

室内可见光通信复合光学接收端设计与分析

王云 蓝天 倪国强

Design and analysis of composite optical receiver for indoor visible light communication

Wang Yun Lan Tian Ni Guo-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 084207 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.084207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于连续扫频光时域反射的全同弱光栅高速解调方法

High speed demodulation method of identical weak fiber Bragg gratings based on wavelength-sweep optical time-domain reflectometry

物理学报.2016, 65(20): 204209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204209>

多光谱可见光通信信道串扰分析

Analysis of channel crosstalk in muliti-spectrum visible light communication system

物理学报.2016, 65(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094208>

混沌与湍流大气中的光通信

Optical communication in turbid and turbulent atmosphere

物理学报.2016, 65(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084207>

100Gb/s 归零码信号的2R再生

A study of 100 Gb/s 2R regeneration for return-to-zero code signal

物理学报.2016, 65(5): 054208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054208>

基于太赫兹光非对称解复用器结构的低开关能量、高线性度全光采样门实验研究

Experimental study on a low switching energy and high-linearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer

物理学报.2015, 64(15): 154213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154213>

室内可见光通信复合光学接收端设计与分析*

王云 蓝天† 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)

(2016年10月6日收到; 2017年1月20日收到修改稿)

本文提出了一种适用于室内可见光通信的新型光学接收端的设计. 根据复合抛物面聚光器的聚光特性, 将光电探测器与复合抛物面聚光器耦合作为接收子单元, 并将这些接收子单元按照特定的几何关系嵌入一个半球面中, 得到角度分集型的复合光学接收端, 达到水平方向 360° , 垂直方向 180° 的大视场. 对每个接收单元接收到的光能量, 低传输数据时进行相加求和作为最终的接收功率, 高数据速率时取各个子单元的最大值作为接收功率. 在一个 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的空旷房间中, 通过MATLAB对室内可见光通信系统建模仿真. 计算结果表明, 采用这种复合型光学接收端后, 两种不同处理算法下的接收功率相对于直接接收分别提高了11.85和7.47 dB, 增益分别为15.31和5.98. 信噪比较高, 两种情况下的平均值分别为79.17和72.26 dB, 且接收信噪比分布平缓, 波动较小. 这说明采用本文设计的光学接收端, 不仅能够得到较大的接收端视场角, 同时获得较高的增益和接收功率, 以及稳定的接收信噪比, 避免了室内可见光通信系统中通信盲区的存在, 保证了室内通信性能的稳定性.

关键词: 室内可见光通信, 接收端, 接收功率

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

DOI: 10.7498/aps.66.084207

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]. 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, LED光源既有照明功能又有通信功能, 只要有LED照明灯的地方都能实现通信, 因此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等^[2]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计算, 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LED可见光通信系统.

目前, 室内VLC的研究主要集中在调制方式^[3,4]、信道模型^[5-7], LED光源布局设计等^[8-10]

方面. 事实上, 接收端的设计和视场角的选择对通信性能有着至关重要的影响. 室内VLC大多采用多个LED阵列分布在天花板上作为光源, 不同路径的入射光线到达接收端的时间不同, 会造成码间串扰进而影响信噪比(signal to noise ratio, SNR), 降低传输速率. 无线光通信系统的码间串扰主要取决于数据速率和发射端与接收端的视场角. 但对于室内可见光通信来说, 由于发射端视场角一般较大, 因此, 数据速率和接收端的视场角是码间串扰的主要影响因素. 室内VLC通信链路分为直射型链路和非直射型链路, 较大的接收端视场角可以使更多的光线进入接收端, 提高接收光功率, 实现无盲点通信, 但是同时也会加剧码间串扰, 降低通信性能, 并且视场角的大小会影响接收端的增益, 因此接收端的设计和视场角的选择是一项非常重要的研究内容. 南洋理工大学的Wang等^[11]针对室内VLC系统提出了一种倾斜接收端的方法, 并

* 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

采用牛顿算法计算最佳倾斜角度,提高了系统的 SNR.

角度分集接收器一般采用多个视场角较小的接收单元,面向不同方向放置,组合成具有较大组合视场的阵列式接收端.角度分集接收技术能够克服多径衰落的影响,在不同的接收单元中接收到光能量被分别放大与处理.该接收器具有很多优点:相对于大视场的单元接收器具有更高增益,同时能有效地抑制背景光噪声、信道干扰和多径干扰的影响.本文根据室内 VLC 系统的特点,利用角度分集思想,提出了一种新型的接收端设计方法.根据复合抛物面的聚光特性,将复合抛物面聚光器与光电探测器耦合作为接收子单元,并按照几何关系将多个接收子单元嵌入一个半球透镜中,形成一个半球面(水平方向 360° ,垂直方向 180°)的大视场的复合型全视场接收端.根据不同的通信要求,对每个子单元接收到的光能量进行不同的处理.由于单个接收子单元视场角较小,因此可以有效抑制码间串扰,提高通信系统性能,同时多个接收子系统又保证接收端的全视场.并通过 MATLAB 仿真,在一个 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的空旷房间中,模拟了采用这种聚光器时接收端的接收功率分布和 SNR 分布.仿真结果表明,采用本文设计的复合型光学接收端,在保证大视场的同时,能够得到较高的增益,在相加求和和取最大值两种情况下接收端的平均接收功率提高了 11.85 和 7.47 dB,增益分别达到 15.31 和 5.98. SNR 较高且波动较小,实现了大视场、高增益和稳定的通信性能.

