

基于有界信道状态信息不确定性的异构 VLC/RF 网络鲁棒能效资源分配算法

辛雅楠¹, 刘期烈¹, 刘倩¹, 陈前斌¹, 薛红梅^{2*}, 李子炎¹, 成奎³

¹重庆邮电大学移动通信技术重点实验室, 重庆 400065;

²河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;

³宜宾学院人工智能与大数据学部, 四川 宜宾 644000

摘要 为解决异构可见光通信(VLC)/射频(RF)网络信道估计误差大和系统能效低的问题,本文提出了一种基于能效最大的鲁棒资源分配算法。在考虑基站最大传输功率约束、用户传输时间约束、系统带宽约束、用户服务质量约束及含有随机信道不确定性的速率中断概率约束的条件下,建立了鲁棒能效资源分配模型。基于 Dinkelbach 方法,将原不确定性优化问题转化成确定性优化问题。基于交替优化算法,将非凸确定性优化问题分解为两个凸优化子问题。仿真结果表明:与非鲁棒算法相比,本文算法的能效提升了 7.3%;与基于功率最小的鲁棒资源分配算法相比,本文算法的鲁棒性提升了 16.7%。

关键词 光通信; 异构可见光通信/射频网络; 鲁棒性; 不完美信道状态信息; 能效最大化

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2306003

1 引言

近年来,随着移动用户数量的迅速增加,如何满足用户对高数据传输速率和稳定频谱日益增长的需求成为一个关键问题。由于频谱资源有限,以往广泛应用的射频(RF)通信技术受到了限制。为此,研究人员提出了一种很有应用前景的室内通信技术——可见光通信(VLC),其以免许许可证频谱、低成本、高安全性、强大的抗电磁干扰能力和高速短距离无线通信等优势,成为能够克服 RF 通信限制并为用户提供更好服务的关键技术^[1-3]。不可忽视的是,在非视线(NLOS)场景中,VLC 系统的性能会受到遮挡物的影响。因此,研究人员将 RF 系统和 VLC 系统相结合提出了混合 VLC/RF 网络^[4-7]。

目前,对混合 VLC/RF 网络资源分配问题的研究主要分为两方面:1)速率最大;2)能效最大。前者的目的在于提高和速率,而后者则主要考虑了系统功耗的影响,旨在平衡系统容量与功率消耗之间的关系。基于双跳异构 VLC/RF 系统,文献[8]考虑了 VLC 系统收集能量的约束条件,以最大化系统和速率。基于混合 VLC/RF 系统,文献[9]研究了功率与时隙分配问题,并提出以用户为中心和以网络为中心的时隙分配

方案,以最大化系统和速率。针对混合 VLC/RF 网络,文献[10]联合负载平衡和功率分配问题,提出了一种在接入点(AP)上分配用户并在用户上分配 AP 功率的迭代算法,以最大化系统和速率。然而,上述工作主要针对提升系统和速率进行了研究,缺乏功率消耗对系统性能影响的讨论。文献[11]基于混合 RF/VLC 异构无线网络,研究了能效最大化情况下的功率和带宽分配问题。基于软件定义的异构 VLC/RF 网络,文献[12]研究了基于能效最大的节能子信道和功率分配问题。基于结合波束成形设计的多用户多输入单输出混合 RF/VLC 异构无线网络,文献[13]研究了基于分式规划的最大化系统能效问题。

上述工作大部分是基于完美信道状态信息进行的,缺乏对不完美信道状态信息的研究。在实际场景中,光线强弱以及环境等变化都会对 VLC 系统的信道状态产生影响,使得 VLC AP 处难以获得完美信道的状态信息。同时,RF 信道也存在频谱感知误差和量化误差等问题,使得 RF 基站处获取到的实际信道状态信息与完美信道状态信息之间存在误差。因此,研究异构 VLC/RF 网络的鲁棒资源分配问题具有重要意义。

本文研究了基于不完美信道状态信息(CSI)的异

收稿日期: 2022-01-12; 修回日期: 2022-02-13; 录用日期: 2022-04-07

基金项目: 重庆市科技创新领军人才支持计划(CSTCCXLJRC201908)、重庆市自然科学基金重点项目(cstc2019jcyj-zdxm0008)、重庆市教委重点项目(KJZD-K201900605)

通信作者: *xuehm_74@163.com

构 VLC/RF 网络鲁棒资源分配算法,以最大化系统能效。主要贡献如下:

1) 建立了一个由 VLC AP 与 RF 基站组成的异构 VLC/RF 网络模型。为保证系统的鲁棒性,提前引入了随机信道不确定性参数。考虑了发射功率约束、传输时间约束、带宽约束、用户服务质量约束及速率中断概率约束,提出了系统总能效最大的资源分配问题。

2) 上述资源分配问题是一个无限维、多变量耦合、分式目标函数的非凸优化问题,不易获得解析解。因此,利用 Dinkelbach 法^[14]将分式形式的目标函数转化为参数相减的形式,并将资源分配问题分解为两个子问题;然后,针对 VLC 系统的非凸优化子问题利用交替优化求解,针对 RF 系统子问题利用拉格朗日对偶分解和次梯度更新的方法求解;最后对本文算法进行了复杂度分析。

3) 仿真结果表明,与功率最小算法、速率最大算法以及非鲁棒算法相比,本文所提算法具有良好的能效性和鲁棒性。

2 系统模型及问题描述

由一个 VLC 子系统和一个 RF 子系统组成的下行异构 VLC/RF 网络如图 1 所示。其中,VLC 子系统包含一个 VLC AP 和 M 个用户,采用时分多址(TDMA)的方式服务用户。RF 系统中包含一个 RF 基站和 N 个用户,采用频分多址(FDMA)的方式服务用户。VLC 子系统和 RF 子系统共用一个回程网络,且每个用户仅由一个子系统提供服务。定义 VLC 服务的用户集合为 $\forall m \in \mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 且配备有光电探测器,定义 RF 服务的用户集合为 $\forall n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 且每个用户配备有单个接收天线。所有的用户均使用正交通道进行通信。

