

## 基于 OFDM 的协同认知网络跨层资源调度

刘忠军<sup>\*①</sup> 徐友云<sup>①②</sup> 张冬梅<sup>①</sup> 宫兵<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

<sup>②</sup>(上海交通大学电子工程系 上海 200240)

**摘要:** 协同通信与认知无线电是未来移动通信的重要技术。针对基于 OFDM 的无线协同认知网络中的资源分配问题, 该文提出了一种有效的跨层资源调度方案。该调度方案在考虑对主用户所受干扰功率进行控制的前提下, 以最大化认知用户超帧中总的传输速率为目标, 在调度帧中对各传输帧两阶段的子载波进行最佳配对, 并为配对子载波分配最优的发送功率。通过分步求解的方法, 该调度方案形成的优化问题得到有效解决。仿真结果表明该资源调度方案使得认知用户传输速率有显著提升, 方案的可行性与有效性得到了验证。

**关键词:** 协同通信; 认知无线电; OFDM; 资源分配; 跨层调度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)07-1556-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01239

## Cross-layer Resource Scheduling in OFDM-based Cooperative Cognitive Radio Networks

Liu Zhong-jun<sup>①</sup> Xu You-yun<sup>①②</sup> Zhang Dong-mei<sup>①</sup> Gong Bing<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

<sup>②</sup>(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Cooperative communication and cognitive radio are the key candidates for the future mobile communication technologies. Focusing on the resource allocation issue in OFDM-based cooperative cognitive radio networks, an efficient cross-layer scheduling scheme is proposed. In the scheme, while taking strict interference control to protect the primary user, the most appropriate subcarrier pairs for the two phases transmission in each frame as well as optimal power is allocated to obtain a maximal rate during a superframe's transmission. The optimization issue for scheduling scheme is solved effectively with a decomposition method. Simulation results indicate that the proposed cross-layer scheduling scheme brings a notable increase in the transmission rate, which confirms the feasibility and validity of the proposed scheduling scheme.

**Key words:** Cooperative communication; Cognitive radio; OFDM; Resource allocation; Cross-layer scheduling

### 1 引言

随着现代无线通信技术的发展, 频谱资源变的越来越紧张, 如何高效地利用有限的频谱成为当前研究的热点。认知无线电技术允许网络中的认知用户通过检测周围环境动态地接入授权主用户的频谱, 从而实现频谱的高效利用, 解决频谱稀缺问题, 已成为未来移动通信研究的关键技术<sup>[1,2]</sup>。然而, 在认知无线网络中, 为了保护主用户的通信, 认知用户的发送功率受到了严格地限制, 同时由于传输过程中固有的衰落和干扰影响, 导致认知用户的传输

速率表现并不理想。这样虽然实现了频谱的共享, 频谱的有效利用率并没有得到提高。在认知用户的传输中引入协同中继技术可以有效地解决这个问题。通过协同中继站的中继转发, 克服了长距离通信所遇到的深衰落影响, 提高认知用户的传输速率。目前已有大量的专家学者侧重于这方面的研究<sup>[3,4]</sup>。

正交频分复用(OFDM)技术由于可以灵活地为认知用户动态地分配信道, 并且减少认知用户与主用户间的互干扰<sup>[5]</sup>, 已成为认知无线电技术实现的热门方案。在现有的研究中, 文献[6]在认知 OFDM 系统中考虑主用户所受干扰功率受限的约束下, 将资源分配问题建模成 0-1 knapsack 问题, 并且给出了一种子载波比特分配方案。文献[7]在多用户的 OFDM 认知网络中, 综合考虑实时用户业务与非实

