

基于能量协作的认知能量采集网络功率分配算法

谢振威¹, 朱琦²

(1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003; 2. 教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘 要: 针对认知能量采集网络, 提出一种基于系统吞吐量最大化的功率分配算法。该算法在满足 2 个次用户节点采集能量的因果性限制和对主用户干扰限制的条件下, 构建了系统吞吐量的优化模型; 通过变量代换和问题等价性变换, 将各节点的功率和协作能量联合优化问题解耦为分离的功率分配问题和逐个时隙的协作能量求解问题, 而原问题的最优解则通过迭代求解分离的 2 个问题来获得。仿真结果表明, 在 2 个节点采集能量总量差距较大时, 能量协作可以显著提高系统吞吐量。

关键词: 认知无线电; 能量采集; 能量协作; 吞吐量最大化

中图分类号: TN925

文献标识码: A

Power allocation algorithm for cognitive radio energy harvesting networks based on energy cooperation

XIE Zhen-wei¹, ZHU Qi²

(1. Jiangsu Province Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Key Lab on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing 210003, China)

Abstract: An algorithm to optimize the power allocation by maximizing the system throughput in cognitive radio energy harvesting networks was proposed. The algorithm formulated the throughput optimization model subject to the causality constraints of the harvested energy within the two secondary users and the interference constraint of the primary user. In addition, by applying the variable-substitution method and problem equivalence transformation, the joint optimization problem of power and cooperative energy was decoupled into two problems: a power allocation problem and a cooperative energy one. The former problem could be solved by iterating the two decoupled problems. As shown in the simulation results, the energy cooperation can significantly improve the system throughput when the harvested energy difference between two nodes is rather large.

Key words: cognitive radio, energy harvesting, energy cooperation, throughput maximization

1 引言

能量采集技术可以从周围环境源源不断地采集能量, 从而大大延长设备的生命周期, 降低充电成本, 提高无线网络的性能^[1~3]。另外, 认知无线电技术可以发现频谱空洞并合理使用, 从而提高系统的频谱资源利用率^[4,5], 因此, 对认知能量采集网络

中的资源分配问题进行研究非常重要。

人们对能量采集无线网络的资源分配问题已经展开了相关研究。Tutuncuoglu 等^[6]针对单用户能量采集无线网络, 在信道条件始终不变、电池容量受限的条件下, 证明并给出了最优功率分配算法。Orhan 等^[7]针对能量采集广播通信系统, 假设各子信道消耗的能量包括传输信息的能量和固定消耗

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-07-12

通信作者: 朱琦, zhuqi@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571234, No.61631020); 国家重点基础发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (No.2013CB329005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571234, No.61631020), The National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2013CB329005)

的能量,分别在吞吐量最大化,能量最大化和传输时间最小化准则下给出了最优传输策略。Varan 等^[8]假设随机大小的数据分组在传输过程中以随机时间到达源节点,在源节点电池容量受限、数据分组缓冲区大小受限和数据发送时延受限的情况下,通过将功率分配问题与数据调度问题解耦,获得了最大化系统吞吐量的交替最大化算法。但是他们仅仅考虑了能量采集技术,应用场景较为简单^[6-8]。

认知无线电技术和能量采集技术相结合的研究工作也已经展开,一般假设次级用户为能量采集节点^[9-11]。Liang 等^[9]在一定的主用户速率损失约束条件下,通过动态规划和凸优化理论获得了最优功率分配策略。Yin 等^[10]假设系统工作在时隙模式,且每个时隙被按比例划分,分别用来采集能量、频谱感知和数据传输,在满足对主用户的干扰门限限制条件下,通过最大化次用户吞吐量来获得最优的时隙划分系数。Park 等^[11]在次用户采集能量因果性限制和对主用户一定的碰撞约束条件下,推导了最大化吞吐量的最优时隙划分系数。但是他们考虑的都是单个次用户占用主用户频谱,因此主用户对次用户的干扰门限限制可以直接转化为对次用户的峰值功率限制^[9-11]。

当无线通信系统包含2个及以上能量采集节点时,若各节点处于不同的环境,可能采集的能量总量差距很大,采集能量过小的用户可能会产生中断,此时可以用无线能量协作^[12,13]的方式将一个用户的能量传输到另一个用户。Ni 等^[14]针对源节点和目的节点均为能量采集节点的点对点无线通信系统,假设系统处于睡眠模式时,源节点和目的节点采集能量,同时目的节点可以将采集的能量按照一定比例传输到源节点;系统处于活跃模式时,源节点发送数据到目的节点,以最大化系统吞吐量为目标,获得了源节点最优功率分配与活跃模式、睡眠模式的比例系数。Li 等^[15]针对多用户通信场景,假设在下行链路,基站可以向各用户无线传输能量,在上行链路,各用户采集能量并按照时分多址的方式向基站传输信息,在最大化能效目标下,通过拉格朗日乘子法和 Jensen 不等式,给出了最优时间分配在单用户场景的准确表达式和多用户场景的近似表达式,极大地简化了问题的求解。Shin 等^[16]假设2个对称用户之间存在干扰,并可以互相协作能量,研究了系统的可实现平均速率区域问题。Tutuncuoglu 等^[17]考虑了几种包含能量采集发送者

的多节点网络,假设各个发送者之间可以双向协作能量,在吞吐量最大化准则下,提出了一种延迟策略,即当前时隙用户之间传输的能量,必定在当前时隙被使用,而不会存储到未来时隙使用,不影响问题解的最优性。在延迟策略下,通过将原问题解耦为分离的功率分配问题和能量协作问题,从而获得了系统的最优功率分配和能量协作策略。但是文献^[14~17]未考虑认知无线电技术,因此本文需要解决的问题复杂度更高,求解更加困难。

针对认知能量采集网络,本文提出了一种基于系统吞吐量最大化的功率分配算法。该算法在满足2个用户节点采集能量的因果性限制和对主用户干扰限制的条件下,通过变量代换和问题等价性变换,将各节点的功率和协作能量联合优化问题解耦为分离的功率分配问题和逐个时隙的协作能量求解问题,而原问题的最优解则通过迭代求解分离的2个问题来获得。本文研究的网络模型不同于文献^[9~11],只要2个次用户对主用户的干扰之和不超过主用户的最大干扰门限限制,就可以采用正交频分复用(OFDM)方式占用主用户频谱^[18],因此需要对2个次用户不同时间的功率进行联合优化。

