

doi:10.13756/j.gtxyj.2021.06.003

光通信系统与网络技术

可见光通信 DCO-OFDM 系统资源分配算法研究

洪文昕^a, 李天屿^b, 陈建飞^a

(南京邮电大学 a. 电子与光学工程, 微电子学院; b. 通信与信息工程学院, 南京 210023)

摘要:针对室内可见光通信(VLC)直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)系统存在的低信道利用率问题,文章对该系统的信道资源和比特资源进行了优化分配研究。首先介绍了 DCO-OFDM 系统的信号发射端模型和系统的信道利用率计算,并按照两步算法的思路依次分析了信道资源分配和比特资源分配问题,进而提出了自适应动态资源分配算法,该算法能够根据信道幅度频率响应来灵活分配子信道,并为各信道自适应选择满足服务质量要求的最高阶正交振幅调制(QAM)调制方式。仿真结果表明,相比于传统固定分配算法,该自适应资源分配算法可显著提升室内 VLC DCO-OFDM 系统的信道利用率。

关键词:室内可见光通信;直流偏置光正交频分复用系统;自适应动态资源分配算法;信道利用率

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2021)06-0019-04

Research on Resource Allocation Algorithm of Visible Light Communication DCO-OFDM System

HONG Wen-xin^a, LI Tian-yu^b, CHEN Jian-fei^a

(a. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics; b. College of Telecommunications
Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In view of the problem of low channel utilization in the Direct Current-biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (DCO-OFDM) system for indoor Visible Light Communication (VLC), the channel and bit resources of the system are optimally allocated. This paper first introduces the signal transmitter model of the DCO-OFDM system and the calculation of the channel utilization of the system. Then we analyze the problem of channel resource allocation and bit resource allocation in sequence according to the two-step algorithm. Finally, we propose an adaptive dynamic resource allocation algorithm. The algorithm can flexibly allocate sub-channels according to the channel amplitude and frequency response, and adaptively select the highest order Quadrature Amplitude Modulation (QAM) modulation method for each channel to meet service quality requirements. The results show that, compared with the traditional fixed allocation algorithm, this adaptive resource allocation algorithm can significantly improve the channel utilization of indoor VLC DCO-OFDM system.

Key words: indoor VLC; DCO-OFDM system; adaptive dynamic resource allocation algorithm; channel utilization

0 引 言

近年来,可见光通信(Visible Light Communication, VLC)已成为无线通信研究的焦点之一。VLC 系统使用发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)进行通信,采用强度调制直接检测系统,要求输入信号是单极性信号并且是实值传输。直流偏置光正交频分复用(Direct Current-biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, DCO-OFDM)通信协议是 VLC 采用的方案之一^[1-2]。

无线通信系统的目标之一是保证服务质量下的高效传输,合理进行资源分配,使系统的有效性和可靠性得以提高。针对资源分配等问题,2018 年,李伟提出了一种基于分解分层图和拥塞博弈的优化网络吞吐量的资源分配机制,该机制可实现网络吞吐

量和搜索复杂度的均衡^[3];2019 年,白向伟等人提出了一种低复杂度室内超密集 VLC 网络频谱资源分配算法,该算法将吞吐量性能提升了 57%,服务质量满意度性能提升了 67%^[4];次年,徐文艳等人提出了一种新的导频资源分配算法,该算法可以有效改善导频污染问题,提高训练资源利用率^[5];2020 年,徐文艳等人又提出了一种 VLC 联合小区形成和功率分配的优化算法,该算法能够实现能源效率最大化^[6]。

VLC 系统资源分配问题虽已得到许多关注,但在系统信道利用率性能上还未做出相关研究。因此,针对室内 VLC DCO-OFDM 系统,本文提出了一种自适应动态资源分配算法,以提升该系统的信道利用率。仿真结果表明,该算法可有效提高室内 VLC DCO-OFDM 系统信道利用率。

收稿日期:2021-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61601237);江苏省自然科学基金资助项目(SJ216039);江苏省高校自然科学研究面上资助项目(16KJB420001);南京邮电大学校级科研资助项目(XK1060918088)

