

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

王云 蓝天 李湘 沈振民 倪国强

Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication

Wang Yun Lan Tian Li Xiang Shen Zhen-Min Ni Guo-Qiang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 124212 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于注入锁定法布里 - 珀罗激光器的光学双稳态及光存储研究

Optical bistability and optical storage based on injection locked Fabry-Perot semiconductor laser

物理学报.2015, 64(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044204>

结构参数对串联微环谐振腔编解码器性能的影响

Study of structure parameters effect on performance of optical en/decoder based on parallel-cascaded microring resonators

物理学报.2015, 64(3): 034218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034218>

基于谐波拟合产生周期性三角形光脉冲串的实验研究

Experimental demonstration on triangular-shaped pulse train generation based on harmonic fitting

物理学报.2014, 63(15): 154210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154210>

基于半导体光放大器中非线性偏振旋转效应单一光缓存环全光时隙交换处理能力研究

Capability of single optical buffer loop implementing all-optical time slot interchange based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifier

物理学报.2014, 63(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084205>

基于双平行马赫曾德调制器的动态可调光载波边带比光单边带调制:理论分析与实验研究

Optical single sideband modulation with continuously tunable optical carrier-to-sideband ratio by employing a dual-parallel Mach-Zehnder modulator

物理学报.2013, 62(22): 224210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224210>

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*

王云 蓝天[†] 李湘 沈振民 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, 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

(2014年11月8日收到; 2014年12月18日收到修改稿)

针对室内可见光通信的特点, 选择复合抛物面聚光器作为可见光通信系统光学天线, 介绍了复合抛物面聚光器的几何结构和光学特性, 利用光学仿真软件 TracePro 对复合抛物面聚光器进行了设计、建模与仿真。通过对不同光源条件下复合抛物面聚光器聚光特性的仿真发现: 在光源为朗伯辐射模型时复合抛物面聚光器的聚光性能更好, 且视场角越小增益越高; 但接收端与光源的相对位置对小视场复合抛物面聚光器的实际增益有明显影响, 在仿真条件下, 视场角为 10° 的复合抛物面聚光器实际增益为 22.88, 比理论值降低了 31%。在此基础上, 在一个 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的房间中对采用复合抛物面聚光器为光学天线的室内可见光通信系统进行了建模, 分别得到了直射链路和非直射链路下房间内各个位置的光功率分布。仿真结果表明, 采用一个视场角为 60° 的复合抛物面聚光器为光学天线, 两种链路下平均接收功率分别提高了 4.29 dBm 和 4.77 dBm, 非直射链路比直射链路的平均接收功率提高了 11.2%。

关键词: 可见光通信, 复合抛物面聚光器, 光学天线, 增益

PACS: 42.79.Sz, 74.25.Gz, 42.15.Eq, 42.60.Lh

DOI: [10.7498/aps.64.124212](https://doi.org/10.7498/aps.64.124212)

1 引言

可见光通信(visible light communication, VLC)是以白光发光二极管(light emitting diode, LED)为光源的新型无线光通信方式^[1,2]。与传统的射频通信及其他光无线通信方式相比, VLC 不占用频谱带宽、无电磁波干扰, 而且 LED 光源既有照明功能同时又有通信功能, 只要有 LED 照明灯的地方都能实现通信, 是一种极具发展潜力的通信方式。从 2000 年起, 日本研究人员 Komine 和 Nakagawa^[3] 就开始了室内条件下以白光 LED 作为光源的通信信道研究, 他们通过数学分析与仿真, 确认了白光 LED 同时作为照明光源和通信光源的可行性。利用白光 LED 的发光特性, 将信号调制到白光上进行传输, 可以构成以 LED 为光源的 VLC 系统。

光学天线也叫光学聚光器或光学前端, 放在接收器前尽可能多地会聚光能量到探测器接收面上。室内 VLC 有直射(line-of-sight, LOS)链路和非直射(non-line-of-sight, NLOS)链路两种传输链路, 作为光源的 LED 符合朗伯辐射模型, 发射角较大, 相对于采用激光为光源的传统无线光通信, VLC 系统要求光学天线有较大的视场角和较高的增益。常见的光学天线如卡塞格伦天线视场角为 1° 左右^[4], 菲涅耳透镜只在平行光入射时聚焦效果好^[5], 这些成像型天线多用于自由空间光通信, 并不适用于 VLC 系统。

复合抛物面聚光器(compound parabolic concentrator, CPC)是根据边缘光线原理设计的非成像聚光器, 在 20 世纪 60 年代被用作太阳能收集器以提高太阳能利用率, 减少光能损失^[6]。其结构是由两条对称的抛物线绕对称轴旋转而成, 凡是入射