2010-11-15 收到, 2011-02-14 改回

国家 973 计划项目(2009CB3020402)和国家 863 计划项目(2009AA01Z249)资助课题

\*通信作者: 刘忠军 tougaoliu@163.com

时用户业务的不同通信要求，为各个认知用户合理分配子载波与发送功率，以实现网络传输速率的最大化。以上研究都是基于 OFDM 的认知系统的研究，没有考虑引入协同中继的情况。文献[8]研究采用双路放大-转发协议的协同 OFDM 无线网络的跨层调度问题。利用优化思想中的对偶理论对调度问题进行求解，求得各帧上不同子载波的发送功率和每个子载波上的最佳比特分配，但是在文献[8]的研究中，认为中继站可以在同一子载波上同时接收来自不同终端的信号，目前这是很难做到的。在本文的研究中，将文献[8]的通信机制引入认知用户的传输。认知用户采用时分的放大-转发协同协议，每个帧的传输分两阶段，第 1 阶段由用户传输至中继站处，第 2 阶段中继站将接收信号处理后转发至目标用户。本文从网络优化的角度出发，在每一超帧上的调度帧中进行资源调度，调度内容包括功率分配和子载波配对，目的是实现超帧总传输速率的最大化。对主用户接收的干扰信号进行控制之后，该调度问题被建模成优化问题，通过分步求解并且采用凸优化知识确定最优子载波的配对形式和相应子载波对上的发送功率。在此基础上，本文给出了详细的调度方法。

## 2 场景描述

考虑一个认知无线网络如图 1 所示。在该网络中，用户按照对通信频带占有的优先级不同分为主用户和认知用户两类。主用户为网络中通信频带的授权用户，可以直接使用网络中的无线频谱进行通信；认知用户则必须通过感知、检测共享主用户频谱进行通信。频谱的共享主要存在两种假设：(1) 认知用户使用主用户临时没有占用的频段通信；(2) 认知用户在进行干扰控制确保不影响主用户通信的前提下使用主用户正在占用的频段<sup>[1]</sup>。假设该无线网络为宽带 OFDM 系统，系统中总的可用带宽为  $W$ ，划分成  $K^a$  个子载波，并且每个子载波带宽  $W/K^a$  远远小于无线信道的相关带宽，因此每个子载波上的信道响应都是平坦的。在本文中，认知用户可以检测到  $K \leq K^a$  个子载波，并且为了克服无线传播过程中阴影衰落和干扰噪声等不利因素，认知用户的子载波必须通过固定协同中继站进行中继转发。此外，为了降低资源调度的信令开销，认知用户的数据帧采用 IEEE 802.16m 的超帧(superframe)结构<sup>[9]</sup>。如图 2 所示，每个超帧被划分成若干个迷你帧(miniframe)，包括一个调度帧和  $T$  个传输帧。中继站采用的数据帧为图 2 中的传输帧结构，收到认知

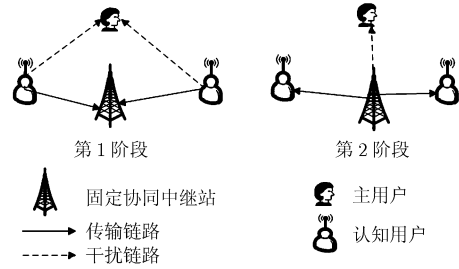


图 1 协同认知网络系统模型

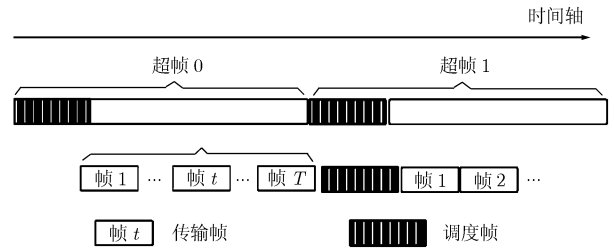


图 2 认知用户数据帧结构

用户传输帧的数据后即通过放大处理进行转发。为了调度的可行性，认为在一个超帧内主用户的通信需求没有发生改变，从而可以根据调度帧开始时的主用户子载波占用情况进行资源调度；当下一个超帧主用户子载波占用情况改变时，则由下一个超帧的调度帧根据此时主用户子载波占用情况对资源进行重新分配，保证主用户通信不受干扰。传输帧上的数据通信通过固定中继站分两个阶段完成。在第 1 阶段，认知用户中的源用户通过多接入信道将信息发送至固定中继站；在第 2 阶段，固定中继站将接收到的信号经放大处理后转发至相应的目标用户。