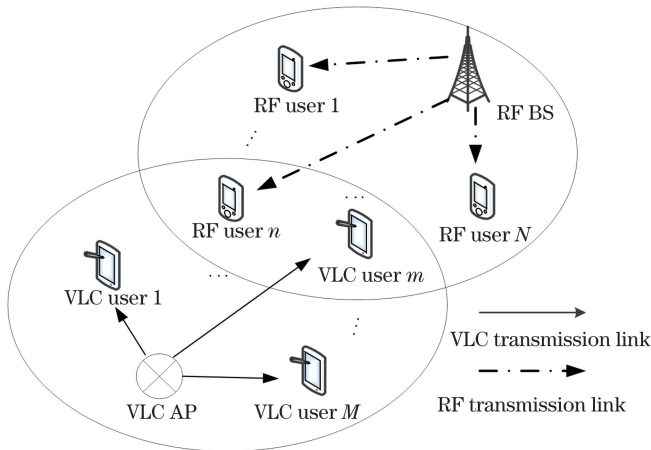


图 1 异构 VLC/RF 网络传输模型

Fig. 1 Transmission model of heterogeneous VLC/RF network

2.1 VLC 子系统模型

VLC 系统用户 m 的接收信号可表示为

$$y_m^v = h_m x_m + n_m, \quad (1)$$

式中: $h_m = h_L h_m^R$ 表示 VLC 系统到用户 m 间的信道增益,其中 h_L 表示朗伯辐射后的路径损失^[15], h_m^R 表示大气湍流因子,遵循 \mathcal{M} 分布^[15-16]; x_m 表示 VLC AP 到用户 m 的传输信号,且满足 $E[|x_m|^2] = 1$; n_m 表示接收机 m 处的噪声信号,且其噪声功率服从均值为 0 方差为 σ_v^2 的高斯分布,即 $n_m \sim N(0, \sigma_v^2)$ 。基于以上可得到用户 m 的接收信噪比为

$$\gamma_m^v = \frac{h_m P_m}{\sigma_v^2}, \quad (2)$$

式中: P_m 表示 VLC 系统分配给用户 m 的传输功率。由于 VLC 系统采用 TDMA 方式进行资源分配,考虑系统中的每个用户所需传输带宽为单位带宽。这里定义用户 m 的传输时间为 t_m ,由香农公式可以得到用户 m 的传输速率为

$$R_m^v = t_m \log_2(1 + \gamma_m^v). \quad (3)$$

从而可将 VLC 系统中所有用户的总传输速率描述为

$$R^v = \sum_{m=1}^M R_m^v.$$

由于 VLC 系统的发射机端不可能提供无限大的传输功率,因此传输功率应该满足

$$\sum_{m=1}^M P_m \leq P_{\max}, \quad (4)$$

式中: P_{\max} 表示 VLC AP 的最大传输功率。定义整个 VLC 系统的传输时间为 T ,则每个用户的传输时间 t_m 满足

$$\sum_{m=1}^M t_m \leq T. \quad (5)$$

2.2 RF 子系统模型

定义 RF 系统用户的接收信号为

$$y_n^r = \sqrt{p_n g_n} s_n + z_n, \quad (6)$$

式中: p_n 和 g_n 分别表示 RF 基站分配给用户 n 的传输功率以及 RF 基站到用户 n 之间的信道增益^[17]; s_n 表示 RF 基站到用户 n 的传输信号,且满足 $E[|s_n|^2] = 1$; z_n 表示接收机 n 处的噪声信号,且其噪声功率服从均值为 0 方差为 σ_r^2 的高斯分布,即 $z_n \sim N(0, \sigma_r^2)$ 。

为了提高用户的公平性,在 RF 系统中采用带宽分配的方式进行资源分配。定义 RF 基站分配给用户 n 的带宽为 B_n ,基于接收信号的形式,可以得到 RF 系统中用户 n 的接收信噪比为

$$\gamma_n^r = \frac{p_n g_n}{B_n \sigma_r^2}. \quad (7)$$

RF 系统采用频分复用的方式来分配资源,因此,根据香农定理,用户 n 的传输速率为

$$R_n^r = B_n \log_2(1 + \gamma_n^r). \quad (8)$$

基于式(8),同时考虑系统的总传输时间,RF 系统所有用户总速率可以描述为 $R^r = T \sum_{n=1}^N R_n^r$ 。

同理,RF 系统的传输功率约束表示为

$$\sum_{n=1}^N p_n \leq p_{\max}, \quad (9)$$

式中: p_{\max} 表示 RF 系统的最大传输功率。

另外,考虑到系统有限的频谱资源,RF 系统带宽应满足

$$\sum_{n=1}^N B_n \leq B_{\max}, \quad (10)$$

式中: B_{\max} 表示 RF 系统的带宽。

2.3 非鲁棒资源分配问题描述

定义 Q_{T_1} 为 VLC 系统照明和数据处理的功率消耗, Q_{T_2} 表示 RF 系统数据处理的功率消耗。考虑到传输功率消耗,可以得到 VLC 系统和 RF 系统的功率消耗分别为

$$Q_1 = TQ_{T_1} + \sum_{m=1}^M t_m P_m, \quad (11)$$

$$Q_2 = TQ_{T_2} + \sum_{n=1}^N p_n. \quad (12)$$

定义系统总功率消耗为 $Q = Q_1 + Q_2$, 系统总速率为 $R = R^r + R^v$ 。为了提高系统的传输速率,降低系统的功率消耗,同时保证所有用户的服务质量(QoS),基于上述介绍,设计了如下能效最大化问题,即

$$\begin{aligned} & \max_{P_m, p_n, t_m, B_n} \frac{R}{Q}, \\ & \text{s. t.} \begin{cases} C_1: \sum_{m=1}^M P_m \leq P_{\max} \\ C_2: \sum_{m=1}^M t_m \leq T_{\max} \\ C_3: \sum_{n=1}^N p_n \leq p_{\max} \\ C_4: \sum_{n=1}^N B_n \leq B_{\max} \\ C_5: R_n^r \geq R_n^{\min} \\ C_6: R_m^v \geq R_m^{\min} \end{cases}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中: C_1 为 VLC 系统最大传输功率约束条件; C_2 为时隙约束条件; C_3 为 RF 系统最大传输功率约束条件; C_4 为 RF 系统带宽约束条件; R_m^{\min} 和 R_n^{\min} 分别为用户 m 和用户 n 的最小需求速率门限值; C_5 和 C_6 是保证用户 QoS 的约束条件。

