

# 认知中继网络中基于能效的协作传输技术研究

冯立<sup>1,2</sup>, 邝育军<sup>1</sup>, 吴斌伟<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, 四川 成都 611731; 2. 四川广播电视大学工程技术学院, 四川 成都 610073)

**摘要:** 针对协作认知网络设计了一种高能效 (energy efficiency) 最佳中继协作传输方案 (BCT)。基于 BCT 机制, 考虑次级中断概率为约束条件, 在衰落信道下建模了以感知时间与功率为优化变量的系统平均能效最大化问题。借助 Jensen 不等式, 并将原问题分解成 2 个相对独立的子问题来分别求解感知时间与功率分配, 提出了一种高效的交叉迭代算法得到系统次优解。理论分析与仿真结果表明, 在系统服务质量要求较高的情况下, 与非协作传输机制相比, BCT 机制不仅能提升次级传输的能量效率, 还可显著提高次级传输的可靠性。

**关键词:** 认知无线电; 协作感知; 中继传输; 能量效率; 资源分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

## Energy-efficient cooperative sensing and transmission in relay-assisted cognitive radio network

FENG Li<sup>1,2</sup>, KUANG Yu-jun<sup>1</sup>, WU Bin-wei<sup>1</sup>, FU Xin-chuan<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** An innovative EE-oriented cooperative sensing and transmission scheme in relay-assisted cognitive radio networks, called energy-efficient best-relay cooperative transmission (BCT) was proposed. Based on the BCT scheme, mean energy efficiency (MEE) maximization problem with sensing duration and transmitting power as optimization variables was modeled for fading channels under constraint of minimal secondary outage probability. By virtue of Jensen's inequality, the original optimization problem was decomposed into two relatively independent subproblems which solved sensing duration and power allocation respectively. And for the two subproblems, an efficient cross iteration based algorithm was proposed to obtain the suboptimal solutions. Both analytical and simulation results demonstrate that the proposals can achieve significantly higher EE while enhancing reliability of secondary transmission remarkably compared to non-cooperation single cognitive transmission schemes in high QoS requirement.

**Key words:** cognitive radio, cooperative sensing, relay transmission, energy efficiency, resource allocation

### 1 引言

随着移动用户数量和无线数据业务的不断快速增长, 提升移动通信传输的能量效率成为一个迫

在眉睫的问题。尤其是当下数字媒体业务的急剧增长, 在考虑到用户更高传输速率需求的驱动下, 如何实现高能效传输就变得尤为关键<sup>[1]</sup>。与此同时, 认知无线电(CR, cognitive radio)与协作通信(CC,

收稿日期: 2016-11-06; 修回日期: 2017-01-24

通信作者: 冯立, feng\_fengli@163.com

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2014AA01A703); 国家自然科学基金资助项目 (No.61471089, No.61201129); 华为公司基金资助项目 (No.YB2014110120); 四川省教育厅科研基金资助项目 (No.16ZB0504); 四川广播电视大学教学改革基金资助项目 (No.XMGCS2016001Q)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA01A703), The National Natural Science Foundation of China (No.61471089, No.61201129), The Fund of Huawei Corporation (No.YB2014110120), Research Project of Sichuan Province Education Department (No.16ZB0504), Education and Teaching Reform Project of Sichuan Radio and TV University (No.XMGCS2016001Q)

cooperative communication)技术被认为是实现高效通信的重要手段<sup>[2]</sup>。一方面, 认知无线电技术内在的感知能力使其能充分检测频谱空穴, 在不对授权终端引起干扰的情况下, 利用空闲频谱通信有效改善传输速率<sup>[3]</sup>。另一方面, 由于中继用户能辅助转发源用户信号, 使通信覆盖范围、链路频谱效率以及传输可靠性等方面性能显著提升<sup>[4]</sup>。

现有研究也显示运用认知与协作技术可以降低网络能耗<sup>[5-7]</sup>。文献[5]研究了在异构认知网络中的高效协作传输问题, 提出了在满足最低服务质量要求下, 系统能效最大化的功率分配方案。在基于正交频分复用的认知无线电系统中, 文献[6]分析了多个次级用户基于能效的机会频谱接入策略问题, 提出了一种低复杂度的启发式算法来求解能效优先的最优功率分配方案。文献[7]提出了一种基于审查机制的分布式协作频谱感知策略, 研究表明在不降低感知性能的情况下, 可以显著降低能耗。文献[8]研究了通过联合优化次级帧周期和频谱感知时间来提高认知无线网络中能量效率问题, 并提出了一种次优的最大化网络能量效率算法。结果表明, 与固定感知时间方案相比, 所提方案可显著降低能耗。文献[9]建模了在快衰落场景中认知用户的平均能效最大传输问题, 并考虑传输中断概率约束的条件, 提出了一种实现认知用户平均能效最大化的功率分配策略。与文献[9]中快衰落单跳认知传输场景类似, 文献[10]考虑感知与传输 2 个阶段认知用户的平均能效最大传输问题, 联合优化认知用户的频谱感知时间和发射功率, 提出了近似最优的认知网络能量效率最大化算法。与文献[9,10]单跳认知传输不同, 文献[11]讨论了在检测概率和协作传输误码率的限制下协作认知网中节能传输问题, 提出了一种加权目标能耗函数最优中继用户数目的选择方案, 实现了频谱感知精度和能耗之间的折中。此外, 文献[12]考虑了最佳中继协作传输, 针对多个主次用户的网络场景, 定义次级传输能量效率为收益函数, 提出了一种分布式的次级用户联盟博弈形成算法。

上述研究分别从不同角度讨论了认知无线网络传输的高能效问题, 但存在不同方面的局限性。事实上, 文献[8~10]考虑单跳认知网络存在 2 个方面的不足, 一方面, 次级系统较大的虚警概率会浪费次级用户接入空洞的机会, 即损失了传输机会而降低吞吐量; 另一方面, 次级系统需较高的传

输服务质量, 必然消耗大量发射功率出现低能效。文献[11,12]虽然考虑了协作感知与传输问题, 但没有考虑优化感知时间与传输功率的资源来最大化系统能效。另外, 认知用户链路传输的 QoS 衡量标准通常也没有考虑采用中断概率来刻画。因此, 针对上述不足, 与文献[8,10~12]类似, 本文考虑次级用户感知和传输 2 个阶段, 提出了一种基于能效优先的最佳中继协作传输(BCT, best-relay cooperation transmission)机制。其主要思想是在感知阶段次级中继用户参与感知来提高传输机会, 并在传输阶段通过最佳协作用户辅助次级传输来改善通信质量, 进而提升次级能效。同时, 通过次级传输能量效率最大化的感知时间与次级用户功率联合资源分配算法, 实现在保证主系统传输质量的前提下, 提高次级传输能量效率, 降低传输的中断概率。为方便下文分析和描述进行如下定义:  $\nabla_x f \triangleq \frac{\partial f(x)}{\partial x}$  和  $\nabla_x^2 f \triangleq \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2}$ 。

## 2 系统模型与传输描述

### 2.1 系统模型

本文假设的认知中继网络如图 1 所示, 其中包含一对主用户 ( $U_{P1}, U_{P0}$ ), 一对次级用户 ( $ST, SD$ ) 和  $M$  个次级中继协作用户  $SR(\Theta = \{SR_i | i = 1, 2, \dots, M\})$ 。并假设各认知用户  $J = \{ST, SR\}$  均采用能量检测(ED, energy detect)方法去执行本地感知, 并且通过协作感知进行判决融合的方式伺机接入。

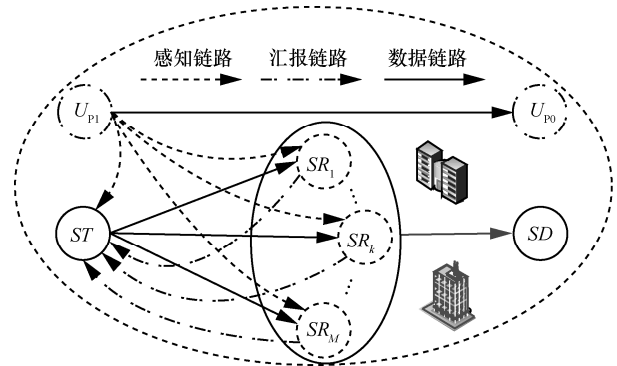


图 1 中继协作传输的认知网络模型

用  $H_1$  和  $H_0$  分别表示授权信道繁忙 ( $U_{P1} \rightarrow U_{P0}$  链路存在) 和信道空闲 ( $U_{P1} \rightarrow U_{P0}$  链路不存在) 2 种情况, 且用  $\hat{H}_1$  和  $\hat{H}_0$  分别表示感知结果为主用户信道繁忙和空闲的状态。根据文献[13]的结论, 考

