

用于移动可见光通信的球面型可变焦光学接收天线

张学彬 唐 义 崔 璐 白廷柱

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 针对可见光通信环境的复杂多样性以及传统光学接收天线应用的局限性,设计了一种可变焦光学天线作为移动可见光通信系统的接收天线。通过引入直角反射棱镜折叠空间光路的方法减小天线的厚度,且该天线各透镜面型均为球面,较大地节约了系统成本。仿真分析结果显示:系统的变倍比为2.5倍,视场角可以在 $16^\circ\sim 42^\circ$ 之间连续变化,最大增益可达16.2,系统尺寸为 $18\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,探测面照度均匀且相对照度较高,满足通信应用。最后,在 $5\text{ m}\times 5\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的通信环境中对变焦天线和定焦天线在不同应用场景下的接收性能进行了对比分析。分析结果表明,变焦光学接收天线满足大视场高增益要求的同时,在系统的稳定性、移动性和环境适用性方面明显优于定焦光学天线,非常适于可见光通信应用。

关键词 光通信; 变焦光学接收天线; 移动性; 增益

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0106004

Design of a Spherical Optical Zoom Antenna Using for Mobile Visible Light Communication

Zhang Xuebin Tang Yi Cui Lu Bai Tingzhu

*Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Photoelectricity,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

Abstract As the problem of the complex optical communication environment and the boundedness of the traditional optical antenna, an optical zoom antenna is designed for mobile visible light communication. The thickness of the antenna is reduced by using right-angle reflecting prism folding the space optical path. The surface type of each lens in the antenna is spherical, which can save the system cost. The simulation results indicate that the zoom ratio of the system is 2.5; the field of view (FOV) can change between 16° and 42° ; the system gain is 16.2; the system size is $18\text{ mm}\times 6\text{ mm}$. The image quality of the system is well and the relative illumination is high, basically satisfying the communication application. At last, an indoor visible light communication system model is set up in a room with a size of $5\text{ m}\times 5\text{ m}\times 3\text{ m}$, and the comparison of the detection results between the zoom antenna and the fixed-focus antenna in different situations is analyzed. The simulation results indicate that the optical zoom antenna can satisfy the requirement of large field of view and high gain, improve the system stability, mobility and environmental suitability, and be suitable for visible light communication.

Key words optical communications; zoom optical receiving antenna; mobility; gain

OCIS codes 060.4510; 120.4570; 080.3620; 080.4295

1 引 言

可见光通信(VLC)是以发光二极管(LED)作为光源的一种新兴无线光通信技术,它与无线通信技术相比具有更高的通信速率,且具有防窃听、抗干扰、可靠性高等优点^[1-2]。该技术可以与现有无线通信网络相结合

收稿日期: 2015-07-29; 收到修改稿日期: 2015-09-01

基金项目: 国家973计划(2013CB329202)、国家自然科学基金(61571067)、工业技术基础项目(J312012B002)

作者简介: 张学彬(1987—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: zhangxb9@163.com

导师简介: 唐 义(1977—),男,博士,副教授,主要从事光通信、成像光谱仪方面的研究。

E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn(通信联系人)

解决“最后一百米”的问题,因而已经成为无线短距离通信技术的研究热点之一^[3-4]。

在通信过程中,如果接收端能自由移动将会更加符合用户的使用需求,各国学者针对接收天线在移动可见光通信中的应用展开了深入研究。常用的卡塞格伦天线和菲涅耳透镜等天线虽然增益高,但是视场角较小,并不适合移动可见光通信系统^[5-6]。凸凹反射面接收天线或者复合抛物面聚光器(CPC)^[7-8]虽然增大了系统的视场角,一定程度上提高了天线的移动接收性能,但是增益只能维持在一个较低的水平。空间分集天线是一种由多个小天线组合在一起的结构^[9],每个天线负责一个视场角和方向,增加了系统的移动性,但是该天线结构较为复杂。

