ nm} \sim 7.4 \text{ nm}$ respectively, and the overall diffraction efficiency of more than 95.3% . Compared with the combination of a converging lens and a filter into the conventional optical receiving antenna, small size, light weight, and low cost of the holographic mirror can be used as optical receiving antenna for indoor visible light communication.

Key words: Indoor visible light communication; Optical receiving antenna; Holographic mirror; Coupled wave theory; Angular selectivity; Spectral selectivity; Diffraction efficiency

OCIS Codes: 060.4510;090.2890;090.7330;090.2645

0 引言

光学天线是室内可见光通信(Indoor Visible Light Communication, VLC)系统^[1-4]的重要组成部分,分为光学发射天线和光学接收天线两类.其中,光学接收天

线的作用是尽可能多地接收自由空间中微弱的信号光辐射,然后被探测器所探测并转换成电信号.

传统的光学接收天线^[5-6]是由聚光透镜和滤波片组成的.聚光透镜的作用是将系统中发射的信号光进行聚焦,增加信号光接收的能量,从而可以相对减小探

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. SQ2012CB037092)资助

第一作者:王龙辉(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为信息光学、全息技术和光通信. Email: wlhp@petrelli@163.com

导师(通讯作者):蓝天(1962-),女,教授,博士,主要研究方向为信息光学和光通信. Email: lantian@bit.edu.cn

收稿日期:2014-07-02;录用日期:2014-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

测器的接收面积,提高传输速率;滤波片的功能是滤除系统中背景光和杂散光的干扰,提高系统的信噪比^[7].

香港大学的 Grantham Pang 于 1999 年将音频信号编码调制到 LED 灯上用于通信^[8]. 2000 年日本 KEIO 大学 Tanaka 提出了利用高功率白光 LED 灯来搭建室内无线链路 VLC 系统. 2004 年日本科技工作者 Toshihiko Komine 采用数个 LED 灯在实验室实现了光无线通信,并且用仿真法研究了信道的信噪比分布情况^[2]. 牛津大学 Brien 于 2008 年提出采用光学滤波、发射和接收均衡技术、光学多输入多输出等技术来提高数据传输速率. 2010 年到 2011 年间,德国弗劳恩霍夫研究所 Langer 证实了高速 VLC 的可能性,通过采用不同的调制方式和接收器获得运行速率在 10~800Mbit/s 的链路. 2012 年,意大利研究者 Cossu 使用 DMT 调制方式和 WDM 技术获得高达 3.4Gbit/s 的数据率^[9].

国内在白光 LED 照明通信研究领域的研究起步较晚,2006 年 2 月,西安理工大学柯熙政、丁德强对 LED 可见光通信的关键技术进行了探讨^[10]. 2009 年华南师范大学刘宏展在光无线通信上发表了白光 LED 照明的可见光通信的现状与发展. 2010 年,中国科学院半导体所在上海世博会期间演示了 2Mbit/s 的 VLC 系统. 2013 年,复旦大学的研究人员使用 RGB 式 LED 和磷荧光粉式 LED 成功实现下行链路 575Mbit/s 和上行链路 225Mbit/s 的全双工副载波复用的波分复用 VLC 系统^[11].

本文提出了一种在白光 LED 室内可见光通信系统中全息光学接收天线的设计方法. 系统采用离轴反射式结构,通过平面光波与会聚球面光波在全息干板上发生干涉完成记录过程,形成的全息图兼顾会聚光束和滤除背景光^[12]的功能,称此全息图为全息反射镜(Holographic Mirror, HM). 当使用经过调制的白光 LED 以较远的距离垂直照射 HM 再现时,其通信信息加载于光波上,经衍射后形成的单色会聚点偏离光轴,便于探测器接收,再经过相应的信号处理单元,从而完成白光 LED 室内可见光的通信过程.

1 全息光学元件

全息光学元件是根据全息原理制成的光学元件,它具有光谱选择性、角度选择性、光学结构不受基底形态影响等多个独特性质^[13-14]. 相比于透射全息图,反射全息图具有更高的光谱选择性和较小的角度选择性^[15]. 体积反射全息图被称为全息反射镜,虽然它不能像普通透镜那样反射光,但它服从布喇格定律来衍射光的. 布喇格定律为

$$2n\Lambda\sin\theta=\lambda \quad (1)$$

式中, Λ 为峰值强度面的垂直间距, θ 为入射光与衍射

光夹角的一半, λ 为光波波长, n 为全息材料的折射率.

