

## 合作认知无线网络中能效最优资源分配

曲桦<sup>①</sup> 赵永强<sup>\*①</sup> 赵季红<sup>①②</sup> 闫飞宇<sup>①</sup> 徐西光<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安交通大学电信学院 西安 710049)

<sup>②</sup>(西安邮电大学通信与信息工程学院 西安 710061)

**摘要:** 针对能量受限的合作认知网络, 该文研究在保证主用户服务质量要求下, 认知用户能量效率最大化问题。认知用户利用信能同传技术接收主用户信号, 并采用解码转发协议协助主用户通信。基于分式规划和引入辅助变量将原始非凸问题转换为凸优化问题进行求解, 并提出一种迭代的资源分配算法。仿真结果表明, 所提算法能够快速收敛于最优解。与能量合作方案相比, 该文所采用方案能量效率显著提高, 同时能更好地保证主用户服务质量要求。

**关键词:** 合作认知网络; 能量效率; 信能同传; 凸优化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)05-1024-07

DOI: 10.11999/JEIT170671

## Energy Efficient Resource Allocation in Cooperative Cognitive Radio Networks

QU Hua<sup>①</sup> ZHAO Yongqiang<sup>①</sup> ZHAO Jihong<sup>①②</sup> YAN Feiyu<sup>①</sup> XU Xiguang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

<sup>②</sup>(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Considering the energy-constrained cooperative cognitive radio networks, the maximization problem of Energy Efficiency (EE) with Quality of Service (QoS) constraint of primary user is investigated. Secondary user receives the signals of primary user using Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) and serves as a relay with decode-and-forward protocol. Based on fractional programming and introducing auxiliary variables, the original optimization issue is converted to a convex issue and solved, and an iterative algorithm for resource allocation is proposed. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm converges to the optimal solution quickly. Compared with the energy-cooperation strategy, the proposed strategy achieves a higher EE and protects the QoS of primary user better.

**Key words:** Cooperative cognitive radio networks; Energy efficiency; Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT); Convex optimization

### 1 引言

随着无线通信技术的快速发展, 频谱资源日益紧缺。认知无线电技术允许认知用户共享授权频谱, 从而有效地提高了无线频谱资源利用率<sup>[1]</sup>。传统的频谱共享方式主要有机会式 (overlay) 和覆盖式 (underlay)。在 overlay 频谱共享中, 认知用户感知到主用户授权频谱空闲时, 会试图接入空闲频谱进行通信<sup>[2]</sup>。在 underlay 频谱共享中, 认知用户在不影响主用户正常通信情况下, 可以和主用户共享信道<sup>[3]</sup>。本文采用合作频谱共享模式, 认知用户作为合作中继协助主用户通信, 能够提高主用户的吞吐量

以及通信的稳定性, 从而获得使用主用户频谱资源的机会<sup>[4]</sup>。

随着通信行业能量消耗问题日益严重, 基于经济和环境问题考虑, 绿色通信成为通信网络设计中的新趋势<sup>[5]</sup>。实现绿色通信的一种方法就是对资源进行有效地分配。文献[6]针对能量受限的中继网络, 在节点功率约束和最小保密速率要求下, 研究了使安全能效最大化的功率分配方案。文献[7]研究了 underlay 频谱共享中分别使遍历容量, 中断容量和最小速率容量最大化的功率分配方案。文献[8]中认知用户协助主用户通信, 在保证主用户和认知用户服务质量(Quality of Service, QoS)要求下, 作者研究了使全局能量消耗最小化的最优功率和时间分配方案。但是文献[7,8]中认知用户有稳定的能量供给, 所提出的方案并不适用于能量受限的认知无线网络。

收稿日期: 2017-07-07; 改回日期: 2018-01-29; 网络出版: 2018-03-21

\*通信作者: 赵永强 zhaoyongqiang@stu.xjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61372092, 61531013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61372092, 61531013)

能量收集技术能将射频信号转换为电信号，进而能延长能量受限的无线网络的寿命，这使信能同传(SWIPT)技术成为现实，也成为当前研究的热点。此时，认知用户不仅作为中继协助主用户传输数据，同时从主用户的信号中收集能量。文献[9,10]提出了两种实际的接收机结构即时间分裂和功率分裂方案来实现信能同传技术。时间分裂方案将时隙分段，一部分用于收集能量，一部分用于解码转发。功率分裂方案将射频信号分割成两部分，一部分用于能量收集，一部分用于解码转发。文献[11]研究了基于正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple, OFDM)中继网络中能量分割方案下使系统吞吐量最大化的功率分配方案，但是没有考虑时间分配。文献[12]采用时间分裂方案，提出了一种时隙分裂的合作方案，优化了能量收集的时间以及用于中继的能量来使认知用户的吞吐量最大化。文献[13]研究了基于 OFDM 信能同传认知无线网络中用户间的合作方案。但是文献[12,13]均以认知用户吞吐量最大化为目标，并没有考虑能量效率问题。

