

基于LED阵列照明光分布和光伏电池阵列的高速可见光通信技术*

刘 峰^{1,2}, 何锡源^{1,2}, 郑代顺^{1,2}, 曹小兵^{1,2}, 郑臻荣^{1,2}

(1. 深圳市裕富照明有限公司, 广东 深圳 518116; 2. 浙江大学 光电科学与工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 研究分析 Si-PvCA 物理结构、光电特性与其电路拓扑结构等关键因素, 并在此基础上提出了利用 LED 阵列照明空间光分布和电池板可细分重构特征, 改善信噪比, 实现空分多址 (Space Division Multiple Access, SDMA) 多输入多输出并发 VLC, 为 LED 阵列照明与 Si-PvCA 的 VLC 应用发展提供了新的研究思路和框架。

关键词: 空分多址可见光通信; 多信道并发通信; 光伏电池细分重构; 信道可用评估

中图分类号: TH744.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)03-0222-07

High Speed VLC Technology Based on Spatial Distribution Feature of LED Array and Photovoltaic Cells Array

LIU Feng^{1,2}, HE Xiyuan^{1,2}, ZHENG Daishun^{1,2}, CAO Xiaobing^{1,2}, ZHENG Zhenrong^{1,2}

(1. Shenzhen Eastfield Lighting Co., Ltd, Shenzhen Guangdong 518116, CHN; 2. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, CHN)

Abstract: Silicon-based photovoltaic cell array panel (Si-PvCA), as a cost-effective universal visible light communication carrier, is increasingly concerned. However, its VLC bandwidth is limited by single-channel communication mode. Based on the analysis of its key factors, such as the physical structure, optoelectronic feature and circuit topology, a way to improve the signal-to-noise ratio (SNR) and implement the space division multiple access (SDMA)-multiple input multiple output (MIMO) based concurrent VLC was proposed by the utilization of its subdividing and reconstruction along with the spatial light distribution characteristics of LED array lighting. A possible way to develop VLC through LED array and Si-PvCA was provided.

Key words: SDMA VLC; MIMO VLC; photovoltaic cell array; availability of VLC links

收稿日期: 2020-01-07

* 基金项目: 深圳集成超大功率照明工程研究中心组建项目 (F-2019-Z99-504960); 深科技创新项目 2015-166 (CXZZ20150402141209068)

作者简介: 刘 峰 (1971—), 男, 博士, 研究方向为可见光通信技术与应用、物联网通信技术与应用;
(E-mail: feng.liu@eastfield.cc)

何锡源 (1977—), 男, 博士, 研究方向为半导体照明技术及应用工作;

郑代顺 (1973—), 男, 博士后, 研究方向为半导体照明技术及应用工作。

引 言

可见光通信(VLC)、光能量采集、照明等三位一体的需求正在悄然成为Si-PvCA与LED照明联合应用研究的热点。其中如何提高VLC应用场景中的传输带宽一直是此领域研究的焦点问题,而Si-PvCA的频率响应不超过10 kHz^[1],成为VLC技术的瓶颈。

2014年英国Haas教授的团队也开展了相关研究工作,他们使用太阳能电池作为VLC的探测器,研究光能量分配和通信质量的关系^[2]。其中OOK(On-Off-Keying)调制模式下,改善后的传输距离为39 cm,系统带宽达到350 kbps。

进一步利用OFDM调制,数据传输速率达到了7.01 Mbit/s。文献[3]、[4]分别报道了VLC系统中光电池探测器的光电转换、伏安、输出功率、结电容、光照度等多种因素与响应带宽的关系,发现Si光电池具有更好的响应度和线性度,可实现较高速VLC信号的探测。这些研究作为以后相关发展提供了良好基础,但却都将Si光电池、甚至Si-Pv-CA系统的收发两端限于单物理信道/通道。实际上,LED照明端通常由多个具有空间光分布特征的LED物理单元组成,Si-PvCA在物理上也是由多块光电池单元组成。显然,利用收发两端物理单元空间独立的特点,研究空分多址的多输入多输出SDMA-MIMO并行通信模式应该是此领域具有创新意义的方向。文中从收发两端出发分析LED阵列照明的光分布特征,及其与Si-PvCA的空间关系特征,提出了SDMA-MIMO方案来提高系统VLC带宽潜能,并给出了适用于Si-PvCA端信号接收电路的关键设计和相应的信道可用性评估方法等实现技术方案。