* 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

角度小于CPC视场角的光线都能够被反射到接收端^[7], 具有较大的视场以及小角度下较高增益的特点, 这些特点使它非常适合在VLC系统中作为光学接收前端。同样作为非成像聚光器的还有半球透镜、多平面聚光器和条形面聚光器等。半球透镜聚光器视场角较大, 但是增益较低, 当入射角在0到30°范围内时, 增益在1.25到2.25之间^[8]。多表面聚光器有两个光学表面, 入射孔径面和反射面, 入射光线先经入射孔径面折射后到达反射面, 被反射面反射回入射孔径面, 再经过全反射最终到达接收器。多表面聚光器结构紧凑、增益大、视场小, 在平行或近似平行光源条件下表现更好, 传输率可达95%以上^[9]。条形平面聚光器利用线性菲涅耳反射技术, 采用多个条形反射器和跟踪控制系统, 可以得到比较均匀的光斑^[10]。这种聚光器一般结构较大, 不适合用在VLC系统中。

关于VLC系统的研究中, 专门针对于光学天线的探索目前还较少, 光学前端一般都是采用透镜加滤光片的结构。随着VLC技术的发展, 光学前端的设计显得愈发重要, 英国诺桑比亚大学Burton等^[11]提出了一种分角度收集的接收方法, 孔梅梅等^[12]也提出了一种在半球上嵌入多个光锥作为光学天线的设计方法。本文根据CPC的几何特性, 采用光学仿真软件TracePro, 针对CPC作为VLC系统的光学天线进行了仿真设计与性能研究, 探讨了影响CPC实际增益的具体因素和通信中CPC视场角的选择问题, 在一个5 m × 5 m × 3 m的房间中对VLC系统信道进行了计算、建模, 并仿真了采用CPC为光学天线时室内VLC系统在LOS链路和NLOS链路下房间中的接收功率分布, 仿真发现采用CPC为光学天线房间内接收光功率有了明显提高。

2 CPC的几何结构与光学性能

CPC的结构如图1所示。AC和BD是两条对称的抛物线, 它们绕中心轴旋转即可得到三维的抛物面聚光器; a, b 分别为CPC的入射口半径和出射口半径; AD 与 BC 的半夹角 θ_{\max} 为CPC的视场角。当入射光线的入射角度小于或者等于 θ_{\max} 时, 光线能够直接到达或者经过反射到达CPC的下端开口并被接收器接收利用; 当光线入射角度大于 θ_{\max} 时, 光线经过多次反射最终从CPC入射口被

反射出去。因此, 视场角 θ_{\max} 是CPC的一个重要参数, 它直接影响着CPC的聚光性能^[13]。

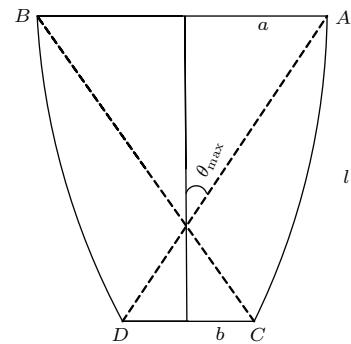


图1 CPC结构图

Fig. 1. Geometry of CPC.

几何聚光比 C_g 是CPC的另外一个重要参数, 对于一个内部无填充(折射率 $n = 1$)的CPC, 它的定义是入射口半径与出射口半径的比值, 即

$$C_g = \frac{a}{b} = \frac{1}{\sin \theta_{\max}}. \quad (1)$$

抛物线的焦距

$$f = b(1 + \sin \theta_{\max}), \quad (2)$$

CPC的高度

$$l = \frac{b(1 + \sin \theta_{\max}) \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} = \frac{f \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}}. \quad (3)$$

长度满足 l 的CPC称为标准型CPC。在实际应用中常对CPC进行截断, 即将其上部截去, 减小高度, 截断后CPC的高度 l' 与 l 的比值 k 为截取比。适当的截断(一般 k 取0.5—0.8)对CPC的性能影响不大^[14], 虽然聚光比会略有减小, 但却可以增大聚光角以接收更多的光线, 同时又可以节省材料, 减小体积和加工难度。因此, 实际应用的CPC一般都是截断型。

对于一个最大接收角为 θ_{\max} 的CPC, 当光源为朗伯辐射体时, 假设CPC入射面上的光亮度是 L_1 , 出射口处放置一个面积为 A_d 的接收器, 接收器位置的光亮度为 L_2 , 在没有CPC的情况下, 接收器所能接收到的光通量 Φ_d 为

$$\begin{aligned} \Phi_d &= \int L_2 A_d \cos \theta d\Omega \\ &= 2\pi L_2 A_d \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= \pi L_2 A_d, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 Ω 是立体角。将CPC作为聚光器放在接收器前, 设CPC的入射口面积和出射口面积分别为 A_i