受文献[13]启发，在认知用户能量受限情况下，本文提出了一种在保证主用户 QoS 前提下最优功率和时间分配方案以使认知用户能量效率最大化。文中原问题为分式规划问题，基于分式规划和引入辅助变量将其转换为标准凸优化问题，进而采用拉格朗日对偶法进行求解。仿真结果表明一方面认知用户作为中继能够保证主用户的服务质量；另一方面，认知用户能够获得传输机会，从而达到共赢。同时本文以认知用户的能量效率最大化为目标，实现了资源的有效利用。

## 2 功率分裂合作方案问题描述与分析

合作认知网络系统模型如图 1 所示。系统模型包含 1 对主用户收发机(Primary Transmitter-Primary User, PT-PU)和 1 对认知用户收发机(Secondary Transmitter-Secondary User, ST-SU)。传输策略为：在给定的授权信道上，主用户信道条件较差，难以保证主用户 QoS 要求，认知用户信道条件较好，在保证主用户 QoS 要求下，认知用户作为合作中继协助主用户发送数据来赢得发送自己数据的机会。主用户发送机有稳定的能量供给，而认知用户发送机能量受限，没有稳定的能量供给，完全从主用户发射的射频信号中收集能量。PT-PU, PT-ST, ST-PU 和 ST-SU 之间的信道衰落系数分别表示为复随机变量  $h_{pp}$ ,  $h_{ps}$ ,  $h_{sp}$  和  $h_{ss}$ 。假设所有信道为瑞利衰落信道，同时为块衰落信道，即信道在一个时隙内不变，但在时隙间相互独立变化。不失一般性，本文将带宽  $B$  归一化，即  $B = 1$  Hz。

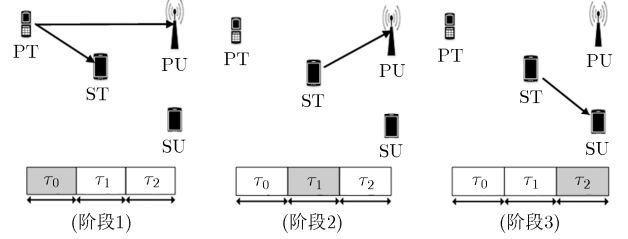


图 1 合作认知网络系统模型图

该策略将每个时隙分为 3 个阶段，不失一般性，时隙长度归一化为 1 s。在阶段 1 中，PT 在  $\tau_0$  时间内向 PU 和 ST 发射信号，ST 通过功率分裂方案将接收到的信号用于能量收集和信息解码。在阶段 2 中，ST 在  $\tau_1$  时间内使用解码转发协议将主用户的信号传输给 PU。在阶段 3 中，ST 在  $\tau_2$  时间内，发送自己的数据给 SU。该策略总的时间限制为

$$\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 \leq 1 \quad (1)$$

在阶段 1，PT 以  $p_p$  功率向 ST 和 PU 发射信号  $x_p$ 。ST 和 PU 接收到的信号分别为

$$y_{ST} = \sqrt{p_p h_{ps}} x_p + w_1 \quad (2)$$

$$y_{PU1} = \sqrt{p_p h_{pp}} x_p + w_2 \quad (3)$$

$w_1$  和  $w_2$  分别是 ST 和 PU 两端的均值为零方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。PU 从接收信号  $y_{PU1}$  中解码信号  $x_p$  的数据传输速率为

$$R_{PU1}(\tau_0, p) = \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{p_p h_{pp}}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

为了转发主用户信息同时收集射频能量，在 ST 采用功率分裂方案接收主用户信号。ST 将射频信号分别以  $\alpha$  和  $1-\alpha$  功率分裂为两部分：一部分经过解码转发发送给 PU，另一部分用于能量收集。用于解码转发的信号会从射频信号转换为基带信号，在 ST 端的接收信号为

$$y_{ST} = \sqrt{\alpha p_p h_{ps}} x_p + w_1 \quad (5)$$

ST 从  $y_{ST}$  解码信号  $x_p$  的数据传输速率为

$$R_{ST}(\tau_0, p_p) = \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{p_p h_{ps} \alpha}{\sigma^2} \right) \quad (6)$$

ST 用于能量收集的信号为

$$y_{ST} = \sqrt{(1-\alpha) p_p h_{ps}} x_p + w_1 \quad (7)$$

收集到的能量总量为

$$E = \eta(1-\alpha) h_{ps} p_p \tau_0 \quad (8)$$

其中， $\eta$  表示能量收集的效率。

在阶段 2，ST 以功率  $p_{sp}$  向 PU 发射重新编码的信号  $x_p$ 。PU 解码信号的数据传输速率为

$$R_{PU2}(\tau_1, p_{sp}) = \tau_1 \log_2 \left( 1 + \frac{p_{sp} h_{sp}}{\sigma^2} \right) \quad (9)$$