受约束条件 C_5 和 C_6 的影响,同时到考虑到分式目标函数,式(13)是一个多变量耦合的非凸优化问题,不易求得解析解。在实际场景中有很多不确定的信道干扰,不易获得完美信道状态信息,因此,克服信道的不确定性对于优化问题尤为重要。

2.4 鲁棒资源分配问题描述

RF 系统存在频谱感知误差、量化误差等问题,导致获取到的实际信道状态信息与完美信道状态信息之间往往存在误差。因此,需要考虑信道不确定性对系统性能的影响。根据加性不确定性建模方法^[15],RF 系统的不确定性参数可以描述为

$$g_n = \bar{g}_n + \Delta g_n, \quad (14)$$

式中: g_n 为信道增益; \bar{g}_n 表示 RF 基站处的估计信道增益; Δg_n 表示 RF 基站到用户 n 的信道估计误差,服从均值为 0 方差为 $\sigma_{g,n}^2$ 的高斯分布,即 $\Delta g_n \sim N(0, \sigma_{g,n}^2)$ 。

在实际场景中,光线强弱以及环境等变化都会对 VLC 系统的信道状态产生影响,难以获得完美信道状态信息。因此,需要讨论信道不确定性参数对 VLC 系统性能的影响。VLC 系统不确定性参数描述为

$$h_m^R = \bar{h}_m^R + \Delta h_m^R, \quad (15)$$

式中: \bar{h}_m^R 表示信道的估计值; Δh_m^R 表示 VLC AP 到用户 m 的信道估计误差,服从均值为 0 方差为 $\sigma_{h,m}^2$ 的高斯分布^[18],即 $\Delta h_m^R \sim N(0, \sigma_{h,m}^2)$ 。

结合式(14)和式(15)中信道系数的不确定性,考虑用户的中断概率约束条件,式(13)可重新表示为

$$\begin{aligned} & \max_{P_m, p_n, t_m, B_n} \frac{R}{Q}, \\ & \text{s. t.} \begin{cases} C_1 \sim C_4 \\ \bar{C}_5: P_{\Delta g_n \in \mathfrak{R}_g} \{R_n^r < R_n^{\min}\} \leq \epsilon_n \\ \bar{C}_6: P_{\Delta h_m^R \in \mathfrak{R}_h} \{R_m^v < R_m^{\min}\} \leq \epsilon_m \end{cases}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中: ϵ_m 和 ϵ_n 分别表示用户 m 和用户 n 的中断概率门限; \mathfrak{R}_g 和 \mathfrak{R}_h 分别表示 Δg_n 和 Δh_m^R 的不确定性参数集合。由于 \bar{C}_5 和 \bar{C}_6 是中断概率的形式,无法得到闭式解,因此先将 \bar{C}_5 和 \bar{C}_6 转化成确定性形式,之后再目标函数转化成凸函数进行求解。

3 鲁棒优化问题转化

考虑到式(16)所示的鲁棒资源分配问题是非凸的且难以求解,本节将对速率中断概率约束条件进行转化。为了将不确定性的约束条件 \bar{C}_5 转化为确定性形式,根据式(14)的描述, \bar{C}_5 可以展开成

$$P_{\Delta g_n \in \mathfrak{R}_g} \left\{ B_n \log_2 \left[1 + \frac{p_n (\bar{g}_n + \Delta g_n)}{B_n \sigma_r^2} \right] < R_n^{\min} \right\} \leq \epsilon_n, \quad (17)$$

上式等价于

$$P_{\Delta g_n \in \mathfrak{R}_g} \left\{ \Delta g_n \geq \frac{B_n \sigma_r^2}{p_n} (2^{R_n^{\min}} - 1) - \bar{g}_n \right\} \leq 1 - \epsilon_n. \quad (18)$$

为了将不确定性问题转化为确定性的约束条件,根据 Q 函数的性质,将式(18)转化为

$$\sigma_{g,n} Q^{-1}(1 - \epsilon_n) \geq \frac{B_n \sigma_r^2}{p_n} (2^{R_n^{\min}} - 1) - \bar{g}_n, \quad (19)$$

式中: $Q^{-1}(\cdot)$ 表示 Q 函数的反函数,则有

$$\tilde{R}_n^r \geq R_n^{\min}, \quad (20)$$

式中: $\tilde{R}_n^r = B_n \log_2 \left(1 + \frac{p_n \tilde{g}_n}{B_n \sigma_r^2} \right)$, 其中 $\tilde{g}_n = \bar{g}_n + \sigma_{g,n}$ 。

$Q^{-1}(1-\epsilon_n)$ 。因此, \bar{C}_5 被转化为了确定性凸优化条件。 \bar{C}_6 是个很难转化的中断概率形式。根据光信号的特点, 结合式(15), 将 \bar{C}_6 展开成

$$P_{\Delta h_m^R \in \mathfrak{R}_h} \left\{ t_m \log_2 \left[1 + \frac{h_L (\bar{h}_m^R + \Delta h_m^R) P_m}{\sigma_v^2} \right] < R_m^{\min} \right\} \leq \epsilon_m \quad (21)$$

式(21)可等价于

$$P_{\Delta h_m^R \in \mathfrak{R}_h} \left\{ \Delta h_m^R \geq \frac{(2^{R_m^{\min}/t_m} - 1)\sigma_v^2}{h_L P_m} - \bar{h}_m^R \right\} \leq 1 - \epsilon_m \quad (22)$$

根据 Q 函数的性质, 式(22)可以转化为

$$\sigma_{h,m} Q^{-1}(1 - \epsilon_m) \geq \frac{\sigma_v^2}{h_L P_m} (2^{R_m^{\min}/t_m} - 1) - \bar{h}_m^R \quad (23)$$