对于某一波长 λ 来说,如果入射角 θ_1 和衍射角 θ_2 满足布喇格定律,那么一个无损反射全息图的衍射效率^[15]为

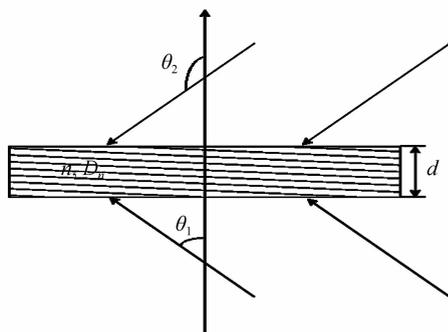
$$\eta=\left[1+\frac{1-(\epsilon/\mu)^2}{\sin h^2(\mu^2-\epsilon^2)^{1/2}}\right]^{-1} \quad (2)$$

式中, $\mu=\frac{\pi D_n d}{\lambda(|\cos\theta_1\cos\theta_2|)^{1/2}}$, $c_R=\cos\theta=\cos\theta_1$, $c_S=\cos\theta-\frac{k_F}{\beta}\cos\Phi=\cos\theta_2$, $\epsilon=\frac{d\Omega}{2c_S}$, D_n 为折射率调制度, d 为全息图厚度, c_R 和 c_S 为照明光和衍射光的倾斜因子. Ω 为相位失配因子,当布喇格角 θ 和布喇格波长 λ 的偏移量分别为 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda$ 时, Ω 表示为

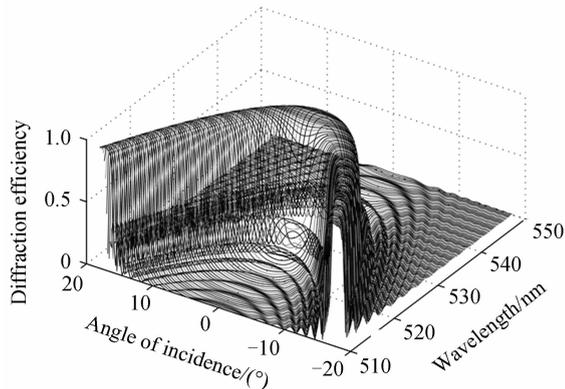
$$\Omega=\beta\Delta\theta\sin(\theta_1-\theta_2)+\Delta\beta[1-\cos(\theta_1-\theta_2)] \quad (3)$$

式中, $\beta=\frac{2\pi n}{\lambda}$ 是满足布喇格定律条件下再现光波矢量的大小.

从式(3)可以看出,记录条件下入射角和波长的变化可以相互得到补偿,那么再现时,满足布喇格条件下的角度和波长可以与记录时的角度和波长不同. 图 1 为一个衍射效率依赖于角度和波长的反射全息图,它是记录波长为 532 nm 的两个反向传播的平面波在正入射的条件下形成的,即 $\theta_1=0$, $\theta_2=\pi$. 不同的折射率



(a) Reflection hologram recorded by two plane waves



(b) Angular and spectral selectivity for $\theta_1=0$, $\theta_2=\pi$, $\lambda=532\text{nm}$, $n=1.5$, $D_n=0.015$, $d=30\mu\text{m}$

图 1 反射全息图的衍射效率与入射角和波长的关系
Fig. 1 Relationship between diffraction efficiency and angle, wavelength for a reflection hologram