根据文献[14], PU 通过合作通信能够达到的数据传输速率为

$$R_p(\tau_0, \tau_1, p_p, p_{sp}) = \min[R_{ST}(\tau_0, p_p), R_{PU1}(\tau_0, p_p) + R_{PU2}(\tau_1, p_{sp})] \quad (10)$$

在阶段 3, ST 以功率  $p_s$  向 SU 发射自己的信号  $x_s$ , SU 接收到的信号为

$$y_{SU} = \sqrt{p_s h_{ss}} x_s + w_3 \quad (11)$$

$w_3$  是 SU 端的均值为零方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。SU 解码信号  $x_s$  的数据传输速率为

$$R_s(\tau_2, p_s) = \tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{p_s h_{ss}}{\sigma^2} \right) \quad (12)$$

### 3 合作认知网络最优功率和时间管理

#### 3.1 问题描述

这里, 将时间分配联合表示为  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_0 \ \tau_1 \ \tau_2]$ , PT 和 ST 的功率分配联合表示为  $\boldsymbol{p} = [p_p \ p_{sp} \ p_s]$ , 定义认知用户能量效率为在一个时隙内单位能量所传输的比特数量, 因此, 合作认知网络中认知用户能量效率最大化问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{p}} \frac{\tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{p_s h_{ss}}{\sigma^2} \right)}{p_p \tau_0 + p_c \tau_0} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 \leq 1 \\ & \text{C2: } p_{sp} \tau_1 + p_c \tau_1 + p_s \tau_2 + p_c \tau_2 \leq \eta(1-\alpha) h_{ps} p_p \tau_0 \\ & \text{C3: } \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{p_p h_{ps} \alpha}{\sigma^2} \right) \geq Q_p \\ & \text{C4: } \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{p_p h_{pp}}{\sigma^2} \right) + \tau_1 \log_2 \left( 1 + \frac{p_{sp} h_{sp}}{\sigma^2} \right) \geq Q_p \\ & \text{C5: } \boldsymbol{\tau} \geq 0, 0 \leq p_p \leq p_{pmax}, p_{sp} \geq 0, p_s \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $Q_p$  为主用户 QoS 要求, 即主用户在一个时隙内传输数据要求,  $p_c$  为电路消耗功率, C1 为时间限制, C2 为能量因果限制, 即认知用户阶段 2 和阶段 3 消耗的总能量需要小于阶段 1 中接收到的能量, C3, C4 为主用户 QoS 要求限制, PU 的合作速率需要满足 QoS 要求, 即  $R_p(\tau_0, \tau_1, p_p, p_{sp}) \geq Q_p$ , 等价于  $R_{ST}(\tau_0, p_p) \geq Q_p$  且  $R_{PU1}(\tau_0, p_p) + R_{PU2}(\tau_1, p_{sp}) \geq Q_p$ , 如 C3, C4 所示, C5 为时间和发射功率限制, 主用户发射功率不能超过规定的最大值。从限制条件可以看出, 总能提高主用户发射功率使限制条件得到满足, 因此, 问题是有可行解的。

#### 3.2 算法步骤

由于问题式(13)中目标函数具有分式形式, 是非凸的, 无法应用常见的凸优化方法进行求解。为

此, 利用分式规划理论<sup>[15]</sup>, 将目标函数转换为参数规划问题进行求解, 转化为参数规划问题后得到如式(14)的优化问题:

$$T(q) = \max_{\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{p} \in F} \left\{ \tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{p_s h_{ss}}{\sigma^2} \right) - q(p_p \tau_0 + p_c \tau_0) \right\} \quad (14)$$

其中,  $F$  是问题式(13)的可行域, 由限制条件 C1~C5 给定。根据分式规划理论, 问题式(13)取得如式(15)的最优能量效率值  $q^*$  时,

$$q^* = \max_{\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{p} \in F} \frac{\tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{p_s h_{ss}}{\sigma^2} \right)}{p_p \tau_0 + p_c \tau_0} \quad (15)$$

当且仅当参数规划问题满足式(16):

$$\begin{aligned} T(q^*) = \max_{\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{p} \in F} \left\{ \tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{p_s h_{ss}}{\sigma^2} \right) \right. \\ \left. - q^*(p_p \tau_0 + p_c \tau_0) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中的参数规划问题可根据 Dinkelbach 方法<sup>[15]</sup>迭代求解。在每次迭代中, 对于给定的  $q$  值, 求出参数规划问题式(14)的最大值, 然后不断更新  $q$  值, 并一直求解参数规划问题直到  $T(q) \leq \varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  为给定的收敛精度。

然而上述参数规划问题仍然是非凸的, 求解依然困难。为此, 通过引入辅助变量使问题转换为凸优化问题, 引入的辅助变量为  $E_p = p_p \tau_0$ ,  $E_{sp} = p_{sp} \tau_1$ ,  $E_s = p_s \tau_2$ , 分别表示 PT 阶段 1 消耗的能量, ST 阶段 2, 阶段 3 消耗的能量, 联合表示为  $\boldsymbol{E} = [E_p \ E_{sp} \ E_s]$ 。此时,  $R_{ST}(\tau_0, p_p)$ ,  $R_{PU1}(\tau_0, p_p)$  和  $R_{PU2}(\tau_1, p_{sp})$  均能够表示为关于  $[\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{E}]$  的凹函数。经过转换, 目标函数和限制条件都是关于  $[\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{E}]$  的凹函数。参数规划问题即等价地表示为式(17):