2 系统模型与问题描述

如图1所示,本文研究的基于能量协作的认知能量采集网络包含一个主用户节点PU,2个次用户节点SU₁和SU₂,和一个基站节点BS。主用户总带宽为W,2个次用户占用主用户频谱分别给基站发送信息,并且均采用能量采集方式提供能量。系统以时隙为最小传输单位,一次传输共包含N个时隙,每个时隙的持续时间单位化为1,本文得出的结论可以扩展到任意时隙长度。假设2个次用户节点各时隙采集的能量大小在开始数据传输前可以被准确预测^[19,20]。

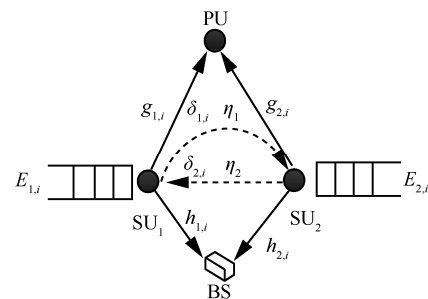


图1 基于能量协作的认知能量采集网络模型

假设在数据传输过程中各信道为瑞利衰落信道, 信道衰落系数在各时隙内保持不变, 第 i 时隙 2 个次用户 SU_1 和 SU_2 到基站的信道衰落系数分别表示为 $h_{1,i}$ 和 $h_{2,i}$, 而 2 个次用户与主用户之间的信道衰落系数分别表示为 $g_{1,i}$ 和 $g_{2,i}$ 。 $E_{1,i}$ 和 $E_{2,i}$ 分别表示第 i 时隙次用户 SU_1 和 SU_2 采集的能量。同时, 在各个时隙, 允许 2 个次用户 SU_1 和 SU_2 之间传输能量, 传输能量的大小表示为 $\delta_{1,i}$ 和 $\delta_{2,i}$, 假设 2 个次用户相距较近, 能量传递效率分别为 η_1 、 η_2 ($0 \leq \eta_1, \eta_2 \leq 1$)^[12,13]。同时, 假设 2 个次用户满负荷, 即总是有信息需要发送。

次用户 SU_1 和 SU_2 各占用主用户带宽的一半。在第 i 时隙, SU_1 和 SU_2 的分配功率分别表示为 $p_{1,i}$ 和 $p_{2,i}$, 要求 2 个次用户对主用户的干扰小于门限值 I , 则系统干扰门限限制为

$$p_{1,i}g_{1,i} + p_{2,i}g_{2,i} \leq I \quad (1)$$

同时, 2 个次用户 SU_1 和 SU_2 的分配功率必须满足采集能量的因果性限制。

$$\sum_{i=1}^n p_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n (E_{1,i} - \delta_{1,i} + \eta_2 \delta_{2,i}), \quad \forall n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n p_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n (E_{2,i} - \delta_{2,i} + \eta_1 \delta_{1,i}), \quad \forall n \quad (3)$$

其中, 式(2)和式(3)表示前 n ($1 \leq n \leq N$) 时隙 2 个次用户各自消耗的总能量不能超过采集的总能量, 并且在第 i 时隙, $\delta_{1,i}$ 和 $\delta_{2,i}$ 不能同时大于 0, 证明可见性质 1。

系统 N 时隙内的总吞吐量可以表示为

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} W \left[\text{lb} \left(1 + \frac{h_{1,i} p_{1,i}}{WN_0} \right) + \text{lb} \left(1 + \frac{h_{2,i} p_{2,i}}{WN_0} \right) \right] \quad (4)$$

其中, N_0 表示信道的噪声功率谱密度。由于 $\frac{WN_0}{2}$ 为常数, 为简化推导流程, 令 $\bar{h}_{1,i} = \frac{h_{1,i}}{WN_0}$, $\bar{h}_{2,i} = \frac{h_{2,i}}{WN_0}$ 。

3 最优功率分配算法

本文以最大化 N 时隙内系统吞吐量为目标, 则最优化问题可以建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\{p_{1,i}, p_{2,i}, \delta_{1,i}, \delta_{2,i}\}} \sum_{i=1}^N \left[\text{lb}(1 + \bar{h}_{1,i} p_{1,i}) + \text{lb}(1 + \bar{h}_{2,i} p_{2,i}) \right] \\ & \text{s.t.} \quad p_{1,i}g_{1,i} + p_{2,i}g_{2,i} \leq I, \quad \forall i \\ & \quad \sum_{i=1}^n p_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n (E_{1,i} - \delta_{1,i} + \eta_2 \delta_{2,i}), \quad \forall n \\ & \quad \sum_{i=1}^n p_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n (E_{2,i} - \delta_{2,i} + \eta_1 \delta_{1,i}), \quad \forall n \\ & \quad 0 \leq p_{1,i}, \quad \forall i \\ & \quad 0 \leq p_{2,i}, \quad \forall i \\ & \quad 0 \leq \delta_{1,i}, \quad \forall i \\ & \quad 0 \leq \delta_{2,i}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 目标函数中的 $\frac{W}{2}$ 被省略并不影响最优功率分配结果, 只需在计算系统吞吐量时加上即可; 由于在式(5)中的目标函数是凹函数, 而限制条件均为线性限制, 限制集为凸集, 故式(5)为凸优化问题^[21], 有唯一最优值。

