

多载波无线携能通信的上下行链路联合资源分配

崔苗¹, 喻鑫¹, 李学易¹, 张广驰¹, 刘怡俊¹, 林凡²

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州杰赛科技股份有限公司, 广东 广州 510310)

摘要: 研究了由基站和用户组成的多载波无线携能通信系统, 其上行链路和下行链路均采用正交频分复用技术。在下行链路中, 基站同时向用户完成信息和能量的传输; 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。以最大化上下行链路加权和速率为目标, 联合优化上下行链路的子载波分配和功率分配, 提出了基于拉格朗日对偶法和椭球法的最优子载波与功率联合分配算法。实验仿真验证了所提算法的有效性。

关键词: 多载波通信; 无线携能通信; 资源分配; 正交频分复用

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019052

Joint downlink and uplink resource allocation for multi-carrier SWIPT system

CUI Miao¹, YU Xin¹, LI Xueyi¹, ZHANG Guangchi¹, LIU Yijun¹, LIN Fan²

1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2. Guangzhou GCI Science & Technology Co., Ltd., Guangzhou 510310, China

Abstract: A multi-carrier simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) communication system including one base station (BS) and one user was investigated, where both uplink and downlink adopt orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). In the downlink, the BS transmitted information and power to the user simultaneously. In the uplink, the user transmitted information to the BS by using the power harvested from the BS in the downlink. The weighted sum of the downlink and uplink achievable rates by jointly optimizing subcarrier allocation and power allocation of the uplink and downlink were aimed to maximized. An optimal algorithm to solve the joint resource allocation problem was proposed, which was based on the Lagrange duality method and the ellipsoid method. Finally, the result shows the performances of the proposed algorithm by computer simulations.

Key words: multi-carrier communication, simultaneous wireless information and power transfer, resource allocation, OFDM

1 引言

无线携能通信 (SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer) 解决了能量受限的无线通信网络中的能源供应问题, 但同样面临着信息传输与能量传输的折中问题, 如何分配信息和能

量的资源是应用该技术的一个重要问题, 引起了众多学者的研究兴趣^[1]。

文献[2]首次提出了无线携能通信的概念, 并提出了接收器可以对相同的信号进行信息解码和能量收集, 但该策略在实际应用中难以实现。文献[3]提出了多载波无线携能通信中继系统中的2种基于

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2019-01-16

通信作者: 李学易, leexueyi@gdut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571138); 广东省科技计划基金资助项目 (No.2017B090909006, No.2016B090904001, No.2016B090919031)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571138), The Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (No.2017B090909006, No.2016B090904001, No.2016B090919031)

能分 (power splitting) 中继和模式适应的传输协议。文献[4-7]研究了2种实现无线携能通信的策略：时分 (time switching) 策略和能分策略。在时分策略中，接收端在一个传输周期内，根据时间分配系数对信息解码模式、能量收集模式进行切换，例如有 K 个用户，整个传输时间被分成 $K+1$ 个时隙，第 $K+1$ 个时隙就用来收集能量，其余时隙则进行信息传输；在能分策略中，接收的信号被一个固定比例的功率分配器分成2个信号流，分别流向能量接收器和信息接收器。文献[8]研究了一种多输入单输出 (MISO, multiple-input single-output) 无线携能通信系统，该系统考虑一个多天发射机对多个单天线接收机进行信息与能量同传，发射端采用随机波束成形技术进行信息传输。文献[9]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[10]研究了基于无线携能的中继通信系统，该系统由发射端、中继、信息和能量接收器及窃听者组成，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。

以正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 为代表的多载波通信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[11]提出了一种多载波通信系统中实现无线携能通信的新方法，利用 OFDM 和波束成形技术形成一组并行的子信道用于无线携能通信，该方法简化了频带资源的分配。文献[12]研究了 OFDM 系统中资源的分配问题，系统模型包括一个基站和多用户，在能量收集的约束下最大化整个系统的信息传输速率，每个用户分别采用时分策略和能分策略进行信息解码与能量收集的协作。文献[13]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[14]研究了放大与转发的双跳中继无线通信系统，文中基于 branch-and-bound 方法提出了最优的上下行链路加权和速率最大化算法，并具有较低的运算复杂度。文献[15]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[16]研究了全双工无线携能通信网络的性能，在功率、子载波受限的约束下，分别对自干扰完全消除以及自干扰存在情形下系统的可达速率进行优化。文献[17]的系统模型由一个发射端和一个接收端组成，该系统将子载波分成2个部分，分别用于信息解码与能量收