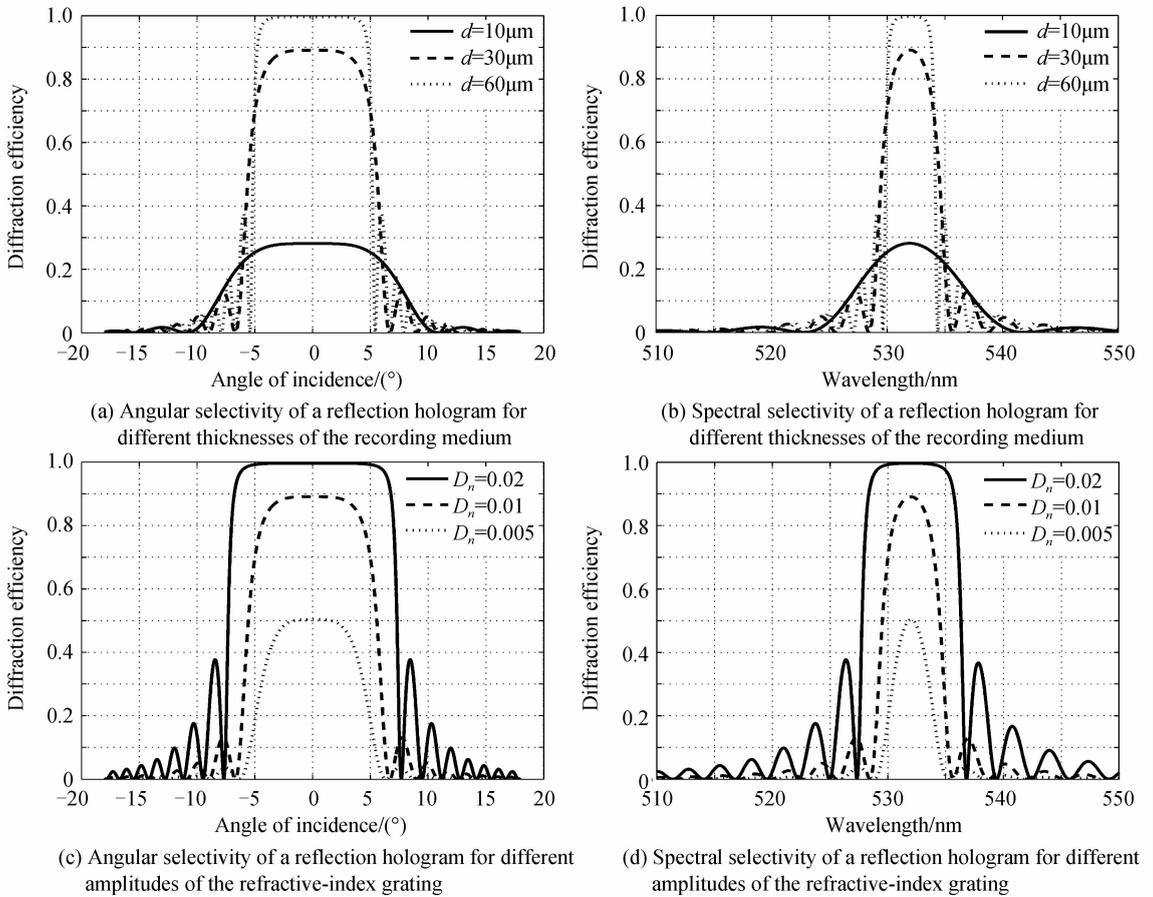


图 2 反射全息图的角度和光谱选择性

Fig. 2 Angular and spectral selectivity of a reflection hologram

调制度 D_n 和全息图的厚度 d 会得到不同的峰值衍射效率,因此,选择合适的参量有利于增大全息图的衍射效率^[16],进而提高系统的性能.图 2 用全息图的角度和光谱选择性来说明这一点.

2 全息光学接收天线的设计和制作

如果在反射全息图的记录过程中,用一个球面波代替平面波,那么不管材料基底的几何形态如何,反射全息图都会展示出会聚的特性,此反射全息图称为全息反射镜.此外,由于反射全息图固有的光谱选择性,它将从一个较窄的光谱范围内衍射光,从而达到滤波的功能.

本文提出了一种采用离轴反射式结构记录平面光波与会聚球面光波的方法.在光致聚合物^[17]的全息干板上发生干涉,在室内使用经过调制的白光 LED 以较远的距离垂直照射时,出射的光束更接近于平行光照射在全息反射镜上,在记录时信号光的会聚点处形成一个单色会聚点,将光电探测器 (Avalanche Photo Diode, APD) 放于该会聚点处探测接收,经过处理单元后最终完成室内可见光的通信过程,全息反射镜的记录和再现过程如图 3 和图 4.