式(5)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_{i=1}^N \left[\text{lb}(1 + \bar{h}_{1,i} p_{1,i}) + \text{lb}(1 + \bar{h}_{2,i} p_{2,i}) \right] - \\ & \sum_{i=1}^N \lambda_i (p_{1,i}g_{1,i} + p_{2,i}g_{2,i} - I) - \\ & \sum_{n=1}^N \mu_{1,n} \left(\sum_{i=1}^n p_{1,i} - \sum_{i=1}^n (E_{1,i} - \delta_{1,i} + \eta_2 \delta_{2,i}) \right) - \\ & \sum_{n=1}^N \mu_{2,n} \left(\sum_{i=1}^n p_{2,i} - \sum_{i=1}^n (E_{2,i} - \delta_{2,i} + \eta_1 \delta_{1,i}) \right) + \\ & \sum_{i=1}^N \alpha_{1,i} p_{1,i} + \sum_{i=1}^N \alpha_{2,i} p_{2,i} + \sum_{i=1}^N \beta_{1,i} \delta_{1,i} + \sum_{i=1}^N \beta_{2,i} \delta_{2,i} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 拉格朗日乘子 $\{\lambda_i\}$ 、 $\{\mu_{1,i}\}$ 、 $\{\mu_{2,i}\}$ 、 $\{\alpha_{1,i}\}$ 、 $\{\alpha_{2,i}\}$ 、 $\{\beta_{1,i}\}$ 和 $\{\beta_{2,i}\}$ 分别对应于式(5)中的 7 个限制条件, $\{x_i\}$ 表示 $x_i, 1 \leq i \leq N$ 组成的集合。

将拉格朗日函数 \mathcal{L} 分别对 $P_{1,i}$ 、 $P_{2,i}$ 、 $\delta_{1,i}$ 和 $\delta_{2,i}$ 求偏导, 并由 KKT 最优条件获得

$$p_{1,i} = \frac{1}{\lambda_i g_{1,i} + \sum_{n=i}^N \mu_{1,n} - \alpha_{1,i}} - \frac{1}{\bar{h}_{1,i}} \quad (7)$$

$$p_{2,i} = \frac{1}{\lambda_i g_{2,i} + \sum_{n=i}^N \mu_{2,n} - \alpha_{2,i}} - \frac{1}{\bar{h}_{2,i}} \quad (8)$$

$$-\sum_{n=i}^N \mu_{1,n} + \eta_1 \sum_{n=i}^N \mu_{2,n} + \beta_{1,i} = 0 \quad (9)$$

$$\eta_2 \sum_{n=i}^N \mu_{1,n} - \sum_{n=i}^N \mu_{2,n} + \beta_{2,i} = 0 \quad (10)$$

通过分析乘子，可以获得几个最优功率分配和能量协作策略需满足的性质。

性质 1 除非 $\eta_1 = \eta_2 = 1$ ，否则 $\delta_{1,i} \delta_{2,i} = 0$ ，即 2 个次用户在第 i 时隙不可能同时双向协作能量。

证明 若 $\delta_{1,i} > 0$ ，则 $\beta_{1,i} = 0$ ，由式(9)知 $\sum_{n=i}^N \mu_{1,n} = \eta_1 \sum_{n=i}^N \mu_{2,n}$ ；若 $\delta_{2,i} > 0$ ，则 $\beta_{2,i} = 0$ ，由式(10)知 $\sum_{n=i}^N \mu_{1,n} = \frac{1}{\eta_2} \sum_{n=i}^N \mu_{2,n}$ 。而系统设定能量协作效率 $0 \leq \eta_1, \eta_2 \leq 1$ ，当 $0 \leq \eta_1, \eta_2 < 1$ 时，式(9)和式(10)显然互相矛盾，故除非 $\eta_1 = \eta_2 = 1$ ，否则 $\delta_{1,i}, \delta_{2,i}$ 不可能同时大于 0。

性质 2 若 $p_{1,i} g_{1,i} + p_{2,i} g_{2,i} < I$ ， $p_{1,i} \neq 0$ ， $p_{2,i} \neq 0$ 成立，则当 $\delta_{1,i} > 0$ ， $\delta_{2,i} = 0$ ， $\frac{p_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}}}{p_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}}} = \frac{1}{\eta_1}$ ；当 $\delta_{1,i} = 0$ ， $\delta_{2,i} > 0$ ， $\frac{p_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}}}{p_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}}} = \eta_2$ 。

证明 由于 $p_{1,i} g_{1,i} + p_{2,i} g_{2,i} < I$ 和 $\delta_{1,i} > 0$ ，则 $\lambda_i = 0$ ， $\beta_{1,i} = 0$ ，由式(9)知 $\sum_{n=i}^N \mu_{1,n} = \eta_1 \sum_{n=i}^N \mu_{2,n}$ ，又因为 $p_{1,i} \neq 0$ 、 $p_{2,i} \neq 0$ ，得到 $\alpha_{1,i} = 0$ 、 $\alpha_{2,i} = 0$ ，将上述

等式代入式(7)和式(8)，可以得到 $\frac{p_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}}}{p_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}}} = \frac{1}{\eta_1}$ ；同

理，可以得到 $\frac{p_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}}}{p_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}}} = \eta_2$ 。

性质 3 存在延迟策略^[17] $p_{1,i} \geq \eta_2 \delta_{2,i}$ 和 $p_{2,i} \geq \eta_1 \delta_{1,i}$ ， $1 \leq i \leq N$ ，可以解决式(5)。延迟策略可以表达为当前时隙次用户之间协作的能量，必定在当前时隙被使用，而不会存储到未来时隙使用。

证明 假设 $\{p_{1,i}^*, p_{2,i}^*, \delta_{1,i}^*, \delta_{2,i}^*\}$ 是式(5)的最优解，同时不符合延迟策略，那么至少存在一个时隙 n ，使 $p_{1,n}^* < \eta_2 \delta_{2,n}^*$ 或 $p_{2,n}^* < \eta_1 \delta_{1,n}^*$ 成立。假设是 $p_{1,n}^* < \eta_2 \delta_{2,n}^*$

成立，那么令 $\delta_{2,n+1}^* = \delta_{2,n+1}^* + \delta_{2,n}^* - \frac{p_{1,n}^*}{\eta_2}$ ， $\delta_{2,n}^* = \frac{p_{1,n}^*}{\eta_2}$ ，

当 $n = N$ 时，令 $\delta_{2,n}^* = \frac{p_{1,n}^*}{\eta_2}$ 即可，此时时隙 n 满足延迟策略，由于 $\{p_{1,i}^*, p_{2,i}^*\}$ 没有变化，获得的目标函数最优值不变，由于只是将第 n 时隙协作的能量延迟一部分到第 $n+1$ 时隙传输，容易验证所有限制条件没有被违背。同理，若 $p_{2,n}^* < \eta_1 \delta_{1,n}^*$ ，可以相似证明。