国内外学者对光学接收天线的研究主要集中在定焦系统上,当光源与接收天线之间的距离变化时,实际通信效果将会改变。假设在一个可见光照明通信环境中,光源均匀对称分布在房间中的天花板上,同时桌面上摆放着台灯作为备用光源。该通信环境中若接收机采用定焦光学接收天线,将有可能产生如下问题:

1) 房间中天花板上各个信号光源发射不同的信号时,若采用常规的大视场光学接收天线,则将会同时探测到信号光和其他光源传来的干扰光,导致系统的通信性能下降;

2) 在移动 VLC 环境中,接收机与光源的之间的距离可能会产生变化(例如信号光源由天花板灯源切换到台灯),当天线物距缩小时,将会使探测面的光斑扩大弥散,减小了系统的接收能量;

3) 若采用多输入多输出(MIMO)技术上增大系统的信道容量,在光学上要求探测器阵列能精准地接收到相应 LED 阵列发出的信号光,且各信号光斑能量集中。此时若采用定焦光学天线,则必须保证接收端与发射端的之间的距离精确且不能移动,否则会使探测到的光斑位置发生变化,导致无法正常探测接收。如此苛刻的要求将较大地降低该技术的实用性。

针对以上问题,设计了一种可连续变焦的光学接收天线,焦距范围为 4~10 mm,视场角为 16°~42°,系统变倍比约为 2.5 倍,系统最大增益为 16.2,系统尺寸为 18 mm×6 mm,结构简单且成本较低。最后在 5 m×5 m×3 m 的通信环境中对变焦天线和定焦天线在不同应用场景下的接收性能进行了对比分析。分析表明,变焦光学接收天线满足大视场高增益要求的同时,在系统的稳定性、移动性和环境适用性方面明显优于定焦光学天线,非常适于白光通信应用。

2 变焦天线结构设计

2.1 初始结构选择

变焦光学系统是一种在焦距变化的同时保持像面稳定且像质良好的系统。根据补偿方法的不同可分为光学补偿变焦系统和机械补偿变焦系统。光学补偿变焦系统是用几组透镜作为变倍组和补偿组时,各透镜组的移动方向和移动速度都是相同的,各透镜组必须移动到某些位置才能得到稳定清晰的像。该方式机械结构简单,不需要凸轮结构,但是其焦距不能连续变化且系统结构较大。机械补偿变焦系统是通过移动少量的补偿透镜组来补偿像面的位移,补偿透镜组与变倍透镜组的移动方向和移动速度不一定相同。该方式能在变焦过程中始终保证像面的位置稳定,但变焦过程需要复杂的变焦凸轮结构来保证。由于非线性凸轮曲线的精确加工难度大大降低,该类系统应用越来越广泛^[10]。

考虑到接收天线在变焦时保持良好的接收效果及降低机械加工难度,因此采用单变倍单补偿型机械补偿变焦系统作为光路初始结构。

2.2 理论计算

变焦光学接收天线变焦核图如图 1 所示,其中透镜 1 为固定组,透镜 2 为变倍组,透镜 3 为补偿组。

初始结构计算步骤如下所示^[11],其中 f_i 为各相应透镜组的焦距, β_i 为各相应透镜组的初始放大倍率, β'_i 为各相应透镜组在某个变焦位置时的放大倍率, M 为变倍比, d_{ij} 为各透镜组之间的初始间隔, d'_{ij} 为某个焦距位置时各透镜组的间隔, f 为系统的初始焦距, f' 为变倍比为 M 时系统的焦距, x 为变倍组的移动距离, y 为补偿组相应的移动距离。

