

多用户多载波无线携能通信系统的上下行联合资源分配

崔苗 喻鑫 李学易 张广驰* 刘怡俊

(广东工业大学信息工程学院 广州 510006)

摘要: 无线携能通信(SWIPT)技术是解决无线网络能量受限问题的有效方法, 该文研究一个由基站(BS)和多用户组成的多载波SWIPT系统, 其上行和下行链路均采用正交频分复用(OFDM)技术。在下行链路中, 基站向用户同时进行信息与能量传输; 在上行链路中, 用户利用从基站接收的能量向基站回传信息。该文以最大化上下行加权和速率为目标, 联合优化上行和下行的子载波分配和功率分配, 提出基于拉格朗日对偶法和椭球法的最优联合资源分配算法。计算机仿真结果证实了该算法的有效性。

关键词: 无线携能通信; 多用户; 资源分配; 正交频分复用

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)06-1359-06

DOI: [10.11999/JEIT180762](https://doi.org/10.11999/JEIT180762)

Joint Downlink and Uplink Resource Allocation for Multi-user Multi-carrier Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Systems

CUI Miao YU Xin LI Xueyi ZHANG Guangchi LIU Yijun

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) is an effective technique to solve the energy limitation problem of wireless networks. A multi-carrier SWIPT communication system that includes one Base Station (BS) and multiple users is investigated. Both the uplink and downlink of the system apply the OFDM transmission. In the downlink, the BS transmits information and power over different subcarriers to the users simultaneously. In the uplink, the user transmits information to the BS by using the power harvested from the BS in the downlink. This paper aims to maximize the weighted sum of the downlink and uplink achievable rates by jointly optimizing subcarrier allocation and power allocation of the uplink and downlink. An optimal algorithm is proposed to solve this resulted optimization problem, which is based on the Lagrange duality method and the ellipsoid method. The performances of the proposed algorithm are verified by computer simulations.

Key words: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT); Multi-user; Resource allocation; OFDM

1 引言

在目前信息化时代, 无线通信技术快速发展, 衍生了一系列如近场通信、车间通信、设备间通

信、无线传感器网络等网络系统, 这些网络系统的运用给人们的生活带来便利, 但与此同时, 网络系统中设备的能量供应问题同样制约着系统的发展。能量成为了这些无线通信系统运行的瓶颈。为了解决网络能量受限问题, 研究者们做了大量的工作。在众多的能量收集系统中, 无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)技术备受关注^[1-13]。

无线携能通信技术是无线信息传输技术与无线能量传输技术相结合的一个前沿研究方向。利用电磁波既能承载信息又能承载能量的特性, 实现信息与能量的同时传输, 即在信息传输的同时完成能量的传输与收集, 从而提高频谱的利用率。文献[1]最

收稿日期: 2018-08-03; 改回日期: 2019-03-05; 网络出版: 2019-03-28

*通信作者: 张广驰 gezhang@gdut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571138), 广东省科技计划(2017B090909006, 2016B090904001, 2016B090918031, 2018A050506015), 广州市科技计划(201803030028)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571138), The Science and Technology Project of Guangdong Province (2017B090909006, 2016B090904001, 2016B090918031, 2018A050506015), The Science and Technology Project of Guangzhou City (201803030028)

先对无线携能通信技术进行了研究。文献[2]对时分和能分两种策略下的通信性能进行了研究。文献[3]研究了一个较为经典的方案,特别之处在于,接收信号被分成两个部分,一部分用于信息解码,另一部分则用于能量收集。文献[4]研究了基于无线携能的保密通信系统,采用无线供电协同干扰技术来干扰窃听者以提高系统的保密性。文献[5]研究了基于无线携能的中继通信系统,系统模型由一个源端、中继、信息和能量接收器以及窃听者组成,通过设计源端到中继的波束成形向量来最大化系统的安全速率。