由性质 3，对于符合延迟策略的最优解，当前时隙协作的能量，必定在当前时隙被使用，则令 $\bar{p}_{1,i} = p_{1,i} + \delta_{1,i} - \eta_2 \delta_{2,i}$ ，表示次用户 SU₁ 电池实际消耗的能量。由于 $p_{1,i} \geq \eta_2 \delta_{2,i} \geq 0$ ，那么若 $p_{1,i} - \eta_2 \delta_{2,i} \geq 0$ ，由 $\bar{p}_{1,i} = p_{1,i} + \delta_{1,i} - \eta_2 \delta_{2,i}$ 知 $\bar{p}_{1,i} - \delta_{1,i} \geq 0$ ，反之，已知 $\bar{p}_{1,i} \geq \delta_{1,i} \geq 0$ ，可以获得 $p_{1,i} \geq \eta_2 \delta_{2,i} \geq 0$ 。同理，令 $\bar{p}_{2,i} = p_{2,i} + \delta_{2,i} - \eta_1 \delta_{1,i}$ ，表示次用户 SU₂ 电池实际消耗的能量，若已知 $\bar{p}_{2,i} \geq \delta_{2,i} \geq 0$ ，可以获得 $p_{2,i} \geq \eta_1 \delta_{1,i} \geq 0$ ，那么式(5)可以转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\substack{\{p_{1,i}, p_{2,i}, \\ \delta_{1,i}, \delta_{2,i}\}}} \sum_{i=1}^N \left\{ \text{lb} \left[1 + \bar{h}_{1,i} (\bar{p}_{1,i} - \delta_{1,i} + \eta_2 \delta_{2,i}) \right] + \right. \\ & \quad \left. \text{lb} \left[1 + \bar{h}_{2,i} (\bar{p}_{2,i} - \delta_{2,i} + \eta_1 \delta_{1,i}) \right] \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \bar{p}_{1,i} g_{1,i} + \bar{p}_{2,i} g_{2,i} + \delta_{1,i} (-g_{1,i} + \eta_1 g_{2,i}) + \\ & \quad \delta_{2,i} (\eta_2 g_{1,i} - g_{2,i}) \leq I, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^n \bar{p}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{1,i}, \quad \forall n \\ & \sum_{i=1}^n \bar{p}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{2,i}, \quad \forall n \\ & \delta_{1,i} \leq \bar{p}_{1,i}, \quad 0 \leq \delta_{1,i}, \quad \forall i \\ & \delta_{2,i} \leq \bar{p}_{2,i}, \quad 0 \leq \delta_{2,i}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (11)$$

下一步，将对 $\{\delta_{1,i}, \delta_{2,i}\}$ 限制进行分离。由于在式(11)的目标函数中，第 i 时隙 2 个次用户的容量和 $\text{lb} [1 + \bar{h}_{1,i} (\bar{p}_{1,i} - \delta_{1,i} + \eta_2 \delta_{2,i})] + \text{lb} [1 + \bar{h}_{2,i} (\bar{p}_{2,i} - \delta_{2,i} + \eta_1 \delta_{1,i})]$ 仅仅与变量的下标 i 相关，因此定义

$$\begin{aligned} & f(\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}) = \max_{\{\delta_{1,i}, \delta_{2,i}\}} \text{lb} \left[1 + \bar{h}_{1,i} (\bar{p}_{1,i} - \delta_{1,i} + \eta_2 \delta_{2,i}) \right] + \\ & \quad \text{lb} \left[1 + \bar{h}_{2,i} (\bar{p}_{2,i} - \delta_{2,i} + \eta_1 \delta_{1,i}) \right] \\ \text{s.t.} \quad & \delta_{1,i} (-g_{1,i} + \eta_1 g_{2,i}) + \delta_{2,i} (\eta_2 g_{1,i} - g_{2,i}) \\ & \leq I - \bar{p}_{1,i} g_{1,i} - \bar{p}_{2,i} g_{2,i}, \quad \forall i \\ & \delta_{1,i} \leq \bar{p}_{1,i}, \quad 0 \leq \delta_{1,i}, \quad \forall i \\ & \delta_{2,i} \leq \bar{p}_{2,i}, \quad 0 \leq \delta_{2,i}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $f(\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i})$ 表示在第 i 时隙 $\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}$ 确定情况下, 求取最优的 $\delta_{1,i}$ 和 $\delta_{2,i}$, 使第 i 时隙 2 个次用户的容量和最大。由于目标函数 lb 关于 $\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}$ 是联合凹函数, 而限制条件均为线性限制, 限制集为凸集, 故 $f(\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i})$ 关于 $\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}$ 是联合凹函数^[21]。

则原问题可以等价

$$\begin{aligned} \max_{\{\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}\}} & \sum_{i=1}^N \{f(\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i})\} \\ \text{s.t.} & \bar{p}_{1,i}g_{1,i} + \bar{p}_{2,i}g_{2,i} \leq I, \quad \forall i \\ & \sum_{i=1}^n \bar{p}_{1,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{1,i}, \quad \forall n \\ & \sum_{i=1}^n \bar{p}_{2,i} \leq \sum_{i=1}^n E_{2,i}, \quad \forall n \\ & 0 \leq \bar{p}_{1,i}, \quad \forall i \\ & 0 \leq \bar{p}_{2,i}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (13)$$

$$\delta_{1,i}^* = \begin{cases} \min \left\{ \bar{p}_{1,i}, \frac{1}{2} \left[\left(\bar{p}_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}} \right) - \frac{1}{\eta_1} \left(\bar{p}_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}} \right) \right]^+ \right\}, & g_{1,i} \geq \eta_1 g_{2,i} \\ \min \left\{ \bar{p}_{1,i}, \frac{1}{2} \left[\left(\bar{p}_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}} \right) - \frac{1}{\eta_1} \left(\bar{p}_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}} \right) \right]^+, \frac{I - (\bar{p}_{1,i}g_{1,i} + \bar{p}_{2,i}g_{2,i})}{-g_{1,i} + \eta_1 g_{2,i}} \right\}, & g_{1,i} < \eta_1 g_{2,i} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $[x]^+ = \max(0, x)$ 。