考虑主用户信号为复 PSK 信号，对于给定检测阈值  $V_T$ ，认知用户  $k \in J$  的虚警概率和检测概率分别近似表示为

$$\phi_{f,k}(\tau) = \Pr(\hat{H}_1|H_0) = Q(A_1\sqrt{\tau f_s}) \quad (1)$$

$$\phi_{d,k}(\tau) = \Pr(\hat{H}_1|H_1) = Q(-A_2\sqrt{\tau f_s A_3}) \quad (2)$$

其中， $f_s$  表示采样频率， $A_1 = \frac{V_T}{\sigma_n^2} - 1$ ，

$$A_2 = 1 + \gamma_j - \frac{V_T}{\sigma_n^2}, \quad A_3 = \frac{1}{2\gamma_j + 1}, \quad Q(z) \text{ 为标准正态}$$

分布的截尾函数，即  $Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du$ 。此外，

$\sigma_n^2$  表示次级用户  $J$  上加性高斯白噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise) 功率。BCT 机制采用“AND 准则”方式进行判决融合，其目的是在满足检测门限  $Q_d^{\text{th}}$  的前提下，通过降低联合虚警概率来提高次级系统传输机会。为方便分析，假设次级用户  $J$  接收到  $U_{p1}$  信号具有相同的接收信噪比  $\gamma$ ，则联合检测概率和联合虚警概率的表达式为

$$Q_{f,\text{AND}}(\tau) = \prod_{k \in J} \phi_{f,k}(\tau) = (Q(A_1\sqrt{\tau f_s}))^{M+1} \quad (3)$$

$$Q_{d,\text{AND}}(\tau) = \prod_{k \in J} \phi_{d,k}(\tau) = (Q(-A_2\sqrt{\tau f_s A_3}))^{M+1} \quad (4)$$

该认知中继网络中，在感知过程中让  $SR$  参与协作感知来提高次级传输机会，并在传输过程中从  $SR$  中选择最佳中继用户辅助次级传输来改善通信质量，进而提升次级能效。需要说明的是，一方面，认知系统中为刻画次级传输机会一般要求  $Q_{f,\text{AND}}(\tau) \leq \phi_{f,k}(\tau) < 0.5$ ，通过分析式(1)有  $A_1 > 0$ 。另一方面，为充分保证主系统的传输质量，联合检测概率  $Q_{d,\text{AND}}(\tau)$  需不低于目标检测概率， $Q_d^{\text{th}} \geq 0.9$ ，则有  $\phi_{d,k}(\tau) \geq Q_{d,\text{AND}}(\tau) \geq Q_d^{\text{th}} \geq 0.9 > 0.5$ ，不难通过分析式(2)得到  $A_2 > 0$ 。基于上述思想，本文提出了 BCT 传输机制，实现认知中继网络的高能效传输。

### 2.2 基于用户选择的次级传输机制

本文考虑  $ST$  下行链路场景。令  $G_{TD}$ 、 $G_{TR_k}$  和  $G_{R_kD}$  分别表示  $ST$  到  $SD$ 、 $ST$  到  $SR_k$  和  $SR_k$  到  $SD$  链路上的信道系数。不失一般性，假设无线信道建模为衰落独立的瑞利(Rayleigh)衰落，并且链路  $L \rightarrow I$  的信道系数  $G_{LI}$  ( $L \in \{ST, SR, SD\}, I \in \{ST, SR,$

$SD\}, L \neq I)$  服从均值为  $\lambda_{LI}$  的指数分布。与文献[7~12]类似，BCT 传输机制采用帧长为  $T$  的周期过程。从图 2 的帧结构中可以看出，BCT 传输机制与传统的单跳认知传输(SCT, single cognitive transmission)过程完全不同。在 BCT 通信机制中，每个次级传输帧划分成时长为  $\tau$  的协作感知阶段和时长为  $T - \tau$  的协作传输阶段，并且协作传输阶段进一步划分为 2 个等间隔的子时隙，分别记为  $T_{t_1}$  和  $T_{t_2}$ 。

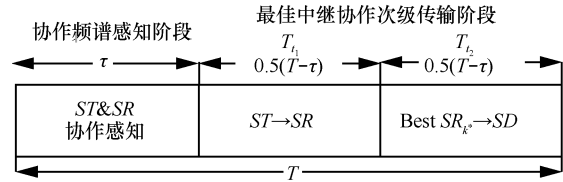


图 2 BCT 机制传输帧结构

提出的 BCT 通信机制可具体描述如下。

1) 协作感知过程。次级中继用户  $SR$  参与协作频谱感知，并将感知结果汇报给次级源用户  $ST$ 。假定感知时间  $\tau$  内主用户信号保持不变，若次级源用户  $ST$  给出的联合决策结果是授权信道空闲，则  $ST$  才利用剩余的  $T - \tau$  时间进行次级传输，否则等待下一个周期。需要指出的是在 BCT 机制中，由于判决融合时间较短，且并非本文研究的重点，故将其忽略。

2) 协作传输过程。如图 2 所示，时长为  $T - \tau$  的传输阶段进一步划分为  $T_{t_1}$  和  $T_{t_2}$  这 2 个等时长的传输子时隙。在  $T_{t_1}$  子时隙里， $ST$  将在感知空闲频谱上，用功率  $P_S$  将数据广播给所有次级中继用户  $SR$ 。接着，在次级中继协作用户集合  $\Theta$  中挑选具有最大端到端信噪比的协作用户作为最优中继  $SR_{k^*}$ ，其选择的标准可描述为

$$SR_{k^*} = \max_{SR_k \in \Theta} (\min(G_{TR_k}, G_{R_kD})) \quad (5)$$

然后，基于上述准则挑选的最佳协作中继  $SR_{k^*}$  进行协助传输。更具体地说， $SR_{k^*}$  将接收数据解码后，在  $T_{t_2}$  子时隙里以功率  $P_{R_k}$  用 DF 协议方式转发给  $SD$ 。

值得注意的是，在 BCT 机制中，协作感知与协作传输阶段都是通过中继协作用户集合  $\Theta = \{SR_1, \dots, SR_i, \dots, SR_M\}$  的协助完成的，此时的协作用户数  $|\Theta| = M$ 。事实上，为节省能耗，次级源用户  $ST$  可根据实际信道状态，选择合适的协作用户集合

$\Theta$ , 其具体的思路可参考文献[12], 这里, 不对其进行具体论述。

### 3 能效最优的认知中继系统

#### 3.1 能耗与传输速率分析

基于上述的 BCT 传输机制, 在分析其传输速率与能耗前, 先做如下说明。假设主源用户  $U_{p_1}$  信号分别以概率  $\phi_{H_1}$  出现和  $\phi_{H_0}$  不出现, 并设认知用户  $J$  的感知功耗为  $P_{sc}$ , 次级源用户  $ST$  和协作用户  $SR$  的电路功耗分别为  $P_c^S$  和  $P_c^R$ 。如图 1 所示, 根据主用户  $U_{p_1}-U_{p_0}$  链路状态与次级用户  $J$  的联合决策结果, 可分析得到如下 4 种情形。这里, 令  $R_i$  和  $E_i$  分别表示 BCT 机制在  $i=1,2,3,4$  情形下的次级传输速率和能量消耗。

**情形 1** ( $H_1$  &  $\hat{H}_1$ )。授权信道处于繁忙且协作感知结果为主用户链路处于繁忙, 其发生的概率为  $\phi_{H_1}Q_{d,AND}(\tau)$ 。在这种情形下, 为避免对主系统造成干扰, 次级用户禁止传输数据, 吞吐量为  $R_1(V_E)=0$ , 传输能量消耗为  $E_1(V_E)=\tau(M+1)P_{sc}+T\alpha_c$ , 其中,  $V_E \triangleq [\tau, P_S, P_{R_k}]$ ,  $\alpha_c = P_c^S + MP_c^R$ 。

**情形 2** ( $H_1$  &  $\hat{H}_0$ )。授权信道处于繁忙且协作感知结果为主用户链路处于空闲, 其发生的概率为  $\phi_{H_1}(1-Q_{d,AND}(\tau))$ 。与文献[10,14]类似, 在这种情形下通常主用户信号对次级用户的干扰较大, 导致次级用户的接收端无法对数据进行正确解码, 故认为此时次级网络吞吐量  $R_2(V_E)=0$ , 次级传输能量消耗  $E_2(V_E)=\tau(M+1)P_{sc}+0.5(T-\tau)(P_S+P_{R_k})+T\alpha_c$ 。

**情形 3** ( $H_0$  &  $\hat{H}_1$ )。授权信道处于空闲且感知结果为主用户链路繁忙, 其发生的概率为  $\phi_{H_0}Q_{f,AND}(\tau)$ 。在该情形下, 次级系统数据传输速率为  $R_3(V_E)=0$ 。  $E_3(V_E)=\tau(M+1)P_{sc}+T\alpha_c$  为次级系统的能量消耗。