正交频分复用(OFDM)多载波技术是无线通信中提高频谱利用率和抗多径干扰能力的关键技术。文献[6]研究了基于解码与转发的多中继OFDM通信系统,提出了载波配对的功率策略来最大化信息传输速率。文献[7]研究了基于放大与转发的多中继OFDM通信系统,通过设计源端与中继之间的预编码矩阵来最大化系统容量。文献[8]研究了单用户OFDM系统的下行链路资源分配问题,文中将下行子载波分成两个部分,在最小信息传输速率的约束下,通过优化子载波分配集合和功率来最大化用户的收集能量。文献[9]研究了多用户OFDM系统的下行链路资源分配问题,文中将下行子载波分成两个部分,在每个用户最小接收能量的约束下,通过优化子载波分配集合和功率来最大化用户的信息传输速率。文献[10]研究了大规模MIMO技术和毫米波技术,提出了射频通信系统中计算和通信的联合优化算法。文献[11]研究了在动态服务质量(QoS)约束下,MIMO-OFDM系统中的能量效率提升问题。文献[12]提出了一种能量效率评估方法,用于计算泊松分布网络小区中业务负载和功率消耗问题。文献[13]研究了无线供电混合多址接入网络的资源分配问题。

本文研究多用户多载波无线携能通信系统,将所有子载波分成两个集合,分别用于传输信息和传输能量,这种策略可以有效减小系统应用的复杂度。与只考虑下行链路的文献[8,9]不同,本文同时考虑无线携能通信系统的上行和下行链路,此系统模型可适用于能量受限的无线传感网络。本文通过研究联合优化上下行链路的子载波分配和功率分配,最大化系统的上下行加权和速率。采用上下行加权和速率作为优化目标的原因是,它更具有通用性。解决了最大化上下行加权和速率问题,就相当于解决了最大化上下行和速率、最大化上行速率、最大化下行速率等多个问题,因为这几个问题等价于加权因子 w 取值不同的最大化上下行加权和速率问题。由于子载波集合是离散的,本文所研究的资源分配问题是非凸优化问题。本文采用拉格朗日对

偶方法,并结合子载波分配和功率分配的交替更新,提出了求解该问题的最优算法。最后,用计算机仿真证实了所提算法的有效性。

2 系统模型

如图1所示,本文考虑一个多用户无线携能通信系统,该系统由1个基站和 K 个用户组成。基站与用户分别只配备单天线¹⁾。系统带宽被平均分成 N 份,子载波集合用 Ω 来表示,其中 $\Omega \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$,每条子载波只服务于1个用户。在下行通信链路中,基站对用户进行信息与能量同时传输,子载波一部分用来信息传输,用 G_{DI} 来表示,另一部分则用来能量传输,用 G_{DE} 表示。其中 $G_{DI,k}$, $G_{UI,k}$ 分别表示用户 k 在下行、上行链路中分配的子载波集合。

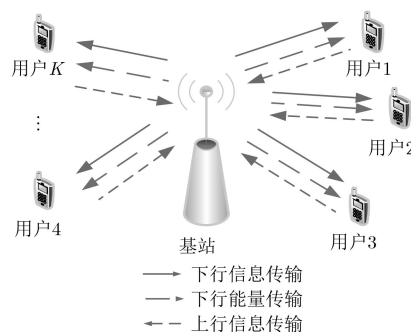


图1 多用户无线携能通信系统

在上行通信链路中,用户利用前一阶段从基站收集到的能量向基站发送反馈信息。因此用于信息、能量传输的子载波集合满足关系如式(1)

$$\left. \begin{aligned} G_{DE} \cap \sum_{k=1}^K G_{DI,k} &= \emptyset, G_{DE} \cup \sum_{k=1}^K G_{DI,k} = \Omega \\ G_{UI,i} \cap G_{UI,j} &= \emptyset, i, j \in \Omega, i \neq j \\ G_{DI,i} \cap G_{DI,j} &= \emptyset, i, j \in \Omega, i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