同理, 当 $\delta_{1,i} = 0$ 时, 式(12)的目标函数对 $\delta_{2,i}$ 求微分, 得到最优解为

$$\delta_{2,i}^* = \begin{cases} \min \left\{ \bar{p}_{2,i}, \frac{1}{2} \left[\left(\bar{p}_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}} \right) - \frac{1}{\eta_2} \left(\bar{p}_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}} \right) \right]^+ \right\}, & g_{2,i} \geq \eta_2 g_{1,i} \\ \min \left\{ \bar{p}_{2,i}, \frac{1}{2} \left[\left(\bar{p}_{2,i} + \frac{1}{h_{2,i}} \right) - \frac{1}{\eta_2} \left(\bar{p}_{1,i} + \frac{1}{h_{1,i}} \right) \right]^+, \frac{I - (\bar{p}_{1,i}g_{1,i} + \bar{p}_{2,i}g_{2,i})}{\eta_2 g_{1,i} - g_{2,i}} \right\}, & g_{2,i} < \eta_2 g_{1,i} \end{cases} \quad (15)$$

但是在达到 $\bar{p}_{1,i}g_{1,i} + \bar{p}_{2,i}g_{2,i} = I$ 限制的时隙, 当 $g_{1,i} < \eta_1 g_{2,i}$ 与 $g_{2,i} < \eta_2 g_{1,i}$ 时, 分别求得 $\delta_{1,i}^*$ 与 $\delta_{2,i}^*$ 为 0, 这是由于从功率的角度逐时隙求需要协作的能量, 存在最大干扰门限限制, 因此, 本文从能量的角度并通过迭代的方式获得各时隙最优的功率分配与能量协作策略, 具体步骤如下。

1) 初始化各时隙 2 个次用户之间协作的能量为 0, 并令 $E_{1,i}^0 = E_{1,i}$, $E_{2,i}^0 = E_{2,i}$, $1 \leq i \leq N$, 其中, 上标 0 表示第 0 次迭代, 上标 m 则表示第 m 次迭代, 则式(13)可以利用迭代注水算法解决, 得到 $\{\bar{p}_{1,i}^0, \bar{p}_{2,i}^0\}$

$$\text{后, 利用 } C = \sum_{i=1}^N \left[\frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{1,i} \bar{p}_{1,i}^0) + \frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{2,i} \bar{p}_{2,i}^0) \right]$$

计算此时获得的系统吞吐量。

在式(13)中, 目标函数关于 $\{\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}\}$ 是联合凹函数, 对 $\{\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}\}$ 的限制均为线性限制, 故式(13)为凸优化问题, 有唯一最优值。同时, 式(11)和式(13)的最优值与对应最优值的可行点相同, 故两者等价。

若初始化各时隙 2 个次用户之间协作的能量为 0, 式(13)可以利用迭代注水算法^[22]解决。得到 $\{\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}\}$ 后, 将确定的 $\{\bar{p}_{1,i}, \bar{p}_{2,i}\}$ 代入式(12), 由性质 1 可知, 同一时隙 2 个次用户之间不可能同时双向协作能量, 即 2 个次用户之间只可能单向协作能量或不进行协作能量。那么可以逐时隙计算最优协作能量的大小, 当 $\delta_{2,i} = 0$ 时, 式(12)中的目标函数对 $\delta_{1,i}$ 求微分, 得到最优解为

2) 分别利用式(14)和式(15)求得未达到 $\bar{p}_{1,i}g_{1,i} + \bar{p}_{2,i}g_{2,i} = I$ 限制的各时隙需要协作的能量大小 $\{\delta_{1,i}^1, \delta_{2,i}^1\}$, 同时, 定义垂直方向度量抽头^[16], 用于记录各个时隙次用户之间协作能量的大小, 规定次用户 SU₁ 向 SU₂ 协作能量为正方向。

3) 更新 $E_{1,i}^1 = E_{1,i}^0 - \delta_{1,i}^1 + \eta_2 \delta_{2,i}^1$, $E_{2,i}^1 = E_{2,i}^0 - \delta_{2,i}^1 + \eta_1 \delta_{1,i}^1$, $1 \leq i \leq N$, 注意到在这一步中, 各时隙 2 个次用户采集的能量等价于考虑了各自需要协作的能量, 那么需要重新分配 2 个次用户各时隙的功率。

4) 由于第 3)步已经将未达到 $\bar{p}_{1,i}g_{1,i} + \bar{p}_{2,i}g_{2,i} = I$ 限制的各时隙需要协作的能量考虑到次用户各自采集的能量中, 那么可以再次初始化各时隙 2 个次用户

之间协作的能量为 0，并利用迭代注水算法解决问题 (13) 得到 $\{\bar{p}_{1,i}^1, \bar{p}_{2,i}^1\}$ ，计算此时获得的系统吞吐量 $C = \sum_{i=1}^N \left[\frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{1,i} \bar{p}_{1,i}^1) + \frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{2,i} \bar{p}_{2,i}^1) \right]$ ，若获得的吞吐量相较于上一次计算的吞吐量增大，重复上述过程，直到系统吞吐量收敛于某一固定值。

除非系统吞吐量达到最优值，否则每次能量协作和迭代注水算法的使用都会增大系统吞吐量，而式(13)为凸优化问题，有唯一最优值，故系统吞吐量不会无限增大下去，最终必收敛于最优值，详细的算法过程可见算法 1。

对于达到 $\bar{p}_{1,i} g_{1,i} + \bar{p}_{2,i} g_{2,i} = I$ 限制的时隙，由于第 m 次迭代中更新 $E_{1,i}^m = E_{1,i}^{m-1} - \delta_{1,i}^m + \eta_2 \delta_{2,i}^m$ ， $E_{2,i}^m = E_{2,i}^{m-1} - \delta_{2,i}^m + \eta_1 \delta_{1,i}^m$ ， $1 \leq i \leq N$ ，然后在迭代注水算法中，分别进行了次用户内部的有峰值功率限制的定向注水，那么达到 $\bar{p}_{1,i} g_{1,i} + \bar{p}_{2,i} g_{2,i} = I$ 限制的时隙也相当于进行了一定程度的能量协作。