集，在平均功率、传输速率的约束下，最大化接收端收集的能量。

本文研究半双工多载波无线携能通信系统，与文献[4-7]采用的策略不同，文中没有采用时分策略和能分策略进行建模，而是将子载波分成2个部分，其中一部分用于信息传输，另一部分用于能量传输，这种策略可以有效地降低系统应用的复杂度。与只考虑下行链路的文献[17]不同，本文同时考虑无线携能通信系统的上行链路和下行链路，在下行链路中，子载波分成2个部分，一部分用于信息传输，另一部分用于能量传输；在上行链路中，所有子载波用于信息传输。本文研究通过联合优化上下行链路的子载波分配和功率分配，实现最大化系统的上下行链路加权和速率。采用上下行链路加权和速率作为优化目标，是因为它更具有通用性。解决了最大化上下行链路加和问题，就相当于解决了最大化上下行链路和速率、最大化上行链路速率、最大化下行链路速率等多个问题，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链路加和问题。由于子载波集合是离散的，将传统方法用于求解资源分配问题十分困难。本文采用拉格朗日对偶方法，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，并进行实验仿真，证实了所提算法的有效性。

2 系统模型

多载波无线携能通信系统如图1所示，该系统包括一个基站和一个用户，其中，基站与用户均只配备单天线。在下行链路中，基站同时向用户进行信息传输与能量传输；在上行链路中，用户利用从基站接收的能量向基站发送信息。该系统适用于能量受限的无线传感网络，首先，基站向传感器节点同时发送能量与信息；然后，传感器节点向基站发送传感信息。

多载波无线携能通信系统带宽被平均分配给 N 条子载波，子载波集合用 Ω 来表示，其定义为 $\Omega \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$ 。分别用 $\mathbf{h}_D = [h_{D,1}, \dots, h_{D,N}]^T$ 、 $\mathbf{h}_U = [h_{U,1}, \dots, h_{U,N}]^T$ 表示基站到用户、用户到基站的信道状态信息。假设基站和用户知道信道状态信息，并且上行链路和下行链路的时长相同。

在下行链路中，基站同时向用户进行能量传输和信息传输。子载波集合 Ω 被分成2个不相交的子

集 G_{DI} 和 G_{DE} ，分别用于信息传输和能量传输。 G_{DI} 和 G_{DE} 符合如式(1)所示的关系。

$$\begin{aligned} G_{DE} \cup G_{DI} &= \Omega \\ G_{DE} \cap G_{DI} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

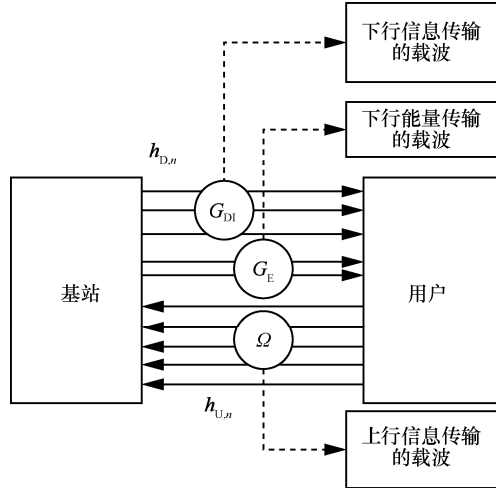


图 1 多载波无线携能通信系统模型

用 $s_{DI,n}$ 和 $s_{DE,n}$ 分别表示第 n 条子载波上基站发送的信息信号和能量信号，满足 $E(|s_{DI,n}|^2) = p_{DI,n}$ ， $E(|s_{DE,n}|^2) = p_{DE,n}$ ，其中， $E(\cdot)$ 表示数学期望， $p_{DI,n}$ 和 $p_{DE,n}$ 分别表示第 n 条子载波上的信息传输功率和能量传输功率。用 P 表示基站发射的总功率，下行链路传输的总功率满足如式(2)所示的关系。

$$\sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n} + \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \leq P \quad (2)$$

用户接收到的能量为

$$E = \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,n}|^2 \quad (3)$$

其中， ξ 表示用户端的能量转换效率。因为噪声的功率远小于能量信号功率，所以式(3)忽略了噪声功率。用户在子载波 n 上接收的信号为

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

其中， $n_{DI,n}$ 是加性高斯白噪声， $\sigma_{DI,n}^2$ 是噪声功率。无论被用于信息传输还是能量传输，每一条子载波能够传输的最大功率值是相同的。因此，定义 $P_{D,peak}$ 为下行链路每条子载波上最大的传输功率，满足如式(5)所示的功率约束。

$$0 \leq p_{DI,n}, p_{DE,n} \leq P_{D,peak}, \forall n \in \Omega \quad (5)$$

通过 G_{DI} 给定的子载波进行信息传输，下行链路的信息传输速率(单位为 $\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$)为

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

在上行链路中，用户通过全部子载波向基站传输信息。 $s_{UI,n}$ 表示用户向基站发送的信号，满足 $E(|s_{UI,n}|^2) = p_{UI,n}$ ，其中， $p_{UI,n}$ 表示子载波 n 上的功率。此时用于信息传输的能量等于在下行链路通信时从基站收集到的能量。

$$\sum_{n=1}^N p_{UI,n} \leq \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,n}|^2 \quad (7)$$

