

# 异构认知网中基于能效的协作技术研究

冯立<sup>1,2</sup>, 邝育军<sup>1</sup>, 代泽洋<sup>1</sup>, 付新川<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731; 2. 四川广播电视大学工程技术学院 成都 610073)

**【摘要】**针对异构认知网络场景,提出了一种主次系统“双赢”的高能效协作通信机制。在满足主次系统“双重”速率QoS要求下,该机制允许次级用户在接入主系统协助主用户传输数据的同时,换取一部分授权频谱资源来实现自身数据在异构网中的传输分流,以此提升次级能效。本文研究了该机制的次级加权能效最大化非凸资源优化问题,结合参数化的分式规划算法和黄金分割法提出了一种资源分配的迭代算法。仿真结果表明,所提机制在不降低主用户通信性能的情况下,提升了次级系统传输能效,实现了主次系统传输“双赢”的目的。

**关键词** 认知无线电; 能效; 异构网络; 资源分配; 中继传输

中图分类号 TN92 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.05.005

## Network Cooperation for Energy-Efficient Communication in Multi-RAT Heterogeneous Cognitive Radio Networks

FENG Li<sup>1,2</sup>, KUANG Yu-jun<sup>1</sup>, DAI Ze-yang<sup>1</sup>, and FU Xin-chuan<sup>1</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Engineering and Technology College, Sichuan Radio and TV University Chengdu 610073)

**Abstract** An innovative EE-oriented ‘win-win’ cooperative transmission scheme in heterogeneous cognitive radio networks (Het-CRNs), called energy-efficient cognitive cooperation (ECC), in which primary system release a part of its radio spectrum to secondary system in exchange for secondary relay (SR) served as a relay to assist transmission of primary user’s traffic under the dual quality of service (QoS) requirements. Then, secondary user’s traffic flow is split into the unlicensed spectrum and the released licensed spectrum to improve EE in Het-CRNs. Based on ECC, we formulate a weighted EE maximization non-convex problem for secondary users. By employing parametric fractional programming and golden section search (GSS) method, an efficient resource allocation policy is developed. Simulation results show that the proposed strategy can gain significantly higher EE without reducing performance of primary transmission, and thus, a ‘win-win’ goal is achieved.

**Key words** cognitive radio; energy efficiency; multi-rat heterogeneous networks; resource allocation; relay transmission

在当今倡导构建环境友好与资源节约社会的大背景下,高能效通信已受到业界关注。特别是在考虑用户更高传输速率需求的前提下,实现高能效传输就变得尤为关键<sup>[1]</sup>。众所周知,无线网络中可利用空间分集来减小多径衰落的影响,从而提高通信可靠性。协作通信能有效地提升分集增益,并通过分布式的传输与信号处理技术来提高能效和减少信息的传输时间<sup>[2]</sup>。同时,由于认知无线电技术内在的感知能力,使次级用户能共享主用户的授权频谱,从而有效地改善次级传输性能<sup>[3-4]</sup>。本文在异构认知网络(heterogeneous cognitive radio networks, Het-CRNs)中研究了利用认知与协作传输

技术来实现节能通信。与文献[5]类似,本文所考虑的 Het-CRNs 环境中共存两类用户设备(user equipment, UE):单模用户设备(single-mode UE, SUE)和多模用户设备(multimode UE, MUE)。其中, SUE 只配备单个无线接入技术(radio access technologies, RAT),而 MUE 配备多个 RAT。

从现有研究文献来看,认知与协作技术相结合可以降低网络能耗。文献[6]中提出了一种在满足主系统最小能耗约束条件下的频谱共享策略,其核心思想是通过对多个频段拍卖机制来提高次级系统的吞吐量。文献[7]针对频谱共享网络,在最低服务质量约束下,提出了一种总系统能耗最小的时间和功

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61471089, 61071099); 四川省教育厅科研项目(16ZB0504)

作者简介: 冯立(1981-),男,博士生,主要从事认知无线电,协作通信系统中的资源管理方面研究。

率分配方案。在保证系统QoS要求的前提下, 文献[8]研究了一种自适应传输业务负荷的最优资源开/关策略来减小网络传输能耗。与文献[8]不同, 文献[9]通过在不同网络之间利用数据分流处理来实现节能通信。文献[10]提出在上行数据链路中让两个MUE相互协作传输策略。研究表明, 相比非合作传输机制, 该网络协作传输模型能大幅降低能耗。文献[11]中应用合同理论模型, 研究了次级用户作为中继来协助主用户传输数据, 从而换取一部分授权频谱来传输自身数据的频谱共享机制。文献[12]中作者尽管研究了同样的模型并提出了相类似的传输机制, 但没有从能量效率角度来开展分析, 也没从实现主次系统传输“双赢”的局面来考虑。事实上, 文献[6-12]主要关心通过主次用户控制其发射功率来降低网络能耗, 而本文采用能量效率指标更全面地反映吞吐量和能耗之间的折衷<sup>[3]</sup>。

为此, 本文在Het-CRNs环境中, 提出了一种高效能认知协作(energy-efficient cognitive cooperation, ECC)通信机制。在ECC传输机制中, 次级用户借助认知无线电智能的频谱共享技术, 使其能接入主系统协助主用户传输数据来换取一部分频谱资源, 实现自身业务数据在异构网中的传输分流, 进而提升次级系统能效。与文献[11-12]不同, 为了实现主次传输系统的“双赢”局面, ECC通信机制对主次级用户的传输质量施加了“双重”QoS需求约束。基于此, 建模了ECC传输机制的次级加权能效最大化问题, 利用非线性分式规划理论, 并结合黄金分割法, 提出了一种高效的迭代算法, 实现了在保障主传输QoS的同时提升次级系统传输的能效。