作者简介:洪文昕(1989—),女,江苏南京人。实验师,硕士,主要研究方向为无线光通信。

通信作者:洪文昕,实验师。E-mail: hongwenxin@njupt.edu.cn

1 系统模型

1.1 室内 VLC DCO-OFDM 系统

图1所示为 VLC DCO-OFDM 系统的发射端模型。发送数据首先通过信道分配获得相应的信道,然后经正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)、串/并变换、埃尔米特对称和 N 点反向快速傅里叶变换后得到 DCO-OFDM 信号^[7],此后完成添加循环前缀、并/串转换、通过滤波器和直流偏置及零值限幅等过程,最终由 LED 将调制信号发送至信道中^[8]。

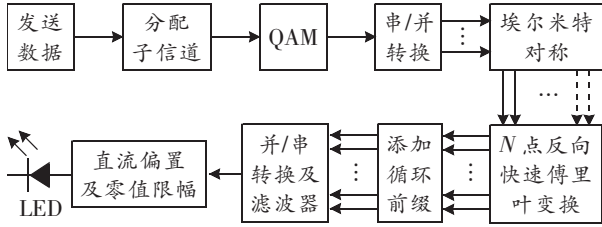


图1 DCO-OFDM 系统发射端模型

本文室内 VLC DCO-OFDM 系统的 LED 光源采用朗伯发光模型,目前已有大量文献论证,因此不再赘述。

1.2 系统信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)

文献[9]指出, VLC DCO-OFDM 系统第 i 个子信道的 SNR 为

$$SNR_i = \frac{|H(i)|^2 \cdot \sigma_i^2}{\sigma_N^2}, \quad (1)$$

式中: $H(i)$ 和 σ_i^2 分别为第 i 个子信道的频域响应和信号功率; σ_N^2 为噪声功率。

室内 VLC 系统背景噪声主要包括散粒噪声、热噪声和码间干扰噪声^[10]。DCO-OFDM 系统可以克服码间干扰,因此本文仅考虑散粒噪声和热噪声,且噪声的大小由探测器性能和绝对温度等参数决定。

1.3 DCO-OFDM 系统信道利用率

在信道数为 N 的 DCO-OFDM 系统中,若码元周期为 T_s ,第 i 个子信道的 SNR 为 SNR_i ,则系统的通信容量 C_t 为

$$C_t = \frac{N}{N + N_{cp}} \sum_{i=1}^{N/2-1} \frac{2}{T_s} \log_2(1 + SNR_i), \quad (2)$$

式中, N_{cp} 为循环前缀的长度。

同时,若第 i 个子信道采用 M_i 阶 QAM,则系统的比特率 R_b 为

$$R_b = \frac{N}{N + N_{cp}} \sum_{i=1}^{N/2-1} \frac{1}{T_s} \log_2 M_i. \quad (3)$$

综上,该系统的信道利用率 α 为

$$\alpha = \frac{R_b}{C_t} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2-1} \log_2 M_i}{\sum_{i=1}^{N/2-1} 2 \log_2(1 + SNR_i)} \times 100\%. \quad (4)$$

2 自适应动态资源分配算法

资源分配算法通常可分为联合分配算法和两步算法。联合分配算法是指同时分配信道、比特和功率等资源,这类算法往往具有较高的复杂度;而两步算法首先完成信道资源的分配,然后再分配其他资源,因此可以降低一定的复杂度,但同时算法的有效性将受到影响^[11]。本节针对室内 VLC DCO-OFDM 系统提出的自适应资源分配算法按照两步算法的思路,首先进行信道动态分配,然后为每个信道自适应选择合适的和高系统信道利用率的 QAM 调制方式。