变倍组和补偿组的初始放大倍率表示为

$$\beta_2 = \frac{f_2}{f_1 + f_2 - d_{12}}, \quad (1)$$

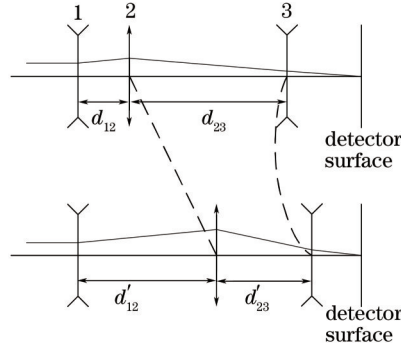


图 1 变焦核图

Fig.1 Diagram of zoom nuclear

$$\beta_3 = \frac{f_3}{f_3 + f_2(1 - \beta_2) - d_{23}} \quad (2)$$

设定变焦系统的变倍比为

$$M = \frac{f}{f'} \quad (3)$$

当总焦距为 f' 时,变焦系统变倍组的倍率如下:

$$\beta_2' = \frac{\left[f_1 + f_3 - 2 - d_{23} - \frac{f_3^2(1 - f_1)}{(f_3 - d_{23})(1 - f_1) + f_1} \right]}{2 \left[\frac{(f_3 - d_{23})(1 - f_1) + f_1}{M} - 1 \right]} \pm \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{2 \left[\frac{(f_3 - d_{23})(1 - f_1) + f_1}{M} - 1 \right]} \quad (4)$$

其中

$$Q = \left[f_1 + f_3 - 2 - d_{23} - \frac{f_3^2(1 - f_1)}{(f_3 - d_{23})(1 - f_1) + f_1} \right]^2 - 4 \left[1 + f_3 - \frac{Mf_3^2}{(f_3 - d_{23})(1 - f_1) + f_1} - \frac{(f_3 - d_{23})(1 - f_1) + f_1}{M} \right] \quad (5)$$

变焦后补偿组的倍率为

$$\beta_3' = \frac{M\beta_2\beta_3}{\beta_2'} \quad (6)$$

变倍组和补偿组的位移为

$$x = f_2 \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2'} \right) \quad (7)$$

$$y = f_3 (\beta_3' - \beta_3) \quad (8)$$

根据位移即可求出变焦后各透镜组之间的间隔

$$d'_{12} = d_{12} + x, \quad (9)$$

$$d'_{23} = d_{23} - x + y. \quad (10)$$

当确定系统的焦距和变倍比等系统指标后,即可代入以上公式,反复计算,使各透镜组之间的间隔在一个合理的范围内(均大于零),即可得到相应的初始结构。

该变焦光学系统采用负-正-负的结构型式,这样的结构有利于调整主光线的角度,使探测器上探测到的能量更加均匀。由于该天线为非成像探测型光学天线,对像差要求不高,所以设计过程中各透镜面型均采用球面镜,较大地节约了系统的成本。为了减小光学接收天线的厚度,使其更加方便用户使用,接收天线前端引入直角反射棱镜折叠空间光路,使透镜组变焦时沿光学天线长度方向移动,增大了各透镜组的移动空间,并为驱动组件的安装留下了空间。

3 变焦光学接收天线仿真设计

3.1 光学接收天线设计

针对移动可见光通信系统便携、高增益、大视场的需求,设计一种变焦光学接收天线,天线设计指标如表 1 所示。

表 1 变焦光学接收天线设计指标

Table 1 Design indexes of zoom optical receiving antenna

	Short focal	Middle focal	Long focal
System length /mm	18	18	18
System diameter /mm	12	12	12
Focal length /mm	4	6	10
Detect surface diameter /mm	3	3	3
Field of view /($^{\circ}$)	± 20	± 14	± 8
Relative illumination /%	≥ 60	≥ 60	≥ 60
Optical gain	≥ 15	≥ 15	≥ 15
Wavelength range /mm	0.48~0.7	0.48~0.7	0.48~0.7

根据第 2 节的公式,用软件 Matlab 进行编程计算,即可得到初始结构数据。用软件 ZEMAX 进行仿真设计,并根据以上指标编写优化函数进行优化,得到最终的变焦光学接收天线结构,其光路图如图 2 所示。