如图 2 所示，本文对达到 $\bar{p}_{1,i} g_{1,i} + \bar{p}_{2,i} g_{2,i} = I$ 限制时隙的等价能量协作进行简单说明，假设在图 2 中第①个容器中有 6 个水槽（等价于系统包含 6 个时隙），6 个水槽都包含一定的初始水位（等价于能量协作前某一个次用户分配的功率，假设这个次用户各时隙采集的能量很少），目标是将容器的各个水槽加满水（等价于通过能量协作获 $\{\bar{p}_{1,i}^m, \bar{p}_{2,i}^m\}$ 得各时隙这个次用户的最优功率分配），但是只能通过有入口的水槽向容器内注水（例如，入口 1 和入口 3，等价于只有时隙 1 和时隙 3 未达到对主用户的干扰门限制），水只能由左向右流动（等价于采集能量的因果性限制）。首先，由入口 1 和入口 3 向水槽内加满水，即①→②，然后将水槽 1 和 3 的水向右流动，即②→③，这就相当于向容器的水槽 2、4、5 和 6 注入了一定的水，重复迭代上述过程，直到容器的各个水槽加满水。

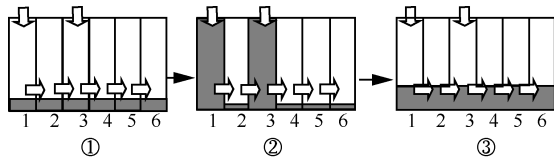


图 2 等价能量协作

算法 1 基于能量协作的认知能量采集网络最优资源分配算法

步骤 1 初始化 $\delta_{1,i} = 0, \delta_{2,i} = 0, E_{1,i}^0 = E_{1,i}, E_{2,i}^0 =$

$E_{2,i}, 1 \leq i \leq N, m = 0, temp_1 = 0;$

步骤 2 利用迭代注水算法获得 $\{\bar{p}_{1,i}^0, \bar{p}_{2,i}^0\}$;

步骤 3 计算 $C = \sum_{i=1}^N \left[\frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{1,i} \bar{p}_{1,i}^0) + \frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{2,i} \bar{p}_{2,i}^0) \right]$;

步骤 4 while $C > temp_1$ do

步骤 5 $m = m + 1, temp_1 = C;$

步骤 6 利用式(14)和式(15)计算 $\{\delta_{1,i}^m, \delta_{2,i}^m\}$ ，更新垂直方向度量抽头的读数；

步骤 7 更新 $E_{1,i}^m = E_{1,i}^{m-1} - \delta_{1,i}^m + \eta_2 \delta_{2,i}^m, E_{2,i}^m = E_{2,i}^{m-1} - \delta_{2,i}^m + \eta_1 \delta_{1,i}^m, 1 \leq i \leq N;$

步骤 8 初始化 $\delta_{1,i} = 0, \delta_{2,i} = 0, 1 \leq i \leq N$ ，利用迭代注水算法获得；

步骤 9 计算 $C = \sum_{i=1}^N \left[\frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{1,i} \bar{p}_{1,i}^m) + \frac{W}{2} \text{lb}(1 + \bar{h}_{2,i} \bar{p}_{2,i}^m) \right]$;

步骤 10 end while

在算法 1 中，第 m 次迭代 2 个次用户之间实际协作的能量为 $\{\delta_{1,i}^m + \delta_{1,i}^m, \delta_{2,i}^m + \delta_{2,i}^m\}$ ，但是由于 $\delta_{1,i} = 0, \delta_{2,i} = 0, 1 \leq i \leq N$ ，因此分别忽略初始化的协作能量；在步骤 6 中，更新垂直方向度量抽头度数时，规定次用户 SU_1 向 SU_2 协作能量为正方向，则第 m 次迭代时第 i 个垂直方向度量抽头读数的增加量为 $\delta_{1,i}^m - \delta_{2,i}^m$ ；在步骤 3 和步骤 9 容量式中，由于计算的 2 个次用户之间需要协作的能量已经算入各时隙采集的能量中，因此计算得到的 $\{\bar{p}_{1,i}^m, \bar{p}_{2,i}^m\}$ 为实际 2 个次用户各时隙分配的功率。

4 仿真结果与分析

本文的仿真参数参照文献[17]和文献[23]设置，假设仿真时隙数 $N = 20$ ，能量传输效率 $\eta_1 = \eta_2, 0 \leq \eta_1, \eta_2 \leq 1$ ，各个时隙的持续时间为 1s，主用户总带宽为 $W = 2$ MHz，则 2 个次用户各占用 $\frac{W}{2} = 1$ MHz 的带宽，各节点的噪声功率谱密度均为 $N_0 = 10^{-19}$ W/Hz。同时假设第 i 时隙 2 个次用户到基站的信道衰落系数 $h_{1,i}$ 和 $h_{2,i}$ 均服从均值为 -110 dB 的瑞利衰落，而 2 个次用户与主用户之间的信道衰落系数 $g_{1,i}$ 和 $g_{2,i}$ 均服从均值为 -100 dB

的瑞利衰落, 2 个次用户采集的能量在 $[0, E_1^{\max}]$ 和 $[0, E_2^{\max}]$ 之间均匀分布。本文比较双向能量协作算法、由 $SU_1 \rightarrow SU_2$ 单向能量协作算法、由 $SU_2 \rightarrow SU_1$ 单向能量协作算法和无能量协作算法的吞吐量性能, 由于各时隙各节点采集的能量与各条信道的信道衰落系数均为随机产生, 为平滑产生的曲线, 本文每个图的每个点都重复仿真 20 000 次并求平均。

图 3 给出的是系统吞吐量随 2 个次用户之间能量传输效率变化的曲线。假设主用户最大干扰门限 $I = -90 \text{ dBm}$, $E_1^{\max} = E_2^{\max} = 10 \text{ mJ}$ 。从图 3 可以看出, 双向能量协作获得的吞吐量优于单向能量协作, 单向能量协作获得的吞吐量又优于无能量协作的情况, 并且随着能量传输效率的增大, 获得的吞吐量增益越来越大。由于 2 个次用户各时隙采集能量的最大值相同, 故单向能量协作 $SU_1 \rightarrow SU_2$ 与 $SU_2 \rightarrow SU_1$ 获得的吞吐量相同。