经过上述转化后, 令 $\tilde{R}_m^v = t_m \log_2 \left(1 + \frac{P_m \tilde{h}_m^R h_L}{\sigma_v^2} \right)$, $\tilde{h}_m^R = \bar{h}_m^R + \sigma_{h,m} Q^{-1}(1 - \epsilon_m)$, 则有

$$\tilde{R}_m^v \geq R_m^{\min} \quad (24)$$

至此, \bar{C}_6 被转化成了确定性约束条件。结合式(20)和式(24), 可将确定性的鲁棒资源分配问题表示为

$$\begin{aligned} & \max_{P_m, p_n, t_m, B_n} \frac{\tilde{R}}{Q}, \\ & \text{s. t. } \begin{cases} C_1 \sim C_4 \\ \tilde{C}_5: \tilde{R}_n^r \geq R_n^{\min} \\ \tilde{C}_6: \tilde{R}_m^v \geq R_m^{\min} \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $\tilde{R} = \tilde{R}^r + \tilde{R}^v$ 。

4 鲁棒资源分配算法

基于以上转化可知 \tilde{R}_n^r 为凹函数。由于式(25)是分式目标函数, 不易求解, 因此, 首先采用 Dinkelbach 法^[14], 引入辅助变量 λ , 将目标函数转化为参数相减的形式, 即

$$F(\lambda) = \max_{P_m, p_n, t_m, B_n} \tilde{R} - \lambda Q \quad (26)$$

由于 VLC 子系统中的 P_m 和 t_m 存在耦合关系, RF 子系统中的 p_n 和 B_n 存在耦合关系, 因此将原问题分解为两个子问题进行求解。为了解除 VLC 子系统中变量之间的耦合关系, 本文采用交替迭代的方法。同时, 由于 RF 子问题是一个凸优化问题, 因此本文使用拉格朗日对偶分解法进行求解。

4.1 求解 VLC 系统的最优解 P_m 和 t_m

根据式(25)和式(26)分解出的关于求解 VLC 子系统传输功率 P_m 和时间 t_m 的问题为

$$\begin{aligned} & \max_{P_m, t_m} \sum_{m=0}^M \tilde{R}_m^v - \lambda Q_1, \\ & \text{s. t. } C_1, C_2, \tilde{C}_6. \end{aligned} \quad (27)$$

根据给定的 t_m^* 的最优解, 传输功率 P_m 的优化问题为

$$\begin{aligned} & \max_{P_m} \sum_{m=0}^M \tilde{R}_m^v - \lambda Q_1, \\ & \text{s. t. } \begin{cases} C_1: \sum_{m=1}^M P_m \leq P_{\max} \\ \tilde{C}_6: t_m^* \log_2 \left[1 + \frac{(\bar{h}_m^R) P_m}{\sigma_v^2} \right] < R_m^{\min} \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

由于 \tilde{C}_6 为非凸约束, 因此, 基于拉格朗日对偶原理求解 P_m 的最优解。式(28)可以表示为

$$\begin{aligned} L(P_m, \mu, \beta_m) &= \sum_{m=0}^M \tilde{R}_m^v - \lambda Q + \\ & \mu \left(P_{\max} - \sum_{m=1}^M P_m \right) + \beta_m (\tilde{R}_m^v - R_m^{\min}), \end{aligned} \quad (29)$$

式中: μ 和 β_m 是对应约束条件 C_1 和 \tilde{C}_6 的拉格朗日乘子, 且满足 $\mu \geq 0, \beta_m \geq 0$ 。式(29)的对偶问题为

$$\begin{aligned} & \min_{\mu, \beta_m} H(\mu, \beta_m), \\ & \text{s. t. } \mu \geq 0, \beta_m \geq 0, \end{aligned} \quad (30)$$

则有

$$H(\mu, \beta_m) = \max_{P_m, t_m^*} L(P_m, \mu, \beta_m) \quad (31)$$

由卡罗需-库恩-塔克(KKT)^[19] 条件并结合式(29)可得 P_m 的最优解为

$$P_m^* = \left[\frac{t_m (1 + \beta_m)}{(\lambda t_m + \mu) \ln 2} - \frac{\sigma_v^2}{\tilde{h}_m^R h_L} \right]^+, \quad (32)$$

式中: $[x]^+ = \max(0, x)$ 。利用梯度下降法更新拉格朗日乘子的值, 即

$$\mu^{i+1} = \left[\mu^i - d_1 \left(P_{\max} - \sum_{m=1}^M P_m \right) \right]^+, \quad (33)$$

$$\beta_m^{i+1} = \left[\beta_m^i - d_6 (\tilde{R}_m^v - R_m^{\min}) \right]^+, \quad (34)$$

式中: i 代表迭代次数; d_1 和 d_6 表示拉格朗日乘子更新步长。

将得到的最优 P_m^* 代入式(27), 则求解 t_m 的优化问题可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{t_m} \sum_{m=0}^M \tilde{R}_m^v - \lambda Q_1, \\ & \text{s. t. } \begin{cases} C_2: \sum_{m=1}^M t_m \leq T_{\max} \\ \tilde{C}_6: t_m \log_2 \left[1 + \frac{(\bar{h}_m^R) P_m^*}{\sigma_v^2} \right] < R_m^{\min} \end{cases} \end{aligned} \quad (35)$$

式(35)中仅含有 t_m 一个变量, 故该式是关于时间 t_m 的线性规划问题。因此, 采用单纯形算法^[20] 进行求解。

4.2 求解 RF 系统的最优解 p_n 和 B_n

由式(25)和式(26)分解出的 RF 子系统传输功率 P_n 和带宽 B_n 分配的子问题为

$$\max_{p_n, B_n} \sum_{n=1}^N \tilde{R}_n^r - \lambda Q_2, \text{ s. t. } C_3, C_4, \tilde{C}_5. \quad (36)$$

