光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023020901

基于 OFDM 的多色可见光通信联合子信道与功率资源分配优化算法

陈礼波[1*]，李 野[1,2]，韦君一[1]

（1. 中讯邮电咨询设计院有限公司，郑州 450000；2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100000）

摘 要： 设计了一种联合功率与子信道的资源分配算法，该算法用于正交频分复用（OFDM）的多色可见光通信（VLC）系统。相比于传统的单色光通信，文章所设计的算法可用于多种可见光，包括红、绿、蓝等多种可见光的 OFDM 信号传输。该资源分配算法目的在于最大化可见光传输网络的传输速率，首先对三种不同的可见光进行子信道的优化分配，得到该优化值后对其进行功率分配，以达到最终的目标优化值。仿真结果表明，相比于固定的资源分配算法，该算法可以取得更高的传输速率。

关键词： 可见光通信；资源分配；优化算法；OFDM

中图分类号： TN914 **文章编号：** 1001－5868(2023)02－0294－05

OFDM-based Optimization Algorithm for Joint Sub-channel and Power Resource Allocation for Multi-color Visible Light Communication

CHEN Libo[1], LI Ye[1,2], WEI Junyi[1]

（1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co. LTD, Zhengzhou 450000, CHN;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100000, CHN）

Abstract: A joint power and sub-channel resource allocation algorithm was designed for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based multi-colour visible light communication (VLC) systems. Compared to the conventional monochromatic optical communication system, this algorithm could be used for OFDM signal transmission of multiple visible lights including red, green and blue. The proposed algorithm aimed to maximize the transmission rate of the visible light transmission network. The optimally allocation of sub-channels was first performed for three different visible lights. After obtaining this optimized sub-channel value, the power was allocatied to it in order to achieve the final target optimized value. Simulation results show that the algorithm can achieve higher transmission rate than fixed resource allocation algorithms.

Key words: VLC; resource allocation; optimization algorithm; OFDM

0 引言

为了充分提升可见光频谱利用率，可见光通信网络可以采用正交频分复用（OFDM）的调制方式[1]，结合多色光源同时传输信号，达到传输速率的最大化。对于单一用户来说，系统根据信道状态信息进行比特-功率的自适应分配算法调整子载波的比特数和功率[2]。而对于多用户系统，文献[3-5]提出了子载波以及功率分配算法。然而，以上文献所设计的算法都基于单色可见光传输系统。例如文献

收稿日期：2023－02－09.

* 通信作者：陈礼波 E-mail：chenlb@dimpt.com

[4]研究的是通过功率分配算法提高系统的总传输速率，文献[5]则提出一种自适应的子载波联合功率分配算法。文献[6-9]介绍了异构可见光传输网络的资源分配算法[10-13]，研究了基于 OFDM 的可见光传输网络通信。

对于一个可见光传输系统，白色光通常可以由红、绿、蓝三种颜色按照 1∶1.2∶1 的功率比例组合而成[14]。因此，不同的光可以服务于不同的用户，使得用户之间的干扰更少，系统的可靠性更高。多数研究人员更多关注如何实现多色光传输系统的设计，而忽略其资源分配的问题。

综上所述，本文提出一种基于 OFDM 多色光通信网络的联合子载波和功率资源优化算法，该算法运用拉格朗日松弛，对有约束条件的目标函数引入拉格朗日因子，使得约束条件被目标函数吸收，简化目标函数，之后采用牛顿迭代算法求解目标函数，即可求得最优解。这个优化问题目的在于最大化本通信系统的传输速率，通过引入拉格朗日因子，提出一种高效的迭代算法以解决此优化问题。最后，仿真结果表明多色可见光通信网络的吞吐量可以通过联合子载波与功率优化算法获得并且能得到吞传输速率的最优值。