## 1 系统模型与机制描述

### 1.1 系统模型

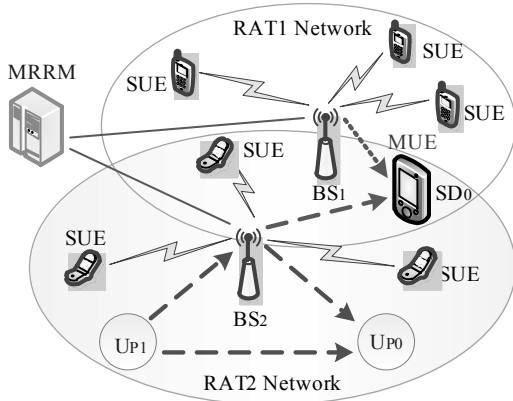


图1 Het-CRNs系统模型

本文假设的异构认知网络(Het-CRNs)系统模型

如图1所示, 其中包含配备RAT2的一对单模主用户 $U_{P1}-U_{P0}$ , 一个配备RAT1和RAT2的多模次级终端用户 $SD_0$ 和多个分别配备RAT1或RAT2的单模次级用户SUE。假设基站 $BS_1$ 和 $BS_2$ 分别服务于配备RAT1和RAT2的单模用户。在该Het-CRNs环境中, RAT1使用带宽为 $W_1$ Hz的未授权频谱, 而RAT2可共享带宽为 $W_2$ Hz的授权频谱。并且假定RAT1与RAT2相互正交, 则彼此间不会造成干扰。与文献[9]类似, 本文进一步假设用与核心网相连的无线资源管理单元(multi-radio resources management, MRRM)来管理不同的RAT, 并运行ECC策略。另外, 由于认知无线电技术可实现主用户的授权频谱与次级用户共享, 使得它可以在不同次级多模用户之间进行网络协作。因此, RAT2有机会接入授权频谱, 这使得 $SD_0$ 的次级业务数据分流在RAT1和RAT2之间形成可能, 进而实现高效通信。

### 1.2 认知协作通信机制描述

本文只考虑 $SD_0$ 下行链路场景。由于 $SD_0$ 的上行链路可分析得到与其下行链路类似结果, 故在此不对其进行论述。不失一般性, 假设数据在网络中传输信道衰落为准静态信道, 即每帧内各信道增益保持不变, 且变化状态与历史无关。令 $G_{U_i, U_0}$ 、 $G_{U_i, B_2}$ 、 $G_{B_2, U_0}$ 、 $G_{B_1, D_0}$ 和 $G_{B_2, D_0}$ 分别表示 $U_{P1}$ 到 $U_{P0}$ 、 $U_{P1}$ 到 $BS_2$ 、 $BS_2$ 到 $U_{P0}$ 和 $BS_1$ 到 $SD_0$ 、 $BS_2$ 到 $SD_0$ 链路上的信道功率增益,  $N_0$ 表示加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)单边功率谱密度。

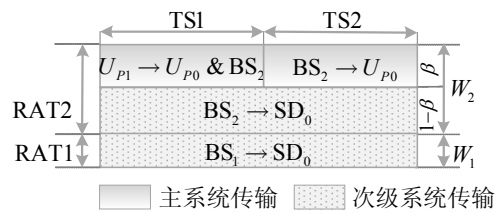


图2 ECC传输帧结构

为了比较方便, 本文首先介绍非合作传输机制(non-cooperation transmission, NCT), 然后提出高效能认知协作传输的ECC机制。在NCT机制中, 当 $U_{P1}$ 向 $U_{P0}$ 传输数据时, 为防止 $SD_0$ 对主用户传输造成干扰,  $BS_2$ 不允许接入RAT2网络进行次级下行服务。此时, 次级多模用户 $SD_0$ 的下行数据传输只能通过 $BS_1$ 接入RAT1提供服务, 则采用NCT机制的主用户速率可表示为 $R_{U_i, U_0}^{NCT} = W_2 \log_2(1 + P_{U_i} G_{U_i, U_0} / (N_0 W_2))$ 。由图2可以看出, ECC机制与NCT机制的传输帧完全不同。在ECC机制中,  $SD_0$ 通过RAT2协助主用户 $U_{P1}$ 传输数据, 换取部分授权频谱资源。这样,  $SD_0$ 可采

用网络协作的方式在不同RAT上实现数据分流, 进而提升次级通信能效。ECC机制中的具体数据传输描述如下。

1) 主数据传输: 图2中每个时长为的传输帧划分为两个时长相等的子帧(TS1, TS2)。在子帧TS1里,  $U_{P1}$  在RAT2上用功率  $P_{U1}$  将数据发送给BS<sub>2</sub>和  $U_{P0}$ 。然后, BS<sub>2</sub>对接收数据解码后在子帧TS2中以协作功率  $P_{B2,1}$  用DF方式转发给  $U_{P0}$ 。最后, 主终端用户  $U_{P0}$  将其在TS1和TS2中的接收信号进行最大比合并(MRC)。在ECC机制中, 链路  $U_{P1} \rightarrow BS_2$  和  $U_{P1} \rightarrow U_{P0}$  的数据传输速率可分别表示为:

$$R_{U_{1,B_2}}^{\text{ECC}} = \frac{1}{2} \beta W_2 \log_2(1 + P_{U_1} G_{U_1, B_2} / (\beta N_0 W_2)) \quad (1)$$

$$R_{U_{1,U_0}}^{\text{ECC}} = \frac{1}{2} \beta W_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_{U_1} G_{U_1, U_0}}{\beta N_0 W_2} + \frac{P_{B_2,1} G_{B_2, U_0}}{\beta N_0 W_2} \right) \quad (2)$$