假设在上下行通信链路中,基站、用户知道信道状态信息,并且在1个传输周期内,信道状态信息恒定。分别用 $\mathbf{h}_{D,k} = [h_{D,k,1}, h_{D,k,2}, \dots, h_{D,k,N}]^T$, $\mathbf{h}_{U,k} = [h_{U,k,1}, h_{U,k,2}, \dots, h_{U,k,N}]^T \forall k$ 表示基站到用户 k 、用户 k 到基站的信道状态信息。

在下行通信链路中,定义 $p_{DI,n}$, $p_{DE,n}$ 分别为子载波 n 上用于信息、能量传输的功率,用 P 表示基站发射的总功率,同时下行每一条子载波上最大的传输功率用 $p_{D,p}$ 表示,功率约束用式(2)、式(3)表示,用户 k 在第 n 条子载波上接收的信号用式(4)表示。

¹⁾ 本文主要研究根据子载波间的信道增益差异进行资源分配,为方便起见,考虑单天线系统。研究结果可以向多天系统扩展。

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} p_{DI,n} + \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \leq P \quad (2)$$

$$0 \leq p_{DI,n}, p_{DE,n} \leq P_{D,p}, \forall n \in \Omega \quad (3)$$

$$y_{DI,k}[n] = h_{DI,k}[n] s_{DI}[n] + n_{DI,k}[n], \forall k, n \quad (4)$$

其中, $s_{DI}[n]$ 表示第 n 条子载波上的传输信号, 该信号的数学期望满足 $E(|s_{DI,n}|^2) = p_{DI,n}$, $n_{DI,k}[n]$ 代表用户 k 在第 n 条子载波上的加性高斯白噪声信号, 其均值为 0, 方差为 $\sigma_{DI,n}^2$ 。用户 k 接收的能量为

$$E_k = \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,k,n}|^2, \forall k \quad (5)$$

其中, ξ 表示用户端在能量收集过程中的转换效率 ($0 < \xi < 1$)。下行通信链路的信息传输速率为

$$R_D = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} \log_2 \left(1 + \frac{p_{DI,n} |h_{DI,k,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) \quad (6)$$

在上行通信链路中, 定义 $p_{UI,n}$ 为子载波 n 上用于信息传输的功率, 此时功率 $p_{UI,n}$ 的来源即为用户在前一阶段从基站收集的能量, 上行子载波上的传输功率 $p_{UI,n}$ 也要满足最大的传输功率约束 $p_{U,p}$, 上述约束如式(7)、式(8), 基站在第 n 条子载波上接收的信号用式(9)表示。

$$\sum_{n \in G_{UI,k}} p_{UI,n} \leq \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,k,n}|^2, \forall k \quad (7)$$

$$0 \leq p_{UI,n} \leq P_{U,p}, \forall n \in \Omega \quad (8)$$

$$y_{UI,k}[n] = h_{UI,k}[n] s_{UI}[n] + n_{UI}[n], \forall k, n \quad (9)$$

其中, $s_{UI}[n]$ 表示第 n 条子载波上的传输信号, 该信号的数学期望满足 $E(|s_{UI,n}|^2) = p_{UI,n}$, $n_{UI}[n]$ 代表第 n 条子载波上的加性高斯白噪声信号, 其均值为 0, 方差为 $\sigma_{UI,n}^2$ 。上行通信链路的信息传输速率为

$$R_U = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{UI,k}} \log_2 \left(1 + \frac{p_{UI,n} |h_{UI,k,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) \quad (10)$$

3 联合资源分配算法

本文提出了联合载波和功率优化策略来最大化上下行加权和速率, 优化问题描述如式(11)

$$\begin{aligned} & \max_{P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}, G_{UI}} w R_D + R_U, \\ & \text{s.t. 式(1) - 式(3), 式(7), 式(8)} \end{aligned} \quad (11)$$

该算法在子载波集合约束式(1)、基站平均功率约束式(2)、上下行载波最大传输功率约束式(3)、式(8)、用户上行发射功率因果约束式(7)等约束下, 通过优化上下行信息、能量传输功率 P_{UI}, P_{DI}, P_{DE} 、上下行用于信息、能量传输的子载波集合 G_{UI}, G_{DI}, G_{DE} 等变量来最大化上下行加权和