基站的接收信号为

$$y_U[n] = h_{UI,n} s_{UI,n} + n_{UI,n} \quad (8)$$

设 $P_{U,peak}$ 为上行链路每条子载波上最大的传输功率，在上行链路中每条子载波上分配的功率要满足如式(9)所示的关系。

$$0 \leq p_{UI,n} \leq P_{U,peak}, \forall n \in \Omega \quad (9)$$

上行链路中的子载波都用来进行信息传输，其信息传输速率(单位为 $\text{bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$)如式(10)所示。

$$R_U = \sum_{n=1}^N \text{lb} \left(1 + \frac{p_{UI,n} |h_{UI,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) \quad (10)$$

3 子载波与功率联合分配算法

3.1 最大化加权上下行链路和速率问题的形成

本文在下行链路信息传输和能量传输子载波数集合约束式(1)、基站平均功率约束式(2)、用户发射能量约束式(7)及每条子载波上的最大功率约束式(5)和式(9)的约束下，最大化上下行链路加权和速率，优化变量为下行链路的信息传输子载波集合 G_{DI} 与能量传输子载波集合 G_{DE} 、下行链路信息传输功率 P_{DI} 与能量传输功率 P_{DE} 、上行链路信息传输的功率 P_{UI} ，其中优化变量 $P_{DI} = [p_{DI,1}, \dots, p_{DI,n}, \dots, p_{DI,N}]^T, n \in G_{DI}$ ， $P_{DE} = [p_{DE,1}, \dots, p_{DE,n}, \dots, p_{DE,N}]^T, n \in G_{DE}$ ， $P_{UI} = [p_{UI,1}, \dots, p_{UI,n}, \dots, p_{UI,N}]^T, n \in \Omega$ 。优化问题如式(11)和式(12)所示。

$$\max_{P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}} wR_D + R_U \quad (11)$$

约束条件：式(1)、式(2)、式(5)、式(7)、式(9)

$$(12)$$

其中， w 是加权因子。加权因子不同，侧重优化的目标便不同，如 $w=0$ 表示侧重优化上行链路信息传输速率； $w=1$ 表示优化上下行链路速率之和； $w=\infty$ 表示侧重优化下行链路信息传输速率。

3.2 子载波与功率联合分配算法的设计

在式(11)中，约束式(1)、式(2)和式(7)都涉及子载波分配问题，由于子载波集合 G_{DI} 和 G_{DE} 是离散的，导致约束式(1)、式(2)和式(7)包含离散优化变量，因此求解式(11)所示的问题具有较高挑战性。

本文求解式(11)的方法如下。首先，可证明式(11)中的优化变量满足 time-sharing 条件^[18]，那么式(11)是强对偶问题，因此利用拉格朗日对偶方法来求解，求解过程分2个步骤进行，第一步先优化对偶变量，第二步利用第一步中计算出的对偶变量来优化变量。

3.2.1 优化对偶变量

式(11)的拉格朗日对偶函数为

$$g(\beta_1, \beta_2) = \max_{\{P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}\}} L(P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}) \quad (13)$$

其中， $G=\{D_{DI}, G_{DE}\}$ ， $P=\{P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}\}$ ，拉格朗日函数表示为

$$\begin{aligned} L(P_{DI}, P_{DE}, P_{UI}, G_{DI}, G_{DE}) = & w \sum_{n \in G_{DI}} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{DI,n} |h_{DI,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) + \\ & \sum_{n=1}^N \text{lb} \left(1 + \frac{P_{UI,n} |h_{UI,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) + \beta_1 \left(P - \sum_{n \in G_{DI}} P_{DI,n} - \sum_{n \in G_{DE}} P_{DE,n} \right) + \\ & \beta_2 \left(\xi \sum_{n \in G_{DE}} P_{DE,n} |h_{DE,n}|^2 - \sum_{n=1}^N P_{UI,n} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

其中， β_1 和 β_2 分别是约束式(2)和式(7)的拉格朗日乘子。对偶的优化问题表示为

$$\min_{\beta_1, \beta_2} g(\beta_1, \beta_2)$$

$$\text{约束条件为 } \beta_1, \beta_2 \geq 0 \quad (15)$$

3.2.2 优化变量

在3.2.1节中已经初始化或者更新了拉格朗日乘子 β_1 、 β_2 ，因此拉格朗日函数中的变量只有 P_{DI} 、 P_{DE} 、 P_{UI} 、 G_{DI} 和 G_{DE} ，优化问题只需求得最优的

变量即可。具体步骤如下。

1) 给定载波分配集合 G_{DI} 和 G_{DE} ，计算 P_{DI} 、 P_{DE} 、 P_{UI} 。

对于给定的载波集合，本文利用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件来求解优化变量 P_{DI} 、 P_{DE} 和 P_{UI} 。

$$\frac{\partial L(G, P)}{\partial P_{DI,n}} = \frac{w |h_{DI,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2 + P_{DI,n} |h_{DI,n}|^2} - \beta_1, n \in G_{DI} \quad (16)$$

$$\frac{\partial L(G, P)}{\partial P_{DE,n}} = \xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1, n \in G_{DE} \quad (17)$$

$$\frac{\partial L(G, P)}{\partial P_{UI,n}} = \frac{|h_{UI,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2 + P_{UI,n} |h_{UI,n}|^2} - \beta_2, n \in \Omega \quad (18)$$