2 光学接收端设计

复合抛物面聚光器^[12](compound parabolic concentrator, CPC)是一种非成像型聚光器,其结构如图 1 所示. AC 和 BD 是两条对称的抛物线段,其焦点分别为 D 和 C , AC 和 BD 绕对称轴旋转一周,并在内部涂高反射薄膜介质,得到三维的复合抛物面聚光器.其中, a, b 分别为 CPC 的入射面半径和出射面半径, l 为 CPC 的高度, 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. CPC 的增

益 G 可表示为

$$G = C_g = \frac{n^2}{\sin^2 \theta_{\max}}, \quad (1)$$

其中, C_g 为 CPC 的几何聚光比, n 为 CPC 内部填充部分的折射率.

将光电探测器放置在 CPC 的出射口,经 CPC 汇聚的光能量被探测器接收利用,由此形成 CPC 与光电探测器耦合的接收子单元, CPC 作为聚光器可以汇聚更多的能量供探测器接收利用,可以大大提高探测器的接收功率.

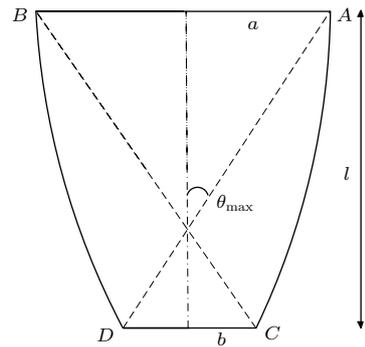


图 1 CPC 结构图
Fig. 1. The structure of CPC.

CPC 的这种光学性质,使得其可以用在室内 VLC 系统中作为光学天线,但是,由于 CPC 的增益与视场角的平方成反比,视场角越大,增益越小.为了在实现大视场的前提下保证通信性能,根据 CPC 的几何特点和聚光特性,基于角度分集思想设计成复合型接收端,其模型图和结构图如图 2 和图 3 所示.在半球透镜的中心位置插入一个视场角为 θ_2 的接收单元,四周放置 M 个接收单元,每个接收单元视场角为 θ_1 ,要在水平方向达到 360° 的视场,需满足

$$2\theta_1 \cdot M = 360^\circ. \quad (2)$$

为了避免视场浪费,使视场角下限与水平面平行,每个接收单元的中心轴相对于 xoy 平面有一个 α 角度的倾斜,如图 4 所示.倾斜角 α 满足

$$\alpha = \theta_1. \quad (3)$$

要在垂直方向达到 180° 的视场,中心放置的接收单元的视场角 θ_2 需满足下式:

$$\theta_2 = 90^\circ - 2\theta_1. \quad (4)$$

根据以上分析,综合考虑 CPC 特性和加工难度,选择视场角 $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$,内部无填充,单个

CPC的理论增益为4. 四周放置 $M = \frac{360}{2 \times 30} = 6$ 个接收单元, 中心1个, 其结构图如图2所示.

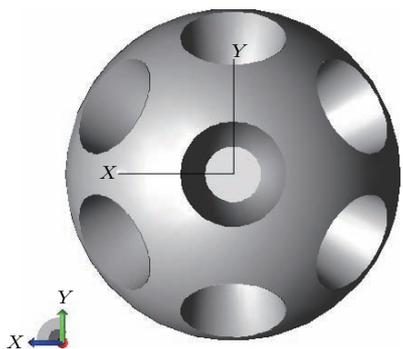


图2 复合接收端俯视模型图

Fig. 2. The counter map of the composite receiver.

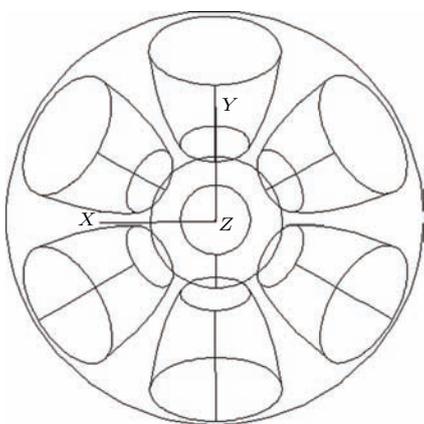


图3 复合接收端透视结构图

Fig. 3. The structure of the composite receiver.