2.1 动态分配信道

在动态分配信道时,我们按照能者多劳的原则分配信道资源。具体来说,对于靠近 LED 通信范围中心的终端,认为其短时间内发生切换的可能性较低,因此将信道幅度频率响应高的子信道以及数量较多的子信道分配给这些终端,以使得这些终端可以持续进行高速率数据传输;对于远离 LED 通信范围中心的终端,认为其短时间内发生切换的可能性较高,因此将信道幅度频率响应低的子信道以及数量较少的子信道分配给这些终端,其中通信区域的界定依据 LED 在室内空间的光照度分布。更具体而言,对于可用子信道数为 N_{all} 的室内 VLC DCO-OFDM 系统,在室内有 n 个通信终端,其中第 i 个终端所处位置的光照度大小为 lx_i 流明,则该终端获得的子信道数 N_i 为

$$N_i = \begin{cases} \left\lceil \frac{lx_i}{\sum_{j=1}^n lx_j} N_{all} \right\rceil, & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ N_{all} - \sum_{j=1}^{n-1} N_j, & i = n \end{cases}. \quad (5)$$

然后,对于获得子信道数量最多的终端,意味着该终端处于最靠近 LED 通信范围中心的位置,因此按照能者多劳原则,将优先获得最多数量和信道幅度频率响应最高的子信道;对于获得信道数量次多的终端,获得次多数量和信道幅度频率响应次高的子信道,进而逐步完成所有终端的信道分配。在室内 VLC DCO-OFDM 系统中,结合终端的移动和信道矩阵的动态变化,及时更新信道分配,进而实现动

态分配信道。

2.2 自适应选择 QAM 调制方式

对于采用 M 阶 QAM 的信道,接收端的误比特率(Bit Error Ratio,BER)可以近似为^[4]

$$P_b \approx 0.2e^{-\varphi(M)SNR}, \quad (6)$$

式中: SNR 为信道的 SNR ;

$$\varphi(M) = \begin{cases} \frac{1.5}{M-1}, & M=2^{2i} \\ \frac{6}{5M-4}, & M=2^{2i-1} \end{cases},$$

i 为任意正整数。设 P_b 目标值为 BER_0 ,由式(6) 可计算得到信道使用 M 阶 QAM 对应的 SNR 门限值 SNR_0 。若取 $BER_0 = 1 \times 10^{-4}$, 计算出不同 M 阶 QAM 下的 SNR 门限值 SNR_{th} , 结果如表 1 所示。

表 1 不同 M 阶 QAM 下的 SNR 门限值

M	SNR_{th}/dB
2	$SNR_{th} \leq 11.82$
4	$11.82 < SNR_{th} \leq 16.59$
8	$16.59 < SNR_{th} \leq 18.81$
16	$18.81 < SNR_{th} \leq 22.96$
32	$22.96 < SNR_{th} \leq 25.04$
64	$25.04 < SNR_{th} \leq 29.06$
128	$29.06 < SNR_{th} \leq 32.09$
256	$32.09 \leq SNR_{th}$

在室内 VLC 系统下,室内空间的环境变化较慢,因此可认为短时间内 SNR 变化较小,故由式(1) 在信号发射端估计接收端的 SNR 大小,并根据表 1 为各信道自适应选择满足 BER 目标值的最高阶 QAM 调制方式,进而实现为各信道自适应选择 QAM 调制方式。基于以上内容,我们提出自适应动态资源分配算法,图 2 所示为该算法的流程示意图。