式中, 等号右边的1/2表示主用户传输分两阶段进行。这样, ECC机制中主用户端到端的可达速率为  $R_{PU}^{\text{ECC}} = \min\{R_{U_{1,B_2}}^{\text{ECC}}, R_{U_{1,U_0}}^{\text{ECC}}\}$ 。此时, 如图2所示, 在不损害主传输的QoS要求下, 主系统将释放比例为  $1 - \beta$  ( $\beta \in [0, 1]$ ) 的授权频谱给次级用户使用。

2) 次级数据传输: 图1中的MRRM将对次级多模用户SD<sub>0</sub>的下行业务数据在RAT1和RAT2上传输分流。具体来说, BS<sub>1</sub>用发射功率  $P_{B1}$  以速率  $R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}}$  发送数据给SD<sub>0</sub>; 同时, BS<sub>2</sub>用发射功率  $P_{B2,2}$  以速率  $R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}}$  来发送数据给SD<sub>0</sub>。SD<sub>0</sub>在RAT1和RAT2上的分流速率可分别表示为:

$$R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}} = W_1 \log_2(1 + P_{B1} G_{B_1, S_0} / (N_0 W_1)) \quad (3)$$

$$R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}} = (1 - \beta) W_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_{B_2,2} G_{B_2, D_0}}{(1 - \beta) N_0 W_2} \right) \quad (4)$$

另外, 次级分流速率需满足次级系统总的传输速率要求, 即  $R_S^{\text{ECC}} = \omega_{\text{RAT1}} R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}} + \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}}$ 。这里  $\omega_{\text{RAT1}}$  和  $\omega_{\text{RAT2}}$  分别表示次级多模用户SD<sub>0</sub>业务数据分流在RAT1与RAT2上的速率加权因子, 以体现不同接入方式的优先级。

## 2 能量效率最优的次级传输

### 2.1 双重QoS约束的能效优化问题

在ECC传输机制中, BS<sub>2</sub>作为中继辅助主用户传输换取的授权频谱供次级多模用户SD<sub>0</sub>的业务数据进行传输分流。为了实现主次传输系统“双赢”局面, ECC传输机制对主次用户的传输质量施加了“双重”QoS限制。具体来讲, 一是主用户系统不仅需满足自身的QoS要求, 还需考虑主用户让次级用户参与协作的意愿。数学上, ECC传输机制将上述要

求刻画为主用户传输速率需满足自身最小速率  $R_P^{\text{req}}$  的同时, 还需不低于非合作模式下的传输速率  $R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}$ , 即满足关系  $R_{PU}^{\text{ECC}} \geq \max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}\}$ 。事实上, 也只有在主用户自身传输质量获得充分保证的情况下, 主系统才会释放一部分授权频谱资源; 二是次级分流速率需满足次级系统总的传输速率要求, 即  $R_S^{\text{ECC}} \geq R_S^{\text{req}}$ 。显然, 这种“双重”QoS约束是实现主次传输系统“双赢”局面的基础。换言之, 也只有在主系统和次系统的利益都得到保证的前提下, 合作才具有意义且符合实际情况。由此可知, ECC传输机制下的能效最大化问题是一个整体分配系统频谱与功率资源的规划问题, 将上述次级传输的加权能效优化问题描述为如下带约束的规划:

$$P1: \max_{V_E} \eta_{\text{EE}}^{\text{ECC}} \triangleq \frac{\omega_{\text{RAT1}} R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}} + \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}}}{P_{\text{cst}} + (1/\zeta)(1/2 P_{B_2,1} + P_{B_2,2} + P_{B_1})} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \min\{R_{U_{1,B_2}}^{\text{ECC}}, R_{U_{1,U_0}}^{\text{ECC}}\} \geq \max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}\} \quad (6)$$

$$\omega_{\text{RAT1}} R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}} + \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}} \geq R_S^{\text{req}} \quad (7)$$

$$1/2 P_{B_2,1} + P_{B_1} + P_{B_2,2} \leq P_S^{\text{max}} \quad (8)$$

$$0 \leq \beta \leq 1, P_{B_2,1} \geq 0, P_{B_2,2} \geq 0, P_{B_1} \geq 0 \quad (9)$$

式中,  $V_E \triangleq [\beta, P_{B_1}, P_{B_2,1}, P_{B_2,2}]$  和  $\mathcal{S}_D$  分别表示P1中的优化变量和可行域;  $R_P^{\text{req}}$  和  $R_S^{\text{req}}$  分别表示主次级传输所需满足的最低速率要求;  $P_S^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{cst}}$  和  $\zeta$  分别表示次级传输最大发射功率、电路功耗和功率放大器转换效率<sup>[3]</sup>。

### 2.2 能效优先的资源分配

注意到P1中的目标函数属于非线性分数规划, 首先定义函数  $T(V_E, q) = R_S^{\text{ECC}} - q(P_{\text{cst}} + 1/\zeta E_S^{\text{ECC}})$ , 式中  $E_S^{\text{ECC}} = 1/2 P_{B_2,1} + P_{B_2,2} + P_{B_1}$ ,  $q$  表示次级系统功耗代价因子。不难通过约束式(6)观察发现, 当主用户在TS1中传输速率  $R_{U_{1,B_2}}^{\text{ECC}}$  小于非合作情况下的传输速率  $\max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}\}$  时, 无论BS<sub>2</sub>以何功率  $P_{B_2,1}$  协助主用户传输都不会改善其性能。因此, 引入采用ECC传输机制的传输示性函数  $\psi$ , 当  $\min\{R_{U_{1,B_2}}^{\text{ECC}}, R_{U_{1,U_0}}^{\text{ECC}}\} < \max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}\}$  满足时  $\psi = 1$ , 否则  $\psi = 0$ 。接着, 通过Dinkelbach's算法<sup>[13]</sup>中的参数转换, 规划问题P1可以进一步描述为规划P2如下:

$$\min_{V_E, q} q(P_{\text{cst}} + 1/\zeta E_S^{\text{ECC}}) - \omega_{\text{RAT1}} R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}} - \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } (1 - \psi) R_{U_{1,U_0}}^{\text{ECC}} \geq \max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}\} \quad (11)$$

$$\omega_{\text{RAT1}} R_{SD_{0,1}}^{\text{ECC}} + \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_{0,2}}^{\text{ECC}} \geq R_S^{\text{req}} \quad (12)$$

$$1/2 P_{B_2,1} + P_{B_1} + P_{B_2,2} \leq P_S^{\text{max}} \quad (13)$$

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (14)$$

为便于理论分析, 这里将最大化问题改写为最小化的形式。在求解问题 P2 之前, 先给出以下两个定理。

**定理 1** 式(10)中的优化目标函数  $T(V_E, q)$  是优化变量  $V_E$  的联合凹函数, 且由式(6)~式(8)中的约束条件定义的可行域  $\mathcal{S}_D$  是凸集。

证明: 定义函数  $C(x, y) \triangleq y \log_2(1 + b/y + x/y)$ , 其中  $b > 0$ 。要证明  $C(x, y)$  是凹函数, 不妨分析  $C(x, y)$  的 Hessian 矩阵, 可表示为:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{y^3(1+(b+x)/y)^2 \ln 2} \begin{bmatrix} -y^2 & y(b+x) \\ y(b+x) & -(b+x)^2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{y(y+b+x)^2 \ln 2} \begin{bmatrix} -y & -y \\ b+x & b+x \end{bmatrix}^T \leq 0 \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{H} \triangleq \nabla(\nabla^T C(x, y)) \leq 0$  表示  $C(x, y)$  的 Hessian 矩阵半负定, 因此  $C(x, y)$  是关于  $x$  和  $y$  的整体凹函数。不难看出, P1 中的速率函数  $R_{U_1 B_2}^{\text{ECC}}$ ,  $R_{U_1 U_0}^{\text{ECC}}$  和  $R_{SD_0,2}^{\text{ECC}}$  具有与  $C(x, y)$  类似的形式, 因此它们都是关于  $V_E$  的整体凹函数。另外, 根据保凸性原则, 约束条件(6)中  $R_{PU}^{\text{ECC}} = \min\{R_{U_1 B_2}^{\text{ECC}}, R_{U_1 U_0}^{\text{ECC}}\}$  表示两个凹函数的最小仍属于凹函数<sup>[14]</sup>。另一方面, 规划问题 P1 中的 QoS 需求约束不等式(6)和(7), 可以分别看作  $R_{PU}^{\text{ECC}}$  和  $R_S^{\text{ECC}}$  的  $\max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1 U_0}^{\text{NCT}}\}$  上水平集和  $R_S^{\text{req}}$  上水平集, 故由凹函数的上水平集是凸集可知它们定义的可行域为凸集。另外, 注意到 P1 约束条件式(8)为非负线性不等式, 由凸优化理论可知它所定义的可行区域为凸集。因此知可行区域  $\mathcal{S}_D$  属于凸集。

令  $F(q) = \min_{V_E} \{-T(V_E, q) | V_E \in \mathcal{S}_D\}$  为优化问题 P2 的最小值, 则问题 P2 的最优解可表示为:

$$f(q) = \arg \min_{V_E} \{-T(V_E, q) | V_E \in \mathcal{S}_D\} \quad (16)$$

定理2指出了优化问题 P1 和 P2 之间的关系, 其具体证明参见文献[13]。

**定理 2** P1 问题达到最优值  $V_E^*$  时当且仅当  $q^* = \min_{V_E} \{-T(V_E, q) | V_E \in \mathcal{S}_D\} = \eta_{EE}^{\text{ECC}}(V_E)$  取最优, 即:

$$F(q^*) = \min_{V_E \in \mathcal{S}_D} \{-T(V_E, q)\} = 0 \text{ and } f(q^*) = V_E^* \quad (17)$$

定理2表明, 优化问题 P2 在参数  $q$  是最优时, P1 与 P2 具有相同的最优解。故解决问题 P1 可以等价于在给定  $q$  的情况下找到 P2 问题最优的  $V_E$ , 然后更新  $q$  直到满足式(17)。

由定理1可知, P2 问题属于凸优化问题, 且定理2保证了参数  $q$  是最优时, P1 与 P2 具有相同解。因此, 其最优解可以通过构造拉格朗日函数推导出最优解, 根据 P2 建立拉格朗日函数  $\mathcal{L}$  如下:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & q(P_{\text{cst}} + 1/\zeta E_S^{\text{ECC}}) - \omega_{\text{RAT1}} R_{SD_0,1}^{\text{ECC}} - \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_0,2}^{\text{ECC}} + \\ & \lambda_1 (\max\{R_P^{\text{req}}, R_{U_1 U_0}^{\text{NCT}}\} - (1 - \Psi) R_{U_1 U_0}^{\text{ECC}}) + \\ & \lambda_2 (R_S^{\text{req}} - \omega_{\text{RAT1}} R_{SD_0,1}^{\text{ECC}} - \omega_{\text{RAT2}} R_{SD_0,2}^{\text{ECC}}) + \\ & \lambda_3 (1/2 P_{B_2,1} + P_{B_2,2} + P_{B_1} - P_S^{\text{max}}) + \lambda_4 (\beta - 1) \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $\lambda = \{\lambda_i\}_{i=1}^4$  是对应规划问题 P2 中约束条件的非负拉格朗日乘子, 则原问题的对偶问题可以表示为 P3:  $\max_{\lambda} \min_{V_E, q} \mathcal{L}(V_E, q, \{\lambda_i\}_{i=1}^4)$  s.t.  $\{\lambda_i\}_{i=1}^4 \geq 0$ , 并用  $r^*$  和  $d^*$  分别表示 P2 和 P3 的最优值。由凸优化理论可知, 凸问题 P2 满足 Slater 条件对偶间隙等于 0, 即  $d^* = r^*$ <sup>[14]</sup>。这保证可通过解决 P3 来获得 P2 的最优解。因此, 根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件, ECC 机制下的最优功率分配可推导为:

$$P_{B_1}^* = \left[ \frac{\omega_{\text{RAT1}} \zeta (1 + \lambda_2) W_1 - N_0 W_1}{\ln 2 (q + \lambda_3 \zeta)} - \frac{N_0 W_1}{G_{B_1 D_0}} \right]^+ \quad (19)$$

$$P_{B_2,1}^* = \left[ \frac{\lambda_1 \zeta \beta W_2 (1 - \psi)}{\ln 2 (q + \lambda_3 \zeta)} - \frac{\beta N_0 W_2}{G_{B_2 U_0}} - \frac{P_{U_1} G_{U_1 U_0}}{G_{B_2 U_0}} \right]^+ \quad (20)$$

$$P_{B_2,2}^* = \left[ \frac{\omega_{\text{RAT2}} \zeta (1 - \beta) W_2 (1 + \lambda_2)}{\ln 2 (q + \lambda_3 \zeta)} - \frac{(1 - \beta) N_0 W_2}{G_{B_2 D_0}} \right]^+ \quad (21)$$

式中,  $[x]^+$  表示  $\max\{0, x\}$ , 并且  $\lambda$  可以通过次梯度法迭代更新得到, 其迭代关系为  $\lambda^{l+1} = \lambda^{l+1} + \mu^{l+1} \nabla_{\lambda} \mathcal{L}(V_E, q, \lambda)$ , 式中  $l$  表示迭代次数,  $\mu^{l+1} > 0$  表示第  $l+1$  次迭代步长。事实上, 应用 Armijo 准则的回溯线性搜索, 可获取最优步长  $\mu^{l+1}$  来加快收敛速度。由前面的分析, 不难看出  $\beta^*$  同样可以通过 KKT 条件得出, 但由于  $\mathcal{L}$  是关于  $\beta$  的超越方程, 没有给出其闭合解表达式。为此, 本文通过联合 Dinkelbach's 算法<sup>[13]</sup>和黄金比例搜索算法 (GSS)<sup>[14]</sup>求得最优的  $V_E^*$ , 具体步骤见算法1和算法2。

算法1: ECC 机制下的资源分配算法

初始化: 令  $\mu = (\sqrt{5} - 1)/2$ ,  $\Xi = \Xi_0 = \{1, 2\}$ , 容忍度  $\xi > 0$ ,  $[\beta^{\text{lb}}, \beta^{\text{ub}}]$  为 GSS 算法搜索区间;

If  $\psi == 1$  采用 NCT 机制传输; Endif

$$\beta_1 = \beta^{\text{lb}} + (1 - \mu)(\beta^{\text{ub}} - \beta^{\text{lb}});$$

$$\beta_2 = \beta^{\text{lb}} + \mu(\beta^{\text{ub}} - \beta^{\text{lb}});$$

Repeat

利用算法2得到  $\beta_n$  下的最优功率分配, 计算  $\text{ee}(n) = \eta_{EE}^{\text{ECC}}(\beta_n)$ , ( $\beta_{n \in \Xi} \in [0, 1]$ ,  $n \in \Xi$ );

If  $\eta_{EE}^{\text{ECC}}(\beta_1) \leq \eta_{EE}^{\text{ECC}}(\beta_2)$

$$\beta^{\text{lb}} = \beta_1, \beta_1 = \beta_2, \beta_2 = \beta^{\text{lb}} + \mu(\beta^{\text{ub}} - \beta^{\text{lb}})$$

$\text{ee}(1) = \text{ee}(2)$ ,  $\Xi = \Xi_0 \setminus \{2\}$ ; Else

$$\beta^{\text{ub}} = \beta_2, \beta_1 = \beta^{\text{lb}} + (1 - \mu)(\beta^{\text{ub}} - \beta^{\text{lb}})$$

$\beta_2 = \beta_1$ ,  $ee(2) = ee(1)$ ,  $\Xi = \Xi_0 \setminus \{1\}$ ; End if

Until  $|ee(2) - ee(1)| < \xi$  收敛

返回P1最优的  $\beta^*$ ,  $P_{B_1}^*$ ,  $P_{B_2,1}^*$ ,  $P_{B_2,2}^*$ 。

具体来说, 首先通过传输示性函数  $\Psi$  判定是否采用ECC机制。接着在给定频谱共享因子  $\beta$  时, 利用算法2基于Dinkelbach's的对偶方法来进行功率分配。然后再给定  $\{P_{B_1}, P_{B_2,1}, P_{B_2,2}\}$ , 优化  $\beta$  使次级能效  $\eta_{EE}^{ECC}$  最大化。这样,  $\beta$  和  $\{P_{B_1}, P_{B_2,1}, P_{B_2,2}\}$  进行交替迭代直到能量效率增益小于预设门限为止。

算法2: 功率分配算法

初始化:  $F(q) = \infty$ ,  $q = q_0$ , 容忍度  $\zeta > 0$ ,  $\delta > 0$ ,

对偶变量  $\lambda^{[0]} = \lambda_{\text{initial}}$ , 迭代次数  $n, l$ ;

While  $|F(q)| > \zeta$  do

Repeat

根据式(19)~式(21)计算  $P_{B_1}^*$ ,  $P_{B_2,1}^*$  和  $P_{B_2,2}^*$ ;