**情形 4** ( $H_0$  &  $\hat{H}_0$ )。授权信道处于空闲且感知结果为主用户链路空闲, 其发生的概率为  $\phi_{H_0}(1-Q_{f,AND}(\tau))$ 。在该情形下, 次级系统采用如图 2 所示的 BCT 机制传输数据。此时, 次级系统吞吐量可表示为  $R_4(V_E)=\frac{1}{2}(T-\tau)\mathbb{E}[\tilde{R}]$ , 其中,  $\tilde{R} = \min\{C_{TR_k}(P_S G_{TR_k}), C_{R_k D}(P_{R_k} G_{R_k D})\}$ ,  $\mathbb{E}(\bullet)$  为期望

运算,  $C_{LI}(x) \triangleq W \log\left(1 + \frac{x}{\sigma_n^2}\right)$  表示传输带宽为  $W$  的

$L \rightarrow I$  链路可达速率。该情形下的能量消耗可以为  $E_4(V_E) = \tau(M+1)P_{sc} + \frac{1}{2}(T-\tau)(P_S + P_{R_k}) + T\alpha_c$ 。

根据上述讨论的 4 种情形, 平均能量消耗可表示为  $\overline{En}(V_E) = \sum_i E_i \Pr(E = E_i)$ , 即

$$\overline{En}(V_E) = T\alpha_c + \tau(M+1)P_{sc} + 0.5(P_S + P_{R_k})(T-\tau) \cdot [1 - \phi_{H_1}Q_{d,AND}(\tau) - \phi_{H_0}Q_{f,AND}(\tau)] \quad (6)$$

在认知系统中, 一般为了保障主系统传输, 联合检测概率  $Q_{d,AND}(\tau)$  需要达到目标检测概率  $Q_d^{th}$ , 则有  $Q_{d,AND}(\tau) \geq Q_d^{th} \geq 0.9$ , 进而有  $\phi_{H_1}Q_{d,AND}(\tau) \approx \phi_{H_1}Q_d^{th}$ 。这样, 式(6)可近似为  $En(V_E) = v_1 + \frac{1}{2}v_2v_3$ , 其中,  $v_1 = \tau(M+1)P_{sc} + T\alpha_c$ ,  $v_2 = -(T-\tau)(P_S + P_{R_k})$ ,  $v_3 = \phi_{H_1}Q_d^{th} - \phi_{H_0}Q_{f,AND}(\tau) - 1$ 。同样地, 根据全概率公式, BCT 机制下的网络平均吞吐量可推导为

$$\overline{Th}(V_E) = \frac{1}{2}(T-\tau)\phi_{H_0}(1-Q_{f,AND}(\tau))\mathbb{E}[\tilde{R}] \quad (7)$$

如前所述, 次级链路信道系数  $G_{LI}$  服从均值为  $\lambda_{LI}$  的指数分布, 这使不能求解得到  $\overline{Th}(V_E)$  中  $\mathbb{E}[\tilde{R}]$  的闭合解析式<sup>[15]</sup>。然而, 观察到  $C_{LI}(x)$  是关于  $x$  的凹函数, 由文献[16]可知, 在  $C_{TR_k}(P_S G_{TR_k})$  与  $C_{R_k D}(P_{R_k} G_{R_k D})$  间取较小者的  $\tilde{R}$  仍为凹函数。为了得到  $\overline{Th}(V_E)$  的闭合公式, 与文献[10]类似, 采用 Jensen 不等式关系对  $\mathbb{E}[\tilde{R}]$  做如下近似, 即凹函数的平均值不大于平均值的凹函数, 描述为

$$\mathbb{E}[\tilde{R}] \leq \hat{R} = \min\{C_{TR_k}(P_S \lambda_{TR_k}), C_{R_k D}(P_{R_k} \lambda_{R_k D})\} \quad (8)$$

其中,  $\hat{R} = \min\{C_{TR_k}(P_S \mathbb{E}[G_{TR_k}]), C_{R_k D}(P_{R_k} \mathbb{E}[G_{R_k D}])\}$ , BCT 机制下的次级网络近似平均吞吐量表示为

$$\overline{Th}(V_E) = \frac{1}{2}(T-\tau)\phi_{H_0}(1-Q_{f,AND}(\tau))\hat{R} \quad (9)$$

需要指出, 通过分析式(7)可以得出, 一方面较大的虚警概率会浪费次级用户接入空洞的机会, 即降低了传输机会而损失吞吐量。另一方面, 采用最佳协作用户辅助次级传输, 可以通过有效地在次级源和协作用户上进行功率分配, 使在改善通信性能

的同时最大化系统能量效率。

### 3.2 能效优先的资源优化问题

本文采用的平均能量效率定义为平均吞吐量与平均能量消耗的比值，即  $\eta_{EE}^{\text{BCT}}(V_E) \triangleq \frac{Th(V_E)}{En(V_E)}$ 。在

BCT 传输机制中资源分配采用平均能量效率最大化作为优化准则，同时考虑次级传输 QoS 要求。这里引入中断概率来衡量次级传输 QoS，即

$$\begin{aligned} Pr_S^{\text{BCT}}(\tau, P_S, P_{R_k}) &= \Pr \left\{ \frac{1}{2} \phi_{H_0} (1 - Q_{f, \text{AND}}(\tau)) \left( 1 - \frac{\tau}{T} \right) \tilde{R} < R_S^{\text{req}} \right\} \\ &= \phi_{H_0} (1 - Q_{f, \text{AND}}(\tau)) Pout_S^{\text{BCT}}(\tau, P_S, P_{R_k}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中， $R_S^{\text{req}}$  表示次级传输所需满足的最低速率要求，

且  $Pout_S^{\text{BCT}}(\tau, P_S, P_{R_k}) \triangleq \Pr \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\tau}{T} \right) \tilde{R} < R_S^{\text{req}} \right\}$ 。由上

文的讨论可知，BCT 机制下的能效最大化问题是一个联合感知时间和传输功率分配的问题。由此，次级传输的平均能量效率最大化问题可刻画为如下数学优化模型。

$$OP_1 : \max_{V_E} \eta_{EE}^{\text{BCT}} = \frac{\frac{1}{2}(T - \tau)\phi_{H_0}(1 - Q_{f, \text{AND}}(\tau))\hat{R}}{v_1 + \frac{1}{2}v_2v_3} \quad (11)$$

$$\text{s.t. } Q_{d, \text{AND}}(\tau) \geq Q_d^{\text{th}} \quad (12)$$

$$0 \leq \tau \leq T, P_S \geq 0, P_{R_k} \geq 0 \quad (13)$$

$$\phi_{H_0}(1 - Q_{f, \text{AND}}(\tau))Pout_S^{\text{BCT}}(\tau, P_S, P_{R_k}) \leq \xi_S^{\text{max}} \quad (14)$$

$$P_S + P_{R_k} + P_c^S + MP_c^R + (M + 1)P_{sc} \leq P_S^{\text{max}} \quad (15)$$

上述优化问题  $OP_1$  中的约束关系式(12)表示在 BCT 机制中保证主用户  $U_{p1} - U_{p0}$  链路的联合检测概率不低于门限  $Q_d^{\text{th}}$ ，避免漏检造成干扰主用户业务。约束关系式(14)表示在最佳中继  $SR_k$  协助次级传输的中断概率应不大于预设值  $\xi_S^{\text{max}}$ ，以此保证次级传输质量。此外， $P_S^{\text{max}}$  表示次级系统传输最大功耗。

分析  $OP_1$  中目标函数式(11)，其形式很复杂，若进一步考虑约束条件，很难直接采用低复杂度的资源分配方案求解，更难以获得最优功率分配的闭合形式解。因此，直接求解关于变量  $V_E$  的非凸优化问题  $OP_1$  非常困难。但是观察式(8)，

不难看出  $\mathbb{E}[\tilde{R}]$  与  $\tilde{R}$  中具有相同最优感知时间  $\tau$ ，这是因为  $\mathbb{E}[\tilde{R}]$  和  $\tilde{R}$  中都不包含  $\tau$ 。据此分析，将  $OP_1$  原问题解耦合为优化感知时间  $\tau$  的  $OP_2$  和优化功率  $\{P_S, P_{R_k}\}$  分配的  $OP_3$  这 2 个子问题分别讨论。具体也， $OP_2$  通过在任意给定功率  $\{P'_S, P'_{R_k}\}$  下优化感知时间  $\tau$ 。此时，给定传输最优功率  $P'_S$  和  $P'_{R_k}$ ，次级传输能量效率仅由感知时间  $\tau$  决定，进而  $OP_2$  表示为如下一维最优化模型。

$$OP_2 : \max_{\tau} \eta_{\alpha EE}^{\text{BCT}}(\tau) = \frac{Th_{\alpha}(\tau)}{En_{\alpha}(\tau)} \quad (16)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \tau \leq T \quad (17)$$

$$Q_{d, \text{AND}}(\tau) \geq Q_d^{\text{th}} \quad (18)$$

$$\phi_{H_0}(1 - Q_{f, \text{AND}}(\tau))Pout_S^{\text{BCT}}(\tau, P'_S, P'_{R_k}) \leq \xi_S^{\text{max}} \quad (19)$$