速率。由于约束式(1)、式(2)、式(7)中涉及到子载波集合分配问题, 该子载波集合的分配问题是离散的, 从而导致约束式(1)、式(2)、式(7)是非凸约束, 进而使得优化问题式(11)是非凸优化问题。根据参考文献[14], 在固定子载波分配策略后, 该问题可以采用拉格朗日对偶方法来求解。

式(11)的拉格朗日函数表示为

$$\begin{aligned} & L(P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}, G_{UI}) \\ & = w \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} \log_2 \left(1 + \frac{p_{DI,n} |h_{DI,k,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) \\ & \quad + \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{UI,k}} \log_2 \left(1 + \frac{p_{UI,n} |h_{UI,k,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) \\ & \quad + \mu \left(P - \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} p_{DI,n} - \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \right) \\ & \quad + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left(\xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,k,n}|^2 - \sum_{n \in G_{UI,k}} p_{UI,n} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\mu, \{\lambda_k\}$ 分别是约束式(2)、式(7)的非负拉格朗日乘子。拉格朗日对偶函数 $g(\{\lambda_k\}, \mu)$ 的解需要先求解式(13)问题

$$\max_{P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}, G_{UI}} L, \text{ s.t. 式(3), 式(8)} \quad (13)$$

上述问题的求解分成3个步骤, 给定乘子 $\mu, \{\lambda_k\}$, 固定子载波分配集合 G_{DI}, G_{DE}, G_{UI} , 问题式(13)是一个凸优化问题, 利用(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件求解传输功率; 给定乘子 $\mu, \{\lambda_k\}$, 利用上一步求解的功率求解子载波分配集合, 采用椭圆法[15]来更新拉格朗日乘子 $\mu, \{\lambda_k\}$, 联合资源分配算法中采用子载波分配和功率分配交替更新的方法。

3.1 信息、能量传输功率求解

给定乘子 $\mu, \{\lambda_k\}$, 固定子载波分配集合 G_{DI}, G_{DE}, G_{UI} , 利用KKT条件求解功率 P_{DI}, P_{DE}, P_{UI} 即拉格朗日函数式(12)分别对 $p_{DI,k,n}, p_{DE,n}, p_{UI,k,n}$ 求偏导, 得到功率为

$$p_{DI,k,n}^* = \left(\frac{w}{\mu} - \frac{\sigma_{DI,n}^2}{|h_{DI,k,n}|^2} \right)^+, \forall n, \forall k \quad (14)$$

$$p_{UI,k,n}^* = \left(\frac{1}{\lambda_k} - \frac{\sigma_{UI,n}^2}{|h_{UI,k,n}|^2} \right)^+, \forall n, \forall k \quad (15)$$

$$p_{DE,n}^* = \begin{cases} P_{D,p}, & \sum_{k=1}^K \xi \lambda_k |h_{DE,k,n}|^2 - \mu > 0 \\ 0, & \sum_{k=1}^K \xi \lambda_k |h_{DE,k,n}|^2 - \mu \leq 0 \end{cases}, \forall n, \forall k \quad (16)$$

3.2 子载波分配集合的确定

给定乘子 $\mu, \{\lambda_k\}$, 利用上一步求解得到的功率求解子载波分配集合 G_{DI}, G_{DE}, G_{UI} 。采用遍历求解法可得到最优子载波分配集合, 具体步骤如下:

(1) 下行: 任取一子载波 n , 令 $p_{DE,n}=0, p_{UI,k,n}=0$, 将 $p_{DI,k,n}$ 代入拉格朗日函数式(12), 遍历所有 k 值, 得到最大值 L_1 ; 令 $p_{DI,k,n}=0, p_{UI,k,n}=0$, 将 $p_{DE,n}$ 代入拉格朗日函数式(12)得到 L_2 ; 若 $L_1 > L_2$, 子载波 n 分配给用户 k 用于信息传输, 否则该子载波用于能量传输;