用  $\lambda^{[l+1]} = \lambda^{[l]} + \mu^{[l]} \nabla_{\lambda} \mathcal{L}(V_E, q, \lambda)$  更新  $\lambda$ ;

计算  $\Delta \lambda = \Delta \lambda^{[l+1]} - \Delta \lambda^{[l]}$ , 更新  $l = l + 1$ ;

Until  $\|\Delta \lambda\| < \delta$  收敛

更新  $n = n + 1$ , 并通过式(5)更新  $q = \eta_{EE}^{ECC}$ ;

End while

返回  $P_{B_1}^*$ ,  $P_{B_2,1}^*$ ,  $P_{B_2,2}^*$ 。

值得注意的是, 当  $\beta = 0$ ,  $P_{B_2,1} = 0$  和  $P_{B_2,2} = 0$  时, ECC机制下的能效问题退化为非合作的NCT机制能效问题。因此, 由算法2可以很容易地求解NCT机制下基于能效的资源分配问题, 这里不再赘述。

### 2.3 收敛性与复杂性分析

本节首先讨论算法的收敛性, 再对其复杂性进行分析。根据定理2可知, 算法2在  $q$  达到最优时才会终止。接下来, 先考察函数  $F(q)$  的单调性, 不妨假设任意  $q_1, q_2 \in \mathcal{S}_D$  且满足  $q_1 < q_2$ , 则根据式(17)有:

$$F(q_2) = \max_{V_E \in \mathcal{S}_D} \{T(V_E, q_2)\} = T(V_E^*, q_2) < T(V_E^*, q_1) < \max_{V_E \in \mathcal{S}_D} \{R_S^{ECC} - q_1(P_{\text{cst}} + 1/\zeta E_S^{ECC})\} = F(q_1) \quad (22)$$

式中,  $F(q_2) < F(q_1)$  表明  $F(q)$  随  $q$  的增加而减小, 即  $F(q)$  是关于变量  $q$  的单调递减函数。这样, 若要证明算法2的收敛性, 只需证明  $F(q)$  随迭代次数  $n$  的增加而逐渐减小, 可作如下分析推导:

$$T(V_E^{*[n-1]}, q^{[n]}) \leq \max_{V_E \in \mathcal{S}_D} \{T(V_E^{*[n-1]}, q^{[n]})\} = F(q^{[n]}) = \max_{V_E \in \mathcal{S}_D} \{T(V_E^{*[n]}, q^{[n]})\} = (q^{[n+1]} - q^{[n]})(P_{\text{cst}} + 1/\zeta E_S^{ECC}(V_E^{*[n]})) \quad (23)$$

另根据定理2可知  $T(V_E^{*[n-1]}, q^{[n]}) = 0$ , 由式(23)可以得到  $E_S^{ECC}(V_E^{*[n]})(q^{[n+1]} - q^{[n]}) > 0$ , 则有  $E_S^{ECC}(V_E^{*[n]}) > 0$ , 必然存在  $q^{[n+1]} \geq q^{[n]}$ 。进一步考虑到  $F(q)$  是关于变

量  $q$  的单调递减函数, 则有  $F(q^{[n+1]}) \leq F(q^{[n]})$ 。因此,  $F(q)$  随着迭代次数  $n$  的增加而减小,  $|F(q^{[n+1]})|$  最终会小于容误差  $\zeta$ , 这表明  $F(q)$  将随  $n$  逐次递减直至收敛条件满足。另外, 所提算法的计算复杂度由黄金分割法的线性搜索复杂度  $O(N)$  和功率分配算法复杂度  $O(KM)$  两部分所组成。不难分析得到, ECC传输机制下的资源分配算法的整体计算复杂度为  $N \times O(KM) = O(NKM)$ , 其中  $N$  的取值是根据算法1中容误差  $\xi$  选取决定, 而  $K$  和  $M$  的取值是由算法2中容误差  $\zeta$  和  $\delta$  的选取决定。

### 3 仿真结果及分析

本节通过仿真验证ECC通信机制的能效性能。根据参考文献[3]和[6]设置仿真参数如下: 次级传输带宽  $W_1 = 0.1$  MHz, 次级系统电路功耗  $P_{\text{cst}} = 3$  W, 次级系统最大发射功率  $P_S^{\text{max}} = 10$  W, 主系统频谱带宽  $W_2 = 0.5$  MHz, 主用户发射功率  $P_{U_1} = 1$  W, 功率放大器效率  $\zeta = 35\%$ 。主和次系统最小传输速率要求分别设置为  $R_p^{\text{req}} = 0.5$  Mb/s和  $R_S^{\text{req}} = 4.5$  Mb/s。链路距离分别为  $d_{U_1, U_0} = 1000$  m,  $d_{U_1, B_2} = 500$  m,  $d_{B_2, U_0} = 800$  m,  $d_{B_1, D_0} = d_{B_2, D_0} = 300$  m。此外, 信道损耗指数  $\gamma = 3.5$ , AWGN噪声功率谱密度  $N_0 = -125$  dBm/Hz。在下面的仿真中, 若图中没有特别说明, 仿真参数默认为上述值。