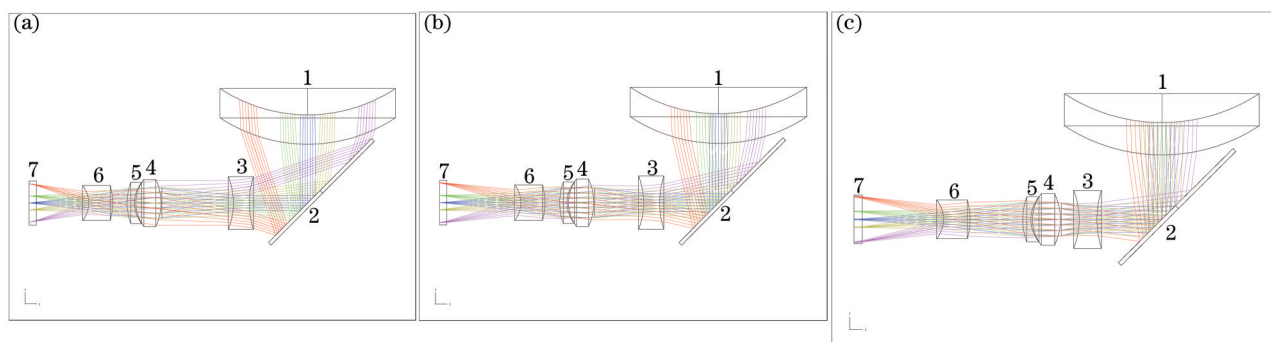


图 2 变焦光学接收天线光路图。(a) 短焦系统; (b) 中焦系统; (c) 长焦系统

Fig.2 Light path diagrams of zoom optical receiving antenna. (a) Short focal system; (b) middle focal system; (c) long focal system

图 2 (a)~ (c)分别为短焦系统、中焦系统和长焦系统,其中透镜 1~3 为固定组,扩大系统的视场角并折叠了空间光路;透镜 4~5 为变倍组,距离相对固定,变倍组通过前后移动可以改变系统的焦距;透镜 6 为补偿组,通过前后移动来补偿像面的位移;元件 7 为相应的探测器。各透镜面型均采用球面镜,结构简单且降低了加工成本。系统总长为 18 mm \times 6 mm,像面直径为 3 mm,焦距分别为 4, 6, 10 mm,对应视场角分别为 42 $^{\circ}$, 28 $^{\circ}$, 16 $^{\circ}$,变倍比约为 2.5 倍,在变焦过程中,系统总长保持不变,探测面稳定。实际通信应用中,系统根据探测到的信噪比可以判断该通信环境下的天线焦距是否合适,然后变倍组根据需求前后移动,调到一个信噪比相对最高的位置。当变倍组移动时,探测面将发生位移,补偿组移动相应的距离补偿探测面的位移,保证探测面的稳定性。该自动变焦过程将会造成一定的系统延时,其中包括信号反馈、电机启动和电机转动等造成的延时,一般在百毫秒量级,对通信系统的影响较小。

3.2 光学接收天线仿真分析

探测面的照度分布反映了天线的探测均匀性。变焦光学天线探测面均匀性分析如图 3 所示。从图中看出,探测面照度分布均匀,能量集中于直径为 3 mm 的探测平面内,平顶度较好。