1 LED阵列光通道模型特性及应用

VLC发送端的LED阵列具备多个物理分离的光通道,是构成SDMA-MIMO方案中的一个基础要素。单个VLC通道可以看做1个或者多个LED组成。单通道模型如图1(a)所示。信号所载的主要光能是直线传播状态,反射等间接传播光能忽略不计。图1(a)中z单元(可看做电池板的一个接收单元)的接收增益 G_r 和功率 P_r 分别可由方程(1)和(2)^[5-7]计算:

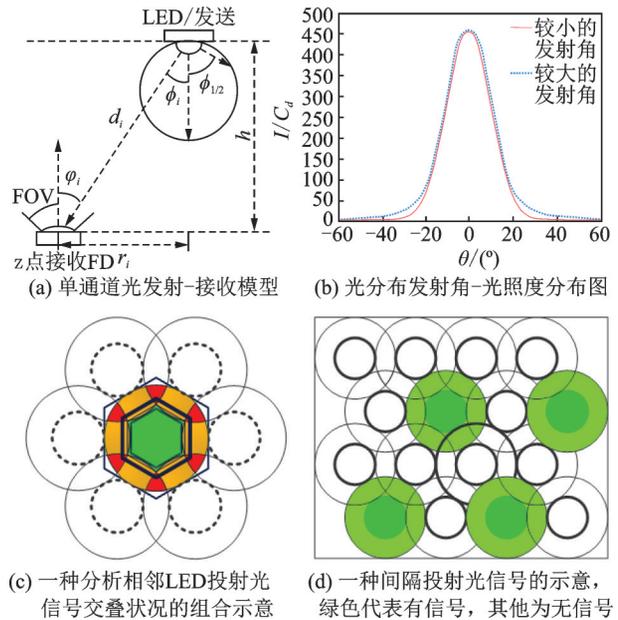


图1 LED阵列及其光分布特性说明图

Fig. 1 Description of LED array illumination and its feature of optical distribution

$$G_r = \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi d_i^2} \cos^m(\varnothing_i) T_s(\varphi_i) g(\varphi_i) \cos(\varphi_i) \quad (1)$$

$$P_r = \begin{cases} P_t \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi d_i^2} \cos^m(\varnothing_i) T_s(\varphi_i) g(\varphi_i) \cos(\varphi_i), & 0 \leq \varphi_i \leq \varphi_c \\ 0, & \varphi_i > \varphi_c \end{cases} \quad (2)$$

其中 d 是LED发送点到接收点(位于光伏电池阵列平面上)的Euclidean距离, m 是Lambertian发射阶数, $m = -\ln(2)/\ln(\cos(\varnothing_{1/2}))$, $\varnothing_{1/2}$ 是LED光场半高全宽(FWHM,或者是半功率半角)的1/2光束角; A_{pd} 是光感应接收点的物理面积; \varnothing_i 表示相应的光辐射(发射)角; φ_i 是相应接收点的光入射角; $T_s(\varphi_i)$ 为光滤波器增益, $g(\varphi_i)$ 是光聚焦透镜增益。文献[7]结合信噪比(SNR)和码间干扰(ISI)的指标引入信号干扰噪声比(SINR),结合式(2)~(4)表明:更小的半功率发射角和更小的接收端视域(FOV)都将有助于减少ISI和提高SNR。

$$SNR = \frac{\gamma^2 P_{rSignal}^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 + \gamma^2 P_{rISI}^2} \quad (3)$$

$$g(\varphi_i) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^{-2}(\varphi_c)}, & 0 \leq \varphi_i \leq \varphi_c \\ 0, & \varphi_i > \varphi_c \end{cases} \quad (4)$$

φ_c 是光电接收器的FOV, n 是接收汇聚透镜的折射系数, γ 是光电探测器的响应率, $P_{rSignal}$ 是接收信号功率, P_{rISI} 是码间干扰导致的接收噪声功率,

σ_{shot}^2 是霰粒噪声方差, $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 是热噪声方差。