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{E}} \tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{E_s h_{ss}}{\sigma^2 \tau_2} \right) - q(E_p + p_c \tau_0) \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 \leq 1 \\ & \text{C2: } E_{sp} + p_c \tau_1 + E_s + p_c \tau_2 \leq \eta(1-\alpha) h_{ps} E_p \\ & \text{C3: } \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{E_p h_{ps} \alpha}{\sigma^2 \tau_0} \right) \geq Q_p \\ & \text{C4: } \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{E_p h_{pp}}{\sigma^2 \tau_0} \right) + \tau_1 \log_2 \left( 1 + \frac{E_{sp} h_{sp}}{\sigma^2 \tau_1} \right) \geq Q_p \\ & \text{C5: } \boldsymbol{\tau} \geq 0, 0 \leq E_p \leq p_{pmax} \tau_0, E_{sp} \geq 0, E_s \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

由凸优化理论可知, 问题式(17)满足强对偶性, KKT 条件是问题取得全局最优解的充要条件<sup>[16]</sup>。因此, 本文接下来将用 KKT 条件来分析上述问题并得到问题式(17)的解析解。

问题式(17)的拉格朗日函数表示为

$$\begin{aligned}
L(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{E}) = & \tau_2 \log_2 \left( 1 + \frac{E_s h_{ss}}{\sigma^2 \tau_2} \right) - q(E_p + p_c \tau_0) \\
& - \mu_1 (\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 - 1) - \mu_2 (E_{sp} + E_s \\
& + p_c (\tau_1 + \tau_2) - \eta(1 - \alpha) h_{ps} E_p) \\
& - \mu_3 \left( Q_p - \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{E_p h_{ps} \alpha}{\sigma^2 \tau_0} \right) \right) \\
& - \mu_4 \left( Q_p - \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{E_p h_{pp}}{\sigma^2 \tau_0} \right) \right) \\
& - \tau_1 \log_2 \left( 1 + \frac{E_{sp} h_{sp}}{\sigma^2 \tau_1} \right)
\end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \ \mu_2 \ \mu_3 \ \mu_4]$  是和限制条件相乘的非负拉格朗日乘子, 同时为了简便, 将信噪比表示为  $\gamma_{pp} = h_{pp}/\sigma^2$ ,  $\gamma_{ps} = h_{ps}/\sigma^2$ ,  $\gamma_{sp} = h_{sp}/\sigma^2$ ,  $\gamma_{ss} = h_{ss}/\sigma^2$ . 最优解能够通过下面的理论获得.

**理论 1** 当问题式(17)取得最优解时, 容易知道  $E_p$ ,  $\tau_0$ ,  $E_s$ ,  $\tau_2$  都不会为零, 而  $E_{sp}$ ,  $\tau_1$  可能为零, 因此, 问题式(17)的最优解可能在两种情况下取到, 分别为  $\tau_1 = 0$  时和  $\tau_1 > 0$  时. 基于此问题式(17)有 3 个候选 KKT 点.

候选 KKT 点 1:  $\tau_1 = 0$ , 由 KKT 条件, 给定  $\boldsymbol{\mu}$ , 问题式(17)的最优解为

$$\mathbf{p}^* = \begin{cases} p_p^* = \frac{E_p^*}{\tau_0^*} = \left[ \frac{\mu_4}{(q - \eta h_{ps} (1 - \alpha) \mu_2) \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{pp}} \right]^+ \\ p_s^* = \frac{E_s^*}{\tau_2^*} = \left[ \frac{1}{\mu_2 \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{ss}} \right]^+ \end{cases} \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\tau}^* = \begin{cases} \tau_0^* = \frac{Q_p}{\log_2(1 + p_p^* \gamma_{pp})} \\ \tau_2^* = 1 - \frac{Q_p}{\log_2(1 + p_p^* \gamma_{pp})} \end{cases} \quad (20)$$

$$E_p^* = p_p^* \tau_0^*, \quad E_s^* = p_s^* \tau_2^* \quad (21)$$

KKT 点 1 是最优解需要满足条件 C5 以及  $\tau_1 = 0$  时取得最优解的条件  $\frac{\partial}{\partial \tau_1} L < 0$ .

$\tau_1 > 0$  时, 优化问题式(17)的最优解满足

$$\begin{aligned}
& \left( 1 + \frac{E_p}{\tau_0} \gamma_{pp} \right) + \tau_1 \log_2 \left( 1 + \frac{E_{sp}}{\tau_1} \gamma_{sp} \right) \\
& \leq \tau_0 \log_2 \left( 1 + \frac{E_p}{\tau_0} \gamma_{ps} \alpha \right)
\end{aligned}$$

若不满足, 总可减小  $\tau_1$ , 增大  $\tau_2$  直到满足该条件, 由于目标函数是关于  $\tau_2$  的增函数, 将取得更大值.