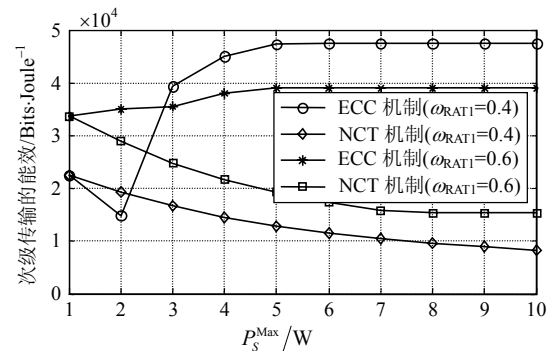


图3 不同次级最大发射功率限制下的次级能效

图3和图4分别给出了在不同次级最大发射功率  $P_S^{\text{max}}$  限制下的次级传输能效关系和功耗关系。由图3可以看出, 当  $P_S^{\text{max}} = 1$  W时, ECC机制与NCT机制具有相同的能效, 这是因为此时的  $P_S^{\text{max}}$  协作主系统传输并不能保证其提高通信性能, 故造成MRRM不会选择ECC机制进行次级传输。相反, 当  $P_S^{\text{max}} \geq 2$  W时, ECC机制下的能效随  $P_S^{\text{max}}$  的增大而增加, 而NCT机制下的能效随  $P_S^{\text{max}}$  的增大而减小, 但最终都趋于稳定。图4表明, 与NCT机制相比, 采用网络协作的ECC机制可以大幅降低次级传输能耗。对比图3和图

4, 不难看出, 当  $P_S^{\max} \leq 5$  W时, 次级系统所能提供的自身功率限制了  $P_S^{\max}$  成为影响ECC机制次级传输能效的最主要因素。所以,  $P_S^{\max}$  增大对应的能效得到改善, 直至能效提升到最大。此外, 可以很容易地看出ECC机制下次级传输的能效随着  $\omega_{\text{RAT1}}$  的变大相应变小。这是因为, 当速率分配权重  $\omega_{\text{RAT1}}$  增大时, 表明SD<sub>0</sub>有更少的数据分流在RAT2上进行传输, 使得SD<sub>0</sub>在RAT1和RAT2之间进行网络协作的可能减小, 从而降低了次级系统通信能效。

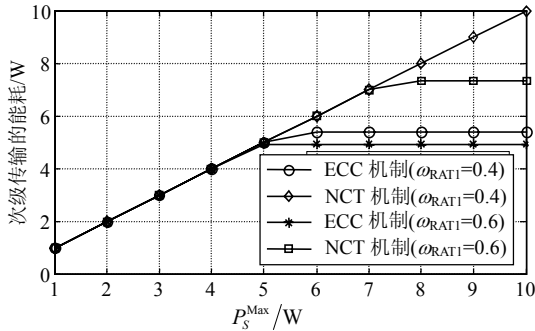


图4 不同次级最大发射功率限制下的传输功耗

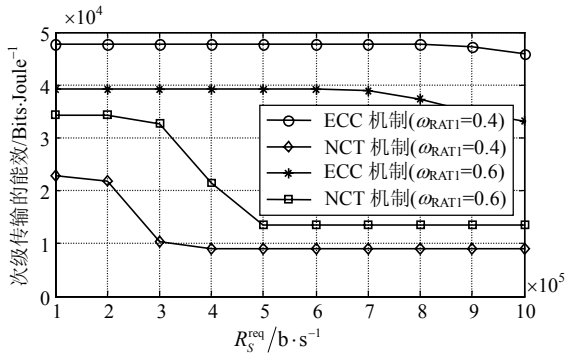


图5 不同次级最小速率限制下的次级能效

图5和图6分别给出了次级最小速率  $R_S^{\text{req}}$  对次级传输能效和功耗的影响。可以看出, 两种机制下的次级能效都会随  $R_S^{\text{req}}$  的增加而减小, 而系统功耗会随  $R_S^{\text{req}}$  的增加而增加。这是因为次级传输需提供更多的功率来满足更高的传输速率QoS要求。值得注意的是, ECC机制下的能效和功耗变化趋势比NCT机制缓慢的多。其原因是在满足主用户速率QoS要求的前提下, 在ECC机制中可通过释放更多的频谱资源来弥补  $R_S^{\text{req}}$  的增加。对比图5和图6, 在  $R_S^{\text{req}}$  较低时, NCT机制只需要较低的传输功耗即可满足次级用户的低速率要求, 而ECC机制需要消耗额外的功率来协助主传输, 造成更多的次级传输功耗。但是, 由于ECC机制通过网络协作主传输, 换来了更多通信频谱自由度, 使得其能效仍然较NCT机制高。当  $R_S^{\text{req}}$  较大时, 相比于NCT机制, ECC机制可以显著