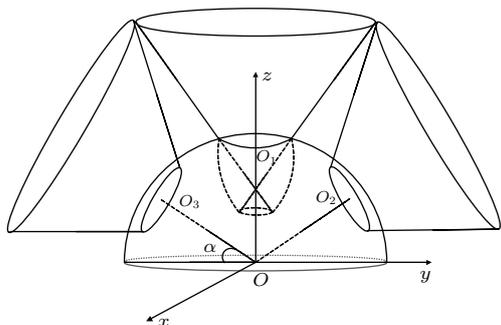


图4 复合接收端侧视示意图

Fig. 4. The profile of the composite receiver.

本文中采用的半球体的半径为60 mm, 每个CPC的出口半径为10 mm, 设半球体的球心为坐标原点, 根据几何关系, 可计算出7个CPC的入射面圆心坐标分别为: $(0, -51.96, 30)$, $(45, -25.98, 30)$, $(45, 25.98, 30)$, $(0, 51.96, 30)$, $(-45, 25.98, 30)$, $(-45, -25.98, 30)$, $(0, 0, 60)$. 根据这些参数, 在TracePro可建立接收端的模型, 并进行仿真分析. 设置光源为四组朗伯辐射面光源, 总光通量为

4 lm, 接收端放置在原点位置, 四组光源对称分布. 通过光线追迹, 可以得到各个CPC接收面的光照度分布 (只考虑直射光), 如图5中所示.

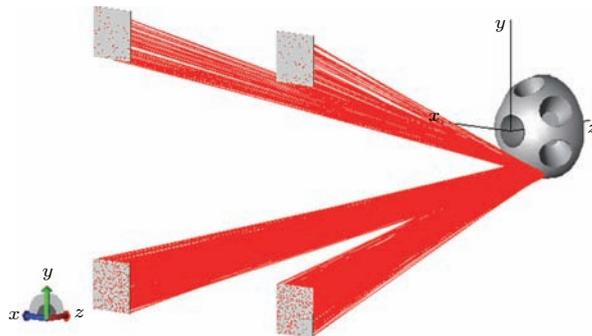


图5 单个子单元接收示意图 (只显示部分光线)

Fig. 5. Rays collected by one receiving unit.

3 接收端性能分析

3.1 接收功率分析

采用本文设计的光学接收端, 室内VLC系统通信模型如图6所示. 接收端有多个接收子单元, 由于每个接收子单元的光轴方向不同, 相同方向的光线相对于各个子单元的入射角是不同的, 根据入射角度的不同光线被不同的接收子单元分角度接收. 利用MATLAB仿真软件, 在一个 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的空旷房间中对室内VLC通信模型建模, 其中接收端放置在高度为0.85 m的水平桌面上.

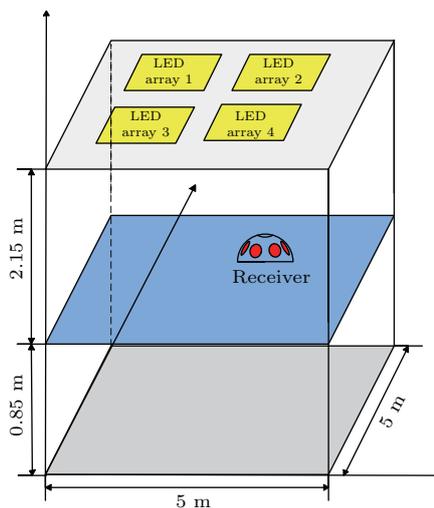


图6 室内VLC通信模型

Fig. 6. The communication model of indoor VLC system.

一般认为LED灯遵循朗伯辐射规律, 其辐射光强度 I 与其辐射角度相关 [2]:

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi), \quad (5)$$

其中, $I(0)$ 为光源的中心发光强度, ϕ 为光源的辐射角, m 为辐射模式数, 与光源的半功率发射角 $\phi_{1/2}$ 相关, 可以表示为 $m = \ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$.

在室内 VLC 系统中, 系统的直流增益 $H(0)$ 可表示为 [11,13]

$$H(0) = \frac{(m+1) \cos^m(\phi) A \cos \theta}{2\pi d^2}, \quad (6)$$

其中, d 为光源到接收端之间的距离, A 是光电探测器的有效面积, θ 为光线相对于接收端的入射角. 由于本文中接收端采用多个接收子单元, 相对于每一个接收子单元, 光线的入射角 θ 由接收单元的光轴方向和入射光线的方向向量决定. 假设某接收单元的光轴方向单位向量为 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$, 入射光线单位向量为 $\mathbf{l}(l_x, l_y, l_z)$ 则光线相对于该接收单元的夹角为 $\cos \theta = \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$.