和 A_o , 令 $A_o = A_d$. 此时, CPC 入射口接收到的光通量 Φ_i 为

$$\begin{aligned}\Phi_i &= \int L_1 A_i \cos \theta d\Omega \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi L_1 A_i \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi L_1 A_i,\end{aligned}\quad (5)$$

出射口接收到的光通量 Φ_o 为

$$\Phi_o = \eta_{opt} \Phi_i = \pi \eta_{opt} L_1 A_i,\quad (6)$$

其中 η_{opt} 为 CPC 的光效率, 是 CPC 出射口与入射口的光通量之比. 由于 CPC 的高度相对房间的高度很小, 因此可设 $L_1 = L_2$, 则 CPC 的增益 G 为

$$G = \frac{\Phi_o}{\Phi_d} = \frac{\pi \eta_{opt} L_1 A_i}{\pi L_2 A_d} = \eta_{opt} \frac{A_i}{A_o} = \eta_{opt} C_g,\quad (7)$$

这里, 在三维情况下几何聚光比 $C_g = A_i/A_o = 1/\sin^2 \theta_{max}$.

3 CPC 仿真设计与聚光性能分析

CPC 属于非成像聚光器, 用在光学系统中的目的是尽可能会聚较多的光能量到探测器接收面上, 因此不需要考虑色散、相差等因素. 在以上分析的基础上, 采用 TracePro 软件设计一个截断型 CPC. 在实际设计中, CPC 的关键参数是最大视场角 θ_{max} 、抛物线焦距 f 、出射口半径 b 以及长度 l' . 由于软件模拟的光线数目有限, 因此本文中设计的 CPC 孔径相对实际的光电探测器较大, 这样可以得到较为准确的仿真结果. 首先设计一个视场角为 30° 的 CPC, 具体参数设置如表 1 所列.

表 1 视场角为 30° 的 CPC 设计参数
Table 1. Design parameters of CPC with a field of view of 30° .

出射口半径 b/mm	视场角 θ_{max}	CPC 长度 l'/mm	焦距/mm
80	30°	240	120

将上述参数分别输入, 即可建立一个视场角为 30° 的三维 CPC 模型, 其轮廓图如图 2 所示. 由于室内 VLC 中采用白光 LED 为光源, 白光 LED 的发光模型遵循朗伯辐射模型, 因此, 在坐标原点处创建一个表面光源来模拟朗伯光源, 总能量为 1 W, 模拟光线数为 100000 条, 每条光线携带的光能量相同, 可得到光源的配光曲线如图 3 所示, 可以看到在极坐标下配光曲线近似为圆形. 将 CPC 放置

在坐标 (300, 300, 900) 处, 设置 CPC 内壁的反射率为 1, 即假设理想情况下入射光线在 CPC 内无吸收损失. 完成对光源和材料特性的设置后, 开始进行光线追迹 [15,16].

通过光线追迹, 可以分别得到有无 CPC 作为光学前端时接收面的光能量分布, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 两种情况下接收端接收到的光线数量分别为 1523 条和 385 条, 这说明采用 CPC 作为聚光器, 接收端收集到的光能量是不采用 CPC 时的 3.96 倍, 即此时 CPC 的实际增益为 3.96. 另外从图 4 还可以看到, 采用 CPC 后收集到的光能在图中左边较多, 这是由接收端与光源的相对位置和 CPC 的会聚特性造成的.

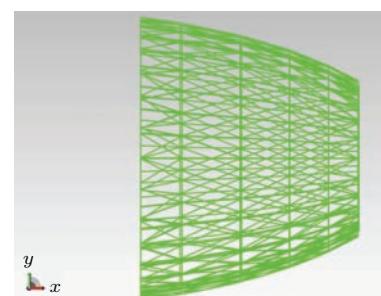


图 2 (网刊彩色) TracePro 中建立的 CPC 模型

Fig. 2. (color online) Model of CPC in TracePro.