1 问题描述

1.1 系统模型

基于 OFDM 的多色可见光通信系统如图 1 所示。信源为 LED 灯，多种颜色按照不同的功率比可以混合得到白光灯。对于这个系统，假设总带宽为 B 的信道可以被分为 M 个正交的子信道，每个子信道的带宽为 b_0。此外，子信道的噪声功率为 $N_0/2$。U_i 表示第 i 个用户，则第 i 个用户的传输速率为：

$$r_i=\sum_k n_i^k b_0 \log_2\left(1+\frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right) \tag{1}$$

式中，n_i^k 为第 k 个颜色分配给第 i 个用户的子信道数量；p_i^k 表示第 k 个颜色分配给第 i 个用户的功率，g_i^k 是 $k\sim i$ 的信道增益，第 k 个颜色的光有 M_k 个子载波以及 P_k 数量的功率可进行数据传输。

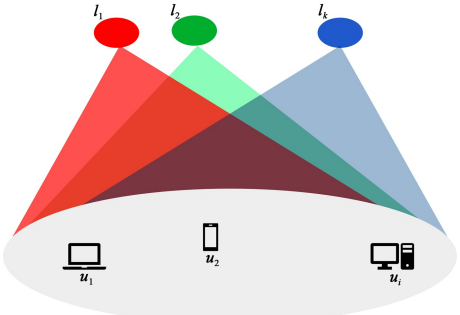


图 1 多色可见光通信模型

1.2 信道模型

本文提出的算法是基于朗伯斯辐射模型的大尺度信道衰减[15]，大尺度信道衰减表示了可见光通信网络的视距传输信道衰减，如图 2 所示。设 β 为发射角，$\beta_{\max}$ 为最大发射角，ω 为入射角，使用朗伯斯辐射模型，在 LED 和第 i 个用户之间的光通信信道的增益可以通过以下方式给出：

$$g_i(\beta)=\frac{(m+1)A}{2\pi d_i^2}\cos(\beta)G_f(\omega)g(\omega)\cos(\omega) \tag{2}$$

其中，朗伯斯辐射阶数 m 由下式给出：

$$m=-\frac{\ln 2}{\ln(\cos\beta_{1/2})} \tag{3}$$

式(2)、(3)中，$\beta_{1/2}$ 为半角发射功率，A 为用户 i 的光电二极管检测区域面积，d_i 是 LED 与第 i 个用户的距离，$G_f(\omega)$表示光学滤波器增益，$g(\omega)$为光学集中器增益，表示为：

$$g(\omega)=\left(\frac{\epsilon}{\sin\omega}\right)^2 \tag{4}$$

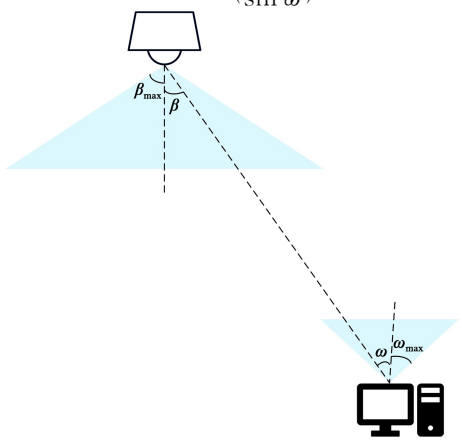


图 2 视距传输模型

2 联合子信道及功率分配优化算法

联合算法首先需要给所有用户分配相同数量的功率，通过优化算法得出所分配的最优化子信道数量。然后将优化后的子信道数量代入功率分配算法中，迭代得出功率分配的最优解。

2.1 子信道分配优化算法

本算法的目的是最大化系统的传输速率，则优化问题可以写为：

$$\max_{n_i} R=\sum r_i=\sum_k\sum_i n_i^k b_0\log_2\left(1+\frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right),$$

$$\forall i \in \mathcal{U} \tag{5}$$

约束条件为：

$$n_i^k = 1, \cdots, M_k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{6}$$

$$\sum_i n_i^k \leqslant M_k, \quad \forall i \in \mathcal{U} \tag{7}$$

$$\sum_i p_i^k \leqslant P_k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{8}$$

$$p_k \geqslant 0, \forall i \in \mathcal{U} \tag{9}$$

$$\sum_i r_i^k \geqslant r_{\min}^k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{10}$$