此时, 根据 KKT 条件, 最优解在  $\mu_3 = 0$  或者  $\mu_3 > 0$  时取到, 由此得到候选 KKT 点 2 和候选 KKT 点 3.

候选 KKT 点 2:  $\tau_1 > 0$ ,  $\mu_3 = 0$ , 由 KKT 条件, 给定  $\boldsymbol{\mu}$ , 问题式(17)的最优解为

$$\mathbf{p}^* = \begin{cases} p_p^* = \frac{E_p^*}{\tau_0^*} = \left[ \frac{\mu_4}{(q - \eta h_{ps} (1 - \alpha) \mu_2) \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{pp}} \right]^+ \\ p_{sp}^* = \frac{E_{sp}^*}{\tau_1^*} = \left[ \frac{\mu_4}{\mu_2 \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{sp}} \right]^+ \\ p_s^* = \frac{E_s^*}{\tau_2^*} = \left[ \frac{1}{\mu_2 \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{ss}} \right]^+ \end{cases} \quad (22)$$

$\boldsymbol{\tau}^*$  是线性方程组式(23)的解,

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 &= 1 \\ (p_{sp} + p_c) \tau_1 + (p_s + p_c) \tau_2 &= \eta(1 - \alpha) h_{ps} p_p \tau_0 \\ \tau_0 \log_2(1 + p_p \gamma_{pp}) + \tau_1 \log_2(1 + p_{sp} \gamma_{sp}) &= Q_p \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$E_p^* = p_p^* \tau_0^*, \quad E_{sp}^* = p_{sp}^* \tau_1^*, \quad E_s^* = p_s^* \tau_2^* \quad (24)$$

KKT 点 2 是最优解需要满足条件 C3 和 C5.

候选 KKT 点 3:  $\tau_1 > 0$ ,  $\mu_3 > 0$ , 由 KKT 条件, 给定  $\boldsymbol{\mu}$ , 问题式(17)的最优解为

$$\mathbf{p}^* = \begin{cases} p_p^* = x^* \\ p_{sp}^* = \frac{E_{sp}^*}{\tau_1^*} = \left[ \frac{\mu_4}{\mu_2 \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{sp}} \right]^+ \\ p_s^* = \frac{E_s^*}{\tau_2^*} = \left[ \frac{1}{\mu_2 \ln 2} - \frac{1}{\gamma_{ss}} \right]^+ \end{cases} \quad (25)$$

$$\boldsymbol{\tau}^* = \begin{cases} \tau_0 = \frac{Q_p}{\log_2(1 + p_p \gamma_{ps} \alpha)} \\ \tau_1 = \frac{Q_p - \tau_0 \log_2(1 + p_p \gamma_{pp})}{\log_2(1 + p_{sp} \gamma_{sp})} \\ \tau_2 = 1 - \tau_0 - \tau_1 \end{cases} \quad (26)$$

$$E_p^* = p_p^* \tau_0^*, \quad E_{sp}^* = p_{sp}^* \tau_1^* \quad (27)$$

其中,  $x^*$  是方程  $\mu_3 f(x \gamma_{ps} \alpha) + \mu_4 f(x \gamma_{pp}) = (\mu_1 + q p_c)$  的解,  $f(x)$  定义为

$$f(x) \triangleq \log_2(1 + x) - \frac{x}{\ln 2(1 + x)} \quad (28)$$

KKT 点 3 是最优解需要满足条件 C5.

**证明** 略

通过理论 1, 问题的最优解可以由表 1 的算法获得. 算法共分为两层, 外层使用 Dinkelbach 方法更新  $q$  值直到收敛. 内层利用 KKT 条件逐个计算给定  $q$  值的 3 个候选 KKT 点直到找到最优解. 计算候选 KKT 点 1 时, 先初始化  $\mu_2$ , 根据 KKT 条件计算相应的  $\mu_1$  和  $\mu_4$ , 再根据式(19), 式(20)计算  $\mathbf{p}^*$ ,

表1 认知用户能量效率最大化算法

---

初始化  $q$  和收敛精度  $\varepsilon$  ;

Repeat

  计算 KKT 点 1, 初始化  $\mu_{2\max}, \mu_{2\min}$

  While  $\mu_{2\max} - \mu_{2\min} \geq \varepsilon$

$\mu_2 = \frac{1}{2}(\mu_{2\max} + \mu_{2\min})$  ;

    根据 KKT 条件计算相应的  $\mu_1$  和  $\mu_4$  ;