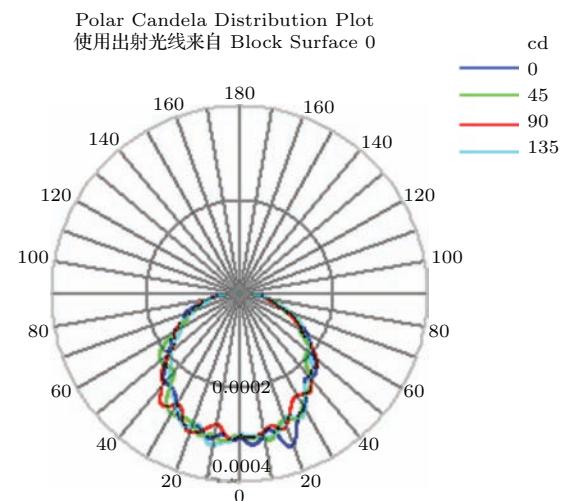


图 3 (网刊彩色) 朗伯光源配光曲线

Fig. 3. (color online) Lambert light source distribution curve.

为了比较不同光源条件下 CPC 的聚光性能, 将光源设置为平行光出射, 得到平行光垂直入射情况下采用 CPC 为光学前端和不采用 CPC 时接收端的光能量分布, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 加入 CPC 作为光学接收前端后收集到的光能是不采

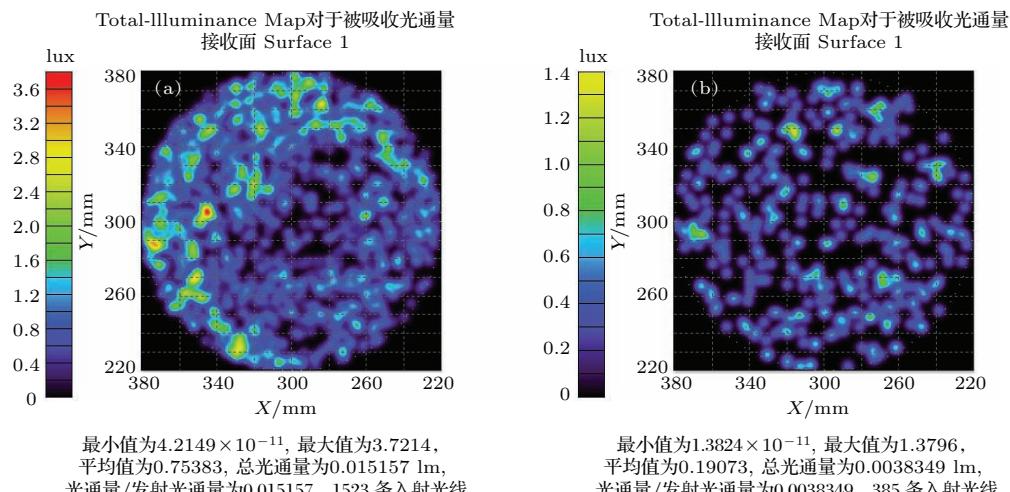


图4 (网刊彩色) 光源为朗伯辐射模型时接收面的能量分布 (a) 采用 30° 的 CPC; (b) 不采用 CPC

Fig. 4. (color online) Power distribution under the Lambert source condition: (a) using a CPC with a field of view of 30°; (b) without CPC.

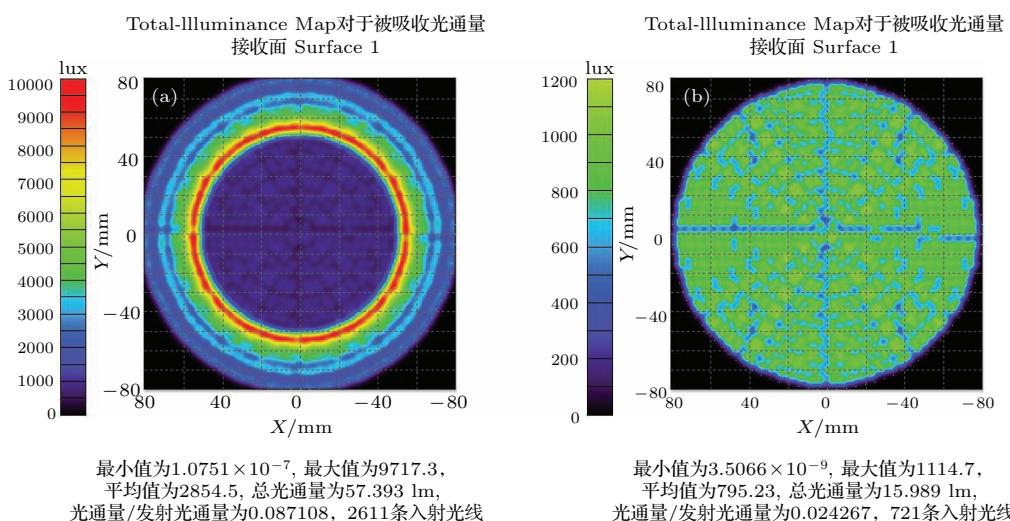


图5 (网刊彩色) 平行光垂直入射时接收端光能量分布 (a) 采用 30° 的 CPC; (b) 不采用 CPC

Fig. 5. (color online) Power distribution under the parallel light condition: (a) using a CPC with a field of view of 30°; (b) without CPC.