求解式(16)~式(18)，可得

$$P_{DI,n}^* = \left(\frac{w}{\beta_1} - \frac{\sigma_{DI,n}^2}{|h_{DI,n}|^2} \right)^+, n \in G_{DI} \quad (19)$$

$$P_{DE,n}^* = \begin{cases} P_{D,peak}, \xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 > 0 \\ 0, \xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 \leq 0 \end{cases}, n \in G_{DE} \quad (20)$$

$$P_{UI,n}^* = \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{\sigma_{UI,n}^2}{|h_{UI,n}|^2} \right)^+, n \in \Omega \quad (21)$$

其中， $(x)^+ = \max\{x, 0\}$ ，此时拉格朗日对偶问题是关于拉格朗日乘子 β_1 、 β_2 的线性函数，因此对偶问题就是一个凸问题，可采用椭球法^[19]来求解，其中用于更新拉格朗日对偶乘子的梯度为

$$\Delta \beta_1 = P - \sum_{n \in G_{DI}} P_{DI,n}^* - \sum_{n \in G_{DE}} P_{DE,n}^*$$

$$\Delta \beta_2 = \xi \sum_{n \in G_{DE}} P_{DE,n}^* |h_{DE,n}|^2 - \sum_{n=1}^N P_{UI,n}^* \quad (22)$$

2) 给定功率 P_{DI} 、 P_{DE} 和 P_{UI} ，计算载波分配集合 G_{DI} 、 G_{DE} 。

将式(19)~式(21)中计算得出的功率代入式(14)中，拉格朗日对偶函数转换为如式(23)所示。在式(23)中，只有最后一行与载波的分配有关，因此用以下的方法来解决拉格朗日对偶函数中的载波分配问题。

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{P}, G) &= w \sum_{n \in G_{DI}} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) + \sum_{n=1}^N \text{lb} \left(1 + \frac{P_{UI,n}^* |h_{UI,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) + \beta_1 \left(P - \sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n}^* - \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n}^* \right) + \\
 &\beta_2 \left(\xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n}^* |h_{DE,n}|^2 - \sum_{n=1}^N p_{UI,n}^* \right) = w \sum_{n \in G_{DI}} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) + \sum_{n=1}^N \text{lb} \left(1 + \frac{P_{UI,n}^* |h_{UI,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) + \\
 &\beta_1 \left(P - \sum_{n=1}^N p_{D,n}^* \right) + \xi \beta_2 \sum_{n=1}^N p_{D,n}^* |h_{D,n}|^2 - \xi \beta_2 \sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2 - \beta_2 \sum_{n=1}^N p_{UI,n}^* = \\
 &\sum_{n=1}^N \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{UI,n}^* |h_{UI,n}|^2}{\sigma_{UI,n}^2} \right) - \beta_2 p_{UI,n}^* \right] + \beta_1 P + \\
 &\sum_{n \in G_{DI}} \left[w \text{lb} \left(1 + \frac{P_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) - \xi \beta_2 p_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2 \right] + \sum_{n=1}^N p_{D,n}^* \left(\xi \beta_2 |h_{D,n}|^2 - \beta_1 \right) \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$n \in \begin{cases} G_{DI}, & F_{1,n}^* + F_{2,n}^* > F_{3,n}^* \\ G_{DE}, & F_{1,n}^* + F_{2,n}^* \leq F_{3,n}^* \end{cases} \quad (24) \qquad \sum_{n=1}^N p_{UI,n} \leq \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,n}|^2 \quad (29)$$

其中, $F_{1,n}^*$ 、 $F_{2,n}^*$ 、 $F_{3,n}^*$ 可分别表示为

$$\begin{aligned}
 F_{1,n}^* &= w \text{lb} \left(1 + \frac{P_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2}{\sigma_{DI,n}^2} \right) - \xi \beta_2 p_{DI,n}^* |h_{DI,n}|^2 \\
 F_{2,n}^* &= p_{DI,n}^* \left(\xi \beta_2 |h_{DI,n}|^2 - \beta_1 \right) \\
 F_{3,n}^* &= p_{DE,n}^* \left(\xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 \right) \quad (25)
 \end{aligned}$$

在计算出优化变量后, 需要注意的是当 $\xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 = 0$ 时, 优化变量 $p_{DE,n}$ 的取值不唯一, 可以取得任意满足 $0 \leq p_{DE,n} \leq P_{D,peak}$ 的值。在 $\xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 = 0$ 情形时, 仅式(17)中取 $p_{DE,n} = 0$, 式(17)求得 $p_{DE,n} = 0$ 并不是优化问题式(15)的最优解, 所以在求得 \mathbf{P}^* 值之后, 还要求解 $\xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 = 0$ 情况下的 $p_{DE,n}$ 值。因此, 产生出 3 个集合, 分别为 D_1 、 D_2 和 D_3 , 其中, $D_1 = \{n | \xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 = 0\}$, $D_2 = \{n | \xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 > 0\}$, $D_3 = \{n | \xi \beta_2 |h_{DE,n}|^2 - \beta_1 < 0\}$ 然后求解 $n \in D_1$ 时的 $p_{DE,n}$, 其问题为

$$\text{find } p_{DE,n} \quad (26)$$

$$\text{约束条件为 } \sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n} + \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \leq P \quad (27)$$

$$0 \leq p_{DE,n} \leq P_{D,peak}, n \in \Omega \quad (28)$$

式(26)所示的问题的求解可以转换为求解式(31)所示的问题, 这是因为式(26)的任意一个解都是式(30)的可行解。

$$\max_{p_{DE,n}} \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,n}|^2 \quad (30)$$