(2) 上行: 令 $p_{DE,n}=0, p_{DI,k,n}=0$, 将 $p_{UI,k,n}$ 代入拉格朗日函数式(12), 任取一子载波 n , 遍历所有 k 值, 找出最大 L 值所对应的 k 值, 则子载波 n 分配给用户 k 。

经过3.1节和3.2节的求解后, 拉格朗日对偶问题转换为: $\min_{\{\lambda_k\}, \mu} g(\{\lambda_k\}, \mu)$, 本文采用椭球法来求解这个问题。其中用于更新拉格朗日乘子的梯度表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\mu &= P - \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} p_{DI,n} - \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \\ \Delta\lambda_k &= \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,k,n}|^2 \\ &\quad - \sum_{n \in G_{UI,k}} p_{UI,n}, \forall n, \forall k \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

在求解下行能量传输功率 $p_{DE,n}$ 时, $p_{DE,n}$ 可以取得两个值, 分别为0和 $P_{D,p}$, 需要注意的在情形 $\sum_{k=1}^K \xi \lambda_k |h_{DE,k,n}|^2 - \mu = 0$ 时, $p_{DE,n}$ 的取值不唯一, 但是在求解过程中, 在不影响计算结果的情况下, 将 $p_{DE,n}$ 全部置0, 因此在算法收敛、得到最优的功率载波分配策略后, 需要对 $\sum_{k=1}^K \xi \lambda_k |h_{DE,k,n}|^2 - \mu = 0$ 情况下的 $p_{DE,n}$ 进行求解。求解问题描述为

$$\text{Find } p_{DE,n} \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} p_{DI,n} + \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \leq P \quad (19)$$

$$0 \leq p_{DE,n} \leq P_{D,p}, n \in \Omega \quad (20)$$

$$\sum_{n \in G_{UI,k}} p_{UI,n} \leq \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,k,n}|^2, \forall k \quad (21)$$

式(18)的求解可以转换为求解式(22), 这是因为式(18)的任意一个解都是式(22)的可行解。

$$\max_{p_{DE,n}} \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,k,n}|^2, \text{ s.t. 式(19), (20), (22)}$$

$$\text{令 } \hat{m} = \left\lfloor \left(P - \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} p_{DI,n}^* \right) / P_{D,p} \right\rfloor,$$

其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 向下取整, 求解 $T_n = \sum_{k=1}^K |h_{DE,k,n}|, \forall n$, 这里 $|T_{\hat{m}+1}|$ 代表 $\{T_n\}$ 中第 $\hat{m}+1$ 大的数。式(22)的解为

$$p_{DE,n}^* = \begin{cases} P_{D,p}, & |T_n| > |T_{\hat{m}+1}| \\ P - \sum_{k=1}^K \sum_{n \in G_{DI,k}} p_{DI,n}^* - \hat{m} P_{D,p}, & |T_n| = |T_{\hat{m}+1}| \\ 0, & |T_n| < |T_{\hat{m}+1}| \end{cases} \quad (23)$$

上述算法具体为:

步骤1 初始化拉格朗日乘子 $\{\lambda_k\}, \mu$;

步骤2 根据式(14)–式(16)分别计算上下行信息、能量传输的功率 P_{UI}, P_{DI}, P_{DE} ;

步骤3 根据3.2节中遍历法得到用于信息、能量传输的载波集合 G_{UI}, G_{DI}, G_{DE} ;

步骤4 根据式(17), 采用椭球法更新拉格朗日乘子 $\{\lambda_k\}, \mu$;

步骤5 若椭球法中轴长大于给定精度 ε , 跳转到步骤2–步骤4, 否则到步骤6;

步骤6 根据式(23)计算 $\sum_{k=1}^K \xi \lambda_k |h_{DE,k,n}|^2 - \mu = 0$ 情况下的下行能量传输功率 $p_{DE,n}$ 。