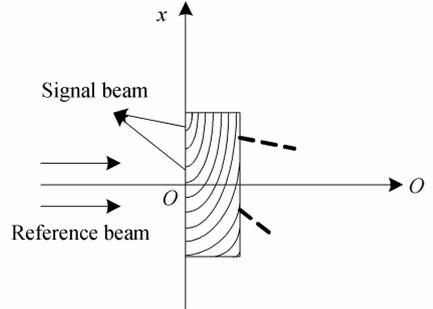


图 3 全息材料的记录过程

Fig. 3 Recording process of holographic material

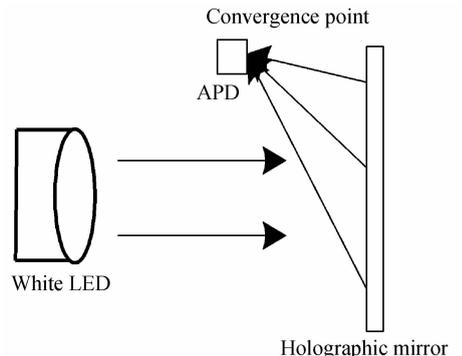


图 4 白光 LED 照射 HM 的再现过程

Fig. 4 The reconstruction process of white LED illuminating Holographic Mirror

整个记录系统采用离轴反射式结构. 当用白光 LED 以一定的距离照射再现时, 记录时信号光的会聚点处形成一个单色会聚点, 并且该会聚点有着较窄的光谱宽度, 达到滤除背景光的目的. 当用白光 LED 照射再现时, 衍射会聚的单色光点偏离主光轴, 在探测接收时不会遮挡照明光波, 提高了能量的利用率.

图 5 为具体记录光路的原理图, 白光 LED 是由红绿蓝(RGB)三种颜色混合而成, 针对不同波长灵敏度的全息材料, 可以由各个波长制作全息反射镜, 制作的原理和过程与图 5 基本相同, 只需相应改变某些参量值(λ 、 D_n 、 d 等)来提高全息反射镜的衍射效率. 针对绿光敏感的聚合物全息材料进行研究, 由 532 nm 半导体激光光源 1 发射出一束单色相干光, 通过电子快门 2, 再经偏振分光棱镜 3 分为振动方向互相垂直的两束线偏振光, 这两束线偏振光分别称为参考光和信号光. 其中, 参考光经过空间滤波器 4 和准直透镜 5 之后, 以平行光的形式照射在全息干板 9 上; 另一束信号光经过 $\lambda/2$ 波片 6, 调整光束与波片快慢轴之间的夹角, 使其振动方向偏转 90° , 然后光束依次通过反射镜 7、空间滤波器 4 以及准直透镜 5, 最后通过会聚透镜 8, 将平行光束变为会聚的球面光波, 且以一定的倾斜角照射在全息干板 9 上, 与参考光发生干涉, 进而完成记录过程. 电子快门 2 的作用是控制曝光时间.

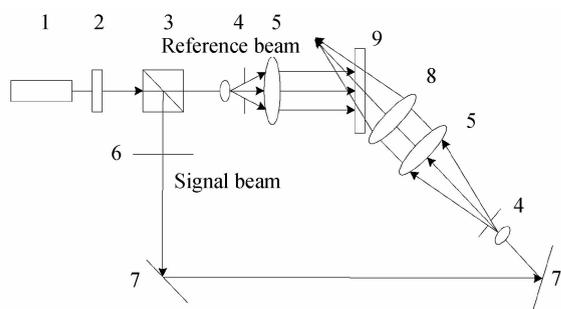


图 5 全息光学接收天线的记录原理图

Fig. 5 The recording schematic diagram of holographic optical receiving antenna

记录完成之后, 全息干板经过紫外灯照射固化, 然后在 100°C 的烘箱中烘烤 30 min, 从而完成全息光学接收天线的制作过程. 再现过程中, 采用白光 LED 以较远的距离垂直照射 HM, 在记录时信号光会聚点处形成一个绿色光点. 图 6 和图 7 分别为 HM 的记录



图 6 HM 的记录过程

Fig. 6 Recording process of holographic mirror

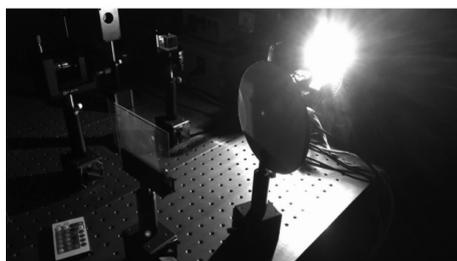


图 7 白光 LED 照射 HM 的再现实验图

Fig. 7 The reproduction experimental figure of white LED illuminating Holographic Mirror

实验图和再现实验图.