因此, 接收端接收到的直射光功率为

$$P_{r(\text{LOS})} = H(0)P_t. \quad (7)$$

墙壁的一次反射光的直流增益可以表示为

$$dH_{\text{NLOS}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 d_1^2 d_2^2} \rho dA_{\text{wall}} \cos^m(\phi) \cos(\beta_1) \\ \times \cos(\beta_2) g(\theta) T_s(\theta) \cos(\theta), & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{max}}, \\ 0, & \theta > \theta_{\text{max}}, \end{cases} \quad (8)$$

其中, ρ 为墙壁的反射率, dA_{wall} 为墙壁反射面的微小面源, d_1 是光线到反射点的距离, d_2 是反射点到接收端的距离, β_1 和 β_2 分别是光线相对墙壁的入射角和出射角, θ_{max} 为接收端的视场角, $g(\theta)$ 为接收端增益, $T_s(\theta)$ 为滤波器增益.

一次反射接收光功率

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

因此系统的总接收功率为

$$P_R = P_{r(\text{LOS})} + P_{r(\text{NLOS})}. \quad (9)$$

本文中, LED 阵列光源布局是根据照度均匀方差最小原则放置 [14], 四组 LED 阵列的放置中心点位置分别为 (1.025, 3.975, 3.000), (3.975, 3.975, 3.000), (1.025, 1.025, 3.000) 与 (3.975, 1.025, 3.000). 每个阵列的 LED 的数目为 3600 (60×60) 个, 每个 LED 的发射功率为 20 mW, 半功率角为 70°,

LED 中心光强为 0.73 cd, LED 间隔为 0.01 m, 接收子单元的视场角为 30°.

根据 (9) 式, 利用 MATLAB 仿真, 可得到房间中的接收光功率分布. 图 7 是不采用光学天线, 直接用探测器接收时房间中的接收功率分布, 探测器的具体参数列于表 1 中.

表 1 光电探测器参数

Table 1. Parameters of the photo-detector.

探测器半视场角	探测器响应率/A·W ⁻¹	探测器有效面积/cm ²	光学滤波器增益
60°	0.53	1	1

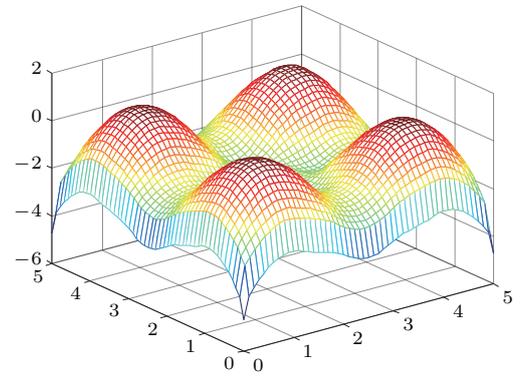


图 7 (网刊彩色) 直接接收时房间中的功率分布
Fig. 7. (color online) The distribution of received power without optical receiver.

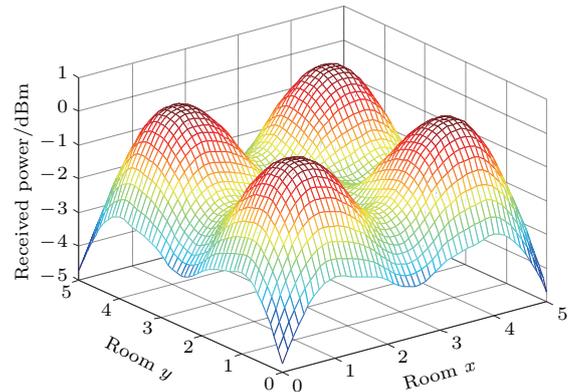


图 8 (网刊彩色) 采用单个 CPC 为光学天线时房间中的功率分布
Fig. 8. (color online) The distribution of received power using a CPC as the receiver.

从图 7 中可以看出, 在直接接收情况下, 接收功率最大值 0.25 dBm (1 dBm = 10 lg P (mW)), 最小值 -5.23 dBm, 平均值为 -2.25 dBm. 接收功率的分布呈现中间高, 边缘较低的形状, 尤其在距离

光源较近的地方功率最高. 这是因为在房间中心的位置处, 光源与接收端之间的距离较短, 光线的入射角度较小, 会有更多的光线被接收单元接收.

单独采用一个视场角为 60° 的CPC为接收

天线时, 房间中的接收功率分布如图8所示. 其中, 接收功率的最大值为 0.27 dBm , 最小值为 -4.72 dBm , 平均值为 -1.51 dBm . 相对于直接接收, 增益为1.18.