4 仿真结果

利用计算机仿真对上述所提联合资源分配算法进行验证, 并对比两种基准算法“载波固定算法”和“启发式算法”。

“载波固定算法”的描述为: 子载波固定算法中载波数为32, 下行固定子载波1~11用于用户1信息传输, 子载波12~21用于传输能量, 子载波22~32用于用户2信息传输, 上行固定子载波1~16, 17~32分别用于用户1, 2信息传输; 上、下行用于信息能量传输的功率采用注水法求解。

“启发式算法”的描述为: 下行选取信道增益最高的4条子载波固定 $p_{D,p}$ 来传输能量, 下行子载波5, 7, ..., 31用于用户1信息传输, 下行子载波6, 8, ..., 32用于用户2信息传输; 上行固定子载波1~16, 17~32分别用于用户1, 2信息传输。上、下行用于信息能量传输的功率采用注水法求解。

仿真中系统带宽固定为10 MHz, 且平均分配给32条子载波, 即 $N=32$ 。用户数取 $K=2$ 。上下行的大尺度衰落用 $\xi_0 (d/d_0)^{-\kappa}$ 表示, 其中 $d_0=1$ m时路径损耗用 $\xi_0=-30$ dB表示, 基站到用户间距离 d 均为3 m, κ 是路径损耗因子, 本文中设为3, 小尺

度衰落用瑞利衰落建模。噪声功率为 $\sigma_n^2=(\sigma^2/N)$ ，其中 $\sigma^2=-100$ dBm。基站最大发射功率30 dBm，能量转换效率 $\xi=1$ ，精度值设为 $\varepsilon=10^{-4}$ 。采用蒙特卡罗方法仿真上述算法，对产生的500个随机信道仿真结果取平均，得到如图2—图7所示结果。

图2、图3分别是上、下行通信链路中用户的和速率随基站发射功率变化的关系图。基站与用户之

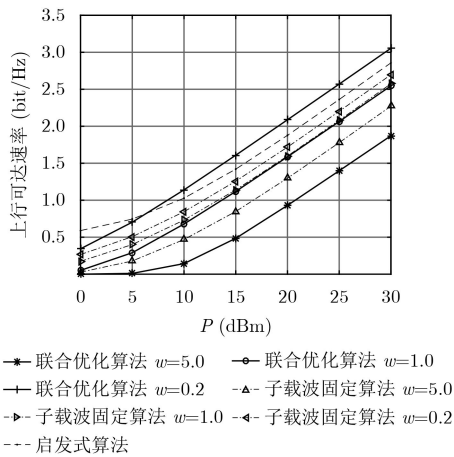


图2 上行通信链路中用户的和速率随基站发射功率变化的关系图

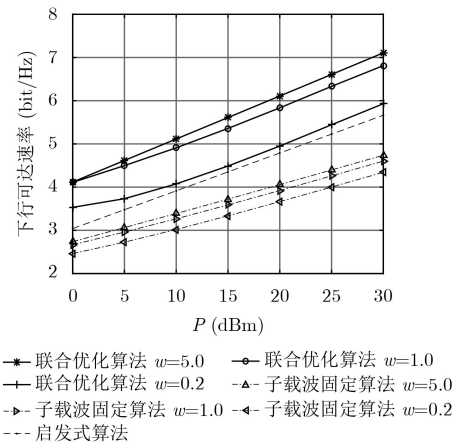


图3 下行通信链路中用户的和速率随基站发射功率变化的关系图

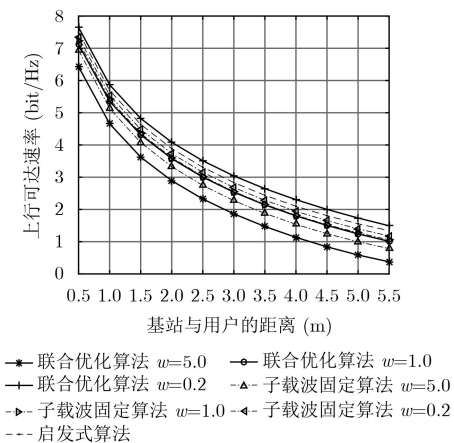


图4 上行通信链路中用户的和速率随基站与用户之间距离变化的关系图

间距离固定为 $d=3$ m，基站的发射功率在0~30 dBm之间变化。从图中可见，上、下行用户和速率随基站发射功率的增加而增加，从图2和图3中可以看出，当加权因子 w 较小时，联合优化算法更侧重于最大化上行可达速率；当加权因子 w 较大时，联合优化算法更侧重于最大化下行可达速率。与子载波固定算法相比，联合优化算法取得了明显的性能提高。