其中， $Th_{\alpha}(\tau) \triangleq Th(\tau, P'_S, P'_{R_k})$  与  $En_{\alpha}(\tau) \triangleq En(\tau, P'_S, P'_{R_k})$  分别表示在给定传输功率  $\{P'_S, P'_{R_k}\}$  下的系统吞吐量和能耗。类似地，给定感知时间  $\tau'$ ，能量效率仅由次级源与协作用户的发射功率  $P'_S$  与  $P'_{R_k}$  决定，进而将  $OP_3$  描述为

$$OP_3 : \max_{P_S, P_{R_k}} \eta_{\beta EE}^{\text{BCT}}(P_S, P_{R_k}) = \frac{Th_{\beta}(P_S, P_{R_k})}{En_{\beta}(P_S, P_{R_k})} \quad (20)$$

$$\text{s.t. } P_S + P_{R_k} \leq P_S^{\text{max}} - P_c^S - MP_c^R - (M + 1)P_{sc} \quad (21)$$

$$\phi_{H_0}(1 - Q_{f, \text{AND}}(\tau'))Pout_S^{\text{BCT}}(\tau', P_S, P_{R_k}) \leq \xi_S^{\text{max}} \quad (22)$$

其中， $Th_{\beta}(P_S, P_{R_k}) \triangleq Th(\tau', P_S, P_{R_k})$  表示在给定感知时间  $\tau'$  时的系统吞吐量，而  $En_{\beta}(P_S, P_{R_k}) \triangleq En(\tau', P_S, P_{R_k})$  表示在给定感知时间  $\tau'$  时的系统能耗。下文将通过优化感知时间与次级用户功率，使 BCT 传输机制的系统平均能效最大化。

## 4 联合感知时间与功率的资源分配

### 4.1 次级传输的感知时间优化与功率分配

如前讨论，原问题  $OP_1$  解耦合为  $OP_2$  和  $OP_3$  这 2 个子问题。下文首先通过分析得到 2 个子问题的数学特性，并在此基础上提出了一种基于能效最优的联合感知时间和功率交叉迭代分配算法。以此来实现保证链路传输可靠性的同时，尽可能改善链路能量有效性。在求解  $OP_2$  之前，给出以下 2

个定理。

**定理 1**  $OP_2$  中的目标函数  $\eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau)$  是关于感知时间  $\tau$  的拟凹函数。

**证明** 文献[16]表明要证明函数  $\eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau)$  是关于感知时间  $\tau$  的拟凹函数, 需要先证明  $Th_\alpha(\tau)$  与  $En_\alpha(\tau)$  分别是  $\eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau)$  的凹函数和凸函数。先考察  $Th_\alpha(\tau)$  的一阶导数

$$\nabla_\tau Th_\alpha = \frac{1}{2} \phi_{H_0} (Q_{f,AND}(\tau) - 1 + (\tau - T) \nabla_\tau Q_{f,AND}) \hat{R} \quad (23)$$

其中,  $\nabla_\tau Q_{f,AND}$  和  $\nabla_\tau \phi_f$  分别表示为

$$\nabla_\tau Q_{f,AND} = (M + 1) \phi_f^M \nabla_\tau \phi_f \quad (24)$$

$$\nabla_\tau \phi_f = -\frac{A_1}{2} \sqrt{\frac{f_s}{2\pi\tau}} e^{-\frac{1}{2}\tau f_s A_1^2} \quad (25)$$

推导  $Th_\alpha(\tau)$  的二阶导数如下

$$\nabla_\tau^2 Th_\alpha = \phi_{H_0} (\nabla_\tau Q_{f,AND} + 2(\tau - T) \nabla_\tau^2 Q_{f,AND}) \hat{R} \quad (26)$$

其中,  $\nabla_\tau^2 Q_{f,AND}$  和  $\nabla_\tau^2 \phi_f$  分别表示为

$$\nabla_\tau^2 Q_{f,AND} = (M + 1) \phi_f^{M-1} [M(\nabla_\tau \phi_f)^2 + \phi_f \nabla_\tau^2 \phi_f] \quad (27)$$

$$\nabla_\tau^2 \phi_f = A_1 \left( \frac{1}{4\tau} + \frac{f_s A_1^2}{4} \right) \sqrt{\frac{f_s}{2\pi\tau}} e^{-\frac{1}{2}\tau f_s A_1^2} \quad (28)$$

如前所述, BCT 机制需满足  $A_1 > 0$  和  $A_2 > 0$ , 则判决门限  $V_\tau$  存在如下关系  $\sigma^2 < V_\tau < \sigma^2(1 + \gamma)$ 。分析式(25)和式(28)可得  $\nabla_\tau \phi_f < 0$  且  $\nabla_\tau^2 \phi_f > 0$ , 则有  $\nabla_\tau Q_{f,AND} < 0$  与  $\nabla_\tau^2 Q_{f,AND} > 0$ , 得到  $\nabla_\tau^2 Th_\alpha < 0$ 。这表明  $Th_\alpha(\tau)$  是关于感知时间  $\tau$  的凹函数。考察能耗  $En_\alpha(\tau) = v_1 + \frac{1}{2} v_2 v_3$ ,  $v_1$  是关于  $\tau$  的仿射函数, 为凸函数。不难分析,  $v_2$  是关于  $\tau$  单调递减的凸函数, 而  $v_3$  是关于  $\tau$  单调递增的凸函数。由文献[17]可知,  $v_2 v_3$  是关于  $\tau$  的凸函数, 故可得  $En_\alpha(\tau)$  是关于  $\tau$  的凸函数。

令  $\{\tau_1, \tau_2\} \in \mathcal{S}_D$ , 其中,  $\mathcal{S}_D$  表示  $OP_2$  中由约束条件式(17)~式(19)所组成的可行域, 并假设  $0 \leq \vartheta \leq 1$  与  $\eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau_1) < \eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau_2)$ , 由于  $Th_\alpha(\tau)$  是关于  $\tau$  的凹函数, 则根据凹函数定义有如下关系

$$\begin{aligned} Th_\alpha(\vartheta\tau_1 + (1 - \vartheta)\tau_2) &> \vartheta Th_\alpha(\tau_1) + (1 - \vartheta) Th_\alpha(\tau_2) > \\ &\vartheta Th_\alpha(\tau_1) + (1 - \vartheta) En_\alpha(\tau_2) \frac{Th_\alpha(\tau_1)}{En_\alpha(\tau_1)} \\ &= \frac{Th_\alpha(\tau_1)}{En_\alpha(\tau_1)} (\vartheta En_\alpha(\tau_1) + (1 - \vartheta) En_\alpha(\tau_2)) \end{aligned} \quad (29)$$

另外,  $En_\alpha(\tau)$  是关于  $\tau$  的凸函数, 则有

$$En_\alpha(\vartheta\tau_1 + (1 - \vartheta)\tau_2) < \vartheta En_\alpha(\tau_1) + (1 - \vartheta) En_\alpha(\tau_2) \quad (30)$$

将式(30)代入到式(29)中, 整理可得如下关系

$$\frac{Th_\alpha(\vartheta\tau_1 + (1 - \vartheta)\tau_2)}{En_\alpha(\vartheta\tau_1 + (1 - \vartheta)\tau_2)} > \frac{Th_\alpha(\tau_1)}{En_\alpha(\tau_1)} \quad (31)$$

观察式(31), 同时, 由拟凹函数的定义<sup>[17]</sup>可知,  $\eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau)$  是关于感知时间  $\tau$  的拟凹函数, 定理 1 得证。

定理 1 表明,  $OP_2$  中目标函数的拟凹性。显然, 若不考虑  $OP_2$  中约束条件,  $[0, T]$  中最优的感知时间  $\tau^{opt}$  可以通过搜索  $\nabla_\tau \eta_{\alpha EE}^{BCT} = 0$  求解。根据一元函数一阶最优条件, 如果  $\tau^{opt}$  是  $\eta_{\alpha EE}^{BCT}(\tau)$  的一个驻点, 则  $\tau^{opt}$  应该满足  $\nabla \eta_{\alpha EE}^{BCT} = 0$ 。下面, 将通过分析约束条件式(19)得到定理 2 中所描述的数学特性。

**定理 2**  $OP_2$  中约束条件式(19)等价于存在  $\tau \in [0, T]$  满足  $\Omega(\tau) = \ln \varpi_{S,1}^{BCT} + (\varpi_{S,2}^{BCT} - 1) \varpi_{S,3}^{BCT} \leq 0$ , 且  $\Omega(\tau)$  是关于  $\tau$  的凸函数,  $\Omega(\tau)$  中的  $\varpi_{S,1}^{BCT}$ 、 $\varpi_{S,2}^{BCT}$  和  $\varpi_{S,3}^{BCT}$  分别表示为

$$\varpi_{S,1}^{BCT} = \frac{1 - \xi_S^{\max}}{(1 - Q_{f,AND}(\tau)) \phi_{H_0}} \quad (32)$$

$$\varpi_{S,2}^{BCT} = 2^{\frac{2R_S^{\text{req}}}{W(T-\tau)}} \quad (33)$$

$$\varpi_{S,3}^{BCT} = \frac{\sigma_n^2 (\lambda_{TR_k} P_S + \lambda_{R_k D} P_{R_k})}{\lambda_{TR_k} \lambda_{R_k D} P_S P_{R_k}} \quad (34)$$