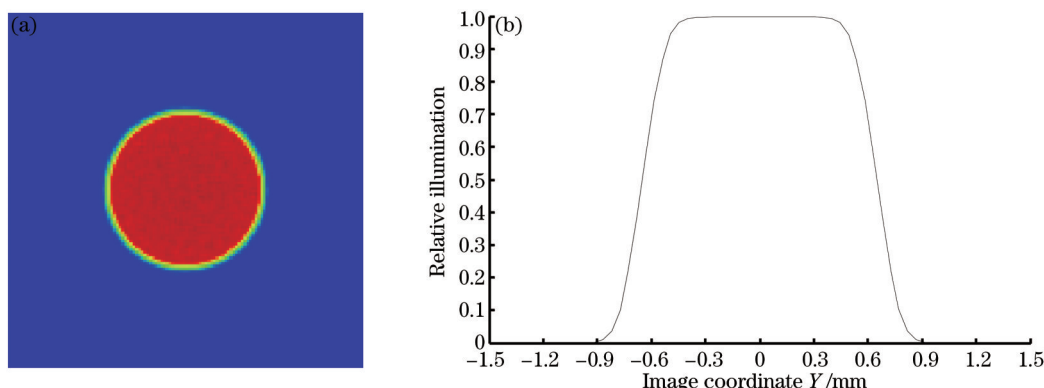


图 3 探测面均匀性分析。(a) 照度 2D 维面图; (b) 照度 Y 方向扫描图;

Fig.3 Detection surface evenness analysis. (a) Illumination 2D surface; (b) illumination Y scan

相对照度是边缘视场照度与中心视场照度的比值,表征了探测面的探测效率。图4为各焦距情况下探测面上的相对照度曲线。从图中可以看出,各焦距情况下探测面上的相对照度均高于90%,证明该光学天线有较高的探测效率。

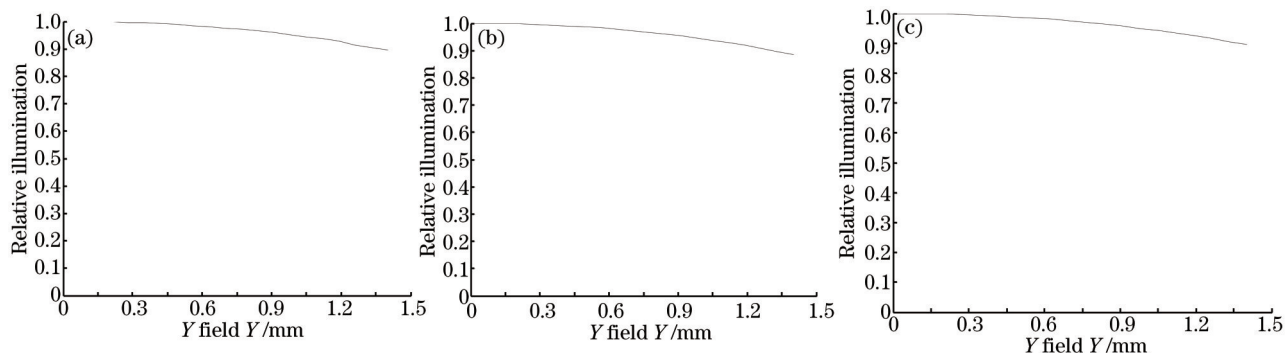


图4 变焦光学天线相对照度曲线。(a)焦距为4 mm的相对照度曲线;(b)焦距为6 mm的相对照度曲线;(c)焦距为10 mm的相对照度曲线

Fig.4 Relative illuminance curves of zoom optical antenna. (a) Relative illuminance curve of 4 mm focal length; (b) relative illuminance curve of 6 mm focal length; (c) relative illuminance curve of 10 mm focal length

光学增益是光学天线在光通信系统中的一项重要指标,其定义为同一探测器在加与未加光学天线时光敏面接收到的光功率的比值^[12]。针对该系统,接收天线的增益可表示为^[13]

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c} & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (11)$$