图4、图5是上、下行通信链路中用户的和速率随基站与用户之间距离变化的关系图。基站的发射功率固定为 $P=30$ dBm，基站与用户之间的距离从0.5 m增加到5.5 m。从图中可见，上、下行信息传输速率随基站、用户之间距离的增加而减小，从图4和图5中可以看出，当加权因子 w 较小时，联合优化算法更侧重于最大化上行可达速率；当加权因子 w 较大时，联合优化算法更侧重于最大化下行可达速率。与子载波固定算法相比，联合优化算法取得了明显的性能提高。

图6、图7是上、下行通信链路中用户的和速率随加权因子变化的关系图。基站发射功率固定为 $P=30$ dBm，基站与用户间距离为 $d=3$ m。图6中，联合优化算法、子载波固定算法中信息传输速率随加权因子的增加而减小，启发式算法中信息传

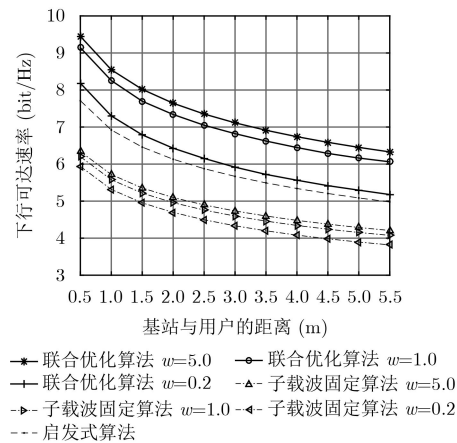


图5 下行通信链路中用户的和速率随基站与用户之间距离变化的关系图

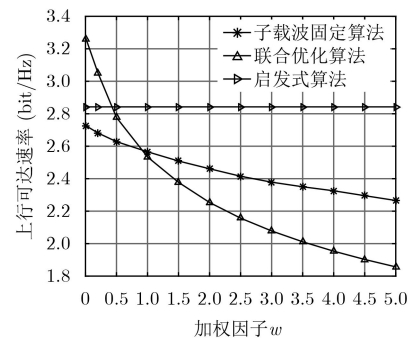


图6 上行通信链路中用户的和速率随加权因子变化的关系图

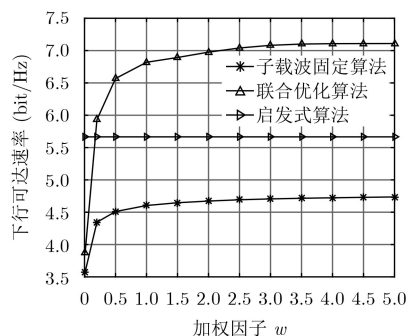


图7 下行通信链路中用户的和速率随加权因子变化的关系图

输速率恒定, 联合优化算法中可达速率要低于另外两种算法; 而图7中现象则相反, 因为在联合优化算法中, 加权因子放置在下行信息传输速率的位置, 即加权因子 w 越大, 整个通信链路更侧重于下行信息传输。

5 结束语

本文研究了多用户多载波无线携能通信系统的资源分配问题, 联合优化载波分配和功率分配最大化上下行加权和速率。仿真结果显示了所提算法的有效性。本文研究的加权上下行和速率最大化问题具有通用性, 通过调整加权因子的大小, 该问题等效于下行速率最大化、上行速率最大化等一系列问题。因此, 研究结果具有较广的适用范围。