**证明** 由于信道系数  $G_{TR_k}$  和  $G_{R_k D}$  分别服从均值为  $\lambda_{TR_k}$  和  $\lambda_{R_k D}$  的指数分布, 则约束条件式(19)可等价于  $\Omega(\tau) = \ln \varpi_{S,1}^{BCT} + (\varpi_{S,2}^{BCT} - 1) \varpi_{S,3}^{BCT} \leq 0$ , 对  $\Omega(\tau)$  进行求导运算, 可得

$$\nabla_\tau \Omega = \frac{\nabla_\tau Q_{f,AND}}{1 - Q_{f,AND}(\tau)} + \varpi_{S,3}^{BCT} \nabla_\tau \varpi_{S,2}^{BCT} \quad (35)$$

其中,  $\nabla_\tau \varpi_{S,2}^{BCT} = \frac{2 \ln(2) TR_S^{\text{req}} \varpi_{S,2}^{BCT}}{W(T - \tau)^2}$ 。接着, 分析  $\Omega(\tau)$  的二阶导数如下

$$\nabla_{\tau}^2 \Omega = \varpi_{S,3}^{\text{BCT}} \nabla_{\tau}^2 \varpi_{S,2}^{\text{BCT}} + \frac{\nabla_{\tau}^2 Q_{f,\text{AND}}}{1 - Q_{f,\text{AND}}(\tau)} + \left( \frac{\nabla_{\tau} Q_{f,\text{AND}}}{1 - Q_{f,\text{AND}}(\tau)} \right)^2 \quad (36)$$

其中,  $\nabla_{\tau}^2 \varpi_{S,2}^{\text{BCT}}$  可表示为

$$\nabla_{\tau}^2 \varpi_{S,2}^{\text{BCT}} = (W(T - \tau) + \ln(2)TR_s^{\text{req}}) \frac{2\nabla_{\tau} \varpi_{S,2}^{\text{BCT}}}{W(T - \tau)} \quad (37)$$

分析式(37), 不难得出  $\nabla_{\tau}^2 \varpi_{S,2}^{\text{BCT}} > 0$ , 有  $\Omega(\tau)$  的二阶导数  $\nabla_{\tau}^2 \Omega > 0$ , 这表明  $\Omega(\tau)$  是关于  $\tau$  的凸函数, 定理 2 得证。

下文将利用上述对  $OP_2$  分析得到数学特性定理 1 和定理 2, 求解  $OP_2$  得到最优的感知时间  $\tau^*$ , 具体说明如定理 3 所述。

**定理 3**  $OP_2$  中的最优感知时间  $\tau^*$  表示为

$$\tau^* = \max(\max(\tau^{\text{det}}, \underline{\tau}), \min(\tau^{\text{opt}}, \bar{\tau})) \quad (38)$$

其中,  $\tau^{\text{det}} = (f_s A_3 A_2^2)^{-1} \left( Q^{-1} \left( M+1 \sqrt{Q_d^{\text{th}}} \right) \right)^2$ ,  $\tau^{\text{opt}}$ 、 $\underline{\tau}$  和  $\bar{\tau}$  分别表示如下

$$\begin{cases} \tau^{\text{opt}} = A^{-1}(0), \tau \in [0, T] \\ \tau^{\text{pout}} = B^{-1}(0), \tau \in [0, T] \\ \underline{\tau} = \Omega^{-1}(0), \tau \in [0, \tau^{\text{pout}}] \\ \bar{\tau} = \Omega^{-1}(0), \tau \in [\tau^{\text{pout}}, T] \end{cases} \quad (39)$$

其中,  $A(\tau) = \nabla_{\tau} \eta_{\alpha\text{EE}}^{\text{BCT}}$ ,  $B(\tau) = \nabla_{\tau} \Omega$ , 且  $F^{-1}(\bullet)$  表示函数  $F(\bullet)$  的逆函数。

**证明** 定理 2 表明  $\nabla_{\tau} \Omega$  是关于  $\tau$  的单调递减函数。由式(2)和式(4)可分别得出用户处的目标虚警概率为

$$\nabla_{\tau} \phi_d = \frac{A_2}{2} \sqrt{\frac{A_3 f_s}{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{1}{2}\tau f_s A_3 A_2^2\right) \quad (40)$$

$$\nabla_{\tau} Q_{d,\text{AND}} = (M+1)\phi_d^M \nabla_{\tau} \phi_d \quad (41)$$

当判决门限  $V_T$  满足  $\sigma^2 < V_T < \sigma^2(1+\gamma)$  时, 由式(40)和式(41)得  $\nabla_{\tau} \phi_d > 0$ , 则  $\nabla_{\tau} Q_{d,\text{AND}} > 0$ , 这表明  $Q_{d,\text{AND}}(\tau)$  是关于  $\tau$  的增函数, 则  $OP_2$  中约束条件  $Q_{d,\text{AND}}(\tau) \geq Q_d^{\text{th}}$  可进一步等价于  $\tau > \tau^{\text{det}}$ 。

由定理 2 中结论  $\nabla_{\tau}^2 \Omega > 0$ , 可得  $B(\tau)$  是关于  $\tau$  的单调递增函数。另外, 当  $\tau \rightarrow 0^+$  时, 有  $B(\tau) \rightarrow -\infty$ , 且当  $\tau \rightarrow T^-$  时, 有  $B(\tau) \rightarrow +\infty$ , 这表

明存在唯一的  $\tau^{\text{pout}}$  满足关系

$$\begin{cases} B(\tau) < 0, \tau \in [0, \tau^{\text{pout}}] \\ B(\tau) = 0, \tau = \tau^{\text{pout}} \\ B(\tau) > 0, \tau \in [\tau^{\text{pout}}, T] \end{cases} \quad (42)$$

即  $\Omega(\tau)$  在  $[0, \tau^{\text{pout}}]$  中关于  $\tau$  单调递减, 而在  $[\tau^{\text{pout}}, T]$  中关于  $\tau$  单调递增。因此, 约束条件式(19)在  $[0, T]$  至少存在一个可行的感知时间  $\tau$  的充要条件是  $\Omega(\tau^{\text{pout}}) \leq 0$ 。进一步地, 对于  $\Omega(\tau^{\text{pout}}) \leq 0$ , 分如下 2 种情况进行讨论。由于  $\Omega(\tau)$  在  $[0, \tau^{\text{pout}}]$  关于  $\tau$  单调递减, 并且  $\lim_{\tau \rightarrow 0^+} \Omega(\tau) > 0$ , 表明存在唯一的  $\underline{\tau}$  使  $\Omega(\underline{\tau}) = 0$ 。同理, 在  $[\tau^{\text{pout}}, T]$  上  $\Omega(\tau)$  关于  $\tau$  单调递减, 且  $\lim_{\tau \rightarrow T^-} \Omega(\tau) = +\infty$ , 表明存在唯一的  $\bar{\tau}$  使  $\Omega(\bar{\tau}) = 0$ 。相反, 若  $\Omega(\tau^{\text{pout}}) > 0$ , 则不存在任何感知时间  $\tau \in [0, T]$  满足  $\Omega(\tau) \leq 0$ 。

由上述讨论, 可得最优感知时间  $\tau^*$  要么在边界两端处取得, 要么在驻点  $\tau^{\text{opt}} = A^{-1}(0)$  处取得。这取决于约束条件式(19)在区间边界点处一阶导数的零点, 即  $\tau^{\text{pout}}$ , 则  $\tau^*$  满足式(38), 故定理 3 得证。

同样地,  $OP_3$  中式(16)的目标函数  $\eta_{\beta\text{EE}}^{\text{BCT}}(P_S, P_{R_k})$  是关于  $\{P_S, P_{R_k}\}$  联合拟凹函数, 其证明方法与定理 1 证明类似, 这里不再赘述。在求解问题  $OP_3$  之前, 给出定理 4。

**定理 4**  $OP_3$  中能量效率达到最大的功率分配应满足  $\lambda_{TR_k} P_S = \lambda_{R_k D} P_{R_k}$  成立。

**证明** 用反证法证明。由式(20)可知,  $ST-SD$  链路能效不仅与  $ST-SR_k$  链路有关, 还受限于  $SR_k-SD$  链路能效。当次级系统能量效率达到最优时, 假定存在  $\tilde{P}_S$ ,  $\tilde{P}_{R_k}$  使  $C_{TR_k}(\tilde{P}_S \mathbb{E}[G_{TR_k}]) \neq C_{R_k D}(\tilde{P}_{R_k} \mathbb{E}[G_{R_k D}])$ 。次级可达速率  $Th_{\beta}(P_S, P_{R_k}) = \frac{\hat{R}}{2}$  表明其速率取决于速率最小的传输链路。这意味着, 可通过降低  $C_{TR_k}(\tilde{P}_S \mathbb{E}[G_{TR_k}])$  与  $C_{R_k D}(\tilde{P}_{R_k} \mathbb{E}[G_{R_k D}])$  中速率较大者来满足  $C_{TR_k}(\tilde{P}_S \mathbb{E}[G_{TR_k}]) = C_{R_k D}(\tilde{P}_{R_k} \mathbb{E}[G_{R_k D}])$ 。由能效函数  $\eta_{\text{EE}}^{\text{BCT}}(V_E)$  定义可知, 在速率  $Th_{\beta}(P_S, P_{R_k})$  保持不变的前提下, 降低了较大速率链路发射功率, 提升能效。这显然与原假设矛盾, 故  $\lambda_{TR_k} P_S = \lambda_{R_k D} P_{R_k}$  成立。