约束条件: 式(27)和式(28)

$$\text{令 } \hat{k} = \left\lfloor \frac{P - \sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n}^*}{P_{D,peak}} \right\rfloor, \text{ 其中 } \lfloor x \rfloor \text{ 代表小于 } x \text{ 的}$$

最大整数, $\hat{h}_{DE,\hat{k}+1}$ 代表 $\{|h_{DE,n}|\}$ 中第 $\hat{k}+1$ 大的数。

式(30)的解为

$$p_{DE,n}^* = \begin{cases} P_{D,peak}, & |h_{DE,n}| > \hat{h}_{DE,\hat{k}+1} \\ P - \sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n}^* - \hat{k} P_{D,peak}, & |h_{DE,n}| = \hat{h}_{DE,\hat{k}+1} \\ 0, & |h_{DE,n}| < \hat{h}_{DE,\hat{k}+1} \end{cases} \quad (31)$$

综上所述, 本文提出的子载波与功率联合分配算法的具体步骤如下。

步骤 1 初始化非负的拉格朗日乘子 $\{\beta_1, \beta_2\}$ 。

步骤 2 分别根据式(19)~式(21)计算出优化功率 p^* 。

步骤 3 根据式(23)得到载波分配集合。

步骤 4 利用椭球法更新拉格朗日乘子 $\{\beta_1, \beta_2\}$ 。

步骤 5 重复步骤 2~步骤 4, 直到椭球的轴长小于 ε , 其中 ε 是一个精度值。

步骤 6 根据式(31)计算 $p_{DE,n}^*$ 。

4 实验仿真

实验参数采用短距离物联网的设置^[20]：载波频率为 750 MHz，子载波带宽为 15 kHz，总子载波数为 32。上下行链路的大尺度衰落用 $\zeta_0 \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-k}$ 表示，其中 $\zeta_0 = -30$ dB，表示 $d_0 = 1$ m 时的路径损耗， $k = 3$ 是路径损耗因子，小尺度衰落用瑞利衰落建模。噪声总功率 $\sigma^2 = -100$ dBm，每条子载波上的噪声功率 $\sigma_n^2 = \frac{\sigma^2}{N}$ 。每条子载波上分配功率上限

$$p_{D,peak} = \frac{4P}{N}, \text{精度值 } \varepsilon = 10^{-4}, \text{能量转换效率 } \xi = 1。$$

因为已有文献的算法无法直接扩展应用于本文的系统中，所以本文算法只与子载波固定算法和启发式算法这 2 种算法进行对比。

1) 子载波固定算法

① 载波分配：下行链路第 1~24 条子载波用于信息传输，第 25~32 条子载波用来能量传输；上行链路子载波都用于信息传输。将用于能量传输的子载波数固定为 8 是因为当总子载波数为 16 时，能量传输的子载波数为 4，可得到最大的下行链路信息传输速率^[21]，本文设总子载波数为 32，因此将能量传输的子载波数固定为 8。

② 功率分配：载波分配问题通过第一步解决后，优化问题就转化成功率分配问题，如式(32)~式(36)所示。该问题是凸优化问题，采取注水功率分配方法进行求解。

$$\max_{p_{DI,n}, p_{DE,n}, p_{UI,n}} wR_D + R_U \quad (32)$$

约束条件为

$$\sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n} + \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} \leq P \quad (33)$$

$$0 \leq p_{DI,n}, p_{DE,n} \leq P_{D,peak}, \forall n \in \Omega \quad (34)$$

$$0 \leq p_{UI,n} \leq P_{U,peak}, \forall n \in \Omega \quad (35)$$

$$\sum_{n=1}^N p_{UI,n} \leq \xi \sum_{n \in G_{DE}} p_{DE,n} |h_{DE,n}|^2 \quad (36)$$

2) 启发式算法。

① 下行链路能量传输子载波 G_{DE} 的确定、功率 $P_{DE,n}$ 的计算：将下行链路信道状态信息进行排序，选择增益最大的 4 条子载波用来传输能量，每条子

载波分配的功率为 $P_{D,peak}$ 。将能量传输子载波数设为 4 是因为能量传输子载波数取决于每条子载波上的功率上限 $P_{D,peak}$ 的大小，本文设 $P_{D,peak} = \frac{4P}{N}$ ，由于基站总功率的约束，最多可以用 8 条子载波传输能量。因此，采用启发式的思想折中取值，将能量传输子载波数设为 4。