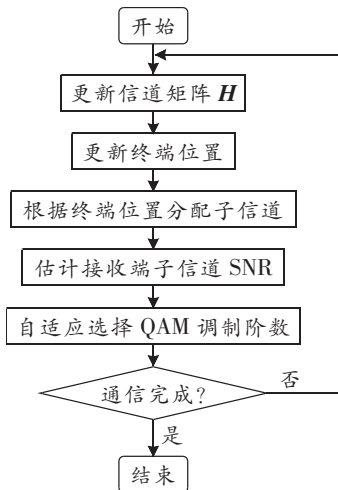


图 2 算法流程示意图

3 仿真校验及数据分析

本节对自适应动态资源分配算法提高室内 VLC DCO-OFDM 系统信道利用率的能力进行仿真校验。仿真模拟了多 LEDs 阵列、多通信终端的室内 VLC DCO-OFDM 系统模型,每个 LEDs 阵列视作一个通信接入点,每个接入点覆盖一个通信微小区,每个 LEDs 阵列由 60×60 的 LED 芯片组成,每个芯片的参数如下:发射光功率为 20 mW,半功率角为 70° ,中心光强 0.73 cd;每个芯片间隔 0.01 m,其他参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	参数值	参数	参数值
系统信道数	256	探测器响应/A/W	0.53
BER_0	1×10^{-4}	暗电流/mA	0.62
房间长度/m	5	LEDs 噪声带宽因子 ξ_2	0.562
房间宽度/m	5	探测器噪声带宽因子 ξ_3	0.868
房间高度/m	3	探测器面积/cm ²	1.5
终端高度/m	1	开环电压增益	10
终端个数	4	沟道噪声因子	15
光滤波增益	1	跨导/ $m \cdot s^{-1}$	30
聚光器增益	1	LEDs 阵列个数	4
视场角/ $^\circ$	80	探测器单位	112
绝对温度/K	295	面积固定电容/Pf/cm ²	

图 3 所示为终端移动轨迹。图 4 所示为终端移动过程中信道动态分配的数量变化。

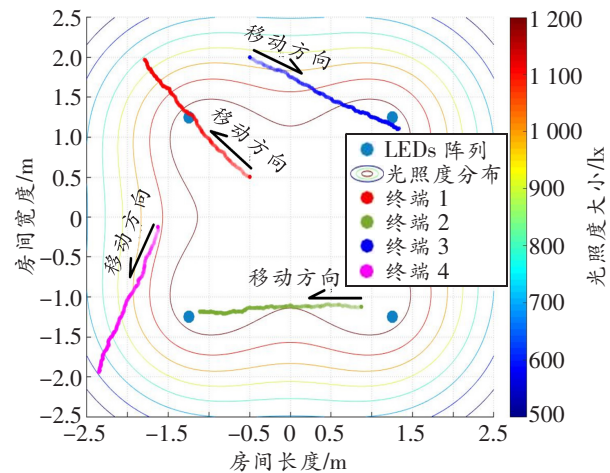


图 3 终端移动轨迹

由图 3 和 4 可知,起初终端 2 和 4 位于不同的通信微小区,各终端独享微小区内的信道资源,但由于终端 2 在移动过程中切换至终端 4 所在微小区,因此终端 2 和 4 将共享该微小区的信道资源,并且因为终端 2 移动过程中逐渐靠近通信中心,所以微小区为终端 2 分配越来越多的信道资源;相反,终端

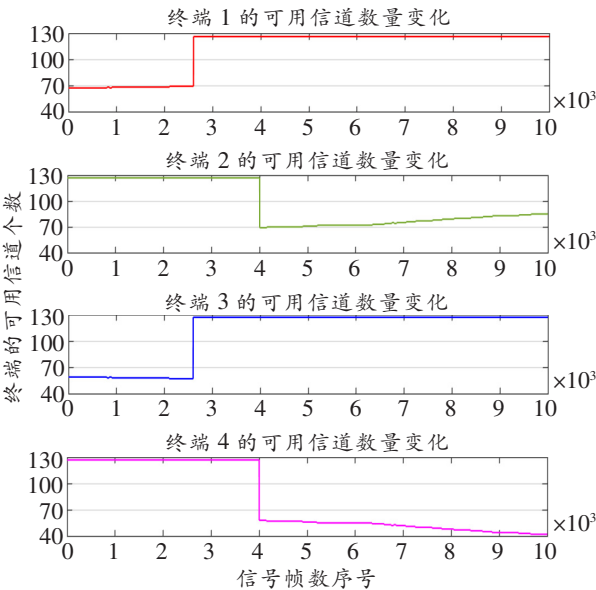


图 4 动态信道分配

1 和 3 起初位于同一微小区,但由于终端 3 移动过程中切换至另一微小区,使得终端 1 和 3 由共享微小区信道资源变为独享信道资源,因此最终终端 1 和 3 获得了相应微小区的所有信道资源。该过程反映了本算法为微小区实现动态信道资源分配的可能性,同时也验证了 2.1 节动态分配信道方案的可行性,为今后研究微小区内多用户信道竞争接入问题埋下可能。