参考文献

- [1] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C]. Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, 2008: 1612–1616. doi: [10.1109/ISIT.2008.4595260](https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595260).
- [2] LIU Liang, ZHANG Rui, and CHUA K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(1): 288–300. doi: [10.1109/TWC.2012.113012.120500](https://doi.org/10.1109/TWC.2012.113012.120500).
- [3] LIU Liang, ZHANG Rui, and CHUA K C. Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(7): 1850–1863. doi: [10.1109/tsp.2014.2303422](https://doi.org/10.1109/tsp.2014.2303422).
- [4] ZHANG Guangchi, XU Jie, WU Qingqing, et al. Wireless powered cooperative jamming for secure OFDM system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1331–1346. doi: [10.1109/TVT.2017.2756877](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2756877).
- [5] ZHANG Guangchi, LI Xueyi, CUI Miao, et al. Signal and artificial noise beamforming for secure simultaneous wireless information and power transfer multiple-input multiple-output relaying systems[J]. *IET Communications*, 2016, 10(7): 796–804. doi: [10.1049/iet-com.2015.0482](https://doi.org/10.1049/iet-com.2015.0482).
- [6] LI Xueyi, ZHANG Qi, ZHANG Guangchi, et al. Joint resource allocation with subcarrier pairing in cooperative OFDM DF multi-relay networks[J]. *IET Communications*, 2015, 9(1): 78–87. doi: [10.1049/iet-com.2014.0346](https://doi.org/10.1049/iet-com.2014.0346).
- [7] LI Xueyi, ZHANG Qi, ZHANG Guangchi, et al. Joint source and relays power allocation for MIMO AF multi-relay networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(3): 1915–1926. doi: [10.1007/s11277-015-2494-z](https://doi.org/10.1007/s11277-015-2494-z).
- [8] LU Weidang, GONG Yi, WU Jiaying, et al. Simultaneous wireless information and power transfer based on joint subcarrier and power allocation in OFDM systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 2763–2770. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2671903](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2671903).
- [9] NA Zhenyu, LI Xiaotong, LIU Xin, et al. Subcarrier allocation based simultaneous wireless information and power transfer for multiuser OFDM systems[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, 2017: 148. doi: [10.1186/s13638-017-0932-1](https://doi.org/10.1186/s13638-017-0932-1).
- [10] GE Xiaohu, SUN Yang, GHARAVI H, et al. Joint Optimization of computation and communication power in multi-user massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(6): 4051–4063. doi: [10.1109/TWC.2018.2819653](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2819653).
- [11] GE Xiaohu, HUANG Xi, WANG Yuming, et al. Energy-efficiency optimization for MIMO-OFDM mobile multimedia communication systems with QoS constraints[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(5): 2127–2138. doi: [10.1109/TVT.2014.2310773](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2310773).
- [12] LIN Xiang, GE Xiaohu, WANG Chengxiang, et al. Energy efficiency evaluation of cellular networks based on spatial distributions of traffic load and power consumption[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(3): 961–973. doi: [10.1109/TWC.2013.011713.112157](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.011713.112157).
- [13] 张广驰, 曾志超, 崔苗, 等. 无线供电混合多址接入网络的资源分配[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 3013–3019. ZHANG Guangchi, ZENG Zhichao, CUI Miao, et al. Resource allocation for wireless powered hybrid multiple access networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 3013–3019.
- [14] YU Wei and LUI R. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(7): 1310–1322. doi: [10.1109/tcomm.2006.877962](https://doi.org/10.1109/tcomm.2006.877962).
- [15] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2009: 561–615.

崔苗: 女, 1978年生, 讲师, 博士, 研究方向为新一代无线通信技术。

喻鑫: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为无线携能通信技术。

李学易: 男, 1974年生, 讲师, 博士, 研究方向为协作无线通信与通信信号处理。

张广驰: 男, 1982年生, 教授, 博士, 研究方向为5G无线通信、无人机通信、无线携能通信、物理层安全等。

刘怡俊: 男, 1976年生, 教授, 博士, 研究方向为类脑计算机、人工智能、新型计算机系统和面向应用的集成电路设计。