式中 n 是系统的折射率, $\psi_c \leq \pi/2$ 是系统的视场角。

该系统的最大增益可达16.2,可大大提高接收信噪比。

4 变焦光学接收天线通信性能分析

为了分析变焦光学天线在移动可见光通信中的优势,对通信场景进行建模仿真,并将变焦光学天线与定焦天线的通信结果进行对比分析。如图5所示,仿真中采用一个5 m×5 m×3 m的房间,4组可见光LED阵列均匀对称分布在房间中的天花板上,每组阵列有60×60个LED单元。LED灯发射角为30°,总功率为20 mW。房间中的桌子高度为0.85 m,接收天线放置在桌子上,接收天线与天花板上光源之间的距离为2 m。桌面上摆放了一个台灯,灯源类型与天花板上的灯源相同,与接收天线之间的距离为0.5 m。探测器采用雪崩光电二极管(APD),探测器直径为3 mm,增益为100,暗电流为0.05 nA,过剩因子为2。

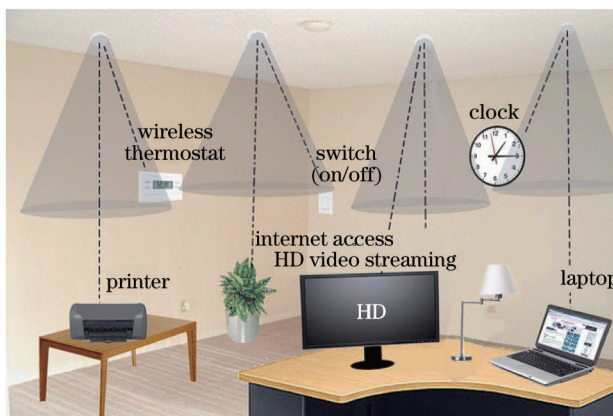


图5 VLC系统通信环境

Fig.5 VLC system communication environment

4.1 多光源情况下对接收天线通信性能的影响

在该仿真环境中存在多个信号光源,光学接收天线可能同时接收到多个光源传来的光,如图6(a)所示。

由于A光源离天线最近,所以信号较强,成为信号光源,B光源成为杂散光源。此时若采用定焦天线,将难以简单去除光源B带来的杂散光。若采用变焦天线,如图6(b)所示,通过变焦可以滤掉来自光源B的杂散光(红圈中的部分)。

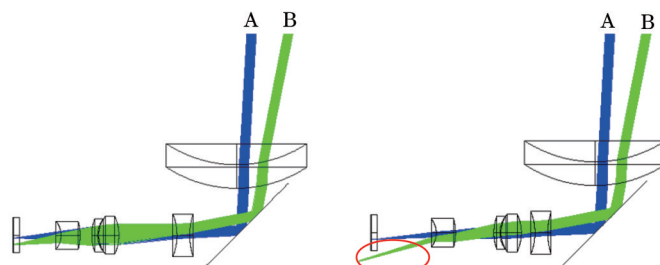


图6 多光源情况下光学接收天线接收情况。(a)定焦天线接收情况;(b)变焦天线接收情况

Fig.6 Receiving condition of optical receiving antenna in multiple light sources situation.

(a) Receiving condition of fixed-focus antenna; (b) receiving condition of zoom antenna

VLC系统的信噪比可以表示为

$$\frac{S}{N} = \frac{i_p^2 M^2}{i_q^2 + i_{DB}^2 + i_{DS}^2 + i_T^2} = \frac{i_p^2 M^2}{2e(i_p + i_D)M^2 F(M)B + 2e i_L B + (4kTBR_L)}, \quad (12)$$

式中 i_p^2 、 i_q^2 、 i_{DB}^2 、 i_{DS}^2 和 i_T^2 分别为光电流、量子噪声电流、本体暗电流、表面暗电流和热噪声电流的均方值, i_p 、 i_D 、 i_L 分别为光电流、没有倍增的本体暗电流、表面暗电流。 M 为增益, $F(M)$ 是与雪崩过程的随机特性有关的过剩因子。 B 是带宽, T 是绝对温度, R_L 是负载电阻。一般而言, APD 的噪声主要来自于器件本身的噪声, 热噪声的影响不大^[14]。