式(36)是个凸优化问题,采用拉格朗日对偶分解法进行求解。考虑到 p_n 和 B_n 耦合,应用 KKT 条件不易求得 B_n 的闭式解,所以采用连续凸逼近(SCA)算法^[21]求解 B_n 的值。 \tilde{R}_n^r 的下界为

$$\tilde{R}_n^r = B_n \log_2(1 + \tilde{r}_n^r) \geq B_n [a_n \log_2(\tilde{r}_n^r) + b_n] = \hat{R}_n^r, \quad (37)$$

式中: $\tilde{r}_n^r = \frac{p_n \tilde{g}_n}{B_n \sigma_r^2}$ 。式(37)成立的条件为

$$a_n = \frac{\tilde{r}_n^r}{1 + \tilde{r}_n^r}, \quad (38)$$

$$b_n = \log_2(1 + \tilde{r}_n^r) - \frac{\tilde{r}_n^r}{1 + \tilde{r}_n^r} \log_2(\tilde{r}_n^r). \quad (39)$$

结合式(37)可知式(36)的拉格朗日函数为

$$L(p_n, B_n, \varphi, \omega, \alpha_n) = \hat{R}_n^r - \lambda Q_2 + \omega \left(p_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n \right) + \varphi \left(B_{\max} - \sum_{n=1}^N B_n \right) + \alpha_n (\tilde{R}_n^r - R_n^{\min}), \quad (40)$$

式中: $\omega, \varphi, \alpha_n$ 分别表示对应约束条件 C_3, C_4, \tilde{C}_5 的拉格朗日乘子,且满足 $\omega \geq 0, \varphi \geq 0$ 和 $\alpha_n \geq 0$ 。应用 KKT 条件,求出 p_n 和 B_n 的最优解分别为

$$p_n^* = \left[\frac{B_n (1 + \alpha_n)}{(\lambda + \omega) \ln 2} - \frac{B_n \sigma_r^2}{\tilde{g}_n} \right]^+, \quad (41)$$

$$B_n^* = \left[\frac{p_n \tilde{g}_n}{\left(2^{\frac{\varphi}{1 + \alpha_n} + \frac{\alpha_n}{\ln 2}} - 1 \right) \sigma_r^2} \right]^+, \quad (42)$$

式中: $[x]^+ = \max(0, x)$ 。拉格朗日乘子更新表达式为

$$\omega^{i+1} = \left[\omega^i - d_3 \left(p_{\max} - \sum_{n=1}^N p_n \right) \right]^+, \quad (43)$$

$$\varphi^{i+1} = \left[\varphi^i - d_4 \left(B_{\max} - \sum_{n=1}^N B_n \right) \right]^+, \quad (44)$$

$$\alpha_n^{i+1} = \left[\alpha_n^i - d_5 (\tilde{R}_n^r - R_n^{\min}) \right]^+, \quad (45)$$

式中: d_3, d_4, d_5 均表示拉格朗日乘子步长。基于中断概率的鲁棒能效资源分配算法步骤如图 2 所示。

Initialization: $P_m, p_n, t_m, B_n, R_n^{\min}, R_m^{\min}, M, N$; auxiliary variable: λ ; upper bound of error estimation: δ ; maximum number of iterations for the outer layer: L ; convergence precision: ε, δ ; initialize outer iterations $l = 0$

1) **while** $\left| \frac{\hat{R}(l)}{Q(l)} - \lambda(l-1) \right| > \delta$ or $l \leq L$, **do**

2) Initializes the Lagrange multiplier $\omega, \varphi, \alpha_n, \beta_m, \mu$ and step length d_1, d_3, d_4, d_5, d_6 ; the maximum number of iterations of the inner layer I ; initialize inner iterations $i = 0$;

3) **While** all Lagrange multipliers converge to an accuracy greater than ε and $i \leq I$, **do**

4) **for** $m = 1:1:M$

5) Solve equation (28) according to the given time t_m^* to obtain the optimal transmit power P_m^* ;

6) Solve equation (35) according to the optimal transmit power P_m^* to obtain the optimal time t_m^* ;

7) Update Lagrange multipliers μ and β_m according to equations (33) and (34);

8) **end for**

9) **for** $n = 1:1:N$

10) **while** both a_n and b_n have greater convergence accuracy than δ , **do**

11) Update transmission power p_n and bandwidth B_n according to equations (41) and (42);

12) Update Lagrange multipliers $\omega, \alpha_n, \varphi$ according to equations (43) - (45);

13) **end while**

14) **end for**

15) Update $l = l + 1$ and $\lambda(l) = \frac{\hat{R}(l-1)}{Q(l-1)}$;

16) **end while**

17) **end while**

图 2 基于迭代的鲁棒能效优化算法

Fig. 2 Robust energy efficiency optimization algorithm based on iteration

4.3 计算复杂度

假设更新 λ 和拉格朗日迭代的最大次数分别为 L 和 I ,更新拉格朗日乘子 μ 和 β_m 需要 $O(M)$ 次运算,更新 α_n, ω 和 φ 需要 $O(N)$ 次运算,采用连续凸逼近算法更新 a_n 和 b_n 需要 $O(K)$ 次运算。由以上假设和分析可以得出所提算法的计算复杂度为 $O(LIMNK)$ 。

5 仿真结果与分析

本节针对异构 VLC/RF 网络所提的能效优化算法进行仿真分析。为验证本文所提算法的有效性,在相同的仿真条件下,将传统非鲁棒资源分配算法、基于速率最大的鲁棒资源分配算法以及基于功率最小的鲁

棒资源分配算法进行了对比。假设 $Q_{T_1} = 4 \text{ W}$, $Q_{T_2} = 6.7 \text{ W}$ ^[7], VLC 系统和 RF 系统的估计误差分别为 $\sigma_{h,m}^2 = 0.01$ 和 $\sigma_{g,n}^2 = 0.01$, 中断概率门限为 0.1 ^[21-22]。定义 $h_L = I_0 \cos^n(\theta) \cos(\varphi/r^2)$, 其中 $I_0 = I(\theta = 0) = (\mu + 1)\Phi/(2\pi)$ 为发光强度, $\mu = -1/\log_2(\cos \theta_{\max})$ 为朗伯指数^[23]。其余仿真参数的取值参考文献[11, 22-24], 如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| Parameter | Numerical value | Parameter | Numerical value |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| M | 2 | T_{\max}/s | 10 |
| N | 2 | l_m/km | 1 |
| B_{\max}/MHz | 10 | η | 6 |
| P_{\max}/W | 1 | $R_n^r/(Mbit \cdot s^{-1})$ | 2 |
| p_{\max}/W | 1 | $R_m^r/(Mbit \cdot s^{-1})$ | 2 |
| θ_{\max} | 60° | I_0/cd | 9.5 |