降低次级传输的功耗。这是因为在NCT机制中高数据传输速率会造成地功率消耗更大。但是, ECC中的网络协作机制有效克服了次级传输功耗的降低。

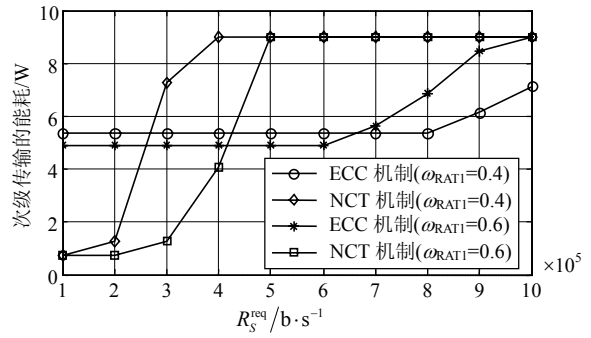


图6 不同次级最小速率限制下的次级功耗

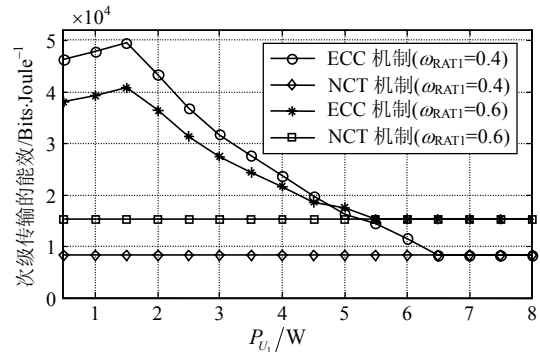


图7 不同主用户发射功率下的次级能效

图7显示了主用户不同发射功率  $P_{U_1}$  下次级传输能效的仿真结果。可以看到, 与NCT机制相比, 在满足主用户速率QoS要求下, NCT机制不随  $P_{U_1}$  变化, 而在不同速率加权因子  $\omega_{\text{RAT1}}$  下次级能效都会随  $P_{U_1}$  的增加呈现先增加后下降的变化。这是因为增大  $P_{U_1}$  的作用有两方面的, 一方面使得ECC机制中主系统释放频谱量增加, 另一方面次级用户在TS2阶段只需要较大的协作功率  $P_{B_{2,1}}$  中继转发给  $U_{P_0}$ 。这样, 当  $P_{U_1}$  较小时,  $P_{U_1}$  的增加量可以提高主用户在TS1阶段的传输性能, 并让主系统释放更多频谱量供次级传输使用, 故此时次级能效随着  $P_{U_1}$  的增加而增加。而随着  $P_{U_1}$  的增加, 虽然ECC机制中主系统释放频谱增加, 但次级用户需要提供更多的协作功率  $P_{B_{2,1}}$  中继转发。此时, 协作功率  $P_{B_{2,1}}$  的增加成为影响次级能效的主要因素, 从而导致ECC机制次级传输能效随着  $P_{U_1}$  的增加而减小。另外, 当主用户传输速率低于其自身非合作传输速率即  $R_{PU}^{\text{ECC}} \leq R_{U_1, U_0}^{\text{NCT}}$  时, 主用户将放弃让次级用户协助传输, 选择非合作机制而使能效性能趋于一致。

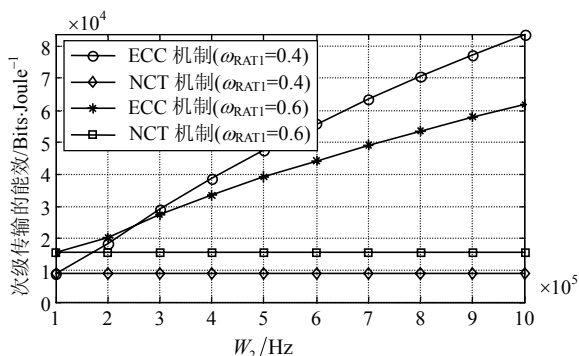


图8 不同授权频谱带宽  $W_2$  下的次级能效

图8给出了不同授权频谱带宽  $W_2$  下的次级传输能效关系。正如所期望的那样, 在ECC机制中, 增大主系统的授权频谱带宽  $W_2$  可以显著提升次级传输能效, 而NCT机制不随  $W_2$  变化。其原因不难理解, 在ECC机制中, 随着授权频谱带宽  $W_2$  的增加, 次级协助主用户传输可换取更多的通信频谱自由度, 在相同的最小速率要求情况下, 所需的传输功耗更小, 从而提升了次级传输能效。此外, 可以明显看到, ECC机制的能效始终优于NCT机制。其原因是相比NCT机制, 采用协作传输的ECC机制数据传输链路距离较短, 用较低传输功耗便可达到较高的数据传输速率, 从而提升了次级传输能效。

## 4 结束语

本文研究了Het-CRNs环境中的高效认知协作传输问题, 提出了一种称为ECC高效认知传输机制。ECC机制借助认知无线电技术, 使次级传输数据可在异构网络中实现传输分流, 进而提高了次级传输能效。基于该机制, 建模了次级能效最大化的非凸资源优化问题, 通过非线性分式规划理论的等价转换, 并结合黄金分割法提出了一种高效的迭代求解算法。仿真分析表明, 所提的方案在不降低主用户通信性能的前提下, 提升了次级系统传输能量效率, 实现了主次用户“双赢”的局面。

本文研究工作得到了华为公司项目(YB2014110120)的资助, 在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] FENG L, KUANG Y J, WU B W. Energy-efficient configuration of power resource for OFDM-based opportunistic regenerative relay links[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(2): 341-347.
- [2] RONG B Y, EPHREIMIDES A. Cooperative access in wireless networks: Stable throughput and delay[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(9): 5890-5907.
- [3] HUANG X Q, HAN T, ANSARI N. On green energy powered cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 827-842.
- [4] FENG L, KUANG Y J, WU B W, et al. Energy-efficient distributed spectrum sensing with combined censoring in cognitive radios[J]. IEICE Transactions on Communications, 2016, 99(2): 455-464.
- [5] GHOSH C, ROY S, CAVALCANTI D. Coexistence challenges for heterogeneous cognitive wireless networks in TV white spaces[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(4): 22-31.
- [6] LIU D, WANG W, GUO W. Green cooperative spectrum sharing communication[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(3): 459-462.
- [7] Cao B, Mark J W, Zhang Q, et al. On optimal communication strategies for cooperative cognitive radio networking[C]//IEEE International Conference on Computer Communications, 2013: 1726-1734.
- [8] ISMAIL M, ZHUANG W. Network cooperation for energy saving in green radio communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5): 76-81.
- [9] MA X, SHENG M, ZHANG Y. Green communications with network cooperation: a concurrent transmission approach[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 1952-1955.
- [10] ZOU Y, ZHU J, ZHANG R. Exploiting network cooperation in green wireless communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 61(3): 999-1010.
- [11] DUAN L, GAO L, HUANG J. Cooperative spectrum sharing: a contract-based approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(1): 174-187.
- [12] DAI Z, LIU J, WANG C, et al. Exploiting network cooperation for green communications in cognitive radio networks[C]//IEEE Global Communications Conference, 2013: 4554-4559.
- [13] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming [J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.
- [14] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

编辑 叶芳