② 下行链路信息传输子载波 G_{DI} 的确定、功率 $P_{DI,n}$ 的计算：在①中确定了下行链路能量传输子载波集合，剩余的子载波用来传输信息；用于信息传输的总能量为 $P - 4P_{D,peak}$ ，优化问题如式(37)~式(39)所示。该优化问题凸优化问题，采取注水功率分配方法进行求解。

$$\max_{p_{DI,n}} \sum_{n \in G_{DI}} \text{lb} \left(1 + \frac{p_{DI,n} |h_{DI,n}|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (37)$$

约束条件为

$$\sum_{n \in G_{DI}} p_{DI,n} \leq P - 4P_{D,peak} \quad (38)$$

$$p_{DI,n} \leq P_{D,peak}, \forall n \in \Omega \quad (39)$$

③ 上行链路信息传输功率 $P_{DI,n}$ 的计算。此时收获的总功率为

$$P_{EH} = \sum_{n \in G_{DI}} \xi |h_{DE,n}|^2 p_{DI,n}$$

上行链路的优化问题如式(40)~式(42)所示。该优化问题凸优化问题，采取注水功率分配方法进行求解。

$$\max_{p_{UI,n}} \sum_{n=1}^N \left(1 + \frac{p_{UI,n} |h_{DI,n}|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (40)$$

约束条件为

$$\sum_{n=1}^N p_{UI,n} \leq P_{EH} \quad (41)$$

$$p_{UI,n} \leq P_{U,peak}, \forall n \in \Omega \quad (42)$$

采用蒙特卡罗法，将上述 3 种算法在 Matlab 软件进行仿真实验。对 500 个随机信道的运行结果取平均，得到如下结果。

图 2 是上行链路可达速率与基站发射功率的关系变化曲线，其中考虑到无线能量信号传输的路径损耗，为了使用户能够获取足够多的能量，用户与基站之间的距离不宜太远，在仿真实验中将用户与

基站之间的距离设置为 $d = 3 \text{ m}$ [17,20]。可以明显看出，3 种算法的上行链路可达速率随着基站发射功率的增加而增加。在加权因子 $w=0.2$ 时，本文的子载波与功率联合分配算法（以下简称本文算法）的可达速率要大于载波数固定算法的可达速率；当加权因子 $w=1$ 和 $w=5$ 时，本文算法的可达速率要小于载波数固定算法的可达速率，这是由于 $w=0.2$ 时，整个通信系统更侧重于上行链路信息传输，而更多载波用于能量传输来完成上行链路信息传输，此时本文算法中用于上行链路信息传输的能量要大于固定载波算法中上行链路信息传输的能量，同理，在 $w=1$ 和 $w=5$ 时，得到相反的结果。

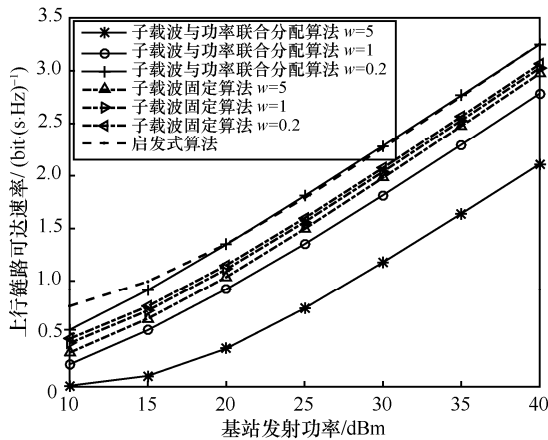


图 2 上行链路可达速率与基站发射功率的关系变化曲线

图 3 是与图 2 对应的下行链路可达速率与基站发射功率的关系变化曲线，图中呈现的是 3 种算法下，下行链路信息传输速率随着基站发射功率的增加而增加。在不同加权因子影响下，本文算法的信息传输速率要大于载波数固定算法的可达速率。对于本文算法以及固定载波的算法来说，下行链路信息传输速率与加权因子有关，即加权因子越大，速率越高，这是因为加权因子越大，系统更侧重下行链路信息传输。

图 4 是上行链路可达速率随基站和用户之间距离变化的关系曲线。其中，基站的发射功率 $P=30 \text{ dBm}$ 。因为当用户与基站之间距离不超过 6 m 时，无线携能通信系统有较好的性能，但当距离超过 6 m 时，由于极大的无线能量信号的路径损耗，用户接收的能量几乎为零 [17]，所以将用户与基站之间距离设置在 $0.5\sim 5.5 \text{ m}$ 。图中显示在 3 种算法下，上行链路可达速率随着基站和用户之间距离的增加而减小。在

加权因子 $w=0.2$ 时，本文算法的可达速率要大于载波数固定算法的可达速率，当加权因子为 $w=1$ 和 5 时，本文算法的可达速率要小于载波数固定算法的可达速率，这是由于 $w=0.2$ 时，整个通信系统更倾向于上行链路信息传输，此时更多载波用于能量传输来完成上行链路信息传输，而本文算法中用于上行链路信息传输的能量要大于固定载波算法中上行链路信息传输的能量。同理，在加权因子为 $w=1$ 和 $w=5$ 时，结果刚好相反。