为了达到较好的照明和通信效果, 防止产生阴影效应, VLC 系统一般由安装在天花板上的数个光源构成, 但是由于不同光源离接收机的距离不同以及光信号经过墙体的反射产生了多径效应, 极大降低了系统的性能. 通常采用正交频分复用的调制方式来抑制多径效应对通信性能的影响^[18].

图 8 为室内可见光通信的过程. 经过调制的白光 LED 以平行光的形式垂直照射在封装单元中的 HM 上, 形成的单色会聚点由 APD 探测接收, 再经过处理单元最终到达 PC 上, 完成整个室内可见光的通信过程.

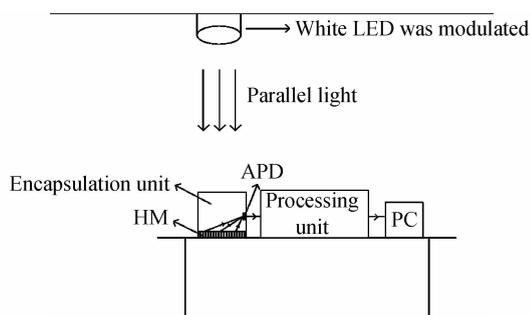


图 8 室内可见光通信的过程

Fig. 8 Indoor visible light communication process

3 性能分析

全息光学接收天线的性能主要与全息反射镜的角度选择性、光谱选择性以及衍射效率有关. 角度选择性决定了全息光学接收天线的视场角; 光谱选择性决定了全息光学接收天线的滤波特性; 衍射效率决定了全息光学接收的通信质量.

3.1 角度选择性和光谱选择性

角度选择性和光谱选择性可由相位失配因子 Ω ^[19] 得出

$$\Omega = k_F \cos(\Phi - \theta) - \frac{k_F^2 \lambda}{4\pi n} \quad (4)$$

又因 $\theta = \Delta\theta + \theta_0$, $\lambda = \Delta\lambda + \lambda_0$, 代入式(4)有

$$\Omega = k_F [\cos(\Phi - \theta_0) \cos(\Delta\theta) + \sin(\Phi - \theta_0) \cdot \sin(\Delta\theta)] - \frac{k_F^2 \Delta\lambda}{4\pi n} - \frac{k_F^2 \lambda_0}{4\pi n} = k_F \sin(\Phi - \theta_0) \cdot$$

$$\sin(\Delta\theta) = \frac{k_F^2 \Delta\lambda}{4\pi n} + \frac{k_F^2 \Delta\lambda_0}{4\pi n} [\cos(\Delta\theta) - 1] \quad (5)$$

当 $\Delta\theta$ 很小时,式(5)表示为

$$\Omega = \Delta\theta k_F \sin(\Phi - \theta_0) = \frac{k_F^2 \Delta\lambda}{4\pi n} \quad (6)$$

式中, θ_0 为布喇格入射角; k_F 为条纹的传播矢量,其方向垂直于峰值强度面; Φ 为 k_F 与 Z 轴之间的夹角。

3.2 衍射效率

由于系统采用离轴反射式结构来记录,那么全息反射镜上各点的衍射效率就会不同.通过确定任意点 k_F 矢量的大小和方向,可以完全确定全息反射镜内部的条纹分布情况,再根据耦合波理论来确定全息反射镜上各点衍射效率的大小。

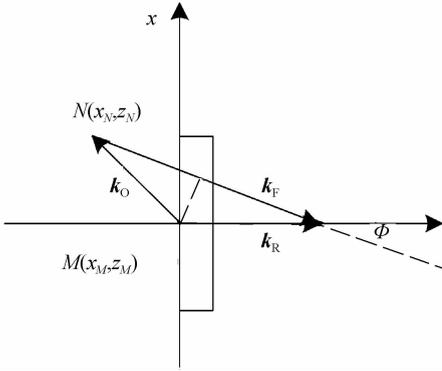


图9 全息反射镜内任意点的 k 矢量闭合法示意图
Fig. 9 k vector closed legitimate schematic of any point within Holographic Mirror

如图9所示,参考光 k_R 和信号光 k_O 是全息记录平面上任意 M 点处的传播矢量,当两者相等时可以表示为

$$\beta = |k_O| = |k_R| = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (7)$$