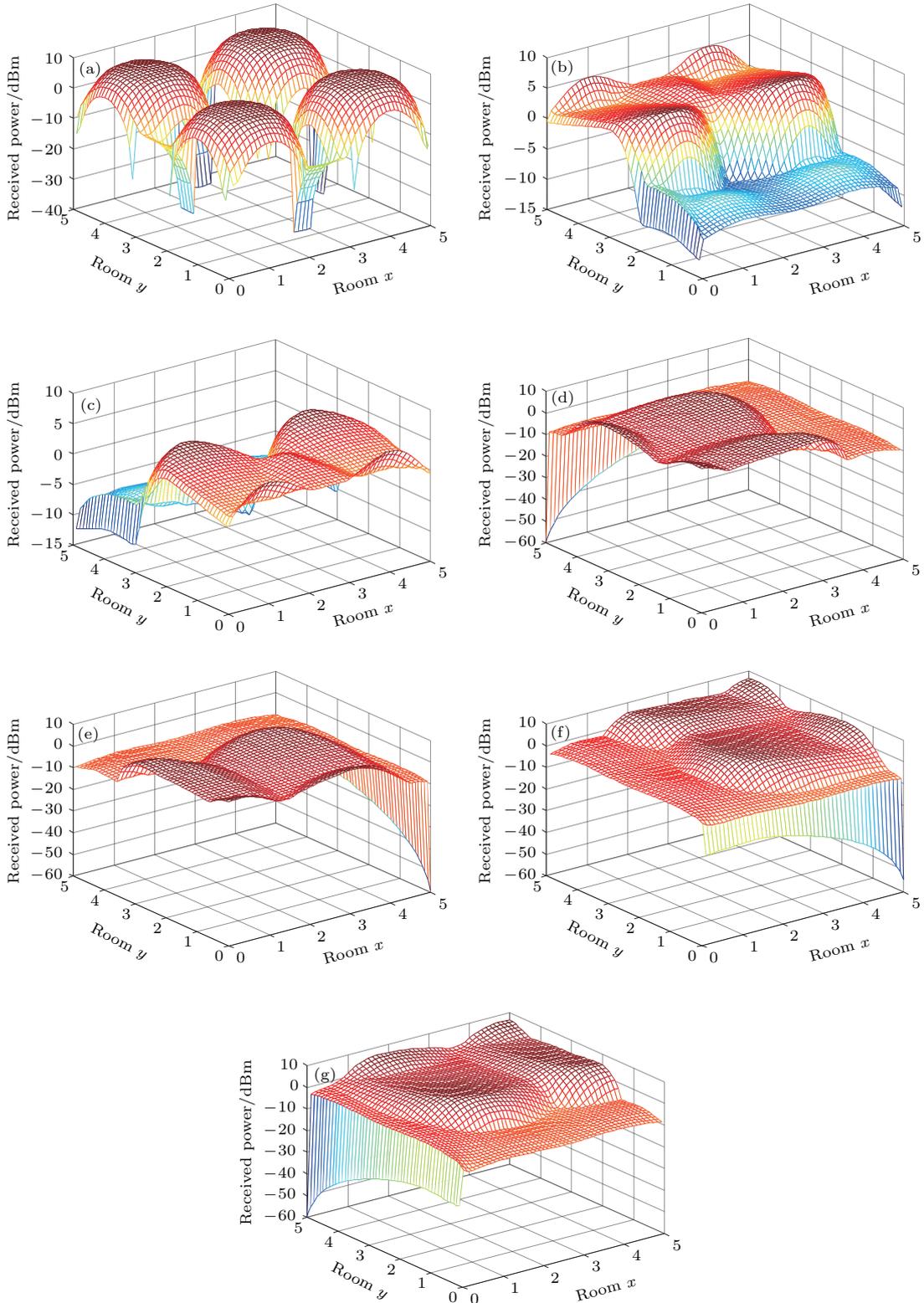


图9 (网刊彩色) 接收端各个接收子单元的接收功率(只考虑直射光)

Fig. 9. (color online) The received power distribution of each receiving unit.

同样地, 可以计算出每个接收子单元接收功率, 由于接收子单元视场较小, 这里只考虑直射光, 如图 9 所示. 其中图 9(a) 为中心接收单元的接收功率, 其余为四周放置的 6 个接收单元的接收功率. 从图中可以看出, 由于视场角小, 单个接收子单元接收存在着通信盲区, 且每个接收子单元的接收功率分布差别较大, 这与每个子单元的法向量相关, 对于每一个子单元来说, 在顺着其法线方向的区域功率较大, 背依法线方向的区域则功率较小.

对于每个子单元接收到的光能量的处理分为两种情况. 在室内 VLC 系统传输速率较低时, 房间中各个位置的接收光功率可以通过将各个接收子单元接收到的光能量相加而得到, 此时房间中的接收功率分布如图 10 所示.