### 2.1 系统模型

假定在每个传输帧传输的过程中信道状态保持稳定。在帧  $t \in \{1, \dots, T\}$  传输的第 1 阶段，固定中继站在子载波  $k \in \{1, \dots, K\}$  上接收到的信号  $y_1^{t,k}$  可以表示为

$$y_1^{t,k} = \sqrt{P_1^{t,k}} h_1^{t,k} x^{t,k} + z_1^{t,k} \quad (1)$$

其中  $x^{t,k}$  为认知用户在传输帧  $t$  第 1 阶段子载波  $k$  上的发送信号， $h_1^{t,k}$  为传输帧  $t$  第 1 阶段子载波  $k$  在其所属认知用户与固定中继站之间小尺度衰落信道增益，由于实际系统中小区覆盖范围有限，本文忽略了大尺度衰落对信号传输的影响。 $P_1^{t,k}$  为传输帧  $t$  第 1 传输阶段子载波  $k$  上的发送功率， $z_1^{t,k} \sim CN(\mu, \sigma^2)$  为子载波  $k$  上的加性高斯白噪声。为了简便起见，无线网络中各个接收机在所有子载波上的噪声功率都归一化成 1 个单位。

用向量  $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_K]$  作为主用户对各子载波的

占用情况的标识。 $b_k = 1$ 表示第  $k$  个子载波在本次超帧内被主用户使用,  $b_k = 0$ 则认为子载波  $k$  空闲。主用户在信道  $k$  上接收到的干扰信号为

$$I_1^{t,k,1} = \sqrt{P_1^{t,k}} g_1^{t,k} x_1^{t,k} + z_1^{t,k} \quad (2)$$

其中  $g_1^{t,k}$  是帧  $t$  第 1 阶段传输时子载波  $k$  所属的认知用户与主用户之间的干扰链路信道增益。为了不影响主用户的通信, 我们对传输帧  $t$  第 1 阶段带来的干扰进行控制, 保证任意子载波上的干扰功率处于主用户可承受的范围。

$$b_k P_1^{t,k} |g_1^{t,k}|^2 \leq \eta_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3)$$

其中  $\eta_k$  为主用户在子载波  $k$  上的所能承受的干扰功率门限值。

在第 2 阶段, 固定中继站将从子载波  $k$  上接收到的信号放大后通过子载波  $p \in \{1, \dots, K\}$  发送至目标用户。放大因子的设定为  $\sqrt{G^{t,p} P_2^{t,p}}$ , 其中  $P_2^{t,p}$  为传输帧  $t$  第 2 阶段子载波  $p$  上的发送功率, 即固定中继站在子载波  $p$  的发送功率,  $G^{t,p}$  为功率归一化因子, 根据文献[10]其值可确定为

$$|G^{t,p}|^{-1} = 1 + P_1^{t,k} |h_1^{t,k}|^2 \quad (4)$$

认知用户在子载波  $p$  上接收到的信号为

$$y_2^{t,p} = \sqrt{G^{t,p} P_2^{t,p}} h_2^{t,p} \left( \sqrt{P_1^{t,k}} h_1^{t,k} x_1^{t,k} + z_1^{t,k} \right) + z_2^{t,p} \quad (5)$$

其中  $h_2^{t,p}$  是传输帧  $t$  的第 2 个阶段传输时子载波  $p$  在固定中继站至目标用户与之间的信道增益,  $z_2^{t,p}$  为子载波  $p$  上的加性白噪声。那么目标用户处可以达到的传输速率为

$$R^{t,p} = \frac{1}{2} \lg \left( 1 + \frac{G^{t,p} P_2^{t,p} |h_2^{t,p}|^2 P_1^{t,k} |h_1^{t,k}|^2}{G^{t,p} P_2^{t,p} |h_2^{t,p}|^2 + 1} \right) \quad (6)$$

其中, 乘 1/2 是因为分成了两个阶段传播。

第 2 阶段主用户在子载波  $p$  上接收到的干扰信号可以表示为

$$I^{t,p,2} = \sqrt{G^{t,p} P_2^{t,p}} g_2^{t,p} \left( \sqrt{P_1^{t,k}} h_1^{t,k} x_1^{t,k} + z_1^{t,k} \right) + z_2^{t,p} \quad (7)$$