定理 4 表明  $OP_3$  中次级传输的能量效率达到最大时的功率分配必然满足如下关系

$$P_{R_k}^* = \frac{P_S^* \lambda_{TR_k}}{\lambda_{R_k D}} \quad (43)$$

下文将利用上述对  $OP_3$  分析得到数学特性定理 4, 以及目标函数式(20)的拟凹特性, 得到  $OP_3$  的最优功率分配  $\{P_S^*, P_{R_k}^*\}$ , 具体说明如定理 5 所述。

**定理 5**  $OP_3$  中的最优功率分配  $\{P_S^*, P_{R_k}^*\}$  为

$$\begin{cases} P_S^* = \max\left(P_S, \min\left(P_S^{\text{opt}}, \overline{P_S}\right)\right) \\ P_{R_k}^* = P_S^* \lambda_{TR_k} \lambda_{R_k D}^{-1} \end{cases} \quad (44)$$

其中,  $P_S^{\text{opt}}$ 、 $\underline{P_S}$  和  $\overline{P_S}$  分别表示如下

$$\begin{cases} \underline{P_S} = \left[ \frac{2(\varpi_{S,2}^{\text{BCT}} - 1)\sigma_n^2}{\lambda_{TR_k} \ln\left(\frac{1}{\varpi_{S,1}^{\text{BCT}}}\right)} \right]^+ \\ \overline{P_S} = \frac{P_S^{\text{max}} - (M+1)P_{se} - \alpha_c}{1 + \lambda_{TR_k} \lambda_{R_k D}^{-1}} \\ P_S^{\text{opt}} = K^{-1}(0), \quad P_S \in [\underline{P_S}, \overline{P_S}] \end{cases} \quad (45)$$

其中,  $[x]^+ \triangleq \max(x, 0)$ ,  $K(P_S) = \nabla_{P_S} \eta_{\beta\text{EE}}^{\text{BCT}}$ 。

**证明** 由  $OP_3$  中约束条件式(21)可得  $P_S$  的上界

$$P_S \leq \overline{P_S} = \frac{P_S^{\text{max}} - P_c^S - MP_c^R - (M+1)P_{se}}{1 + \lambda_{TR_k} \lambda_{R_k D}^{-1}} \quad (46)$$

由  $OP_3$  中约束条件式(22)可得  $P_S$  的下界

$$P_S \geq \underline{P_S} = \frac{2(\varpi_{S,2}^{\text{BCT}} - 1)\sigma_n^2}{\lambda_{TR_k} \ln\left(\frac{1}{\varpi_{S,1}^{\text{BCT}}}\right)} \quad (47)$$

由上述讨论, 并结合定理 4 中的最优平衡关系式(43), 可得次级源用户的最优发射功率  $P_S^*$  在边界两端  $\underline{P_S}$  或  $\overline{P_S}$  处取得, 或在驻点  $P_S^{\text{opt}} = K^{-1}(0)$  处取得, 这取决于约束条件式(21)和式(22), 则  $OP_3$  中的最优功率分配  $\{P_S^*, P_{R_k}^*\}$  满足式(44), 故定理 5 得证。

将上述最佳中继协作传输的 BCT 机制为基础, 以次级网络平均能量效率最大化为目标, 提出基于协作感知时间  $\tau$ 、次级源用户  $ST$  与中继用户  $SR_k$  处功率  $\{P_S, P_{R_k}\}$  的联合资源优化算法。

## 4.2 联合感知时间与功率的资源优化

上文详细分析了 BCT 机制高效传输的数学特性, 本文将基于上述理论分析, 提出一种具有较低计算复杂度的联合感知时间和功率资源高效分配方案, 即高效联合资源分配(EJRC, energy-efficient joint resource configuration)算法, 其具体步骤描述如算法 1 所示。总体而言, EJRC 算法包括 2 个主要阶段: 1) 在  $[\underline{\tau}, T]$  的连续感知时间内, 通过取得感知时间的线性离散值  $\underline{\tau} + \frac{(2j-1)(T-\underline{\tau})}{2^m}$  来搜索某个可行的迭代初值, 若能找到一组可行的解  $\{\tau^{[0]}, P_S^{[0]}, P_{R_k}^{[0]}\}$  则进入第 2) 阶段, 否则退出; 2) 根据第 1) 阶段通过线性搜索方法得到的迭代初值, 再采用交替迭代方法找到最优的  $\{\tau^*, P_S^*, P_{R_k}^*\}$ 。

**算法 1** 高效联合资源分配 (EJRC) 算法

**初始化** 容忍度  $\xi_i > 0, i \in \{\tau, p, ee\}$ ,  $ee^{[0]} = 0$ ,

$j = m = 1$ ,  $M = \left\lfloor \frac{T - \tau}{\xi_\tau} \right\rfloor$ , 最大次数  $MaxIter$  和索引

号  $n = 0$ ;

**Stage1**

计算  $\underline{\tau} = (f_s A_s A_r^2)^{-1} \left( Q^{-1} \left( M+1 \sqrt{Q_d^{\text{th}}} \right) \right)^2$ ;

While  $flag == 1 \ \&\& \ 2^m \leq M$

Repeat

计算  $\underline{P_S} = \left[ \frac{2(\varpi_{S,2}^{\text{BCT}} - 1)\sigma_n^2}{\lambda_{TR_k} \ln\left(\frac{1}{\varpi_{S,1}^{\text{BCT}}}\right)} \right]^+$ ;

计算  $\overline{P_S} = \frac{P_S^{\text{max}} - P_c^S - MP_c^R}{1 + \lambda_{TR_k} \lambda_{R_k D}^{-1}}$ ;

If  $\max\{P_S, 0\} < \overline{P_S}$

设置  $flag = 0$ ; Break;

End if

更新  $j = j + 1$ ;

Until  $\underline{\tau} + \frac{(2j-1)(T-\underline{\tau})}{2^m} < T$

设置  $m = m + 1, j = 1$ ;

End while

If  $flag == 1$  无可行解返回, End if

设置  $\tau = \underline{\tau} + \frac{(2j-1)(T-\underline{\tau})}{2^m}$ ;

**Stage2**

Repeat

$$\text{计算 } \underline{P}_S = \left[ \frac{2(\sigma_{S,2}^{\text{BCT}} - 1)\sigma_n^2}{\lambda_{TR_k} \ln \frac{1}{\sigma_{S,1}^{\text{BCT}}}} \right]^+;$$

$$\text{计算 } \overline{P}_S = \frac{P_S^{\text{max}} - P_c^S - MP_c^R}{1 + \lambda_{TR_k} \lambda_{R_k D}^{-1}};$$

If  $\max\{P_S, 0\} < \overline{P}_S$

$P_S \in [0, \overline{P}_S]$  中搜索精度为  $\xi_p$  的  $P_S^{\text{opt}} = K^{-1}(0)$ ;

得到  $\tau^{[n]}$  下的最优功率  $P_S^{[n]} = \max(\underline{P}_S, P_S^{\text{opt}})$ ;

利用关系  $P_{R_k}^{[n]} = \frac{P_S^{[n]} \lambda_{TR_k}}{\lambda_{R_k D}}$  计算得到  $P_{R_k}^{[n]}$ ;

If  $\Omega(\tau^{[n]}) < 0 \ \&\& \ \tau^{[n]} \geq \tau^{\text{det}}$

$$\text{计算 } \tau^{\text{det}} = (f_s A_3 A_2^2)^{-1} \left( Q^{-1} \left( M \sqrt{Q_d^{\text{th}}} \right) \right)^2;$$

$\tau \in [0, T]$  中搜索精度为  $\xi_\tau$  的  $\tau^{\text{opt}} = A^{-1}(0)$  与  $\tau^{\text{pout}} = B^{-1}(0)$ ;

$\tau \in [0, \tau^{\text{pout}}]$  中搜索精度为  $\xi_\tau$  的  $\underline{\tau} = \Omega^{-1}(0)$ ;

$\tau \in [\tau^{\text{pout}}, T]$  中搜索精度为  $\xi_\tau$  的  $\overline{\tau} = \Omega^{-1}(0)$ ;

$$\text{计算 } \tau^{[n]} = \max(\max(\tau^{\text{det}}, \underline{\tau}), \min(\tau^{\text{opt}}, \overline{\tau}));$$

$$\text{计算 } ee(n) = \eta_{\text{EE}}^{\text{BCT}}(\tau^{[n]}, P_S^{[n]}, P_{R_k}^{[n]});$$