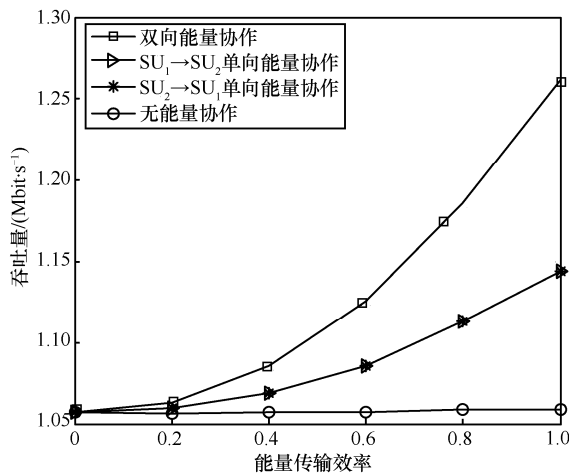


图 3 不同能量传输效率下各个算法的系统吞吐量比较

图 4 给出的是系统吞吐量随次用户 SU_1 的采集能量最大值变化的曲线。假设 $I = -90 \text{ dBm}$, $\eta_1 = \eta_2 = 0.5$, $E_2^{\max} = 10 \text{ mJ}$ 。从图 4 可以看出, 在次用户 SU_1 采集能量最大值 E_1^{\max} 较小时, 双向能量协作与单向能量协作 $SU_2 \rightarrow SU_1$ 的性能接近, 且明显优于单向能量协作 $SU_1 \rightarrow SU_2$ 和无能量协作的情况。随着 E_1^{\max} 的逐渐增大, 双向能量协作的性能逐渐与单向能量协作 $SU_2 \rightarrow SU_1$ 的性能拉开, 且 2 种单向能量协作性能差距逐渐变小。从图 4 可以看出能量协作比较适合于 2 个节点能量采集能力差距较大的情况, 并且此时双向能量协作和从能量采集能力较大的节点向较小的节点进行单向能量协作性能较好。

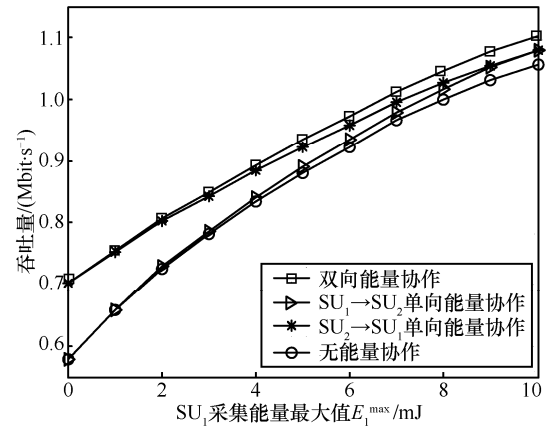


图 4 不同 SU_1 采集能量最大值下各个算法的系统吞吐量比较

图 5 给出的是系统吞吐量随主用户干扰门限变化的曲线。假设 $\eta_1 = \eta_2 = 0.5$, $E_1^{\max} = E_2^{\max} = 10 \text{ mJ}$ 。从图 5 可以看出, 随着主用户干扰门限 I 的逐渐增大, 4 种算法的系统吞吐量都逐渐增大, 并且增幅逐渐减小, 这是由于随着 I 的增大, 主用户对 2 个次用户各时隙分配功率限制的概率越来越小, 当 I 足够大时, 4 种算法的系统吞吐量都会收敛, 并且收敛于不同的值。值得注意的是, 4 种算法的系统吞吐量曲线始终差距很小, 这是由于 $E_1^{\max} = E_2^{\max} = 10 \text{ mJ}$, 那么 2 个次用户各时隙采集的能量大小接近, 故能量协作获得的系统吞吐量增益比较小。

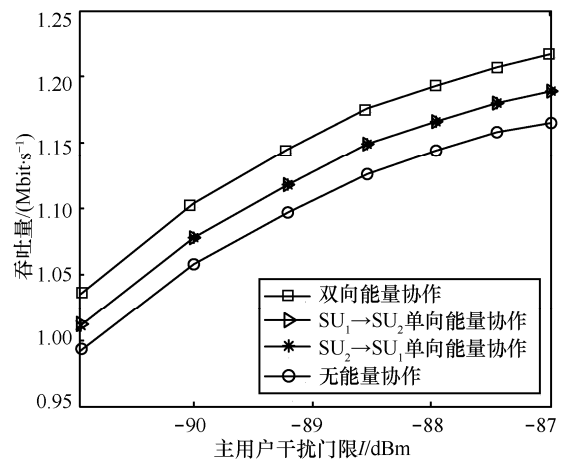


图 5 不同干扰门限 I 下各个算法的系统吞吐量比较

图 6 给出的是系统吞吐量随迭代次数变化的曲线。假设 $I = -90 \text{ dBm}$, $\eta_1 = \eta_2 = 0.5$, $E_1^{\max} = 5 \text{ mJ}$, $E_2^{\max} = 10 \text{ mJ}$ 。从图 6 可以看出, 本文提出的算法在 5 次迭代内就几乎可以收敛到最优状态。

图 7 给出的是算法平均运行时间随主用户干扰

门限变化的曲线。假设 $\eta_1 = \eta_2 = 0.5$ ， $E_1^{\max} = E_2^{\max} = 10 \text{ mJ}$ 。仿真计算机是华硕 FX50JK4710，8 GB 内存，操作系统是 Win10 64 位，Matlab 版本是 2014a。从图中可以看出，随着主用户干扰门限 I 的逐渐增大，考虑能量协作的 3 种算法的平均运行时间都是先增大，然后慢慢减小直到收敛。这是因为当主用户干扰门限 I 比较小时，2 个次用户节点第一次迭代注水获得的初始功率在大多数时隙都达到了干扰门限的限制，导致能量协作的机会大大减少。为了容易理解这一点，考虑一种极端情况，当 I 很小时，2 个次用户节点各时隙采集的能量都远大于可以分配的功率，此时显然没有能量协作的必要性。随着 I 的增大，能量协作的机会逐渐增加，平均运行时间也随之增大。但是当 I 增加到很大时，2 个次用户节点各时隙分配的功率都无法达到干扰门限的限制，那么算法 1 进行一次迭代就可以获得最优资源分配，此时各算法平均运行时间会收敛。同时，从图 7 也可以看出，