通过仿真计算可得, 图6(a)中系统的信噪比只有12.87 dB, 若采用变焦系统达到图6(b)的效果, 信噪比为24.95 dB, 提高了将近12 dB, 系统的信噪比得到了较大的提升, 相比定焦光学天线具有更高的环境适应性。

4.2 光源与接收天线的距离对通信性能的影响

如图5所示, 若关掉天花板上的灯, 采用台灯作为信号光源, 通信距离由2 m缩短为0.5 m, 天线探测面上的接收情况如图7所示。

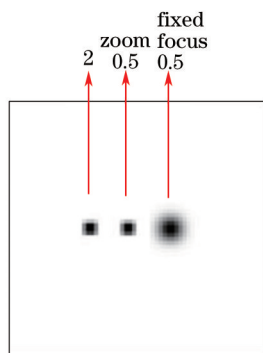


图7 变焦系统和定焦系统探测结果对比

Fig.7 Detection results comparison of zoom system and fixed-focus system

图7中左边为采用天花板上的光源照明时接收天线探测面上所形成的光斑; 中间为采用台灯照明时变焦天线探测面上所形成的光斑; 右边为采用台灯照明时定焦天线探测面上所形成的光斑。如图8所示, 若改变光源与接收天线的距离, 变焦系统可以通过调节焦距使光斑大小基本保持不变, 保证较高的探测效率; 相同情况下定焦系统探测到的光斑变大很多, 降低了系统的探测效率。通过(11)式可以计算出光源位置改变后变焦系统的增益不变, 定焦系统的增益降为8, 变焦光学天线比定焦光学天线增益提高了2.02倍。可见变焦光学天线具有更强的移动性和稳定性。

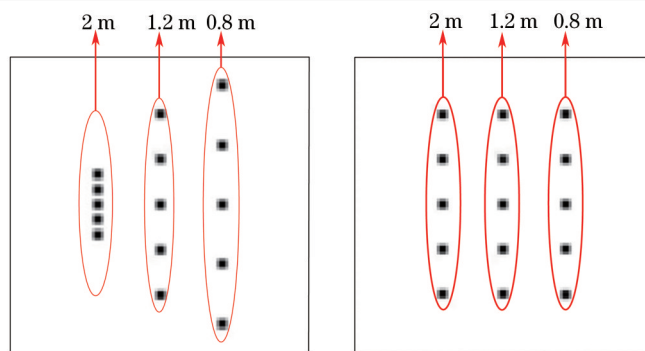


图 8 APD 阵列探测面接收结果。(a) 定焦光学接收天线探测结果; (b) 变焦光学接收天线探测结果
Fig.8 Receiving results of APD array detecting surface. (a) Detecting results of fixed-focus optical antenna;
(b) detecting results of zoom optical antenna

4.3 接收天线位置变化对探测器阵列接收的影响

MIMO 技术在光学上要求通过光学天线使探测器阵列中每个探测器均能准确地接收到相应的 LED 信号,且光斑能量集中。仿真中为了方便对比分析,采用一个 1×5 的 LED 阵列作为信号源,将接收天线分别在 1.2 m 处进行前后移动,观察其接收情况,如图 8 所示。

如图 8(a)所示,当接收端位置变化时,若采用定焦光学接收天线对信号进行探测接收,各信号光斑的位置已经发生了明显的改变,探测器阵列无法对其进行探测接收。相同情况下若采用变焦光学接收天线,如图 8(b)所示,无论接收端位置如何前后变化,探测面上均可以非常清晰地接收到光源阵列的信号光,且各信号光斑的位置保持不变,可以较好地被探测器阵列接收。该仿真证明变焦光学天线可以较好地适用于移动 MIMO 通信系统中。