用 CPC 时收集的光能的 3.6 倍。此时不仅光能量有了明显的提高, 能量分布也发生了变化, 这与光源的辐射特性以及 CPC 的视场角选择有关。

通过比较不难发现, 相同视场角的 CPC 在光源为朗伯辐射模式时的会聚表现更佳、增益更高。由此可见, CPC 非常适合作为 VLC 系统的光学天线。

4 视场角 θ_{\max} 对 CPC 聚光性能的影响

从前文的论述可知, CPC 的最大聚光角即视场角 θ_{\max} 对其性能影响很大, 同时也是评价光学

天线性能优劣的重要指标之一。根据几何聚光比公式 $C_g = 1/\sin \theta_{\max}$ 可知, 视场角越小, 几何聚光比越大, 其会聚能力也越强。在以上朗伯光源条件下不变的情况下, 改变 CPC 的设计参数, 将视场角 θ_{\max} 分别设置为 60°, 50°, 40°, 20° 和 10°, 取相同的接收口径与截取比, 可分别得到各视场角下接收端接收到的光能量。根据(7)式可知, 在理想情况下即光效率 $\eta_{\text{opt}} = 1$ 时, 三维 CPC 理论增益 $G = C_g = 1/\sin^2 \theta_{\max}$ 。各视场角的 CPC 的理想增益和实际增益分别列于表 2。

根据表 2 可得到不同视场角下 CPC 的实际增益(即光线数 n_1 与 n_2 的比值)和理论增益随视场角的变化, 如图 6 所示。从图 6 可以看出: 视场角越小,

表 2 不同视场角的 CPC 参数与接收光线数目

Table 2. Parameters and the numbers of received light of different CPCs.

视场角 θ_{\max}	CPC 高度 l'/mm	理论增益 G	光线数目 n_1 (有 CPC)	光线数目 n_2 (无 CPC)	实际增益 (n_1/n_2)
10°	1751	33.16	1670	72	22.88
20°	492	8.55	1154	260	4.44
30°	240	4.00	1523	385	3.95
40°	139	2.42	1143	431	2.65
50°	88	1.70	843	477	1.78
60°	57	1.33	702	519	1.35

CPC 的会聚效果越明显、增益越大; 随着视场角的增大, 增益会很快减小。视场角较大时, CPC 的实际增益与理论增益符合良好, 由于截断的影响使得实际增益略大于理论增益。而当视场角较小时, 实际增益与理论增益相差较大, 视场角为 10° 时实际增益相对理论增益降低了 31%, 这是因为 CPC 的光轴与光源的光轴位置偏离造成的, 而在实际的 VLC 系统中, 光源与接收端的光轴方向必然存在相对偏离, 造成小角度 CPC 实际增益的减小。

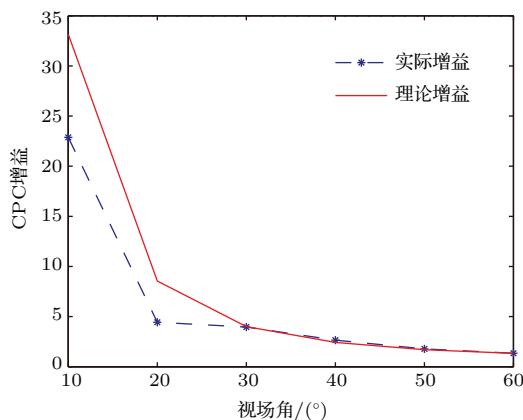


图 6 (网刊彩色) CPC 增益随视场角的变化

Fig. 6. (color online) Gain of CPCs with different fields of view.

综合表 2 中不同视场角下相同截取比的 CPC 的长度可知, 视场角越小, CPC 的长度越长, 太大的尺寸不利于小型化设计, 加工中也有难度。另外, 为了避免通信中盲区的存在, 视场角取值不能太小, 在通信速率要求不高于 100 Mb/s 的情况下, 60° 可以满足系统的通信要求^[3]。