图 5 所示为终端与 LEDs 阵列通信过程中某一帧 DCO-OFDM 系统数据信号的各信道 QAM 分布。如图所示,该算法可以实现为信号的各个子信道选择合适的 QAM 调制方式,从而验证了 2.2 节自适应选择 QAM 调制方式的可行性。通过以上分析,自适应动态资源分配算法的可行性得以验证,此后将讨论该算法的有效性和合理性。

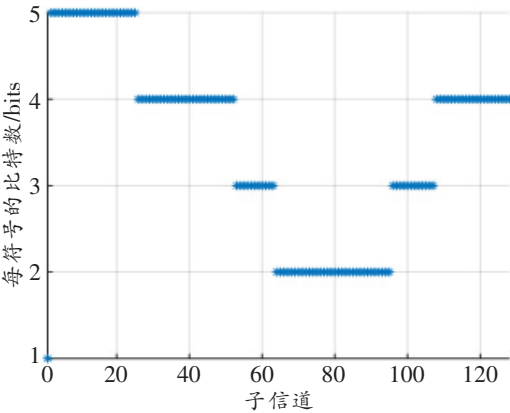


图 5 各信道 QAM 分布

图 6 所示为在终端与 LEDs 阵列的通信过程中,LEDs 阵列采用不同发送信号功率时,不同算法

的系统信道利用率对比情况。其中,实线的纵坐标为左侧的信道利用率,虚线的纵坐标为右侧的 SNR,该 SNR 是指当前信号功率下,在频率选择性衰落信道中所有子信道 SNR 的最低值,图中的固定分配指在微小区中信道分配采用平均分配方案,且各信道采用相同 QAM 调制方式的固定分配算法。

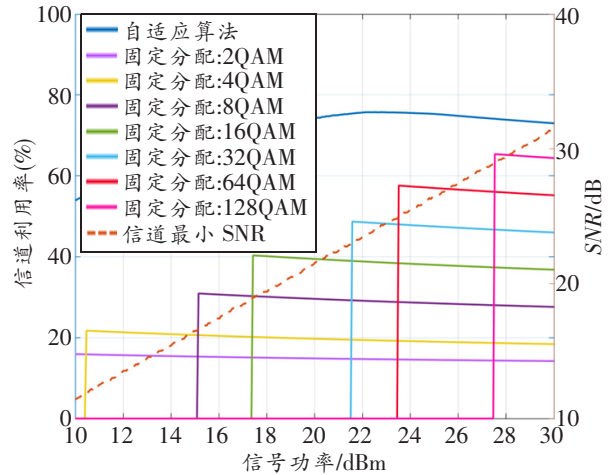


图 6 不同算法的信道利用率对比

图中,虚线反映了不同发送信号功率下微小区内所有可用于子信道当前的最低 SNR,结合该 SNR 和表 1 数据可以确定固定分配算法的最大 QAM 调制阶数。如在信号功率 19 dBm 处的各信道中,最低 SNR 约为 20 dB,查询表 1 可知,在 BER 目标值 $BER_0 = 1 \times 10^{-4}$ 的要求下,固定分配算法的 QAM 调制方式不得超过 16QAM,因此在信号功率 19 dBm 处采用超过 16QAM 调制方式时,固定分配算法的系统信道利用率视为 0。作为对比,自适应算法可以为各信道选择合适的调制方式,而不同于固定分配方案中各信道采用相同的调制方式,因此可以提高该系统的信道利用率。如图 6 所示,在 $BER_0 = 1 \times 10^{-4}$ 时,自适应动态资源分配算法最低可提升信道利用率 8.6% (相比于固定分配 128QAM 方案),最高可达 61.0% (相比于固定分配 2QAM 方案)。由此可见,该算法可显著提升室内 VLC DCO-OFDM 系统的信道利用率,进而验证了该算法的有效性和合理性。

4 结束语

本文针对室内 VLC DCO-OFDM 系统中的资源分配问题进行优化研究,通过对信道和比特分配问题的分析,提出自适应动态资源分配算法。仿真结果表明,该算法可以显著提高室内 VLC DCO-OFDM 系统的信道利用率。

(下转第 44 页)

结果进行准确补偿。另外需要特别注意的是,在 APR 激活后,光功率快速下降,部分光功率计采用自动量程时,会因量程不能及时切换而导致测试不准确,可采用功率的积分模式进行测量。