设点 M 是全息反射镜内任意一点,坐标为 (x_M, z_M) , 点 N 是球面信号光波的会聚点,坐标为 (x_N, z_N) , 条纹矢量 k_F 表示 M 点处记录下的全息干涉条纹,并且垂直于全息材料中形成的干涉条纹.通过理论推导可得

$$\Phi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{x_N - x_M}{z_N - z_M}\right) \quad (8)$$

即确定了条纹矢量 k_F 的方向,也就确定了条纹内部的分布情况.由 $\cos\Phi = \frac{k_F}{2\beta}$ 可得

$$k_F = 2\beta \cos\Phi = \frac{4\pi n}{\lambda} \cos\left[\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{x_N - x_M}{z_N - z_M}\right)\right] \quad (9)$$

即确定了条纹矢量 k_F 的大小,通过式(2)可得全息反射镜各点上的衍射效率。

3.3 模拟仿真

聚合物全息材料的实际参量分别为 $\lambda = 532 \mu\text{m}$, $n = 1.5$, $D_n = 0.015$, $d = 25 \mu\text{m}$, 会聚点 N 坐标为 $(4 \text{ cm}, -4 \text{ cm})$, 光电探测器位于 N 点,其有效接收面

积为 1 mm^2 , 划分全息反射镜表面为7各点,分别为点 $A(-4 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$ 、 $B(-3 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$ 、 $C(-1.5 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$ 、 $O(0 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$ 、 $D(1.5 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$ 、 $E(3 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$ 、 $F(4 \text{ cm}, 0 \text{ cm})$, 如图10所示。

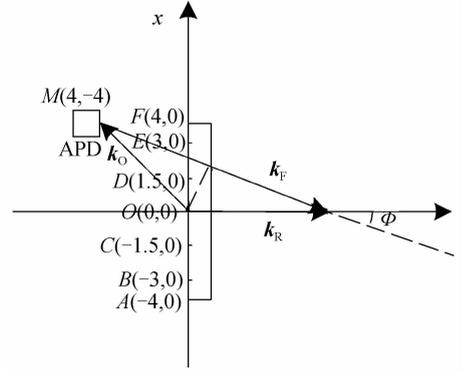
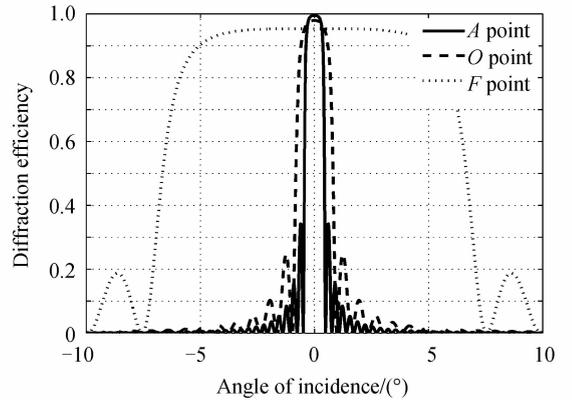
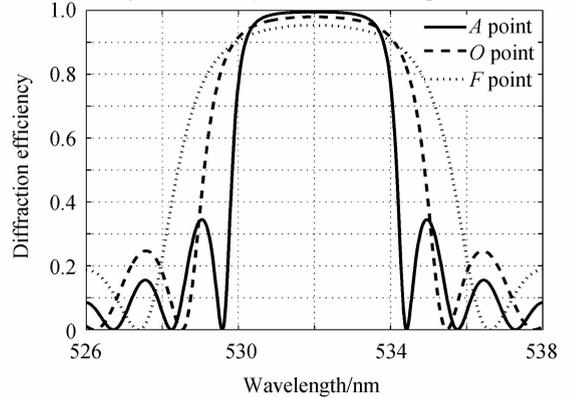


图10 全息反射镜内固定点的 k 矢量闭合法示意图
Fig. 10 k vector closed legitimate schematic of the fixed points within Holographic Mirror

将具体数值分别代入式(2)、(6)、(8)和(9),可得出各点的衍射效率分别与角度和光谱选择性的关系,取 A 、 O 、 F 三个代表点,如图11。



(a) The diagram of the diffraction efficiency depends on angular selectivity for three different points A 、 O 、 F