基于式(2)~(3)可以继续推导 LED 阵列的计算公式(5)~(7)。依据式(5)~(7)可以计算出 LED 阵列条件下,接收点的 P_{rSignal} 和 P_{rISI} 。公式中, T 是数据传输中 1 位(bit)所用周期, nrLED 是产生光照 LED 灯珠的数量, $X(t)$ 代表 VLC 发送的光脉冲, s 表示卷积算子。文献[8]给出了 $h_i(t)$ 的计算公式(7), 其中 c 代表光速。

$$P_{\text{rSignal}} = \frac{\int_0^T \left(\sum_{i=1}^{\text{nrLED}} h_i(t) X(t) \right) dt}{\int_0^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{\text{nrLED}} h_i(t) X(t) \right) dt} \quad (5)$$

$$P_{\text{rISI}} = \frac{\int_T^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{\text{nrLED}} h_i(t) X(t) \right) dt}{\int_0^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{\text{nrLED}} h_i(t) X(t) \right) dt} \quad (6)$$

$$h_i(t) = \begin{cases} G_i \times \delta\left(t - \frac{d}{c}\right), & 0 \leq \varphi_i \leq \varphi_c \\ 0, & \varphi_i > \varphi_c \end{cases} \quad (7)$$

公式(5)~(7)所刻画的是 LED 阵列单信号的传输模式。即使是单通道信号,由于光速有限性和码间间隔(T)的影响依然会有干扰。

LED 阵列传输单信道信号(数据)就会产生 ISI 干扰,那么 LED 阵列传输多信道数据时,不同信道间的干扰将更为明显。充分利用空间分离信道的特征,即 SDMA 的特征,将成为 MIMO 方案中需要关注的重要问题。

根据图 1(b),依据公式(3)可以获得图 1(b)所示的单个 LED 光强-光束角分布图。如图 1(b),光束角越大,中心光强相对越小,光斑越大,光照则相对越均匀,相反则中心区光强相对越大,光斑越小。映射到平面,每个 LED 单元的出射光投射成光斑(圆盘),如图 1(c)和 1(d)所示。参考 FWHM 的含义,对光能量分布进行简化:将投射光斑圆盘分为内圆盘(内光斑)和外环光斑,分别对应主能区和次能区,对应图 1(b)所示的能量分布。

如图 1(c)所示为一种 LED 阵列的投射样例,1 个 LED 光斑紧邻其他 6 个光斑,以中心光斑分析的内光斑为光强较高的部分,外环光斑光强则较低。LED 单元的外环光斑与相邻投射光斑的外环相交叠。结合图 1(b)直观来看,中心光斑的内光斑,即绿色区域,受到相邻光斑的影响较少,而其外环光斑,标记为橙色和红色的部分则会受到相邻 1 个和 2 个光斑的交叠影响。那么如果每个光斑对应的 LED 单元可以独立调制不同的信号,外环带出现的交叠实际上会导致显著的信道间干扰。信道间干扰相

对 ISI 影响更大,相对而言,后者可以忽略。文中不讨论如图 1(c)所示案例的理论模型,此类理论模型可依据式(1)~(7)为基础进行构建,具体构建细节可参考分区 VLC 相关的研究文献。

基于图 1(c),通过图 1(d)的方式重构光斑的空间分布,降低光斑间的交叠状况。图 1(d)中,绿色-深绿色组合的光斑调制不同的信号,而无颜色覆盖的光斑则不调制任何信号,形成隔离区,从而达到降低通道间干扰,提高 SNR 的效果。可见相对于图 1(c),图 1(d)的并发信道的密度降低了,但提高了各个通道的 SNR。如何权衡两者的关系,优化 SDMA 方案,实现更高的并发通信性能也是值得研究的方向。

2 光伏电池阵列及其电特性

通常整体来看,光伏电池阵列是由多个光伏电池子单元组成,如图 2(a)所示的黑块,其电连接也被分为光电池组合单元(多个小黑块组合)。但目前研究与应用也只把如图 2(a)所示类似的组合或者更多组合当做一个整体进行 VLC 信号接收和处理,而没有充分利用潜在可接收信号子单元的并行度。在电池板光能量采集功能的基础上,本节通过分析组合单元和细分子单元的频率电特性,针对典型 Si-PvCA 结构,构造出适合 SDMA-MIMO 要求的 VLC 数字接收系统。