其中  $g_2^{t,p}$  为传输帧  $t$  第 2 阶段时子载波  $p$  在固定中继站到主用户间的干扰链路上的信道增益。类似于第 1 阶段对主用户的保护, 我们对干扰进行控制。

$$b_p P_2^{t,p} |g_2^{t,p}|^2 \leq \eta_p, \quad \forall p \in \{1, \dots, K\} \quad (8)$$

其中  $\eta_p$  视为主用户在子载波  $p$  上的所能承受的干扰功率门限值。

## 2.2 模型建立

调度的内容是超帧中各传输帧两阶段的子载波进行有效配对, 并且为所形成的子载波对分配合适的发送功率, 以实现超帧中所有子载波上的传输速率最大化。该模型可以初步归纳。

$$\left. \begin{aligned} & \max_{P_2^{t,p}, P_1^{t,k}, A^t} \sum_t \sum_p R^{t,p} \\ & = \sum_t \sum_p a_{p,k}^t \frac{1}{2} \lg \left( 1 + \frac{G^{t,p} P_2^{t,p} |h_2^{t,p}|^2 P_1^{t,k} |h_1^{t,k}|^2}{G^{t,p} P_2^{t,p} |h_2^{t,p}|^2 + 1} \right) \\ \text{s.t. } & b_k P_1^{t,k} |g_1^{t,k}|^2 \leq \eta_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, T\} \\ & b_p P_2^{t,p} |g_2^{t,p}|^2 \leq \eta_p, \quad \forall p \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, T\} \\ & (P_1^{t,k} + P_2^{t,p}) a_{k,p}^t \leq P_{\text{th}}, \quad \forall k, t, p \\ & a_{k,p}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall t, p, k \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中  $A^t$  矩阵表示在第  $t$  传输帧的第 1, 第 2 传输阶段子载波配对矩阵,  $a_{k,p}^t = 1$  表示传输  $t$  帧第 1 阶段使用子载波  $k$  时, 第 2 阶段使用的子载波为  $p$ 。约束条件 3 为传输帧  $t$  第 1, 第 2 阶段传输时认知系统的功率限制。

## 3 实际调度分析与求解

本文中资源的调度与分配是在传输帧开始前的调度帧中完成的, 而各传输帧的即时信道状态在调度帧上是得不到的。这增加了调度的难度, 容易造成资源分配的盲目性。为了保证资源分配的有效性, 需要在调度帧中对未来各传输帧中子载波的信道状态进行预测。

对于传输链路, 认为所有子载波在超帧中所有第 1, 第 2 阶段的传输中均为平坦的瑞利衰落信道, 即对于第 1 阶段的任一子载波  $k$  的信道增益, 有  $h_1^{t,k} \sim CN(0, d_t^{-\nu})$ , 其中  $d_t$  为第  $t$  个传输帧时子载波  $k$  所属认知用户与固定中继站之间的距离,  $\nu$  为路径衰落因子。考虑用户低速移动时忽略距离的变化, 认为超帧传输时距离始终为调度帧时用户与固定中继站之间的距离, 归一化后有  $h_1^{t,k} \sim CN(0, 1)$ 。这样在已知调度帧子载波  $k$  在第 1 阶段的信道增益  $h_1^{0,k}$  后, 可以通过衰落状态的相关性得到帧  $t$  时的信道状态。假设超帧中所有帧的传输长度都是固定的, 设为  $\tau$ , 则子载波  $k$  在调度帧与第  $t$  个传输帧时信道状态的相关性为<sup>[8]</sup>

$$E \left( h_1^{t,k} \left( h_1^{0,k} \right)^H \right) = r(t \times \tau) \quad (10)$$