5 结 论

针对移动可见光通信环境的复杂多样性以及传统的光学接收天线的局限性,通过理论计算和仿真优化,设计了一种变焦光学接收天线。经过仿真分析可以得出,该光学天线的变倍比为 2.5 倍,视场角可以在 $16^\circ \sim 42^\circ$ 之间连续变化,最大增益为 16.2,系统总长仅为 $18 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,结构简单且成本较低。为了分析变焦光学接收天线的通信性能,在一个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的房间内建立了室内 VLC 系统通信模型,并对变焦天线和定焦天线的探测接收性能进行了对比分析。仿真结果表明,相同情况下变焦光学天线具有更高的信噪比和增益。因此,该变焦光学接收天线在满足大视场高增益要求的同时,提高了系统的信噪比和增益,具有较强的稳定性、便携的可移动性和较好的环境适用性,比起传统的定焦天线更加适用于移动可见光通信系统。

参 考 文 献

- 1 Gao Junying, Wang Dechang, Yao Jianguo. MIMO visible light wireless communication system employed camera-based receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106004.
高俊英,王德昌,姚建国.基于摄像头的 MIMO 可见光无线通信系统[J].光学学报,2015,35(1):0106004.
- 2 Lu Qingfeng, Ji Xinsheng, Huang Kaizhi, *et al.*. Power allocation method for reducing nonlinearity clipping distortion in asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing based visible light communication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0706004.
陆庆峰,季新生,黄开枝,等.降低可见光通信不均匀限幅正交频分复用系统非线性限幅失真的功率分配方法[J].光学学报,2014,34(7):0706004.
- 3 Anthony C. Boucouvalas. Challenges in optical wireless communications[J]. Opt Photonics News, 2005, 16(9): 36-39.
- 4 D M Boroson, R S Bondurant, J J Scozzafava. Overview of high-rate deep-space laser communications options[J]. SPIE, 2004, 5338: 37-49.
- 5 Li Bo, Wang Shurong, Wang Junbo. Optical design of space-based ultraviolet tracking and detailed reconnaissance system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0916003.
李博,王淑荣,王俊博.天基紫外跟踪详查光学系统设计[J].中国激光,2013,40(9):0916003.
- 6 Li Xiang, Lan Tian, Wang Yun, *et al.*. Design and study of Fresnel lens for antenna in indoor visible light communication system[J]. Acta

- Physica Sinica, 2015, 64(2): 024201.
- 李 湘, 蓝 天, 王 云, 等. 室内可见光通信系统中菲涅尔透镜接收天线的设计研究[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024201.
- 7 Sergey Trubko, Venkata N Peri, Shree K Nayar, *et al.*. Super wide-angle panoramic imaging apparatus: USA, 6611282B1[P]. 2003-08-01.
- 8 Wang Yun, Lan Tian, Li Xiang, *et al.*. Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 124212.
- 王 云, 蓝 天, 李 湘, 等. 复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析[J]. 物理学报, 2015, 64(12): 124212.
- 9 Andrew Burton, Zabih Ghassemlooy, Sujan Rajbhandari, *et al.*. Design and analysis of an angular-segmented full-mobility visible light communications receiver[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014, 25(6): 591-599.
- 10 Gao Duorui, Zhong LiuJun, Zhao Zhao, *et al.*. Zoom optical system design based on Matlab[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416002.
- 高铎瑞, 钟刘军, 赵 昭, 等. 基于 MATLAB 的变焦光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- 11 Li Lin, Wang Yongtian, Zhang Liqin. Study of zoom lens Gaussian optical parameters[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 424-427.
- 李 林, 王涌天, 张丽琴. 变焦天线高斯光学参数研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 424-427.
- 12 Alireza Bonakdar, Hooman Mohseni. Hybrid optical antenna with high directivity gain[J]. SPIE, 2013, 38(15): 2726-2728.
- 13 Z Ghassemlooy, W Popoola, S Rajbhandari. Optical wireless communications: System and channel modelling with Matlab[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012: 81
- 14 Toshihiko Komine, Masao Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Trans Consum Electr, 2004, 50(1): 100-107.

栏目编辑: 王晓琰