    根据式(19), 式(20)计算  $\mathbf{p}^*, \tau^*$  ;

    if  $E_s + p_c \tau_2 > \eta(1 - \alpha) h_{ps} E_p$ ,  $\mu_{2\max} = \mu_2$  ; else  $\mu_{2\min} = \mu_2$  ;

  end

  检查候选 KKT 点 1 是否为最优解, 若不是则计算候选 KKT 点 2, 初始化  $\mu_{2\max}, \mu_{2\min}$  ;

  While  $\mu_{2\max} - \mu_{2\min} \geq \varepsilon$

$\mu_2 = \frac{1}{2}(\mu_{2\max} + \mu_{2\min})$  ;

    根据 KKT 条件计算相应的  $\mu_1$  和  $\mu_4$  ;

    将  $\mu_1, \mu_2$  和  $\mu_4$  代入  $\frac{\partial}{\partial \tau_0} L$ , if  $\frac{\partial}{\partial \tau_0} L > 0$ ,  $\mu_{2\max} = \mu_2$  ; else  $\mu_{2\min} = \mu_2$  ;

  end

  根据式(22), 式(23)计算  $\mathbf{p}^*, \tau^*$  ;

  检查候选 KKT 点 2 是否为最优解, 若不是则计算候选 KKT 点 3, 初始化  $\mu_{3\max} - \mu_{3\min}$  ;

  While  $\mu_{3\max} - \mu_{3\min} \geq \varepsilon$

$\mu_3 = \frac{1}{2}(\mu_{3\max} + \mu_{3\min})$  ;

    根据 KKT 条件计算相应的  $\mu_1$  和  $\mu_4$  ;

    初始化  $\mu_{3\max}, \mu_{3\min}$  ;

    While  $\mu_{3\max} - \mu_{3\min} \geq \varepsilon$

$\mu_3 = \frac{1}{2}(\mu_{3\max} + \mu_{3\min})$  ;

      根据式(25)计算  $p_p$ , 将其代入  $\frac{\partial}{\partial E_p} L$ , if  $\frac{\partial}{\partial E_p} L > 0$ ,

$\mu_{3\max} = \mu_3$ , else  $\mu_{3\min} = \mu_3$  ;

    end

    根据式(25), 式(26)计算  $\mathbf{p}^*, \tau^*$  ;

    if  $E_{sp} + p_c \tau_1 + E_s + p_c \tau_2 > \eta(1 - \alpha) h_{ps} E_p$ ,  $\mu_{2\max} = \mu_2$  ,

    else  $\mu_{2\min} = \mu_2$  ;

  end

  更新  $q = \frac{\tau_2^* \log_2(1 + p_s^* \gamma_{ss})}{p_p^* \tau_0^* + p_c \tau_0^*}$

---

until  $T(q) < \varepsilon$

---

$\tau^*$ , 最后检查能量因果条件是否相等, 用二分法迭代更新  $\mu_2$  直到收敛。得到候选 KKT 点 1 后需要检查是否为最优解, 若是最优解, 根据凸优化理论, 最优解有且只有一个, 则找到给定  $q$  值的问题最优解。若不是则继续求解下个候选 KKT 点。计算候选 KKT 点 2 时, 类似地, 先初始化  $\mu_2$ , 根据 KKT

条件计算相应的  $\mu_1$  和  $\mu_4$ , 然后检查  $\partial L / \partial \tau_0$  是否为 0, 迭代更新  $\mu_2$  直至收敛。此时得到最优乘子  $\mu^*$ , 最后根据式(22), 式(23)计算  $\mathbf{p}^*, \tau^*$ 。得到 KKT 点 2 后, 同样需要检查点 2 是否为最优解, 若不是, 则继续检查下个候选 KKT 点。计算候选 KKT 点 3 时, 同样地初始化  $\mu_2$ , 根据 KKT 条件计算相应的  $\mu_1, \mu_4$  和  $\mu_3$ , 再由式(25), 式(26)计算  $\mathbf{p}^*, \tau^*$ , 最后检查能量因果条件是否相等, 否则不断更新  $\mu_2$  直至收敛。得到给定  $q$  值的问题最优解后, 用式(15)更新  $q$  值直到收敛于最优解。由于外层 Dinkelbach 算法和内层的二分法都收敛, 所提出的算法能保证找到最优解。

得到最优功率和时间分配后, 还需要考虑 PT 阶段 1 的发射功率限制, 如果  $p_p^* < p_{p\max}$ , 则  $\mathbf{p} = \mathbf{p}^*$ , 否则  $p_p = p_{p\max}$ , 此时不改变各阶段时间分配, 由于 ST 收集的能量不够阶段 2, 阶段 3 使用, ST 优先满足阶段 2 的能量, 将剩余的能量用于传输自己的数据。