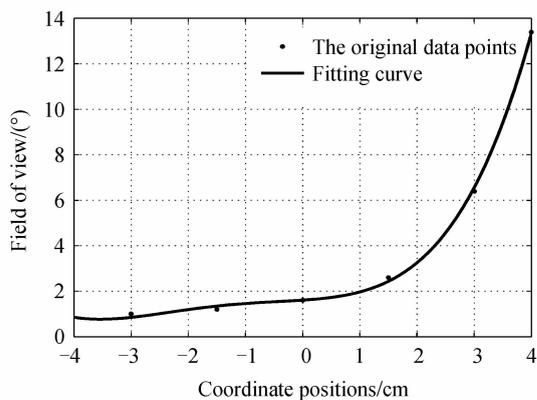


(b) The diagram of the diffraction efficiency depends on wavelength selectivity for three different points A 、 O 、 F

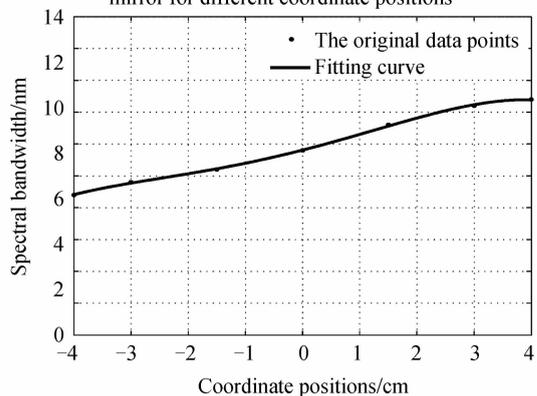
图11 点 A 、 O 、 F 下行射效率分别与角度和波长选择性的关系
Fig. 11 The diagram of the diffraction efficiency respectively depends on angular and wavelength selectivity for three different points A 、 O 、 F

从图 11(a)中可以看出角度随着信号光 k_o 与 Z 轴夹角增大而增大,当夹角等于 π 时,即在 F 点时达到极大值,半峰宽值为 13.4° ,此时的最大衍射效率为 95.3%。由图 11(b)可见波长随着信号光 k_o 与 Z 轴夹角减小而减小,当在 A 点时到达最小值,半峰宽值为 4.4 nm,此时的最大衍射效率为 99.5%。

实际系统的视场角和光谱带宽在各个点处的值是不同的,如图 12(a)和(b),对上述七个点的值进行多项式函数 polyfit 拟合,计算得出视场角的平均值和方差分别为 3.9° 和 18.09;光谱带宽的平均值和方差分别为 5.9 nm 和 1.39。图 12(a)中视场角随着坐标位置增大而增大,其变化范围在 $0.8^\circ \sim 13.4^\circ$ 之间,且方差较大;图 12(b)中光谱带宽随着坐标位置减小而减小,其变化范围在 4.4 nm~7.4 nm 之间,且方差较小,在其他条件不变的情况下,改变聚合物全息材料折射率 n ,会使视场角和光谱带宽发生变化,但是衍射效率保持不变。



(a) The diagram of angular selectivity of holographic mirror for different coordinate positions



(b) The diagram of wavelength selectivity on holographic mirror for different coordinate positions

图 12 全息反射镜上不同坐标位置下角度和波长选择性的关系

Fig. 12 The diagram of angular and wavelength selectivity on holographic mirror for different coordinate positions

同理,得到不同坐标位置下的衍射效率的关系图,将 $\lambda=532\text{ nm}$, $n=1.5$, $D_n=0.015$, $d=25\text{ }\mu\text{m}$ 等参量代入无损反射全息图的衍射效率式(2)中,计算出全息

反射镜的整体衍射效率在 95.3% 以上,当然这是在不考虑吸收的理想情况下,并且任何参数的变化(λ 、 D_n 、 d 等)都会极大影响衍射效率的大小。

从图 13 可以看到,在其他条件不变的情况下,只改变全息材料的厚度 d ,全息材料的衍射效率随着厚度 d 的增大而变大。当 $d=50\text{ }\mu\text{m}$ 时,衍射效率接近 100%

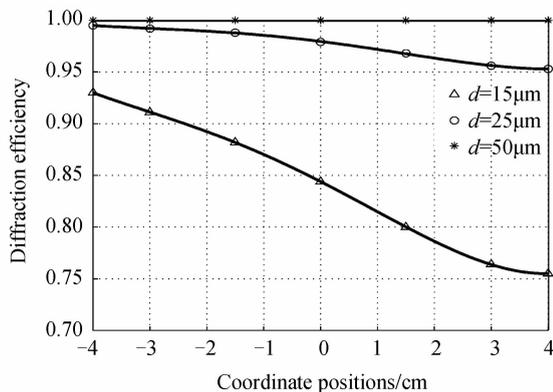


图 13 不同材料厚度下坐标位置与衍射效率的关系

Fig. 13 The relation diagram between coordinate positions and diffraction efficiency for different thicknesses of the recording medium