图 3 给出了 VLC AP 在不同最大发射功率下的能效收敛性能。可以看出, 系统能效随着迭代次数的增加而增大, 且经过两次迭代后开始收敛, 具有良好的收敛性。VLC AP 的最大传输功率越大, 系统的能效越大。这是因为最大传输功率越大, 用户就可以使用更大的传输功率来处理数据, 提高了数据的传输速率, 从而提高了能效。

图 4 分别给出了不同算法下 RF/VLC 信道估计误差与中断概率的关系。由图 4 可知, 随着 RF/VLC 子系统估计误差的增加, 中断概率增大。因为估计误差越大, 信道增益实际值与估计值相差得越大, 系统用

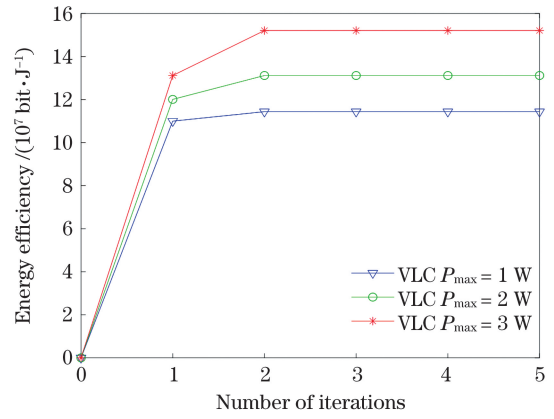


图 3 迭代次数收敛图

Fig. 3 Convergence diagram of iteration times

户发生中断的概率越大。在图 4(a)和图 4(b)中, 基于速率最大的鲁棒资源分配算法的中断概率最低, 本文所提鲁棒资源分配算法的中断概率次之, 而基于功率最小的鲁棒资源分配算法的中断概率最高且超过了中断概率阈值。在图 4(a)中, 当 RF 信道误差为 0.03 时, 所提算法的中断概率为 0.10, 而基于功率最小的鲁棒资源分配算法的中断概率为 0.12。通过计算可得所提算法的鲁棒性与基于功率最小的鲁棒资源分配算法相比提升了 16.7%。这是因为本文所提鲁棒资源分配算法提前考虑了信道估计误差的不确定性, 减小了用户发生中断的概率。同时, 由于本文定义的中断事件是指用户传输速率不满足最小需求速率约束条件的情况, 而基于速率最大的鲁棒资源分配算法的目标函数是最大化系统总速率, 该约束条件对其影响较小, 因此, 中断概率最低的是基于速率最大的鲁棒资源分配算法。

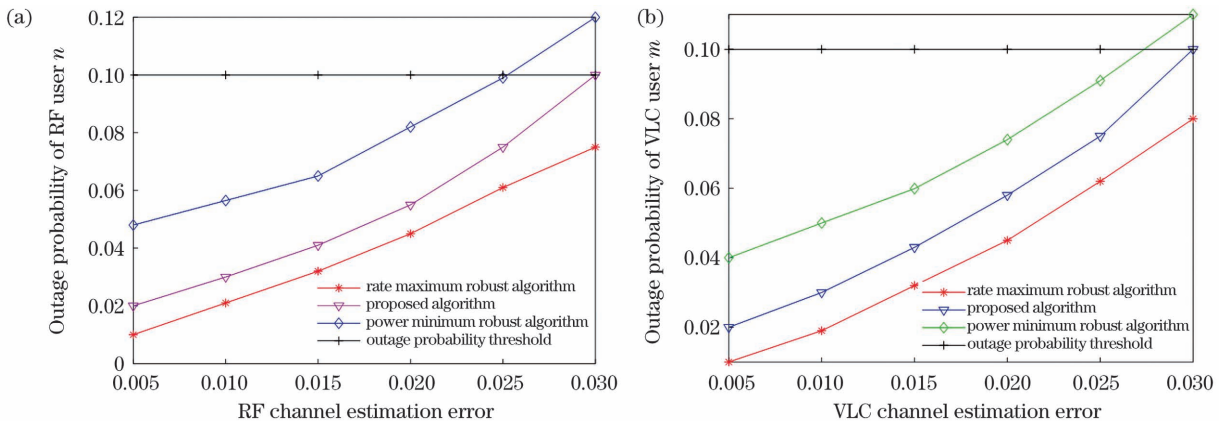


图 4 信道估计误差对中断概率的影响。(a) RF 信道估计误差的影响; (b) VLC 信道估计误差的影响

Fig. 4 Influence of channel estimation error on outage probability. (a) Effect of RF channel estimation error; (b) effect of VLC channel estimation error

图 5 给出了在 RF 信道估计误差不同的情况下 VLC 信道估计误差对能效的影响。可见, 随着 VLC 信道估计误差增大, 能效逐渐增大。此外, 在 VLC 信道估计误差相同的情况下, 随着 RF 信道估计误差增大, 能效也逐渐增大。这是因为增大信道不确定性参数会导致信噪比减小, 而系统传输功耗相应也会降低,

因此系统能效增大。

图 6 给出了不同 VLC 中断概率门限条件下 RF 中断概率门限与能效的关系。可以观察到, 在相同的 VLC 中断概率门限条件下, 随着 RF 中断概率门限增大, 系统能效逐渐减小。同时, 在相同的 RF 中断概率门限条件下, 增大 VLC 中断概率门限, 系统的能效也