#### 4 仿真结果

本节展示信能同传方案仿真结果并与仅进行能量合作的方案比较。能量合作方案没有信息合作阶段, 认知用户将接收到的信号全部转换为能量, 在保证主用户 QoS 要求下, 利用剩余时间传输自己的数据。仿真场景中 PT-PU 间距离为 3 m, ST-PT 间距离为 1 m, ST-PU 间距离为 2 m, ST-SU 间距离为 1 m。信道衰落系数  $h_{pp}, h_{ps}, h_{sp}$  和  $h_{ss} \sim \text{CN}(0, D^{-l})$ , 其中  $D$  是发送机到接收机间距离,  $l$  为路径损失系数选为 4。接收端 AWGN 的功率频谱密度为  $-50$  dBW。功率分裂系数  $\alpha = 0.5$ 。ST 信能同传时的能量收集效率  $\eta = 0.8$ 。电路消耗功率  $p_c = 1$  mW。仿真结果是经历 1000 次信道实现后的平均值。

图 2 给出了不同主用户 QoS 要求下两种方案使用 Dinkelbach 方法的能量效率收敛情况, 根据 4 G 移动通信规范要求<sup>[17]</sup>,  $Q_p$  分别取为 2 bit/s 和 3 bit/s。由图可知, 所提迭代算法平均最多需要 7 次找到最优解。由于内层的二分法也能快速收敛, 因此所提出的算法能够保证快速收敛。同时也可看出所提出的方案能达到的能量效率比仅进行能量传输方案的能量效率高, 这是由于信能同传方案中认知用户将接收到的信号进行了更加有效的利用, 一部分信号用于信息合作协助主用户通信, 能够获得更多传输自己数据的时间, 从而使认知用户的能量效率提高。而且主用户的 QoS 要求越低, 所能达到的能量效率越高, 这是由于主用户的 QoS 更容易保证时, 认知用户能够更好地分配接收到的能量和各阶段时间从而使能量效率更高。

图 3 给出了主用户发射功率限制下主用户吞吐

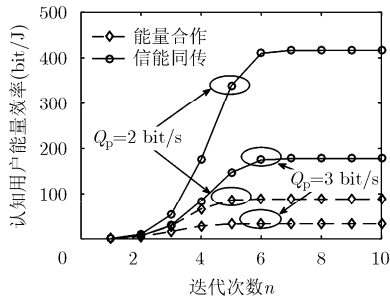


图 2 所提出算法的收敛性

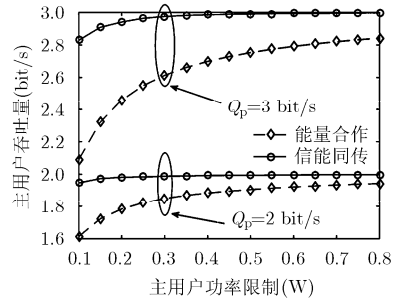


图 3 主用户功率限制条件下主用户吞吐量

量的变化情况， $Q_p$  分别设为 2 bit/s 和 3 bit/s。由图可知，随着主用户发射功率限制的提高，主用户 QoS 要求逐渐满足。这是由于随着主用户功率限制的提高，认知用户接收到的能量逐渐满足信息合作阶段所需的能量，主用户的 QoS 要求逐渐得到满足。同时所提出方案更加容易满足主用户通信要求，这是由于信能同传方案中认知用户优先满足第二阶段即信息合作阶段的能量，认知用户能够协助主用户通信，提高主用户吞吐量，因此更容易满足主用户 QoS 要求。

图 4 给出了主用户功率限制对认知用户能量效率的影响， $Q_p$  取值分别为 2 bit/s 和 3 bit/s。由图可知，随着功率限制的提高，认知用户的能量效率逐渐达到最大值。这是由于主用户功率限制低时，信能同传方案优先满足信息合作阶段能量需求，所以认知用户用于传输自己数据的能量不足，认知用户的吞吐量较少，能量效率较低，随着功率限制的提高，认知用户用于传输自己数据的能量趋于最优值，能量效率同时也提高。能量合作方案中，主用户功率限制较低时，主用户 QoS 要求难以满足，随着功率限制的提高，认知用户接收到的能量增多，吞吐量增加，但吞吐量的增加没有能量消耗增加显

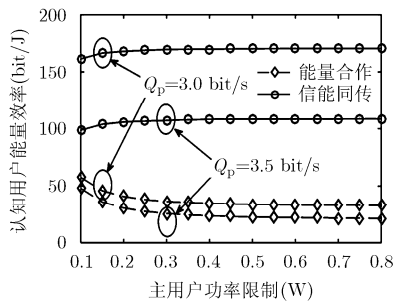


图4 主用户功率限制条件下认知用户能量效率

著，能量效率逐渐减低并收敛于稳定值，同时主用户 QoS 要求限制也逐渐得到满足。

图 5 给出了  $Q_p = 3$  bit/s 时认知用户与主用户间距离对 3 个阶段时间分配的影响。由图可知，随着认知用户与主用户间距离的增大， $\tau_0$  增大， $\tau_1$  减小， $\tau_2$  增大。这是由于随着认知用户与主用户间距离增大，认知用户与主用户间信道条件变差，认知用户接收到的能量减少，合作的作用减小，因此信息合作的时间  $\tau_1$  减少，主用户需要更多时间传输自己的数据达到 QoS 要求，认知用户用于传输自己数据的时间  $\tau_2$  也逐渐增大。