如图 2(a)所示,标准的 Si-PvCA 结构包括旁路二极管、阻塞二极管和多个光电池单元组合(光电池组)。旁路二极管能隔离其中光电池组故障引起的电压失配损耗影响,阻塞二极管阻止电流从相邻光电池组流向故障(电压失配)光电池组。如果图中两个光电池组能独立接收 VLC 信号,实际上初步提高了接收信号的并行度。显然,进一步细分光电池组为子单元,每个子单元成为独立的接收通道,其中一个光电池(子)单元(Cell)是最小的组合,如方块所示。如图 2(b)中,多个光电池单元可以形成不同类型和规模的光电池组,例如 2 个、4 个、8 个等光电池单元形成较大的光电池(宏)单元,当光电池单元增加到足够的数量就成为通常的整体阵列,但建议以阻塞/旁路二极管为边界,组合数量不超过图 2(a)所示的宏单元的规模。由于 VLC 信号一般为高频交流信号,需要在相邻光电池单元间添加高频电感/高频磁珠以衰减射频信号干扰,而真正实现更多信号接收通道,如图 2(d)与图 2(e)单元间的高频磁

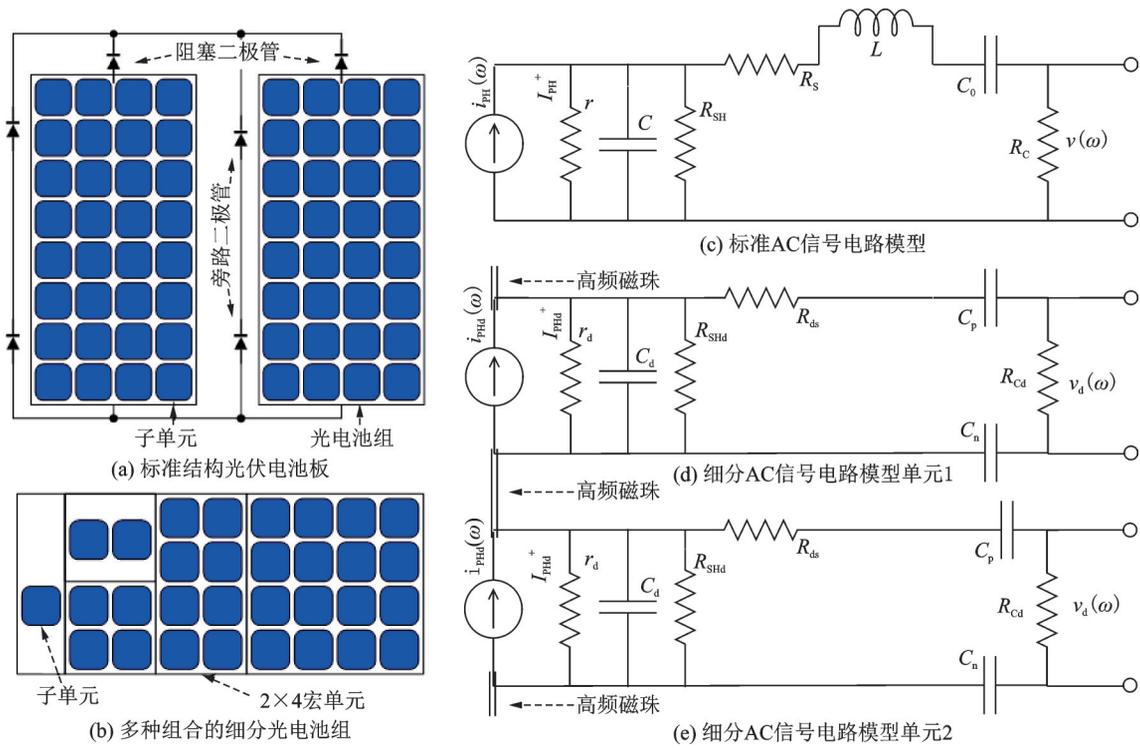


图2 光伏电池组成及其单元的交流电路模型

Fig. 2 The structure of Si-PvCA and its AC circuit module of cell units

珠(感值较小,内阻较大的器件,其阻抗随频率变化而变化,对直流近似为短路,对高频近似断路)。

图2(c)是通用Si-PvCA作为整体的标准交流(AC)信号电路模型^[3-4](简称:标准模型),基于标准模型和以上讨论的细分思想可构建图2(d)和2(e)所示的光电池(子)单元或者宏单元的AC信号电路模型(简称:细分模型)。在文中所附研究文献中可发现标准模型,建立细分模型也要参见图3所示的光伏电池阵列的阵列单元信号采集电路逻辑。图2(d)和图2(e)是相同的两个光电池子单元,两个子单元通过高频电感/电感形成连接。图2(c)~图2(e)的虚线左边,可见两种模型的差异是电感的存在。这考虑整体阵列的连接线缆及其寄生参数相关的特征电感较单个光电池单元要大很多。虽然后者的单元间存在隔离高频信号互扰用的电感,但是在模型内部不存在,因此忽略细分模型中的电感是合理的。实际上,细分后的尺寸缩小效应也适用于其他电参数,如图2(c)中的 r 、 C 、 R_{SH} 和 R_s 等相应地变成了图2(d)~图2(e)中的 r_d 、 C_d 、 R_{SHd} 和 R_{sd} ,后者的应该按比例小于前者的,其中电参数定义见相应模型公式(8)~(11)的说明。式(8)~(9)对应标准模型,根据式(8)~(9),针对细分模型相应地构造了式(10)~(11)。这些公式将有助于以后的理论计算分析。

式(8)~(9)描述了标准模型光电池输出交流电

压信号 $v(\omega)$ 与VLC光信号所产生电流 $i_{PH}(\omega)$ 之间的关系^[3-4]。 ω 是角频率, $j=\sqrt{-1}$; R_{SH} 是光电池并联接地分流电阻; R_s 代表光电池所有噪声阻抗变量, $i_{PH}(\omega)$ 是光电池采集光能量产生的交流电流, C 代表光伏电池本身的电容值, C_0 是隔直电容, R_C 是信号负载, L 是所有连线的等效电感。式(10)~(11)描述了细分模型光电池输出AC电压信号 $v_d(\omega)$ 与光电流 $i_{PHd}(\omega)$ 之间的关系。细分模型的 r_d 、 C_d 、 R_{SHd} 、 R_{sd} 和 R_{cd} 与标准模型对应的符号具有相同的含义, C_p 和 C_n 是细分模型中数值相等的差分隔直电容。基于所给出的式(8)~(11),可在理论上比较分析标准模型与细分模型间的差异。