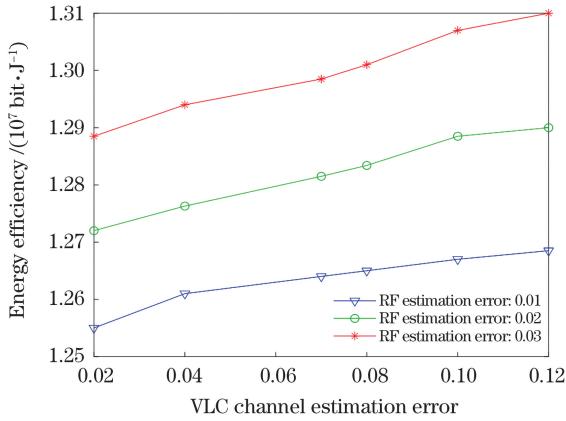


图 5 VLC 信道估计误差对能效的影响

Fig. 5 Effect of VLC channel estimation error on energy efficiency

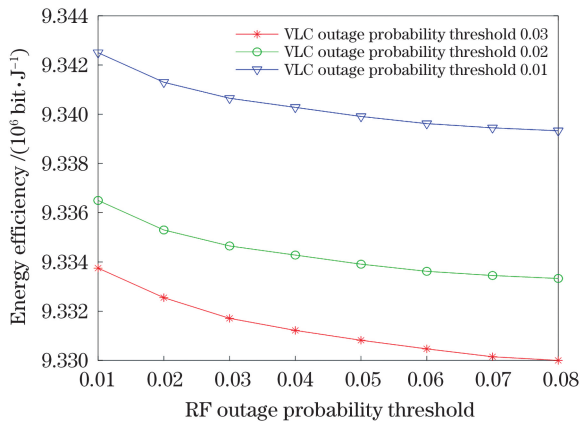


图 6 RF 中断概率门限对能效的影响

Fig. 6 Effect of RF interruption probability threshold on energy efficiency

会降低。这是因为当中断概率门限增大时,为了避免用户发生中断,系统会以功耗为代价来提高传输速率,因此系统的总能效降低。

图 7 给出了不同算法下系统能效与用户最小需求速率之间的关系。从图中可以看出,随着用户最小需求速率增大,4 种算法下的系统能效均缓慢减小。这是因为当用户最小需求速率较小时,系统能效不受速率需求约束的影响;但是随着最小需求速率增大,系统会使用更大的传输功率来满足用户需求速率,此时功率的消耗比例大于速率提升的比例,因此系统的总能效下降。在相同的条件下,本文鲁棒算法提前考虑了信道误差对传输的影响,能效为 7.725×10^7 bit/J,而传统非鲁棒资源分配算法的能效为 7.2×10^7 bit/J。通过计算可以发现本文算法的能效较传统非鲁棒资源分配算法提高了 7.3%。传统非鲁棒资源分配算法会受到信道误差的影响,能效次于鲁棒算法^[13],而基于功率最小的鲁棒资源分配算法虽然节约了功耗,但对速率的提升是有限的,故能效最低。

6 结 论

本文研究了基于不完美信道状态信息的异构

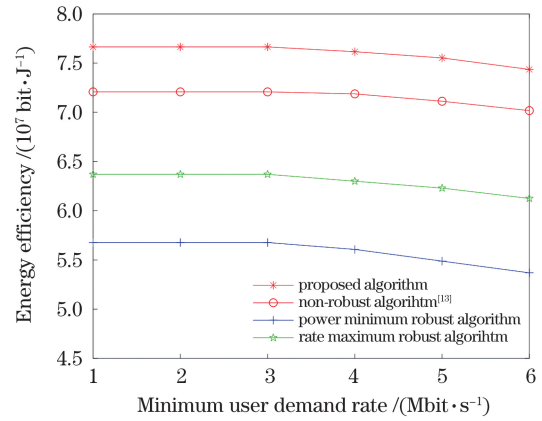


图 7 不同算法下用户最小需求速率对能效的影响

Fig. 7 Effect of minimum user demand rate on energy efficiency under different algorithms

VLC/RF 网络,在满足最大传输功率、系统时隙、带宽以及最小需求速率的条件下,针对 VLC 系统和 RF 系统的传输功率、VLC 系统的传输时间和 RF 系统的带宽分配问题进行了联合优化,以追求系统能效最大化;针对所提出的优化问题建立相应的模型,基于 Dinkelbach 方法将目标函数转化为参数相减的形式,基于交替优化算法将资源分配问题分解为两个子问题;基于拉格朗日对偶原理求得局部最优解,并对所提算法进行了复杂度分析。仿真实验验证了所提算法具有较高的能效和良好的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] Yang H L, Chen C, Zhong W D. Cognitive multi-cell visible light communication with hybrid underlay/overlay resource allocation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30 (12): 1135-1138.
- [2] 陈泉润, 虞翔, 崔文楠, 等. 基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006003. Chen Q R, Yu X, Cui W N, et al. Visible-light communication and performance analysis based on medium- and short-distance inter-satellite links [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (10): 1006003.
- [3] 迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001. Chi N, Lu X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
- [4] Pathak P H, Feng X T, Hu P F, et al. Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047-2077.
- [5] Wu S E, Wang H G, Youn C H. Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications [J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 41-45.
- [6] Kim H S, Kim D R, Yang S H, et al. An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 134-144.
- [7] Wang F, Wang Z C, Qian C, et al. Efficient vertical handover scheme for heterogeneous VLC-RF systems [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(12): 1172-1180.
- [8] Rakia T, Yang H C, Gebali F, et al. Optimal design of dual-hop VLC/RF communication system with energy harvesting [J].

- IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 1979-1982.
- [9] Amjad M, Qureshi H K, Hassan S A, et al. Optimization of MAC frame slots and power in hybrid VLC/RF networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21653-21664.
- [10] Obeed M, Salhab A M, Zummo S A, et al. Joint optimization of power allocation and load balancing for hybrid VLC/RF networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(5): 553-562.
- [11] Kashef M, Ismail M, Abdallah M, et al. Energy efficient resource allocation for mixed RF/VLC heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 883-893.
- [12] Zhang H J, Liu N, Long K P, et al. Energy efficient subchannel and power allocation for software-defined heterogeneous VLC and RF networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(3): 658-670.
- [13] Hsiao Y C, Wu Y C, Lin C. Energy-efficient beamforming design for MU-MISO mixed RF/VLC heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(14): 3770-3784.
- [14] Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming [J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.
- [15] Wang J Y, Wang J B, Zhu J X, et al. On the BER performance of relay-aided free-space optical communications in the presence of input-dependent noise[C]//2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), October 11-13, 2017, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [16] 赵嘉琦, 许银帆, 李洁慧, 等. 强背景光下可见光大气湍流信道建模及分集接收技术[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0301001. Zhao J Q, Xu Y F, Li J H, et al. Turbulence channel modeling of visible light communication under strong background noise and diversity receiving technologies [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0301001.
- [17] Yang H L, Alphones A, Zhong W D, et al. Learning-based energy-efficient resource management by heterogeneous RF/VLC for ultra-reliable low-latency industrial IoT networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5565-5576.
- [18] Al Hammadi A, Muhaidat S, Sofotasios P C, et al. A robust and energy efficient NOMA-enabled hybrid VLC/RF wireless network [C] // 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 15-18, 2019, Marrakesh, Morocco. New York: IEEE Press, 2019.
- [19] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [20] Sentelle C, Anagnostopoulos G C, Georgiopoulos M. Efficient revised simplex method for SVM training [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(10): 1650-1661.
- [21] Xu Y J, Li G Q, Yang Y, et al. Robust resource allocation and power splitting in SWIPT enabled heterogeneous networks: a robust minimax approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10799-10811.
- [22] Al-Khori J, Nauryzbayev G, Abdallah M M, et al. Joint beamforming design and power minimization for friendly jamming relaying hybrid RF/VLC systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 7902718.
- [23] 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2536-2540. Ding D Q, Ke X Z. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2536-2540.
- [24] Kashef M, Abdallah M, Al-Dhahir N. Transmit power optimization for a hybrid PLC/VLC/RF communication system [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(1): 234-245.

Robust Energy Efficiency Resource Allocation Algorithm for Heterogeneous VLC/RF Network Based on Bounded Channel State Information Uncertainty

Xin Yanan¹, Liu Qilie¹, Liu Qian¹, Chen Qianbin¹, Xue Hongmei^{2*}, Li Ziyang¹, Cheng Kui³

¹Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

²School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

³Faculty of Artificial Intelligence and Big Data, Yibin University, Yibin 644000, Sichuan, China

Abstract

Objective Recently, with the rapid increase in mobile devices and applications, how to meet people's increasing demand for wireless data has become a hotly debated issue. Due to its many inherent benefits, including license-free spectrum, low cost, high security, strong antielectromagnetic interference capability, and high-speed short-range wireless communication, the visible light communication (VLC) system has received a lot of attention. The performance of the VLC system will be significantly impacted by non-line-of-sight, and the radio frequency system must also take into account the restricted spectrum resources despite having the advantage of wide coverage. Therefore, combining the characteristics of the RF system and the VLC system, a heterogeneous VLC/RF hybrid network is proposed.

Methods An energy efficiency (EE) maximization-based resilient resource allocation algorithm is proposed to address imperfect channel state information (CSI) and low system EE for a heterogeneous VLC/radio frequency (RF) network with channel uncertainty. Considering the constraints of the maximum transmit power of the VLC access point (AP) and the RF AP, the transmit time of each user, the system band, the quality-of-service requirement of VLC and RF users, and the rate outage probability constraint with random channel uncertainty, a robust efficiency maximization resource allocation problem is established under random channel uncertainties based on rate outage probability. Using Dinkelbach's method, the original optimization problem based on the outage probability is converted into an equivalent deterministic one, which is transformed into two convex optimization subproblems using the alternating optimization algorithm. This

thesis proposed an EE maximization algorithm based on alternate iteration.

Results and Discussions The performance of the proposed strategy for the heterogeneous VLC/RF hybrid network is simulated and examined using MATLAB. The higher the maximum transmission power of VLC AP, the higher the system's EE (Fig. 3). As the RF/VLC subsystem estimation error increases, the outage probability increases. Because the larger the estimation error, the larger the difference between the actual value of the channel gain and the estimated value, and the probability of system user interruption increases. Moreover, the rate-maximum robust algorithm has the lowest outage probability, followed by the proposed robust resource allocation algorithm, while the power-minimum robust algorithm has the highest outage probability over threshold. The power-minimum algorithm is 16.7% more robust than the algorithm proposed in this thesis (Fig. 4). In the RF subsystem, EE increases with the channel estimation error. Additionally, the EE increases with the increase of RF channel estimation error under the same VLC channel estimation error condition (Fig. 5). Under the same VLC outage probability threshold condition, the system EE also decreases with the increase in the RF outage probability threshold. Simultaneously, under the condition of the same RF interruption probability threshold, if the VLC interruption probability threshold increases, the EE of the system will also decrease (Fig. 6). With the increase in the user's minimum demand rate, the system EE of the four algorithms decreases slowly. The system EE is not affected by the rate demand constraint because the user's minimum demand rate is small. However, as the minimum required rate increases, the system will use a larger transmission power to meet the user rate. At this time, the power consumption ratio is greater than the rate increase ratio, thus resulting in a decrease in the overall EE of the system (Fig. 7).

Conclusions This thesis studies a heterogeneous VLC/RF network based on imperfect CSI. Under the conditions of maximum transmission power, system time slot, bandwidth, and minimum required rate, this thesis analyzes the transmission power of the VLC and RF systems and the transmission time of the VLC system. To maximize the EE of the system, a joint optimization with the RF system's bandwidth allocation problem was performed. A corresponding model was created for the proposed optimization problem, and the objective function was then transformed into the form of parameter subtraction using the Dinkelbach method. The problem was then solved using the alternating optimization algorithm. The problem is decomposed into two subproblems; the locally optimal solution is obtained based on the Lagrangian duality principle, and the complexity of the proposed algorithm is analyzed. Simulations verify that the proposed algorithm has high EE and good robustness.

Key words optical communications; heterogeneous visible light communication/radio frequency networks; robustness; imperfect channel state information; energy efficiency maximization