End if

End if

更新  $n = n + 1$ ;

Until  $|ee^{[n+1]} - ee^{[n]}| < \xi_{ee} \ \parallel \ n > \text{MaxIter}$ ;

返回  $OP_1$  最优的  $\tau^*, P_S^*, P_{R_k}^*$ ;

具体来说，在第 1) 阶段中，将感知时间  $\tau$  的连续可行区间  $[\underline{\tau}, T]$  离散化为  $M = \left\lfloor \frac{T - \underline{\tau}}{\xi_\tau} \right\rfloor$  个搜索点，

即  $\tau(1), \tau(2), \dots, \tau(M)$ ，并按照二分搜索方式进行，即第  $j$  次搜索值为  $\tau(j) = \underline{\tau} + \frac{(2j-1)(T - \underline{\tau})}{2^m}$ 。为描述清楚，将在第 1) 阶段线性搜索获取到的初值  $\{\tau^{[0]}, P_S^{[0]}, P_{R_k}^{[0]}\}$  赋予交替迭代变量  $\{\tau', P'_S, P'_{R_k}\}$ 。迭代过程中，先固定  $\tau'$  下，利用定理 5 得到使次级能效  $\eta_{\text{BEE}}^{\text{BCT}}$  最大化的  $\{P'_S, P'_{R_k}\}$ ，即  $\tau' \mapsto \{P'_S, P'_{R_k}\}$ 。固

定  $\{P'_S, P'_{R_k}\}$ ，利用定理 3 得到使次级能效  $\eta_{\text{BEE}}^{\text{BCT}}$

最大化的  $\tau'$ ，即  $\{P'_S, P'_{R_k}\} \xrightarrow{(OP_2)} \tau'$ 。 $\tau'$  和  $\{P'_S, P'_{R_k}\}$  进行交替迭代，直至能效增益  $\Delta ee$  小于预设门限  $\xi_{ee}$  或不满足  $OP_2$  和  $OP_3$  的约束条件时停止。此时的  $\tau^{[n]}, P_S^{[n]}, P_{R_k}^{[n]}$  即为 BCT 机制下最优的感知时间和传输功率  $\{\tau^*, P_S^*, P_{R_k}^*\}$ 。需要指出的是，当设置协作用户数量  $M = 0$  与中继用户能耗  $P_{R_k} = 0$  时， $OP_1$  中的限制条件式(15)简化为  $P_S + P_c^S + P_{sc} \leq P_S^{\text{max}}$ 。这样，BCT 机制下能效问题退化为 SCT 机制的能效问题。因此，利用 EJRC 算法可容易求解 SCT 机制下的能效资源分配问题，这里不再赘述。

**5 仿真结果及分析**

本节通过 Matlab 数值仿真验证 BCT 机制的高能效传输性能。根据文献[9,10,14]设置的仿真参数，假设次级传输帧周期  $T = 0.1$  s，传输带宽  $W = 0.1$  kHz，次级系统最大发射功率  $P_S^{\text{max}} = 1$  W，次级用户  $J$  电路功耗  $P_c^S = P_c^R = 0.05$  W，感知功耗  $P_{sc} = 0.02$  W。进一步假设，次级传输最小速率要求为  $R_S^{\text{req}} = 0.5$  bit/s，次级源用户  $ST$  与目的用户  $SD$  链路距离  $d_{TD} = 1000$  m，且次级中继用户  $SR$  随机分布在  $[400, 600]$  中，信道损耗指数  $\alpha = 3.5$ 。此外，假设采样频率为  $f_s = 10^6$  Hz，认知用户  $J$  平均接收信噪比  $\gamma = -15$  dB，AWGN 噪声功率  $\sigma_n^2 = -64$  dBm。在如下的仿真中，若图中没有特别注明，仿真参数默认为上述值。

图 3 和图 4 分别给出了次级传输速率  $R_S^{\text{req}}$  对次级传输能效和功耗的影响。图 3 和图 4 中的横坐标为次级传输速率  $R_S^{\text{req}}$  要求，变化范围均为  $(0 \sim 8)$  bit/s，而纵坐标分别表示次级系统的能效与功耗，图 3 可以看出，SCT ( $M = 0$ ) 与 BCT ( $M \geq 1$ ) 这 2 种机制的次级能效均会随  $R_S^{\text{req}}$  的增加呈现先增大然后缓慢变小并最终迅速递减到 0 的变化。这是因为当  $R_S^{\text{req}}$  较小时，次级传输需提供的功率增加量可显著改善传输速率，此时传输速率的增加成为影响次级能效的主要因素。然后，随着  $R_S^{\text{req}}$  不断增大，次级能效增加成为主要影响次级能效的原因。最后，由于  $R_S^{\text{req}}$  超过了次级系统的最大吞吐量而导致传输中断。从图 4 也可看出，次级传输能耗随着  $R_S^{\text{req}}$  的增加而逐渐增大。这是因为，香农公式揭示了传输更

高的速率需提供更大的传输功率。值得注意的是，图 4 中 BCT 机制下的传输功率变化趋势比 SCT 机制下的缓慢得多。这是因为，在满足次级系统服务质量的前提下，BCT 机制可通过最佳中继用户  $SR_{k^*}$  来弥补  $R_S^{req}$  的变大，从而有效克服了传输功耗的增加。对比分析图 3 与图 4，在  $R_S^{req}$  较低时，SCT 机制只需要较低的传输功耗即可满足传输服务质量要求，而 BCT 机制引入了中继协助用户  $SR$  参与协作感知和传输，造成了更大的能耗，但同时增加了次级传输机会，同时提高了系统吞吐量。除此之外，图 3 的仿真结果还表明，当  $R_S^{req}$  较大时，相比于 SCT 机制，BCT 机制不仅可以显著改善次级传输的能量效率，还可大幅提升系统的频谱效率。

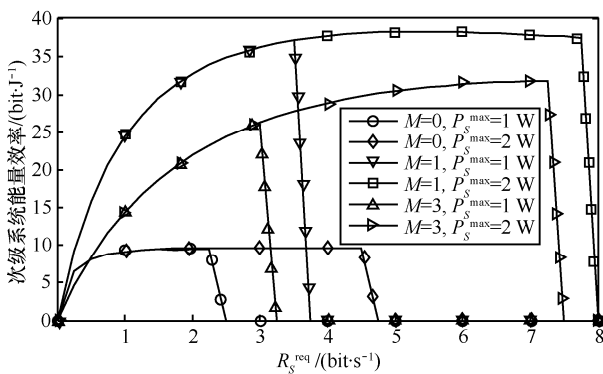


图 3 不同次级最小速率限制下的次级能效

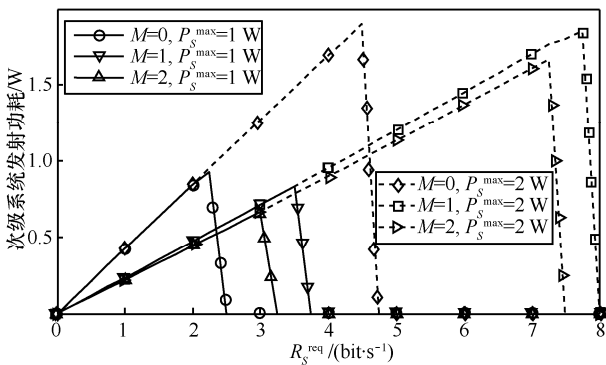


图 4 不同次级传输速率需求下的次级传输功耗

图 5 给出了次级速率  $R_S^{req}$  需求对次级传输中断概率的影响。从图 5 中可观察到 2 种机制下的次级传输中断概率都会随  $R_S^{req}$  限制条件的增加而变大，但 BCT 机制在给定  $R_S^{req}$  下的中断概率都远小于 SCT 机制情况，且变化趋势平缓得多。这表明 BCT 可以有效地降低次级传输的中断概率，提升传输的可靠性。其原因是 BCT 传输机制中采用了最佳中

继用户  $SR_{k^*}$  协助源用户  $ST$  进行数据传输，缩短了传输距离，使路径损耗得到有效克服，也提升系统能量效率的。此外，正如所期望的那样，图 5 表明 BCT 传输机制的中断概率会随中继数量  $M$  的增加而降低。这是因为  $ST$  可在更大的备选中继用户  $SR$  范围内选择最佳的协作用户来协助其传输。