5 采用 CPC 为光学前端的室内 VLC 系统信道仿真与分析

在一个 5 m × 5 m × 3 m 的空旷房间中, 利用 MATLAB 软件对采用一个视场角为 60°、折射率

$n = 1.5$ 的 CPC 为光学天线的室内 VLC 系统进行了建模与仿真。本文采用四组白光 LED 阵列均匀对称地分布在房间中, 每组阵列有 60×60 个 LED 单元, LED 灯距离天花板 0.5 m, 单个的 LED 灯发射光功率为 20 mW, 发射半功率角为 70°, 中心光强为 0.73 cd, 墙壁反射率为 0.7。在室内 VLC 系统中, 在不考虑墙壁反射的情况下, LOS 信道直流增益为^[17]

$$H_{\text{LOS}}(0)$$

$$= \begin{cases} \frac{(m+1)A_d}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) g(\psi) T_s(\psi) \cos(\psi) \\ (0 \leq \psi \leq \psi_C), \\ 0 \quad (\psi > \psi_C), \end{cases} \quad (8)$$

其中, A_d 是探测器的有效面积, D_d 是光源与探测器的距离, ψ 是光线入射角, ϕ 是光源的发射角, $T_s(\psi)$ 为光学滤波器增益, ψ_C 是接收端视场角, $g(\psi)$ 是聚光器增益,

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_C} & (0 \leq \psi \leq \psi_C), \\ 0 & (\psi > \psi_C). \end{cases} \quad (9)$$

接收光功率

$$P_{\text{r(LOS)}} = \sum_{i=1}^N P_{ti} H_{(\text{LOS}i)}(0),$$

i 表示第 i 个 LED 灯, N 是 LED 灯总数, P_{ti} 为第 i 个 LED 的发射功率。探测器有效面积为 1 cm², 响应度为 0.53 A/W, 设光学滤波器增益为 1, 接收器视场角为 90°。根据(8), (9) 式可分别得到室内 VLC 系统 LOS 链路下, 不采用 CPC 和采用视场角为 60° 的 CPC 为光学天线两种情况下, 房间内高度为 1 m 的水平桌面上任意位置的接收功率分布, 如图 7 所示。由图 7 可知, 不采用 CPC 时, 房间中的最大接收功率为 -0.39 dBm, 最小接收功率为 -5.32 dBm, 平均值为 -2.28 dBm。采用 CPC 为聚

光器时, 房间中的最高接收功率为 3.80 dBm, 最小功率为 -1.20 dBm, 平均接收功率 2.01 dBm, 平均接收功率比直接用探测器接收时提高了 4.29 dBm.

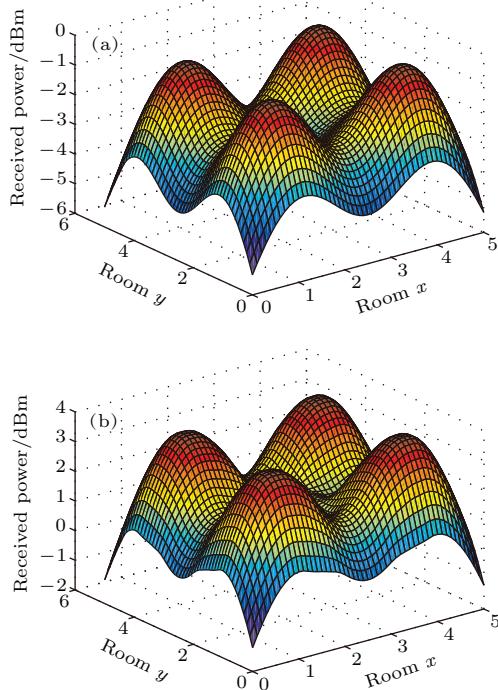


图 7 (网刊彩色) LOS 信道下房间内任意位置接收功率分布 (a) 不采用 CPC; (b) 采用视场角为 60° 的 CPC

Fig. 7. (color online) The distribution of received power: (a) without CPC; (b) using a CPC with a field of view of 60°.

当考虑墙壁一次反射光时, 反射光的直流增益可以表示为

$$\begin{aligned} & dH_{\text{NLOS}}(0) \\ &= \begin{cases} \frac{(m+1)A_d}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dA_{\text{wall}} \cos^m \phi \cos \alpha \\ \times \cos \beta g(\psi) T_s \psi \cos \psi \quad (0 \leq \psi \leq \psi_C), \\ 0 \quad (\psi > \psi_C). \end{cases} \quad (10) \end{aligned}$$

如图 8 所示, D_1 是光线到墙壁某点的距离, D_2 是这一点到接收端的距离, α 和 β 分别是光线相对墙壁的入射角和出射角, ψ 是反射光线相对于接收端的入射角, FOV 为视场角. 一次反射接收光功率

$$P_{r(\text{NLOS})} = \int_{\text{wall}} P_S dH_{\text{NLOS}}(0),$$

此时, 系统总接收功率

$$P_R = \sum_{i=1}^N \left(P_{ti} H_{(\text{LOS}i)}(0) + \int_{\text{wall}} P_{ti} dH_{\text{NLOS}i}(0) \right). \quad (11)$$