### 5 结束语

针对合作认知无线网络模型，本文研究了在保证主用户 QoS 要求下的认知用户能量效率最大化问题，采用 Dinkelbach 方法并引入辅助变量将原始非凸问题转换成了凸优化问题，进而利用拉格朗日对偶法以及 KKT 条件求解该凸优化问题，给出了问题的解析解并提出一种资源分配算法。仿真分析表明，所提出的算法能够快速收敛于最优解，并且与仅进行能量合作方案比较，在主用户功率限制下本文的合作策略能够更好地保证主用户 QoS 要求，同时能达到更好的能量效率性能。

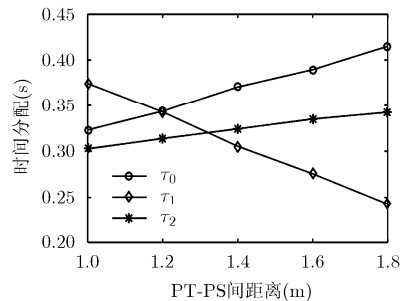


图5 认知用户与主用户间距离对时间分配的影响

### 参考文献

[1] HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in*

*Communications*, 2005, 23(2): 201-220. doi: 10.1109/JSAC.2004.839380.

[2] XU X, QU H, ZHAO J, et al. Cooperative spectrum sensing

- in cognitive radio networks with Kernel Least Mean Square [C]. International Conference on Information Science and Technology, Changsha, China, 2015: 574–578. doi: 10.1109/ICIST.2015.7289037.
- [3] LE L B and HOSSAIN E. Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5306–5315. doi: 10.1109/T-WC.2008.070890.
- [4] ZHOU F, BEAULIEU N C, LI Z, *et al.* Energy-efficient optimal power allocation for fading cognitive radio channels: Ergodic capacity, outage capacity, and minimum-rate capacity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(4): 2741–2755. doi: 10.1109/TWC.2015.2509069.
- [5] LIU D, WANG W, and GUO W. Green' cooperative spectrum sharing communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(3): 459–462. doi: 10.1109/LCOMM.2013.011113.121754.
- [6] 肖潇, 陶晓明, 陆建华. 基于高效无线接入网的绿色无线通信关键技术研究[J]. *电信科学*, 2011, 27(11): 75–83. doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2011.11.014.  
XIAO Xiao, TAO Xiaoming, and LU Jianhua. Study on key technologies of green wireless communications with energy efficient wireless access network[J]. *Telecommunications Science*, 2011, 27(11): 75–83. doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2011.11.014.
- [7] 王东, 李永成, 白铂, 等. 放大转发中继网络中绿色的物理层安全通信技术[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(4): 841–847. doi: 10.11999/JEIT150695.  
WANG Dong, LI Yongcheng, BAI Bo, *et al.* Green communications based on physical-layer security for amplify-and-forward relay networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 841–847. doi: 10.11999/JEIT150695.
- [8] LIU D, HUANG C, WANG W, *et al.* Resource allocation in high energy-efficient cooperative spectrum sharing communication networks[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2016, 25(4): 768–773. doi: 10.1049/cje.2016.07.013.
- [9] ZHANG R and HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 1989–2001. doi: 10.1109/TWC.2013.031813.120224.
- [10] NG D W K, LO E S, and SCHÖBER R. Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(12): 6352–6370. doi: 10.1109/TWC.2013.103113.130470.
- [11] LIU Y and WANG X. Information and energy cooperation in OFDM relaying: Protocols and optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(7): 5088–5098. doi: 10.1109/TVT.2015.2455232.
- [12] YIN S, ZHANG E, QU Z, *et al.* Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(9): 4693–4707. doi: 10.1109/TWC.2014.2322972.
- [13] GAO Z and WANG B. User cooperation in OFDM-based cognitive radio networks with simultaneous wireless information and power transfer[C]. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2015: 1–6. doi: 10.1109/WCSP.2015.7341236.
- [14] JU H and ZHANG R. User cooperation in wireless powered communication networks[C]. IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, USA, 2014: 1430–1435. doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037009.
- [15] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. *Management Science*, 1967, 13(7): 492–498.
- [16] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization* [M]. London: Cambridge University Press, 2004: 218–236.
- [17] 3GPP TR 36.913, Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)[R]. 3rd Generation Partnership Project, 2017.
- 曲 桦: 男, 1961年生, 教授, 研究方向为移动互联网技术、泛在网技术与应用、网络的管理与控制技术、网络的异构和融合技术.
- 赵永强: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为认知无线电无线资源管理.
- 赵季红: 女, 1963年生, 教授, 研究方向为新一代无线移动互联网、泛在网物联网、异构融合网络、网络虚拟化.
- 闫飞宇: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为认知无线电无线资源管理.
- 徐西光: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为认知无线电频谱检测.