$$\left| \frac{v(\omega)}{i_{PH}(\omega)} \right|^2 = \left| \frac{\frac{R_{LC}}{R_s + j\omega L + R_{LC}} \times \frac{R_C}{\frac{1}{j\omega C_0} + R_C}}{\frac{1}{r} + j\omega C + \frac{1}{R_{SH}} + \frac{1}{R_s + j\omega L + R_{LC}}} \right|^2 \quad (8)$$

$$R_{LC} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_0 + R_L} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_0} + R_C}} \quad (9)$$

$$\left| \frac{v_d(\omega)}{i_{PHd}(\omega)} \right|^2 = \left| \frac{\frac{R_{Cd}}{R_{Xd}}}{\frac{1}{r_d} + j\omega C_d + \frac{1}{R_{SHd}} + \frac{1}{R_{Xd}}} \right|^2 \quad (10)$$

$$R_{Xd} = R_{Sd} + \frac{1}{2j\omega C_p} + R_{Cd} \quad (11)$$

如图 3 是并行采集多个光电池单元(图中光伏电池子单元)信号的电路逻辑框架,是细分方案实现的典型案例,其他可能案例可在未来进一步解析实现。图中串联光电池组收获的电能,通过电源管理单元实现稳定可靠,提供给前置放大、多路模拟开关、ADC(模数转换器)和数字信号处理单元工作。电池组内的相邻细分单元的 DC 电压值不同,通过差分隔直流(或高通)电容 C_p 和 C_n 只获取相应细分单元的差分 AC 信号(差分信号)。根据标准模型和细分模型,并由于规模尺寸的不同,细分单元所产生的差分信号幅值 $v_d(\omega)$ 相对于标准整体 $v(\omega)$ 幅值应按比例缩小,但细分单元的 $v_d(\omega)$ 可通过前置电路进行调理放大。根据式(8)~(11)的理论模型,影响信号带宽的主要因素是光电池内生电容。由于细分单元的内生 C_d 按规模比例减少,而其 $v_d(\omega)$ 可被放大。显然对所有细分单元的信号 $v_d(\omega)$ 进行放大处理的方式有助于提高细分单元的高频响应特性以致于提高并行接收系统的高频响应特性。虽然这种处理方式增加了有限的成本,但对实现效益而言仍然具有一定的吸引力。如何优化细分程度是系统性评价问题,将在后期研究中加以分析讨论。