根据 (9), (10) 和 (11) 式可以得到 NLOS 链路下室内各个位置的接收光功率分布, 如图 9 所示. 从图 9 可以看到, 不采用 CPC 时室内接收功率最小值为 -5.23 dBm, 最大值为 0.25 dBm, 平均值为 -2.25 dBm. 采用一个视场角为 60° 的 CPC 为光学天线时室内接收功率最小值为 -1.20 dBm, 最大值为 4.26 dBm, 平均值为 2.52 dBm, 平均值提高了 4.77 dBm.

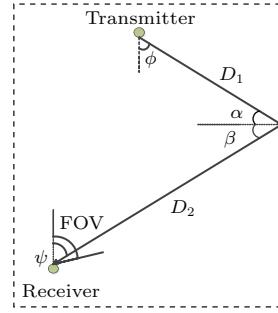


图 8 室内 VLC 系统 NLOS 链路示意图

Fig. 8. Propagation model of diffused link.

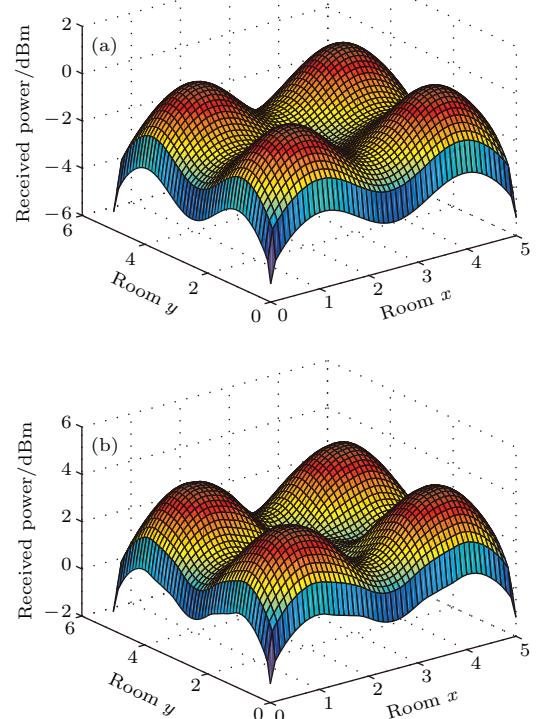


图 9 (网刊彩色) 室内 VLC 系统 NLOS 链路下接收功率分布 (a) 不采用 CPC; (b) 采用视场角为 60° 的 CPC

Fig. 9. (color online) The distribution of received power with reflection: (a) without CPC; (b) using a CPC with a field of view of 60°.

从以上分析可以看出, 采用 CPC 为光学聚光器后, 两种链路下室内 VLC 系统的接收功率都有

大大提高, NLOS 链路的接收功率平均值比 LOS 链路增加了 0.48 dBm, 平均接收功率提高了 11.2%. 且 NLOS 链路下室内功率变化较 LOS 链路平缓, 最大值与最小值之差较小, 这说明墙壁一次反射光对房间内的接收功率分布影响很大.

6 总结与展望

目前, 室内 VLC 系统常用一个简单的凸透镜或半球透镜作为接收前端, 本文根据 CPC 的聚光特点, 采用截断型 CPC 代替常用的透镜作为 VLC 系统接收天线, 视场较大, 且入射角在视场内的光线都能达到理想聚光比. 在分析 CPC 几何结构和光学特性的基础上, 采用光学仿真软件 Trace-Pro 对 CPC 进行了设计和仿真, 对不同光源条件下 CPC 的聚光性能进行了分析和比较, 仿真发现 CPC 具有良好的会聚作用, 在光源为朗伯辐射模型时聚光效果更佳, 视场角越小 CPC 的会聚效果越好, 实际增益越高. 但光源与接收器的相对位置会影响小视场角的 CPC 的实际增益, 在文中的仿真条件下, 视场角为 10° 的 CPC 实际增益为 22.88, 相对于理想增益减小了 31%. 在此基础上, 在一个 5 m × 5 m × 3 m 的空旷房间内建立了室内 VLC 系统通信模型, 分别得到了 LOS 链路和 NLOS 链路下房间内各个位置的光功率分布. 仿真结果表明, 采用一个视场角为 60° 的 CPC 为光学天线后, 两种信道模型下接收功率平均值分别提高了 4.29 dBm 和 4.77 dBm.