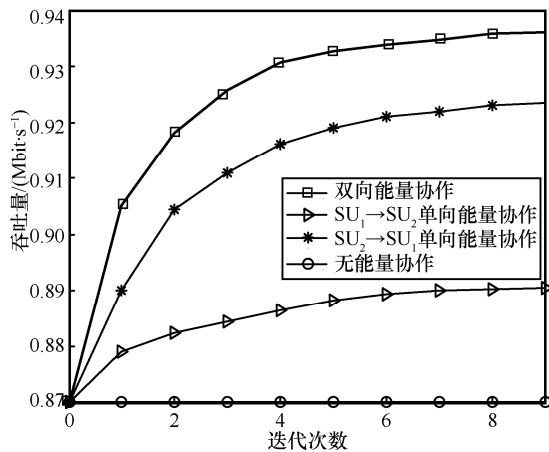


图 6 各个算法的系统吞吐量收敛性能比较

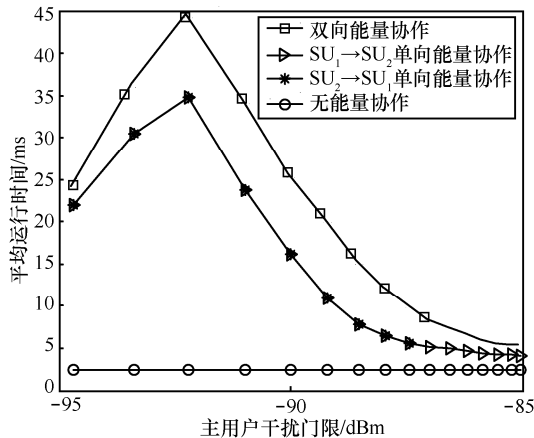


图 7 各个算法的平均运行时间性能比较

双向能量协作和单向能量协作吞吐量的提升是以计算复杂度的提升为代价的，在 I 较大时，算法 1 的迭代次数较少，付出的计算量代价比较低。

5 结束语

本文研究了包含 2 个次用户节点的基于能量协作的认知能量采集网络，在最大化系统吞吐量准则下，提出了对应的最优资源分配算法。首先构建了系统吞吐量的优化模型，证明了这种模型符合的最优性质，然后通过变量代换和问题等价性变换，将各节点的功率和协作能量联合优化问题解耦为分离的功率分配问题和逐个时隙的协作能量求解问题，解耦后的 2 个问题分别利用迭代注水算法和求微分的方式解决。

最后的仿真结果表明，能量协作可以显著提高系统吞吐量，尤其适用于 2 个节点采集能量总量差距很大的情况，并且双向能量协作的性能总是优于单向能量协作，单向能量协作的性能又总是优于无能量协作的情况。

参考文献：

- [1] ATALLAH R, KHABBAZ M, ASSI C. Energy harvesting in vehicular networks: a contemporary survey[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(2): 70-77.
- [2] HEY J, CHENGX D, PENG W, et al. A survey of energy harvesting communications: models and offline optimal policies[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 79-85.
- [3] VALENTA C R, DURGIN G D. Harvesting wireless power: survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems[J]. IEEE Microwave Magazine, 2014, 15(4): 108-120.
- [4] KHAN A A, REHMANIM H, REISSLEIN M. Cognitive radio for smart grids: survey of architectures, spectrum sensing mechanisms, and networking protocols[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 860-898.
- [5] AHMAD A, AHMADS, REHMANI M H, et al. A survey on radio resource allocation in cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 888-917.
- [6] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1180-1189.
- [7] ORHAN O, ERKIP E, ULUKUSS, et al. Energy harvesting broadband communication systems with processing energy cost[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(11): 6095-6107.
- [8] VARAN B, YENER A. Delay constrained energy harvesting networks with limited energy and data storage[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1550-1564.
- [9] LIANG H, ZHAO X H. Optimal power allocation for energy harvesting cognitive radio networks with primary rate protection[C]//International Conference on Computing, Networking and

- Communications, Kauai, Hawaii, 2016, 1-6.
- [10] YIN S, QU Z, LI S. Achievable throughput optimization in energy harvesting cognitive radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 407-422.
- [11] PARK S, KIM H, HONG D. Cognitive radio networks with energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1386-1397.
- [12] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [13] AHN D, HONG S. A transmitter or a receiver consisting of two strongly coupled resonators for enhanced resonant coupling in wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1193-1203.
- [14] NI W, DONG X. Energy harvesting wireless communications with energy cooperation between transmitter and receiver[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 63(4): 1457-1469.
- [15] LI C G, LI Y S, SONG K, et al. Energy efficient design for multiuser downlink energy and uplink information transfer in 5G[J]. Science China (Information Sciences), 2016, 59(2), 1-8.
- [16] SHIN D K, CHOI W, KIM D I. The two-user Gaussian interference channel with energy harvesting transmitters: energy cooperation and achievable rate region[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4551-4564.
- [17] TUTUNCUOGLU K, YENER A. Energy harvesting networks with energy cooperation: procrastinating policies[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4525-4538.
- [18] LIANG J, CHEN J. Resource allocation in cognitive radio relay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(3): 476-488.
- [19] YUAN F C, ZHANGQ T, JIN S, et al. Optimal harvest-use-store strategy for energy harvesting wireless systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 698-710.
- [20] YANG J, ULUKUS S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(1): 220-230.
- [21] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Britain: Cambridge University Press, 2004.
- [22] XIE Z W, ZHU Q. Optimal power allocation based on sum-throughput maximization for energy harvesting cognitive radio networks[C]// International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection. 2016: 1-7.
- [23] NAEEM M, PAREEK U, DANIEL C L, et al. Power allocation and relay assignment for shared-band nonregenerative relaying in cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(6): 2853-2859.

作者简介:



谢振威 (1991-), 男, 河南周口人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为能量采集、中继选择、认知无线电等。



朱琦 (1965-), 女, 江苏苏州人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代通信技术、宽带无线接入、OFDM 技术、信道和信源编码技术和无线资源的动态分配技术等。