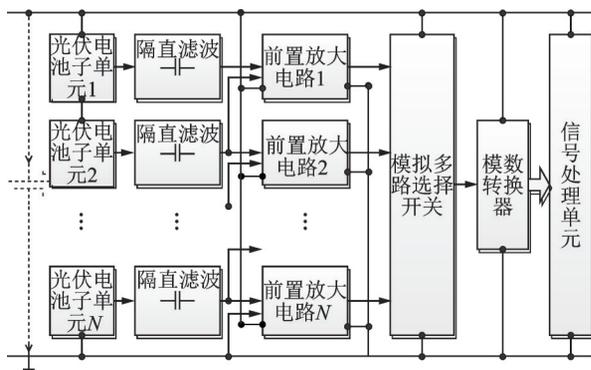


图 3 光伏电池阵列细分单元信号采集处理逻辑框图

Fig. 3 The framework of digital signal acquisition and processing for fine-dividing units of Si-PvCA

讨论实现方案的优化问题。存在两种基本通道信号采集方案,模拟多路开关方案和并行多路方案。选择的依据至少依赖于细分单元的频响上限

和所选用 ADC 方案的性能,如采样位数、采样速率等。考虑性价比,模拟多路开关方案有助于降低单路实现成本。而根据差分信号 $v_d(\omega)$ 的特性,如幅值大小,不同于图 3 所示的逻辑框架,考虑在前置调理电路之前部署模拟多路开关,可以进一步减少前置调理部分的实现代价,进而降低系统整体的实现代价。ADC 的下一阶段进行信号分析、解调/解码,无论哪种信号采集方案,此阶段的实现代价主要取决于调制解调、编解码和数据带宽。在这点上,细分与整体方案没有根本的差别。

3 构建并发 VLC 系统的关键问题

接收端的接收单元区(简称:接收单元区)与发送端的投射单元区(简称:投射单元区)的空间(平面)关联是构建 SDMA-MIMO 并发 VLC 系统的关键问题,本质上,投射区与接收区的组合特征是相对独立的,即投射单元中心与接收单元中心不确定重合匹配,这需要建立简单分析模型以便评估两者的匹配特征(空间关联关系)。图 4 所示黑色虚线方格为接收单元区,大小圆环是投射单元区,等同于图 1(c)/图 1(d)的投射单元区。LED 阵列发送端光分布特征不变,改变发送和接收两端间距可改变投射单元区积,即投射区是易于改变的。结合第 2 节讨论的相关内容,就 VLC 光能量的独立性来看,图 4 给出的是收发端在一定距离上生成的投射单元区组合,这时通信信道有效面积与相邻投射单元区干扰交叠面积之间达到临界,这时的距离可称为临界距离。即,在临界距离上,投射区的有效覆盖度(主能量区大小)与信号独立性(SNR)达到均衡(或称为均衡临界区)。按照文中给出的示例,如图 1(c)等所示,这时一个投射区的主能量区边缘与任何其他投射区的次能量外边缘相切。在临界距离上,如图 4(a)和 4(b)所示,投射单元区和接收单元区的各自组合不变,仅通过改变两者关联距离,而产生两者相对面积的变化,可以发现,单元接收区的面积越大,相邻干扰的概率越大,反之则越小。

既然收发单元区的关联匹配是提高系统并行度的关键,需要定量分析模型。不难想象,在临界距离上,接收单元区与投射单元区完全重合,如图 1(c)和 1(d)所示,SDMA 的并行效率达到最大,那么 MIMO 效率也有希望达到最大。即使针对现实所用的 Si-PvCA 每个最小单元而言,既可以是正方形也可以是紧密排列的等边六角形,而达成一定投射

条件下的最大匹配度,这时可看作投射区、接收区各自的单元组合特征至少是相同的。在此特征相同的条件下,要达到最小匹配度,可以通过平移接收区和发送区相对位置至接收单元区的中心点与3个相邻投射单元区中心点构成的等边三角形的中点,这时一个接收区被三个投射单元区分。