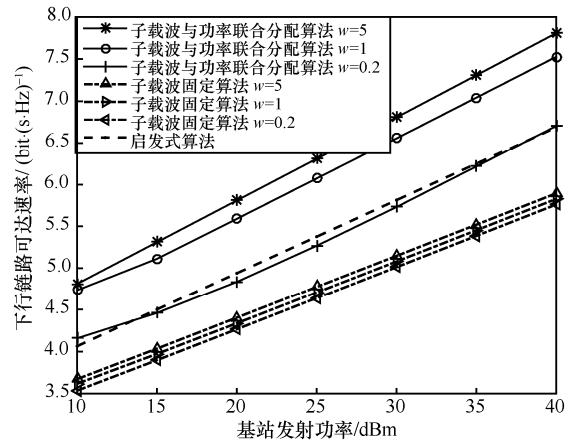


图 3 下行链路可达速率与基站发射功率的关系变化曲线

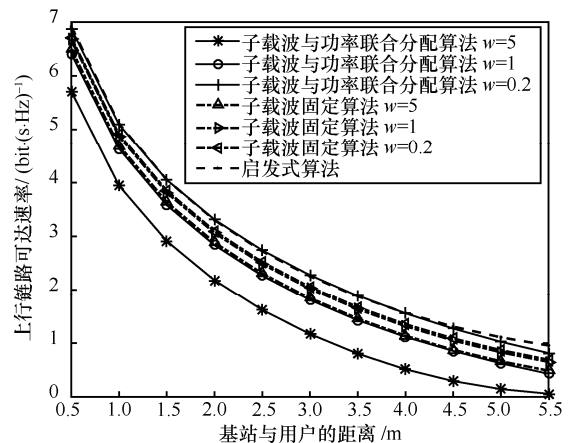


图 4 上行链路可达速率随基站和用户之间距离变化的关系曲线

图 5 是下行链路可达速率随基站和用户之间距离变化的关系曲线。图中呈现出 3 种算法下，下行链路可达速率随着基站和用户之间距离的增加而减小。在不同加权因子影响下，本文算法的信息传输速率要大于载波数固定算法的可达速率，对于每一种算法来说，下行链路信息传输速率与加权因子有关，即加权因子越大，传输速率越高，这是因为加权因子越大，系统更侧重下行链路信息传输。

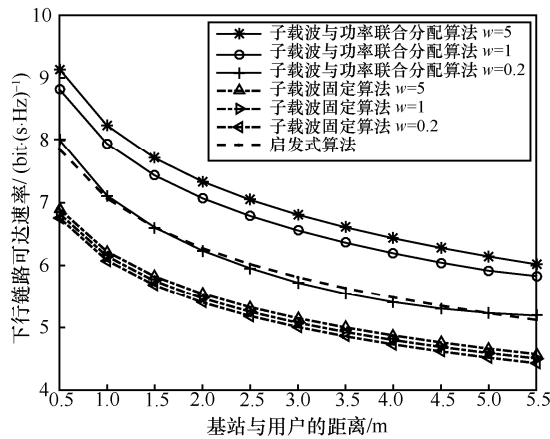


图 5 下行链路可达速率随基站和用户之间距离变化的关系曲线

图 6 是上行链路可达速率随加权因子变化的关系曲线。从图 6 可以看出，本文算法、子载波固定算法中上行链路可达速率随着加权因子的增加而减小。在本文算法中，当加权因子增加时，整个系统更倾向于下行链路信息传输，由于用于上行链路信息传输的能量是来自于上一时隙接收到的能量，因此此时的上行链路传输能力较弱。当加权因子足够大，下行链路都会分配给信息传输。而启发式算法中上行链路可达速率不随加权因子的改变而改变。

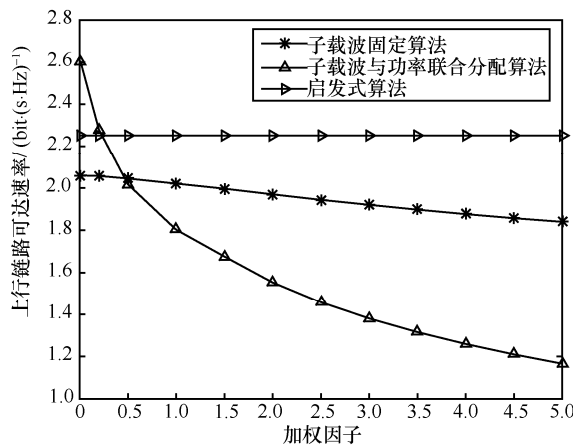


图 6 上行链路可达速率随加权因子变化的关系曲线

图 7 是下行链路可达速率随加权因子变化的关系曲线。从图 7 可以明显看出，本文算法、子载波固定算法中下行链路可达速率随着加权因子的增加而增加。当加权因子在 0.1~3 时，下行链路信息传输速率随加权因子变化的幅度较大，当加权因子在其他区间时，信息传输速率的变化趋势不明显。这是因为加权因子较大时，系统更侧重于下行链路信息传输，此时基本上所有资源都用于下行链路信