分析发现, 采用 CPC 作为光学天线后接收端的光能量分布会发生变化, 不均匀的能量分布可能会影响探测器性能, 降低探测效率. 另外, 在高通信速率要求情况下, 在光源功率较低时单个 CPC 可能满足不了通信要求. 因此, 还需要对 CPC 进一步优化设计, 以满足不同条件下的需求.

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] Li P L, Yang Z P, Wang Z J, Guo Q L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1907
- [3] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **50** 100
- [4] Ran Y H, Yang H J, Xu Q, Xie K, Huang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 946 (in Chinese) [冉英华, 杨华军, 徐权, 谢康, 黄金 2009 物理学报 **58** 946]
- [5] Li X, Lan T, Wang Y, Wang L H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024201 (in Chinese) [李湘, 蓝天, 王云, 王龙辉 2015 物理学报 **64** 024201]
- [6] Winston R, Hinterberger H 1975 *Sol. Energy* **17** 255
- [7] Liu L Z, Li J H 2006 *Power Energy* **27** 52 (in Chinese) [刘灵芝, 李戬洪 2006 能源技术 **27** 52]
- [8] Fang J Y, Zhang H L, Jia H H, Shao Z Z, Chang S L, Yang J C 2008 *J. Appl. Opt.* **29** 198 (in Chinese) [方靖岳, 张海良, 贾红辉, 邵铮铮, 常胜利, 杨俊才 2008 应用光学 **29** 198]
- [9] Miñano J C, Gonález J C, Benítez P 1995 *Appl. Opt.* **34** 7850
- [10] Zhang H, Wang Y P, Zhu L, Sun Y 2013 *Acta Energ. Sol. Sin.* **34** 1882 (in Chinese) [张辉, 王一平, 朱丽, 孙勇 2013 太阳能学报 **34** 1882]
- [11] Burton A, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, Liaw S K 2014 *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* **25** 591
- [12] Kong M M, Liang Z C, Zhang G H 2012 *Inf. Laser Eng.* **41** 750 (in Chinese) [孔梅梅, 梁忠诚, 张国虎 2012 红外与激光工程 **41** 750]
- [13] Winston R, Miñano J C, Benítez P 2005 *Nonimaging Optics* (New York: Academic Press) pp50–65
- [14] Ma M, Zheng H F, Li J C 2011 *Solar Energy* **7** 33 (in Chinese) [马鸣, 郑宏飞, 李家春 2011 太阳能 **7** 33]
- [15] Ding J J, Liu Z W, Xu K, Lou Y Y, Chen R S 2010 *Syst. Eng. Electron.* **32** 2309 (in Chinese) [丁建军, 刘志伟, 徐侃, 娄瑜雅, 陈如山 2010 系统工程与电子技术 **32** 2309]
- [16] An Y Y, Fan Z H, Ding D Z, Chen R S 2014 *Appl. Comput. Electrom.* **29** 279
- [17] Kahn J M, Barry J R 1997 *Proc. IEEE* **85** 265

Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication*

Wang Yun Lan Tian[†] Li Xiang Shen Zhen-Min Ni Guo-Qiang

(Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 8 November 2014; revised manuscript received 18 December 2014)

Abstract

In order to satisfy the need of visible light communication, compound parabolic concentrators are selected as the optical antennas because of their wide fields of view and high gains in small field of view. Their geometries and optical properties are introduced in order to design compound parabolic concentrators with different fields of view by TracePro. These compound parabolic concentrators are tested under different light source conditions. The distribution of the received power of the receiver which has been coupled with the compound parabolic concentrator, is obtained by a simulation. The obtained gain of compound parabolic concentrator proves that the compound parabolic concentrator works better when the light source has a Lambert radiation pattern than the case under a parallel light condition. The results illustrate that compound parabolic concentrator is suitable to serving as an optical antenna for visible light communication. And it also shows that the smaller the field of view, the greater the gain is. Under the condition of simulation in this paper, a compound parabolic concentrator with 10° field of view could realize a gain of 22.88, which is 31% lower than the theoretical gain because of the effect of its position relative to the light source. On this basis, the model of a visible light communication system is established in a room with a size of 5 m × 5 m × 3 m. By using a compound parabolic concentrator with a field of view of 60° as an optical antenna, the simulation results show that the average received power is increased by 4.29 dBm for the directed light from light emitting diodes, and by 4.77 dBm with the reflected light being included. And the average received power is increased by 11.2% when the reflected light is considered.

Keywords: visible light communication, compound parabolic concentrator, optical antenna, gain

PACS: 42.79.Sz, 74.25.Gz, 42.15.Eq, 42.60.Lh

DOI: [10.7498/aps.64.124212](https://doi.org/10.7498/aps.64.124212)

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

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