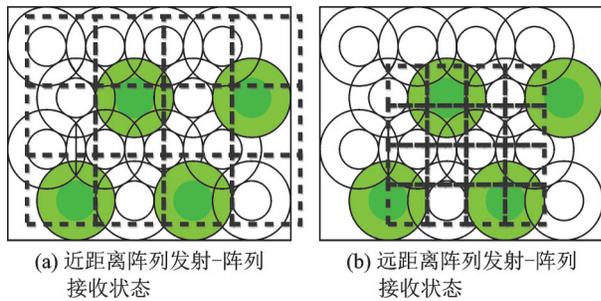


图4 LED发送阵列平面投射与光伏电池接收阵列关联方式

Fig. 4 The association mode between the projection plan of LED array and receiving unit of Si-PvCA

基于以上的分析,可以给出收发区关联匹配度定量分析模型的构建思路,即参数化模型和平面积分重叠模型,在此仅讨论规则分布的参数化模型。首先,分别定义收发两端的单元区形位结构,可用单元区的中心点的连线结构描述,如图4所示,分别是等腰直角三角形和等边三角形(图4中,显然投射和接收形位是不匹配的),其定量参数是三角形边长和夹角。其次,如图5(a)所示,接收单元区,虚线所示(示例两种规则结构:等边六角形和正方形),接收单元区定量描述为边到中心的垂距分别为 D_1 、 D_2 , R_c 是投射单元主能量区半径, R_p 则代表次能量环区的外缘半径,投射区的等边六角形用于等效替代圆形,接收单元区中心与投射单元区中心的距离 R_d 。子图标题中的 R_d (*)中的符合代表子图号a,b,c。 O_t 和 O_r 分别是投射区和接收区中心, θ 是接收单元中心 O_r 与投射单元中心 O_t 连线与水平的夹角,其中接收单元的一条边平行于水平线。图5(a)与图5(b)的区别是匹配的方向不一致,即 R_d 相等 θ 不等;图5(a)与图5(b)的区别是 R_d 不等 θ 相等;可以看出其匹配度,或者相对单元重合面积是不同的。还有具体参数将在后续的研究中进一步深入讨论。

那么简单来看,单元区结构越接近、 R_d 越小、叠加比越高,则匹配度越高。而针对图4所示的接收单元区与投射单元区的状况,其单元区形位特征的不匹配给参数化评估带来了复杂性,需要每点分别匹配,具体匹配过程不在此深入讨论。

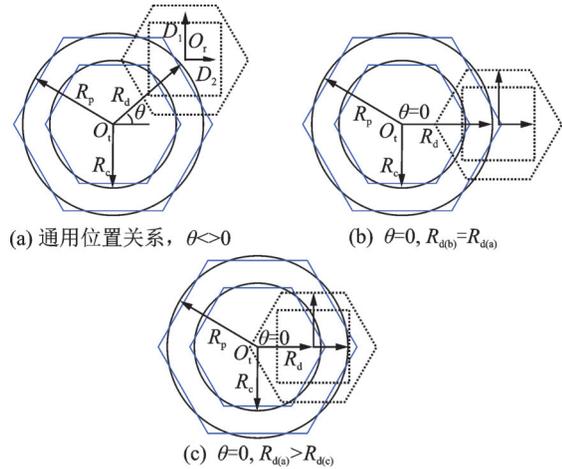


图5 发送单元与接收单元的参数化关联分析模型
Fig. 5 The parametric space association model between transmission unit and receiving unit

如图4所示,当单元区结构出现严重不匹配的状况时,可以通过稀疏化收发两端单元区的间隔,减少相邻投射单元间的干扰,提高并行通信通道的可用性。稀疏化能够提高某些接收单元的SNR,但是也会降低单位空间的并行度,因此合理的稀疏化是一个均衡优化的过程,这也是可以进一步讨论的方向。

4 多信道通信链路可用性的评估技术

上节讨论了收发单元区关联匹配问题的理论方法框架。本节给出基于实际通信特征,通过协议规程设计来评估多VLC物理通信链路的可用性(收发单元区的关联匹配度)。这种方案减少了计算的复杂度,提高了可操作性。同时可结合理论方法,提高收发两端相对位置的定位效率。