其中  $(h_1^{0,k})^H$  代表  $h_1^{0,k}$  的共轭转置。此外,  $r(\tau) = J_0(2\pi f_D \tau)$ ,  $f_D$  为多普勒频移的最大值,  $J_0$  为第 0 阶的第 1 类贝塞尔函数。那么可以得到信道状态  $h_1^{t,k}$  估计  $\bar{h}_1^{t,k}$  为

$$\bar{h}_1^{t,k} = \sqrt{1 - \sigma_e^2} h_1^{0,k} + \Delta h_1^{t,k} \quad (11)$$

其中  $\Delta h_1^{t,k} \sim CN(0, \sigma_e^2(t))$  代表信道状态估计的偏差, 且有  $\sigma_e^2(t) = 1 - r^2(t \times \tau)$ 。类似地, 对于传输帧

$t$  第2阶段子载波  $p$  的信道增益  $h_2^{t,p}$  也可按上述方法估计, 记为  $\bar{h}_2^{t,p}$ 。

对于干扰链路, 由于在干扰信号传播过程中存在大量的散射, 认为所有子载波在干扰链路上都是瑞利平坦衰落信道。考虑到网络中主用户移动的不确定性, 近似认为干扰链路增益分别有  $g_1^{t,k} \sim CN(0,1)$  和  $g_2^{t,p} \sim CN(0,1)$ 。用  $g_1^{0,k}$  和  $g_2^{0,p}$  表示调度帧时检测得的第1, 第2阶段在子载波  $k$  和  $p$  上的干扰链路信道增益, 则通过估计可得到在传输帧  $t$  时的信道增益分别为  $\bar{g}_1^{t,k}$  和  $\bar{g}_2^{t,p}$ 。出于对主用户的保护, 我们考虑干扰最严重的情况, 在调度帧上选取的干扰链路信道增益为  $g_1^{\max,k} = \max_t (\bar{g}_1^{t,k})$  和  $g_2^{\max,p} = \max_t (\bar{g}_2^{t,p})$ 。考虑到式(9)中各信道增益的实际取值的变化, 我们将其重新归纳为式(12)。

$$\left. \begin{aligned} & \text{Max}_{P_1^{t,k}, P_2^{t,p}, A^t} \\ & \sum_t \sum_p a_{p,k}^t \frac{1}{2} \lg \left( 1 + \frac{P_2^{t,p} |\bar{h}_2^{t,p}|^2 P_1^{t,k} |\bar{h}_1^{t,k}|^2}{P_1^{t,k} |\bar{h}_1^{t,k}|^2 + P_2^{t,p} |\bar{h}_2^{t,p}|^2 + 1} \right) \\ \text{s.t. } & b_k P_1^{t,k} |g_1^{\max,k}|^2 \leq \eta_k, \forall k \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, T\} \\ & b_p P_2^{t,p} |g_2^{\max,p}|^2 \leq \eta_p, \forall p \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, T\} \\ & (P_1^{t,k} + P_2^{t,p}) a_{k,p}^t \leq P_{\text{th}}, \forall k, t, p, a_{k,p}^t \in \{0, 1\}, \forall t, p, k \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)涉及整数优化, 直接求解的复杂度太高, 因此考虑将其分步求解。(1)由于超帧中各帧之间的独立性, 可将目标函数按传输帧分解, 先最大化每个传输帧的  $\sum_p a_{k,p}^t R^{t,p}$ , 然后进行叠加。(2)进一步考虑, 由于每一帧中每个子载波上分为两阶段传输, 并且每个子载波之间是独立的, 可以先固定第1阶段的子载波  $k$ , 然后第2阶段在任意子载波上计算选用该子载波时第1, 第2阶段的发送功率, 选出能够使传输速率最大的子载波  $p$  进行配对, 此时  $a_{k,p}^t = 1$ 。当出现配对冲突即存在另一子载波  $k'$  的配对也为  $p$  时, 那么比较两组子载波配对时的传输速率大小, 取其值大者配对, 值小者重新选取第2阶段的子载波。我们把第(2)步中的功率求解问题表示为式(13)。