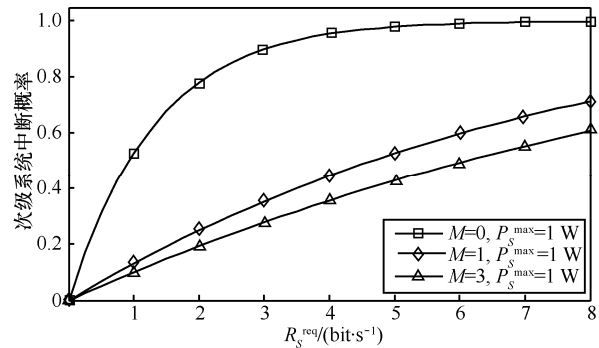


图 5 不同次级最小速率限制下的次级中断概率

图 6 表示在不同次级最大次级传输功耗  $P_S^{max}$  限制下的次级传输能效关系。由图 6 可以看出，当  $P_S^{max}$  较小时，2 种机制的能量效率都为 0，但能量效率会随着  $P_S^{max}$  的增大而变大并最后趋于稳定值。这是因为较小的  $P_S^{max}$  不能保证预设的次级传输性能而导致能量效率为 0，而随着  $P_S^{max}$  增长可有效改善次级传输性能，并结合联合资源分配 EJRC 算法而使系统能量效率最大化。从图 6 还可观察到，当次级速率需求  $R_S^{req}$  较小时，与 SCT 传输机制相比，BCT 机制需要的  $P_S^{max}$  更大；而当次级速率需求  $R_S^{req}$  较大时，相比 SCT 机制，BCT 传输机制需要的  $P_S^{max}$  更小。其原因体现在如下 2 个方面：1) BCT 机制中最佳中继用户  $SR_{k^*}$  会引入额外的功耗来协助次级传输，当  $R_S^{req}$  较小时，造成了更多的次级传输功耗；2) 在次级速率需求  $R_S^{req}$  较大时，BCT 机制采用最佳中继用

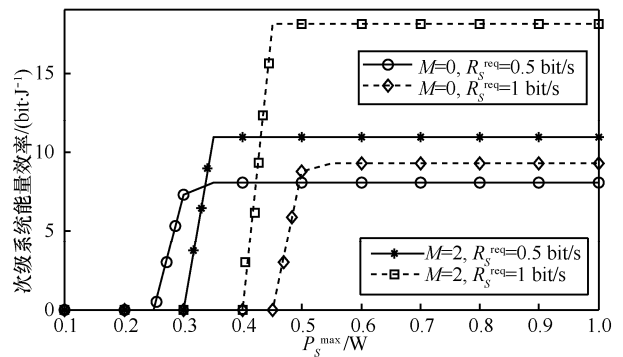


图 6 不同次级最大次级传输功耗的次级能效

户  $SR_{k^*}$  的协助  $ST$  进行次级传输，有效改善了次级传输吞吐量，提高了系统能量效率。

图 7 给出了不同次级用户感知能耗  $P_{sc}$  下次级传输能效的仿真结果。正如所期望的那样，BCT 和 SCT 这 2 种机制下的次级能量效率均随着感知功耗  $P_{sc}$  的增加而降低。这是因为较大的频谱感知能耗会导致更大的能耗总量，从而减小了传输的能量效率。从图 7 还可以看到，更高的目标检测概率  $Q_d^{th}$  会导致能量效率略有降低。

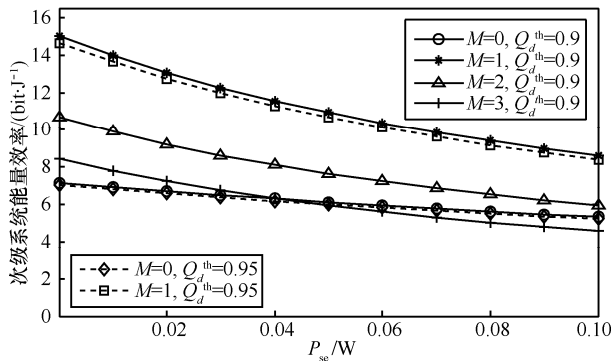


图 7 不同次级用户感知能耗下的次级能效

图 8 给出了在不同的平均接收信噪比  $\gamma$  下的次级传输能效关系。从图 8 可以看出能量效率随着  $\gamma$  的增加而变大，最后保持收敛。这表明较好的次级接收信噪比有利于次级整体改善频谱效率和能量效率。这是因为感知信道质量变好，即  $\gamma$  增大，可使协作频谱感知结果更准确，提高了次级传输的机会，进而使能量效率得到提升。当  $\gamma$  足够大时，如  $\gamma = -15$  dB，协作频谱感知结果几乎是完美的。此时，次级传输能量效率仅由授权信道的空闲概率所决定，故其随  $\gamma$  变大而增高且最终保持收敛。从图 8 中还可看到，当  $\gamma$  较小时，为了保护主系统传输，次级系统将被禁止传输数据，故此时的能量效率为 0。

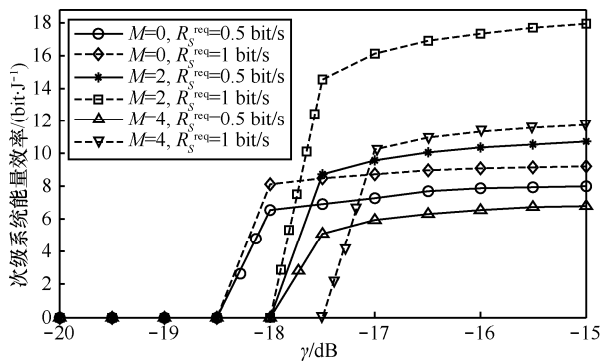


图 8 不同平均接收信噪比下的次级能效

除此之外，与 SCT 机制相比，BCT 机制在次级速率需求  $R_s^{req}$  较大的情况下，仍然能够具有较高的能量效率，这恰恰印证了 BCT 传输机制的优越性。

## 6 结束语

本文针对碰撞冲突下的认知中继网络的高能效传输问题，提出了一种基于能效优先的最佳中继协作传输机制，称为 BCT 通信机制。该机制通过在感知阶段中继用户参与协作感知来提高传输机会，并在传输阶段通过最佳协作用户辅助次级传输来改善通信质量。在此基础上，建模了基于联合感知时间与发射功率资源的网络平均能量效率最大化问题，并提出了一种高效迭代求解算法求解。理论分析和仿真结果表明，与 SCT 传输方案相比，所提的 BCT 机制结合联合分配算法不仅可大幅降低次级传输中断概率，还可提高传输能量效率。并且，在系统服务质量要求较高的传输情形下，能效性能提升更为显著。

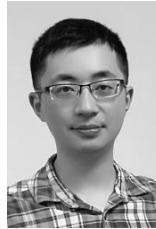
## 参考文献:

- [1] ANDREWS J, BUZZI S, WAN C, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas on Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [2] HUANG X Q, HAN T, ANSARI N. On green energy powered cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 827-842.
- [3] LIANG Y C, CHEN K C, LI Y, et al. Advances in cognitive radio networking and communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2):273-275.
- [4] RONG B, EPHREMIDES A. Cooperative access in wireless networks: stable throughput and delay[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(9): 5890-5907.
- [5] FENG L, KUANG Y J, FU X C, et al. Energy-efficient network cooperation joint resource configuration in multi-RAT heterogeneous cognitive radio networks[J]. Electronics Letters, 2016, 52(16):1414-1416.
- [6] XIONG C, LU L, LI G Y. Energy-efficient spectrum access in cognitive radios[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(3): 550-562.
- [7] 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.
- [8] SHI Z, TEH K C, LI K H. Energy-efficient joint design of sensing and transmission durations for protection of primary user in cognitive radio systems[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(3):565-568.
- [9] WANG L, SHENG M, WANG X, et al. Mean energy efficiency maximization in cognitive radio channels with PU outage constraint[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 287-290.
- [10] ZHANG L, XIAO M, WU G, et al. Energy-efficient cognitive transmission with imperfect spectrum sensing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5):1320-1335.
- [11] XU X, BAO J, CAO H, et al. Energy efficiency based optimal relay selection scheme with a ber constraint in cooperative cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 191-203.

- [12] MOUALEU J M, NGATCHED T M N, HAMOUDA W, et al. Energy-efficient cooperative spectrum sensing and transmission in multi-channel cognitive radio networks[C]//2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2014:4945-4950.
- [13] LIANG Y C, ZENG Y, PEH E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4):1326-1337.
- [14] WANG L, XUE H, JIANG G, et al. Energy efficiency analysis for cognitive radio network with data collision[C]//Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). 2014: 1-6.
- [15] ZWILLINGER D. Table of integrals, series and products[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2014.
- [16] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge University Press, 2004.
- [17] WU J, WANG G, ZHENG Y R. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in type-I ARQ systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2):356-366.



**邝育军 (1971-)**，男，四川广汉人，电子科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为认知无线电、MIMO 无线通信、网络资源分配与优化、现代通信中的智能信号与信息处理、网络理论及其应用等。



**吴斌伟 (1991-)**，男，江苏无锡人，电子科技大学博士生，主要研究方向为协作通信、网络性能分析、网络资源分配与优化等。

**作者简介:**



**冯立 (1981-)**，男，四川内江人，电子科技大学博士生，主要研究方向为认知无线电技术、协作通信、网络资源分配与优化、绿色通信等。



**付新川 (1987-)**，男，四川成都人，电子科技大学博士生，主要研究方向为网络资源分配与优化、机器学习等。