第 k 色光有 M_k 数量的子信道和 P_k 数量的功率。第一个约束条件表示优化问题的可行空间是离散的。第二个约束条件指出，从第 k 色光所分配到所有用户的子信道总数量不应超过总的可用子信道数量。同样地，第三个条件表示从第 k 色光到分配于用户 i 的总传输功率不应超过 P_k。而约束条件四确保每个用户都被分配到一定数额的功率，最后一个约束条件保证了用户 i 的最低传输速率。

使 $b_i^k = n_i^k b_0$，用于表示第 k 色光分配给用户 i 的带宽量。如前所述，假设所有用户都被分配相同数量的功率，那么 p_i 可以认为是一个常数。即上述优化问题可以简化为：

$$\max_{b_i} R = \sum_k \sum_i b_i^k \log_2\left(1 + \frac{g_i^k p_i^k}{b_i^k N_0}\right), \forall i \in \mathcal{U} \tag{11}$$

约束条件为：

$$\sum_i b_i^k \leqslant B_k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{12}$$

$$b_i^k \geqslant 0, \forall i \in \mathcal{U} \tag{13}$$

$$\sum_i r_i^k \geqslant r_{\min}^k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{14}$$

引入拉格朗日乘积因子，那么上述优化问题可等效于以下函数的最大值：

$$L = \sum_k \sum_i b_i^k \log_2\left(1 + \frac{g_i^k p_i^k}{b_i^k N_0}\right) + \lambda_k\left(B_k - \sum_i b_i^k\right) - \eta_k \sum_i b_i^k + \mu_k\left(\sum_i r_i^k - r_{\min}^k\right) \tag{15}$$

式中，λ_k，η_k，μ_k 为拉格朗乘积因子。对上式的每一个拉格朗日因子求偏导，通过梯度算法可以得到乘积因子的值，之后，再使用 KKT 注水算法，可以得到：

$$\frac{\partial L}{\partial b} = (1 + \mu_k)\left[\log_2\left(1 + \frac{g_i^k p_i^k}{b_i^k N_0}\right) - \frac{g_i^k p_i^k}{\ln 2(b_i^k N_0 + g_i^k p_i^k)}\right] - \lambda_k - \eta_k \tag{16}$$

设 $f(b_i^k)^t = \partial L / \partial b$，最后通过牛顿梯度算法，可以得到 b 的值：

$$(b_i^k)^{t+1} = (b_i^k)^t - \frac{f(b_i^k)^t}{f'(b_i^k)^t} \tag{17}$$

经过 t 次循环，最优解 $\hat{b}_i^k$ 即可获得，然后根据 $\hat{n}_i^k = \hat{b}_i^k / b_0$ 可得到最优分配的子信道数量。

2.2 功率分配优化算法

通过以上的子信道优化算法，可以得到每个用户所分配的子信道数量，然而这是基于每一个分配功率一样的情况下。但是当子信道数量改变，功率也相应的改变。因此，代入优化值 $\hat{n}_i^k$ 则功率优化算法可表示为：

$$\max_{n_i} R = \sum r_i = \sum_k \sum_i \hat{n}_i^k b_0 \log_2\left(1 + \frac{g_i^k p_i^k}{\hat{n}_i^k b_0 N_0}\right), \forall i \in \mathcal{U} \tag{18}$$

约束条件为：

$$\sum_i p_i^k \leqslant P_k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{19}$$

$$p_k \geqslant 0, \forall i \in \mathcal{U} \tag{20}$$

$$\sum_i r_i^k \geqslant r_{\min}^k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{21}$$