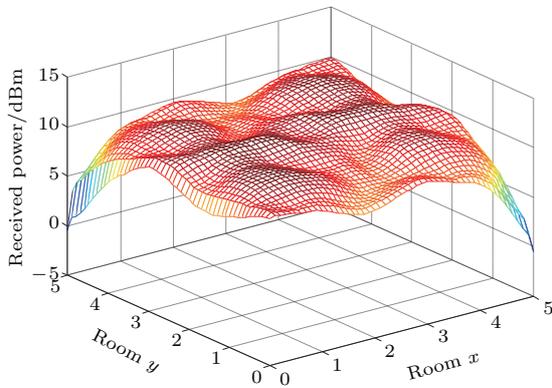


图 10 (网刊彩色) 低速率求和时房间中的接收功率分布
Fig. 10. (color online) The distribution of the received power using sum algorithm at low bit rate.

从图 10 中可以看出, 此时房间中的接收功率很高, 平均功率可达到 9.60 dBm, 相对于单独采用一个视场角为 60° 的 CPC 作为光学天线提高了 11.11 dB, 相对于使用探测器直接接收时提高了 11.85 dB. 除了角落处的个别点之外, 房间中大部分区域接收功率的波动很小. 这说明采用本文设计的光学接收端房间中大部分区域的接收功率不仅较高且稳定, 这样无论接收端在房间中的任何位置, 都能够收到足够的光功率, 有较好的移动性.

此时, 相对于直接接收时的光功率, 光学天线的增益 $G = 15.31$, 相对于单独采用 CPC 作为接收天线, 增益提高了 11.97 倍.

这种相加求和的算法适用于系统传输速率较低的情况下, 当系统传输速率较高时, 就不能这样简单地相加求和了. 对于本文中设计的光学接收端, 在房间中的每个位置, 对每个接收单元的接收功率分别进行比较, 然后选择接收功率最大的接收子单元的接收功率作为此位置的接收功率.

图 11 为采用取最大值算法时房间中的功率分布. 从图中可以看出, 此时的平均接收功率为 5.22 dBm, 相对于直接接收时提高了 7.47 dB. 并且从图中可以看出, 接收功率的分布也发生了变化, 这是因为接收端有多个接收单元, 且每个接收单元视场角小, 增益较高, 因此在房间中的边缘位置也能获得较高的接收功率. 但整体分布与直接接收时情况相似, 在灯下区域接收功率最高, 边缘位置下降. 此时, 相对于直接接收时的光功率, 接收端的增益 G 为 5.98, 相对于采用单个视场角为 60° 的 CPC 为光学天线, 增益提高了 4.07 倍. 表 2 中列出了不同接收条件下房间中的接收功率的最大值、最小值、平均值, 以及此时的接收端增益.

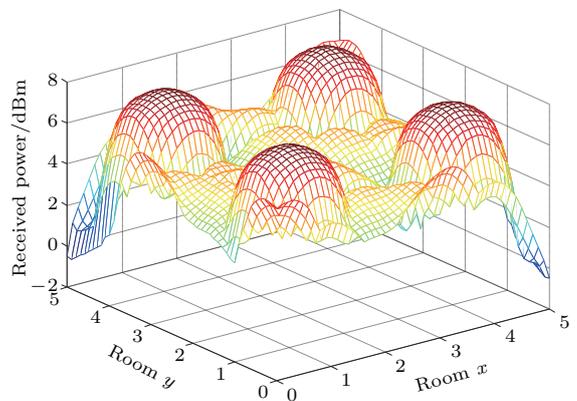


图 11 (网刊彩色) 取最大值时房间内的接收功率分布
Fig. 11. (color online) The distribution of received power using maximum algorithm.

表 2 不同接收条件下的接收功率
Table 2. Received power under different receiving conditions.

接收条件	最小值/dBm	最大值/dBm	平均值/dBm	系统增益
直接接收	-5.23	0.25	-2.25	—
相加求和	-0.48	11.20	9.60	15.31
取最大值	-0.53	7.77	5.22	5.98

3.2 信噪比分析

在室内 VLC 中, 探测器的大小是光波长的上万倍, 光波是空间分集接收, 因此可忽略多径衰落. 系统中的噪声主要包括散粒噪声 σ_{shot} 与热噪声 σ_{thermal} , 即

$$N = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2, \quad (10)$$

其中散粒噪声和热噪声可分别表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{shot}}^2 &= 2q\gamma(P_{\text{rsignal}} + P_{\text{rISI}})B \\ &\quad + 2qI_{\text{bg}}I_2B, \quad (11) \\ \sigma_{\text{thermal}}^2 &= \frac{8\pi kT_K}{G}\eta AI_2B^2 \\ &\quad + \frac{16\pi^2 kT_K\Gamma}{g_m}\eta^2 A^2 I_3B^3, \quad (12) \end{aligned}$$

其中, 探测器的响应率 $\gamma = 0.53 \text{ A/W}$, P_{rsignal} 为信号功率, P_{rISI} 为码间串扰功率, $I_3 = 0.0868$ [2], q 为电荷电量, B 为等效噪声带宽, I_{bg} 为暗电流, I_2 是噪声带宽因子, k 是玻尔兹曼常数, T_K 为绝对温度, G 是开环电压增益, η 是光电探测器单位面积的固定电容, Γ 是 FET 信道噪声系数, g_m 是 FET 跨导, 各参数的具体值分别列于表 3 中. 在只考虑直射光的情况下, 可忽略码间串扰噪声.