补充一个背景,以上的讨论集中在LED阵列向Si-PvCA单向VLC的结构,而在实际应用中,会有反向信息传输通道,构成闭环控制的通信链路。至少如同非对称上下行通信技术(ADSL),即系统的上行带宽可远低于VLC构成的下行带宽。上行通信链路介质可以采用低速红外光、低速射频信号等,其带宽可以定义为小于100 kbps,主要用于下行链路的反馈控制。在此闭环链路的条件下,可实现多路VLC通信链路可用性评估。建议评估多信道通信链路可用性的协议规程如下:

(1)VLC下行链路为编码链路,其通信帧至少由前导控制码和负载数据编码两部分组成,前导码可

以使用伪随机码或者巴克码,接收方检测前导码并通过判断 SNR 来完成通信帧同步;

(2)接收端以给定的最高采样速率,遍历每个接收单元区相关通道以获取通信信号,并通过帧同步和解码算法恢复通信帧;

(3)发送端 VLC 通道采用如图 4 所示的排列布置,并且发送端控制器保存排列布署信息;

(4)VLC 通信速率可配置,采用 OOK-NZ 调制方式;

(5)接收端到发送端可利用低速率信道通信;

(6)收发两端的通道分别对应接收和投射单元区;

(7)收发两端平面可在平行方向做 X-Y 向相对位移;

(8)收发两端平面可在垂直方向做 Z 向相对位移。

5 结 束 语

文中在分析 LED 阵列、Si-PvCA 物理结构、光电特性与其电路拓扑结构等特点的基础上,提出了利用阵列照明空间光分布特征以及细分重构 Si-Pv-CA 接收单元的方法,探索讨论了与之相关的基本理论和技术实现框架,为发展 Si-PvCA 的 VLC 技术和提高其应用价值提供了新途径。

参 考 文 献

- [1] Kim Sung Man, Won Ji San, Nahm Seung Hoon. Simultaneous reception of solar power and visible light[J]. Optical Engineering, 2014, 54(4): 0461031-3.
- [2] Wang Zixiong, Dobroslav Tsonev, Stefan Videv, et al. Towards self-powered solar panel receiver for optical wireless communication [C]. Proc. of IEEE International Conference on Communication(ICC), Sydney, Australia, 2014, 3348-3353.
- [3] 郭俊清,陈雄斌,李洪磊,等.可见光通信系统中硅光电池响应特性研究[J].光电子激光,2015,26(03):474-479.
- [4] 郭俊清,陈雄斌,李洪磊,等.基于光电池探测器的可见光通信系统无线供能技术研究[J].半导体光电,2015,36(05):773-776.
- [5] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications [J]. Proc.IEEE, 1997, 85(2):265-298.
- [6] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Trans. Consum.Electron., 2004, 50:100-107.
- [7] Do T H, Yoo M. Optimization for link quality and power consumption of visible light communication system [J]. Photonic Network Communications, 2014, 27:99-105.
- [8] Do T H, Wang J H, Yoo M. Analysis of the effects of LED direction on the performance of visible light communication system[J]. Photonic Network Communications, 2013,25: 60-72.

(上接第 221 页)

参 考 文 献

- [1] 臧习飞.大动态射频光纤传输系统设计与实现[J].山西通信技术,2017(4):49.
- [2] 袁 强,朱宏韬.射频信号光传输技术研究和应用[J].广西通信技术,2015(2):53.
- [3] 谷德露.外调制光发射机关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2009.
- [4] EMCORE .EMCORE RF and Microwave Fiber-Optic Design Guide[EB/OL].http://www.emcore.com,.
- [5] 左 磊,侯韶华. RoF 外调制链路的噪声系数分析[J].通信技术,2012(3):28-33.
- [6] 胡大绳.接收机与 A/D 变换器动态匹配研究[D].西安:西安电子科技大学,2009.
- [7] 张家会.脉冲信号同步及低抖动光传输技术[J].大众科技,2017,19(209):7-13.
- [8] 韩雪莲,童智勇,杨汝良.一种多通道观测系统数字接收技术研究[J].现代电子技术,2015(4),38(7):52-57.
- [9] Steve Lee, Ken Yang.用于高速数字转换器的低抖动时钟设计[J].EDN 电子技术设计,2002(11):77.