与子信道分配的解法类似，首先引入拉格朗日乘积因子，然后使用 KKT 注水算法得到乘积因子的值，最后使用牛顿梯度算法迭代得到最优的功率分配解，迭代公式如下所示：

$$p_i^k = \hat{n}_i^k b_0 N_0 \left[\frac{1}{\ln 2(\delta_i^k + \tau)} - \frac{1}{g_i^k}\right]^+ \tag{22}$$

式中，δ_i^k，τ 均为拉格朗日乘积因子。

2.3 联合子信道与功率分配优化算法

由香农公式可知，传输速率同时受到带宽以及功率的影响，即是说当带宽改变时，分配的功率也会随之改变，反之亦然。通过上述分析，可以得到一个联合资源分配优化算法，具体算法如下所述。

$$\max_{n^*, p^*} R = \sum_k \sum_i n_i^k b_0 \log_2\left(1 + \frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right) \tag{23}$$

约束条件为：

$$\sum_i n_i^k \leqslant M_k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{24}$$

$$\sum_i p_i^k \leqslant P_k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{25}$$

$$\sum_i r_i^k \geqslant r_{\min}^k, \forall i \in \mathcal{U} \tag{26}$$

$$n_i^k > 0, \forall i \in \mathcal{U} \tag{27}$$

$$p_i^k > 0, \forall i \in \mathcal{U} \tag{28}$$

设向量 $\boldsymbol{n} = [n_1^1, \cdots, n_i^k]$ 和 $\boldsymbol{p} = [p_1^1, \cdots, p_i^k]$，引入非负的拉格朗日乘积因子 λ，δ，η，则拉格朗日函数为：

$$L(\boldsymbol{n},\boldsymbol{p},\lambda,\delta,\eta)=\sum_k\sum_i n_i^k b_0\log_2\left(1+\frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right)+\lambda_k\left(M_k-\sum_i n_i^k\right)+\delta_k\left(P_k-\sum_i p_i^k\right)+\sum_k\eta_k\left(\sum_i n_i^k b_0\log_2\left(1+\frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right)-r_{\min}^k\right)-\sum_k\alpha n_i^k-\sum_k\tau p_i^k \tag{29}$$

对于一个给定的(λ,δ,η)，对 L 求 n 和 p 的偏导，有：

$$\frac{\partial L(\boldsymbol{n},\boldsymbol{p},\lambda,\delta,\eta)}{\partial n}=(1+\eta_k)\left[\log_2\left(1+\frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right)-\frac{g_i^k p_i^k}{\ln 2(n_i^k b_0 N_0+g_i^k p_i^k)}\right]-\lambda_k-\alpha \tag{30}$$

以及

$$\frac{\partial L(\boldsymbol{n},\boldsymbol{p},\lambda,\delta,\eta)}{\partial p}=\frac{g_i^k p_i^k(1+\eta_k)}{\ln 2(n_i^k b_0 N_0+g_i^k p_i^k)}-\delta_k-\tau \tag{31}$$

对于给定的(λ,δ,η)，拉格朗日函数 $L(\boldsymbol{n},\boldsymbol{p},\lambda,\delta,\eta)$有唯一最优解$(\boldsymbol{n}^*,\boldsymbol{p}^*)$。拉格朗日函数对于 n 和 p 有严格的凸性质，因此(λ,δ,η)的梯度等效函数为：

$$\left(\frac{\partial L}{\partial\lambda},\frac{\partial L}{\partial\delta},\frac{\partial L}{\partial\eta}\right)=\left(M_k-\sum_i n_i^k,P_k-\sum_i p_i^k,\sum_i n_i^k b_0\log_2\left(1+\frac{g_i^k p_i^k}{n_i^k b_0 N_0}\right)-r_{\min}^k\right) \tag{32}$$

由梯度迭代算法可以求得(λ,δ,η)的值，那么最优变量可由下式求得：

$$p_i^k=n_i^k b_0\left[\frac{1}{\ln 2(\delta_i^k+\tau)}-\frac{1}{g_i^k}\right]^+ \tag{33}$$