息传输，因此在加权因子继续增加时，信息传输速率并没有太大的变化。而启发式算法中上行链路可达速率不随加权因子的改变而改变。

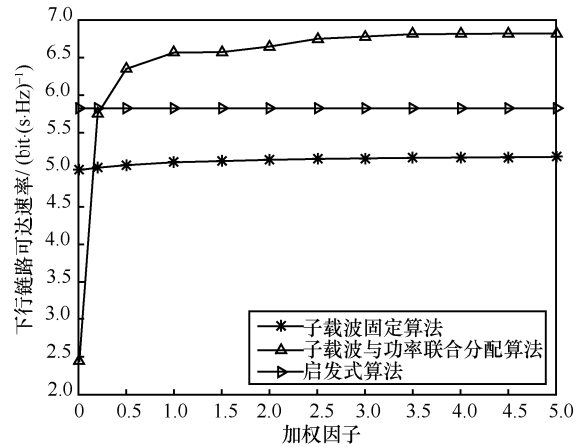


图 7 下行链路可达速率随加权因子变化的关系曲线

5 结束语

本文研究了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链路加权和速率，并通过实验仿真验证了本文算法的有效性。本文研究的加权上下行链路和速率最大化问题具有通用性，通过调整加权因子的大小，该问题等效于下行链路速率最大化、上行链路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] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5):1989-2001.
- [2] VARSHNEY L R. Transporting information and energy simultaneously[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2008: 1612-1616.
- [3] LIU Y, WANG X. Information and energy cooperation in OFDM relaying: protocols and optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7):5088-5098.
- [4] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 12(1): 288-300.
- [5] ZHAO F, WEI L, CHEN H. Optimal time allocation for wireless information and power transfer in wireless powered communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3):1830-1835.
- [6] LIU L, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer: a dynamic power splitting approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3990-4001.

- [7] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [8] JU H, ZHANG R. A novel mode switching scheme utilizing random beamforming for opportunistic energy harvesting[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE 2013: 4250-4255.
- [9] ZHANG G C, XU J, WU Q Q, et al. Wireless powered cooperative jamming for secure OFDM system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2):1331-1346.
- [10] ZHANG G C, LI X Y, CUI M, 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.
- [11] HUANG K B, LARSSON E. Simultaneous information and power transfer for broadband wireless systems[J]. IEEE Transactions Signal Processing, 2013, 61(23): 5972-5986.
- [12] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer in multiuser OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4):2282-2294.
- [13] LI X Y, ZHANG Q, ZHANG G C, et al. Joint resource allocation with subcarrier pairing in cooperative OFDM DF multi-relay networks[J]. IET Communications, 2015, 9(1):78-87.
- [14] CHENG W, GHOGHO M, HUANG Q, et al. Maximizing the sum-rate of amplifyandforwardtwo-way relaying networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(11): 635-638.
- [15] LI X Y, ZHANG Q, ZHANG G C, et al. Joint source and relays power allocation for MIMO AF multi-relay networks[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 83(3):1915-1926.
- [16] KIM H J, LEE H, AHN M. Joint subcarrier and power allocation method in wireless powered communication networks for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(7):4745-4753.
- [17] LU W D, GONG Y, WU J Y. Simultaneous wireless information and power transfer based on joint subcarrier and power allocation in OFDM systems[J]. IEEE Access, 2017, 5:2763-2770.
- [18] YU W, LUI R. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multi-carrier systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 54(7):1310-1322.
- [19] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2004.
- [20] WU Q, CHEN W, NG D, et al. Spectral and energy-efficient wireless powered IoT networks: NOMA or TDMA?[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 6663-6667.
- [21] NA Z, LI X, LIU X, 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(1):148.

[作者简介]



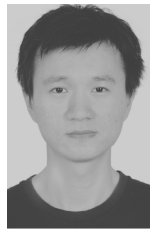
崔苗(1978-),女,新疆昌吉人,博士,广东工业大学讲师,主要研究方向为新一代无线通信技术。



喻鑫(1993-),男,湖北随州人,广东工业大学硕士生,主要研究方向为无线携能通信技术。



李学易(1974-),男,四川乐山人,博士,广东工业大学讲师,主要研究方向为协作无线通信、通信信号处理。



张广驰(1982-),男,广东广州人,博士,广东工业大学教授,主要研究方向为5G无线通信、无人机通信、无线能量传输、资源分配、物理层安全等。



刘怡俊(1976-),男,江西于都人,博士,广东工业大学教授,主要研究方向为类脑计算机、人工智能、新型计算机系统结构和面向应用的集成电路设计。



林凡(1983-),男,浙江温州人,广州杰赛科技股份有限公司高级工程师,主要研究方向为智慧城市和新一代无线通信。