4 结论

全息反射镜作为室内可见光通信的接收天线,不但可以实现普通透镜的会聚光束的作用,而且兼具滤波片滤除背景光的功能。模拟结果表明:全息反射镜在不同点的视场角和光谱带宽分别为 $0.8^\circ \sim 13.4^\circ$ 和 4.4 nm~7.4 nm,并且在满足文中所述参量的情况下整体衍射效率在 95.3% 以上。但是任意参数的变化(λ 、 D_n 、 d 等)都会影响视场角、光谱带宽以及衍射效率,因此选取合适的参量会极大提高整个全息光学接收天线的性能。此外,全息反射镜体积小、重量轻、成本低等的优点,使得它可以作为光学接收天线用于室内可见光通信系统。

参考文献

[1] LANGER K D, GRUBOR J. Recent developments in optical wireless communications using infrared and visible light[C]. International Conference on Transparent Optical Networks, 2007, 3(9): 146-151.

[2] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.

[3] YANG Yu, LIU Bo, ZHANG Jian-kun, et al. A visible light communication system based on high-power illumination LED lamp[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2011, 22(6): 804-807.

杨宇, 刘博, 张建坤, 等. 一种基于大功率 LED 照明灯的可见光通信系统[J]. 光电子-激光, 2011, 22(6): 804-807.

[4] HONG Yang, CHEN Jian, WANG Zi-xiong. Multi-user MIMO indoor visible light communication system based on BD

- precoding algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1277-1282.
- 洪阳, 陈健, 王子雄. 基于BD预编码的多用户MIMO室内可见光通信[J]. *光子学报*, 2013, **42**(11): 1277-1282.
- [5] SUN Wen-chang, YUAN Dan. The research and progress on optical receiving antenna of wide viewing angle[J]. *Popular Science & Technology*, 2012, **14**(6): 54-57.
- 孙文昌, 袁丹. 宽视场光学接收天线研究与进展[J]. *大众科技*, 2012, **14**(6): 54-57.
- [6] DEGNAN J J, KLEIN B J. Optical antenna gain 2: receiving antennas[J]. *Applied Optics*, 1974, **13**(10): 2397-2401.
- [7] WALTER R, LEEB. Degradation of signal to noise ratio in optical free space data links due to background illumination[J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(16): 3443-3449.
- [8] GRANTHAM P, KA L H, THOMAS K, *et al.* Visible light communication for audio systems[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, **45**(4): 1112-1118.
- [9] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, *et al.* 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(26): B501-B506.
- [10] DING De-qiang, KE Xi-zheng. Visible light communication and research on its key techniques [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(2): 114-117.
- 丁德强, 柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(2): 114-117.
- [11] WANG Yuan-quan, WANG Yi-guang, CHI Nian, *et al.* Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(1): 1203-1208.
- [12] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 312-341.
- [13] 周海宪, 程云芳. 全息光学设计、制造和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 185-198.
- [14] 陶世荃, 江竹青, 王大勇, 等. 光学体全息技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 274-337.
- [15] SOLYMAR L, COOKE D J. Volume holography and volume gratings[M]. New York: Academic Press, 1981: 76-111.
- [16] XU Yi-yan. Analysis of diffraction efficiency on volume reflecting hologram of phase place[J]. *Advanced Display*, 2012, **23**(11): 20-23.
- 许翼雁. 影响体积反射相位全息图衍射效率原因的分析[J]. *现代显示*, 2012, **23**(11): 20-23.
- [17] GONG Qiao-xia, HUANG Ming-ju, GU Dong-hong. Effects of monomers and binders in the photopolymer on holographic data storage properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 396-401.
- 弓巧侠, 黄明举, 顾冬红, 等. 光致聚合物中单体及粘结剂对全息性能的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 396-401.
- [18] WANG Yong, CAO Jia-nian. Performance analysis of atmospheric laser communication system based on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 36-40.
- 王勇, 曹家年. 大气激光通信非对称限幅光正交频分复用技术[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 36-40.
- [19] KOGELNIK H. Couple Wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1969, **48**(9): 2909-3138.