联合功率算法如表 1 所述。

表 1 联合子信道与功率分配优化算法

初始化：	赋值给每个初始参数
1：	当 $\sum_i n_i^k\leqslant M_k$ 时，执行
2：	迭代更新拉格朗日乘积因子 λ,μ
3：	设 $f(n_i^k)=\frac{\partial L(\boldsymbol{n},\boldsymbol{p})}{\partial n}$
4：	由下式更新 n_i^k $(n_i^k)^{t+1}=\left[(n_i^k)^t-\frac{f(n_i^k)^t}{f'(n_i^k)^t}\right]^+$
5：	结束循环
6：	当 $\sum_i p_i^k\leqslant P_k$ 时，执行
7：	迭代更新 δ_i^k 以及 p_i^k
8：	$p_i^k=n_i^k b_0\left[\frac{1}{\ln 2(\delta_i^k+\tau)}-\frac{1}{g_i^k}\right]^+$
9：	结束循环
10：	重复步骤 1～9，直至 $r_i^k=r_i^{*k}$ 即算法收敛
11：	返回最优解 $\boldsymbol{n}^*$ 和 $\boldsymbol{p}^*$

2.4 仿真结果分析

参考一个简单的基于 OFDM 可见光通信环境，其中发射端有 3 种可见光，即 $k=3$，接收端包含 3 个用户即 $i=3$。假设待分配的总带宽有 40 MHz，以及传输功率为 5 W。此外，还考虑大尺度的信道衰减情况。作为对比，引入单色光资源分配算法以及固定资源分配算法。单色光的自适应资源分配即当 $k=1$ 时的情况。

图 3 展示了三种算法在不同信噪比下所达到的最高速率。显然地，所有算法都随着信噪比的增加所增加。固定分配算法的传输速率最低，因为所分配给用户的资源都是固定的，因此无法提高资源的利用率，当用户不再使用网络时，资源也仍然会分配给用户，因而造成了资源浪费。由于单色光只有单一光源，因此其所达到的总传输速率也低于联合分配算法。

图 4 显示了三种算法在不同功率下所获得的最高速率。显然，由于固定分配算法分配固定资源，因此其达到的最终速率不随功率变化而变化。联合分配算法充分提高资源的利用率，因此能达到最高传输速率。

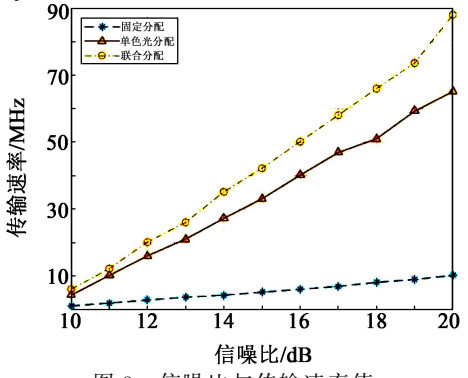


图 3 信噪比与传输速率值

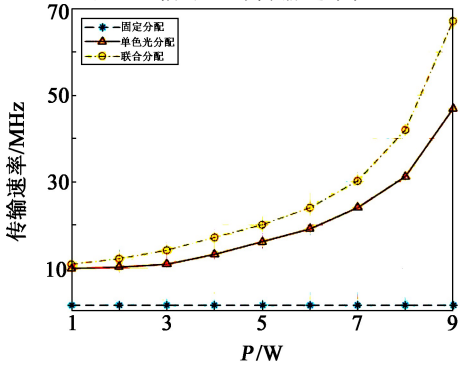


图 4 功率与传输速率值

3 结论

本文设计了一种联合子信道与功率分配的算

法，该算法可用于 OFDM 的多色可见光通信系统。算法以最大化系统的传输速率为优化目标，先进行子信道的分配，通过引入拉格朗日乘积因子，求解拉格朗日函数得到最优的子信道分配数。之后，将得到的子信道解代入功率分配算法中，计算得出相应的功率分配策略。由香农定理可知，子信道随着功率的变化而变化，反之亦然。因此最后将不断迭代循环子信道与功率的分配策略，直至函数达到收敛，即可获得最优值。仿真结果也表明，本算法的资源利用率得到了有效的提高。