表 3 噪声相关参数
Table 3. Parameters of noise.

参数类型	参数值
等效噪声带宽 $B/\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$	100
电荷电量 q/C	1.6×10^{-19}
暗电流 I_{bg}/mA	5.1
噪声带宽因子 I_2	0.562
玻尔兹曼常数 $k/\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$	$1.3806488(13) \times 10^{-23}$
绝对温度 T_K/K	298
开环电压增益 G	10
FET 沟道噪声系数 Γ	1.5
FET 跨导 g_m/Ma	30
光电探测器固定电容 $\eta/\text{pF}\cdot\text{cm}^{-2}$	112

这里我们引入一个 Q 因子 [9] 来评估房间中接收 SNR 的波动大小:

$$Q_{\text{SNR}} = \frac{\overline{\text{SNR}}}{2\sqrt{\text{var}(\text{SNR})}}, \quad (13)$$

其中, $\overline{\text{SNR}}$ 为误码率均值, $\text{var}(\text{SNR})$ 为误码率的方差. Q 值越高, 表示 SNR 分布波动较小, 说明房间中 SNR 分布越均匀, 接收端有较好的移动性, 反之表示波动较大, 移动性差.

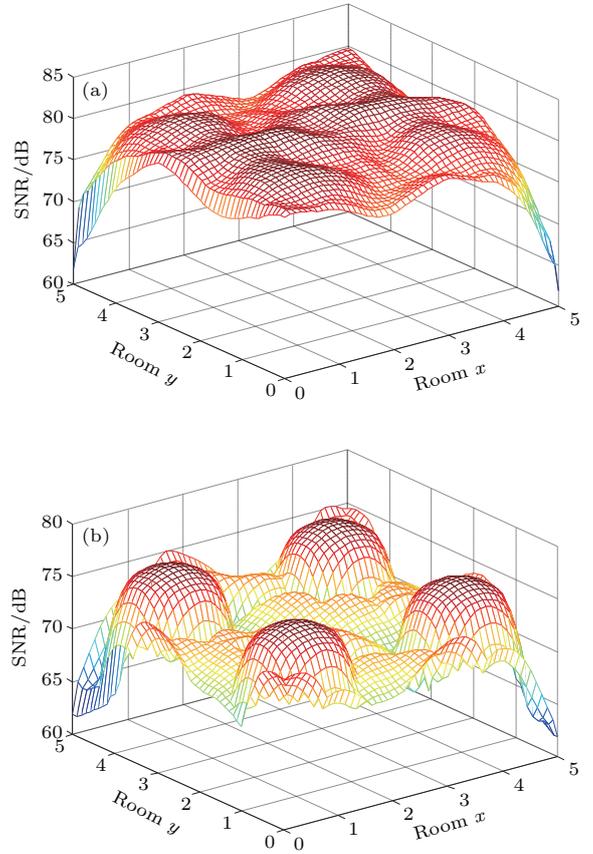


图 12 (网刊彩色) 接收 SNR 分布 (a) 低速率求和; (b) 高速率取最大值

Fig. 12. (color online) The SNR distribution using the composite receiver: (a) Low data rate; (b) high data rate.

根据 (10) 式可分别计算出采用光学接收端后, 低速率求和和高速率取最大值两种算法下房间中的 SNR 分布, 如图 12 (a) 和图 12 (b) 所示. 其中图 12 (a) 中的最大值为 81.46 dB, 最小值为 61.95 dB, 平均值为 79.17 dB; 图 12 (b) 中的最大值为 76.45 dB, 最小值为 61.86 dB, 平均值为 72.26 dB.

从图 12 中可以看出, 除房间角落处的个别位置, 房间中大部分区域 SNR 较高且波动较小. 根据 (13) 式可以计算出两种情况下的 Q 因子分别高达 20.64 和 15.11 dB. 这说明, 本文中设计的光学接收端可以得到较高的接收功率, 在获得大视场的情况下同时可以得到较为稳定的接收 SNR, 保证了室内 VLC 的通信质量.