7 安全设计要求

在对光纤通信产品安全分级后,对产品的安全结构、警告标记和说明书的内容要进行确认和检测,保证产品符合对应安全等级要求。

一般来说,针对人员可能接触到的超过 1 类 AEL 激光辐射的位置,均需要安装防护措施。防护措施可以为防护罩、挡板、安全连锁、复位装置和控制器等等。防护措施的具体要求可参考 IEC 60825-1 第 6 章要求。

在确认了产品的激光等级或危险等级后,还应依据 IEC 60825-1 第 7 章以及 IEC 60825-2 第 4.6 章等安全标识的要求,在产品上加贴相应的标识,并明确其使用区域。如果激光产品因尺寸或设计的原因无法在产品上粘贴相关标识,则标识应附在说明书中或包装箱上。

8 结束语

通过激光安全等级认证,可以降低国际市场准入责任风险,快速提升和扩大全球市场竞争力。本文通过对相关激光标准的研究,结合光纤通信产品

的特性,探讨了光纤通信产品激光安全分级的评估方法,可为产品设计、测试和认证提供参考。文章最后也建议对相关的国内标准尽快完成同步修订工作,以利于消除国际贸易中的技术壁垒,促进国际技术交流合作。

参考文献:

[1] IEC 60825-1-2014, Safety of Laser Products- Part 1: Equipment Classification and Requirements[S].
[2] IEC 60825-2-2010, Safety of Laser Products - Part 2: Safety of Optical Fibre Communication Systems (OFCS) [S].
[3] GB/T 7427. 1-2012, 激光产品的安全 第 1 部分:设备分类、要求[S].
[4] IEC 60825-1-2007, Safety of Laser Products - Part 1: Equipment Classification and Requirements[S].
[5] GB/T 7427. 2-2018, 激光产品的安全 第 2 部分:光纤通信系统(OFCs)的安全[S].
[6] ITU-T G. 664-2012, Optical Safety Procedures and Requirements for Optical Transmission Systems[S].
[7] YD/T 1259-2003, 波分复用系统(WDM)光安全进程技术要求[S].
[8] ITU-T G. 664-1999, Optical Safety Procedures and Requirements for Optical Transmission Systems[S].
[9] IEC 60825-2-i2(ed3. 0)-2014 Safety of Laser Products- Part 2: Safety of Optical Fibre Communication Systems (OFCS) Interpretation Sheet 2[S].



(上接第 22 页)

参考文献:

[1] Carruthers J B, Kahn J M. Multiple-subcarrier Modulation for Nondirected Wireless Infrared Communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(3):538-546.
[2] Gonzalez O, Perez-Jimenez R, Rodriguez S, et al. OFDM over Indoor Wireless Optical Channel[J]. IEE Proceedings. Part J, Optoelectronics, 2005, 152(4): 199-204.
[3] 李伟. 可见光通信组网架构与资源分配机制研究[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
[4] 白向伟,李青,唐燕群. 低复杂度室内超密集可见光通信网络频谱资源分配算法[J]. 光学学报,2019,39(9): 100-109.
[5] 徐文艳,于宏毅,杨森. 以用户为中心的可见光通信协作传输中训练资源分配算法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(1):76-83.
[6] 徐文艳,唐涛,段田东,等. 可见光通信网络节能资源分配策略研究[J]. 光学精密工程,2020,28(7):1577-1587.
[7] 贾科军. 基于光 OFDM 及其相关技术的室内可见光通信研究[M]. 成都:西南交通大学出版社,2019.
[8] 龚宓. 可见光通信 OFDM 调制解调方案研究[D]. 南京:东南大学,2018.
[9] 陈然. 室内照明通信系统的数学模型及其仿真[D]. 南京:南京邮电大学,2013.
[10] 沈振民,蓝天,王云,等. 基于 LED 灯的室内可见光通信系统仿真分析[J]. 红外与激光工程,2015,44(8): 2496-2500.
[11] 周凯福,程伟,窦立超,等. 一种低复杂度的 OFDM 自适应比特功率分配方法[J]. 空军预警学院学报,2019, 33(3):212-215.