参考文献：

[1] Habibi S, Omidi M, Sadat Tabataba F, et al. An overview: Orthogonal frequency division multiplexing techniques for visible light communication systems[C]// 2022 4th West Asian Symposium on Optical and Millimeter-wave Wireless Communications (WASOWC), 2022: 1-6.

[2] Krongold B S, Ramchandran K, Jones D L. Computationally efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems[J]. IEEE Trans. Commun., 2000, 48(1): 23-27.

[3] Na Z, Lv J, Jiang F, et al. Joint subcarrier and sub-symbol allocation-based simultaneous wireless information and power transfer for multiuser GFDM in IoT[J]. IEEE Internet Things J., 2019, 6(4): 5999-6006.

[4] Fu Y, Hong Y, Chen L K, et al. Enhanced power allocation for sum rate maximization in OFDM-NOMA VLC systems [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(13): 1218-1221.

[5] Chahar D, Jani M, Garg P. Performance evaluation of Fibonacci polynomial based power allocation algorithm for NOMA in VLC system[C]// 2021 7th Inter. Conf. on Signal Processing and Communication (ICSC), 2021: 106-110.

[6] Bai B, Deng J, Jin X, et al. Hypergraph based resource allocation algorithms for VLC network with heterogeneous LEDs and varied users[J]. IEEE Photon. J., 2021, 13(4): 1-10.

[7] Zhang R, Cui Y, Claussen H, et al. Anticipatory association for indoor visible light communications: Light, follow me! [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2018, 17(4): 2499-2510.

[8] Guo Y, Xiong K, Lu Y, et al. Achievable information rate in hybrid VLC-RF networks with lighting energy harvesting[J]. IEEE Trans. on Communications, 2021, 69(10): 6852-6864.

[9] Hu C, Wang G, Song S, et al. Experimental demonstration of a novel OFDM-NOMA bit and power loading algorithm for hybrid unicast and broadcast transmission in cooperative VLC systems [C]// 2022 European Conf. on Optical Communication (ECOC), 2022: 1-4.

[10] Yapici Y, Guvenc I. Non-orthogonal multiple access for mobile VLC networks with random receiver orientation[C]// 2019 IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM), 2019: 1-6.

[11] Huang X, Yang F, Pan C, et al. Advanced ADO-OFDM with adaptive subcarrier assignment and optimized power allocation[J]. IEEE Wireless Commun. Lett., 2019, 8(4): 1167-1170.

[12] Deng X, Fan W X, Ma S, et al. Two-dimensional power allocation for optical MIMO-OFDM systems over low-pass channels[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technol., 2022, 71(7): 7244-7257.

[13] Yamashita K, Mano T, Nagasato T, et al. Adaptive resource assignment for multi-user VLC based on pre-distorted ADO-OFDM[C]// 2022 IEEE Inter. Conf. on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia), 2022: 1-4.

[14] Chi N. Visible light communication pre-equalization technology[C]// LED-based Visible Light Communications, 2018: 111-132.

[15] Guzman B G, Serrano A L, Jimenez V P G. Cooperative optical wireless transmission for improving performance in indoor scenarios for visible light communications[J]. IEEE Trans. Consum. Electron., 2015, 61(4): 393-401.

作者简介：

陈礼波(1983—)，男，硕士，高级工程师，从事通信网络咨询规划、设计工作；

李　野(1985—)，男，博士生，工程师，从事 5G 智慧急救、MaaP 平台等的设计研发；

韦君一(1986—)，女，博士，主要研究方向为无线网络虚拟化、无线多网融合，以及移动网络资源分配算法。