4 结 论

本文设计了一种新的室内可见光通信系统光学接收端. 对于单个CPC来说, 视场角越大, 增益越小. 通过将复合抛物面聚光器与探测器的耦合作为接收子单元, 并将这些接收子单元按照特定几何关系嵌入一个半球中, 设计成一种角度分集型的复合光学接收端, 达到了水平方向 360° 、垂直方向 180° 的视场范围. 并在软件TracePro中建立了接收端模型, 通过MATLAB软件对室内VLC系统建模, 得到了采用这种复合接收端后房间中的功率分布和SNR分布, 在低速率相加求和和高速率取最大值两种情况下, 接收端的增益分别为15.31和5.98, 同时保证了大视场和高增益. 通过与直接接收情况下的对比可以看出, 采用这种复合接收端, 接收功率分别提高了11.85和7.47 dB. 且SNR分布比较均匀, 波动较小, 两种情况下 Q 因子分别达到了20.64和15.11 dB, 这说明, 采用这种复合接收端, 在提高接收端视场角的同时, 还能够获得较高的接收功率, 且在房间中的任何位置都有较高的SNR, 使得接收端有较好的移动性, 提高了系统的通信性能.

参考文献

- [1] Tanaka Y, Komine T, Haruyama S, Nakagawa M 2003 *IEICE Trans. Commun.* **86** 2440
- [2] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **50** 100
- [3] Afgani M Z, Haas H, Elgala H, Knipp D 2006 *IEEE 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities* Barcelona, Spain, March 1–3, 2006 p134
- [4] Hashemi S, Ghassemlooy Z, Chao L, Benhaddou D 2008 *IEEE 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing(CNSDSP)* July 25, 2008 p174
- [5] Lee K, Park H, Barry J R 2011 *IEEE Commun. Lett.* **15** 217
- [6] Choi J H, Koo S W, Kim J Y 2009 *IEEE 9th International Symposium on Communications and Information Technology* Icheon, Korea, September 28–30, 2009 p1247
- [7] Cui L, Tang Y, Zhu Q W, Luo J B, Hu S S 2015 *Acta Phys. Sin.* **65** 94208 (in Chinese) [崔璐, 唐义, 朱庆炜, 骆加彬, 胡珊珊 2015 物理学报 **65** 94208]
- [8] Ding D Q, Ke X Z, Li J X 2007 *Optoe. Eng.* **34** 131 (in Chinese) [丁德强, 柯熙政, 李建勋 2007 光电工程 **34** 131]
- [9] Wang Z X, Yu C Y, Zhong W D, Chen J, Chen W 2012 *Opt. Express* **20** 4564
- [10] Liu H J, Lan T, Ni G Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 238503 (in Chinese) [刘浩杰, 蓝天, 倪国强 2014 物理学报 **63** 238503]
- [11] Wang Z X, Yu C Y, Zhong W D, Chen J 2011 *Opt. Express* **19** 13418
- [12] Winston R, Miñano J C, Benitez P 2005 *Nonimaging Optics* (New York: Academic Press) pp50–65
- [13] Kahn J M, Barry J R 1997 *Proc. IEEE* **85** 265
- [14] Shen Z M, Lan T, Wang Y, Wang L H, Ni G Q 2015 *Infrared and Laser Engineering* **44** 2496 (in Chinese) [沈振民, 蓝天, 王云, 王龙辉, 倪国强 2015 红外与激光工程 **44** 2496]

Design and analysis of composite optical receiver for indoor visible light communication*

Wang Yun Lan Tian[†] Ni Guo-Qiang

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

(Received 6 October 2016; revised manuscript received 20 January 2017)

Abstract

A novel design of optical receiver for visible light communication system in indoor environment is proposed in this study. The compound parabolic concentrator is coupled with a photo-detector as the receiving unit due to its optical properties. The composite optical receiver is composed of seven receiving units inserted in a hyper-hemispherical lens aligned with geometry configuration based on angle diversity. The composite optical receiver has fields of view of 360° in the horizontal direction and 180° in the vertical direction respectively, while the field of view of each receiving unit is 30° . Model of indoor visible light communication is built through measurement in a room of a $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ size. The received power and SNR distribution are acquired through MATLAB scripts. The received power of each receiving unit is treated by different algorithms. At a lower data rate, the sum of the received power from all receiving units is the final received power, while at a higher data rate, the final received power is the highest value of power collected by the each unit. The results show that the received powers of the composite receiver by using two different algorithms increase 11.58 and 7.47 dB, respectively, while the gains of the receiver are 15.31 and 5.98, respectively. The mean values of the signalto noise ratio are 79.17 dB from the sum algorithm and 72.26 dB from maximum algorithm, respectively. It is concluded that signalto noise ratio is high and the distribution fluctuation is weak. This usually means a good and stable communication performance. It is proved that the composite receiver designed in this study gives high quality communication performance and presents a wide field of view, thereby avoiding the blind area in communication.

Keywords: visible light communication, receiver, received power

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

DOI: [10.7498/aps.66.084207](https://doi.org/10.7498/aps.66.084207)

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

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