$$\left. \begin{aligned} & \text{Max}_{P_1^{t,k}, P_2^{t,p}} \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{P_2^{t,p} |\bar{h}_2^{t,p}|^2 P_1^{t,k} |\bar{h}_1^{t,k}|^2}{P_1^{t,k} |\bar{h}_1^{t,k}|^2 + P_2^{t,p} |\bar{h}_2^{t,p}|^2 + 1} \right) \\ \text{s.t. } & b_k P_1^{t,k} |g_1^{t,k}|^2 \leq \eta_k \\ & b_p P_2^{t,p} |g_2^{t,p}|^2 \leq \eta_p \\ & P_1^{t,k} + P_2^{t,p} \leq P_{\text{th}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)为凸优化问题, 运用优化理论对其进行求解<sup>[11]</sup>, 可以得到传输帧  $t$  上第1, 第2阶段的发送

功率分别为

$$P_1^{t,k} = \begin{cases} \min \left( \frac{|\bar{h}_2^{t,p}|^2 P_{\text{th}}}{|\bar{h}_1^{t,k}|^2 + |\bar{h}_2^{t,p}|^2}, \frac{\eta_k}{|g_1^{t,k}|^2} \right), & b_k = 1 \text{ 时} \\ \frac{|\bar{h}_2^{t,p}|^2 P_{\text{th}}}{|\bar{h}_1^{t,k}|^2 + |\bar{h}_2^{t,p}|^2}, & b_k = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (14)$$

$$P_2^{t,p} = \begin{cases} \min \left( \frac{|\bar{h}_1^{t,k}|^2 P_{\text{th}}}{|\bar{h}_1^{t,k}|^2 + |\bar{h}_2^{t,p}|^2}, \frac{\eta_p}{|g_2^{t,p}|^2} \right), & b_p = 1 \text{ 时} \\ \frac{|\bar{h}_1^{t,k}|^2 P_{\text{th}}}{|\bar{h}_1^{t,k}|^2 + |\bar{h}_2^{t,p}|^2}, & b_p = 0 \text{ 时} \end{cases}$$

下面给出在调度帧中完整的跨层资源调度方法:

(1)初始化 根据调度帧时的信息预测各子载波在超帧第1, 第2阶段的信道信息的期望值, 并且预测干扰信道增益。

(2)资源调度

(a)对于超帧中任一帧  $t$  传输过程中,

(i)第1阶段任一子载波  $k$ , 它在第2阶段配对子载波的选取按如下方法: 对于任一子载波, 按照公式(14)分别确定第1, 第2阶段的功率, 代入式(6), 选出能够使式(6)值最大的子载波  $p$ , 为  $k$  的配对子载波。

(ii)若第1阶段的子载波  $k'$ , 按(i)方法得到的配对子载波也为  $p$ , 则分别比较  $(k, p)$  与  $(k', p)$  配对时, 式(6)传输速率值的大小, 值大者配对, 值小者重新选择配对子载波。

(iii)重复步骤(i), 直到所有子载波配对完成。

(b)重复步骤(a), 直到为所有传输帧进行了资源分配。

## 4 仿真分析

本节通过数值仿真对上述的跨层调度算法进行验证。为简便起见, 认为主用户在每个子载波上所能承受的干扰功率门限都相同, 主用户对子载波占用情况随机生成。仿真的噪声在超帧中各子载波上都是独立的加性高斯白噪声, 功率都是 1 dB。此外为了避免一个超帧中过多传输帧造成的信道状态预测偏差过大问题, 在每个超帧中只设定了 5 个传输帧。

图3描述了在一个超帧内不同的资源调度方案的性能表现。作为比较, 本文同时仿真了第1, 第2阶段固定使用同一子载波通信和随机选择子载波配对两种调度方案。由图中可以明显地看到, 本文所提出的调度方案相对于上述两种方法, 性能有明显提升, 尤其当可用子载波数增加时提升更明显。这是由于计算机仿真中设定所有子载波上的衰落为平

坦衰落, 各子载波上的信道增益相差不大, 不同配对方案在单条链路上所达到的速率相差不大, 当可用子载波数目少时, 本文调度方案带来的传输速率提升的增益累加值也小, 随着可用子载波数目的增加, 这种累加值越来越大, 性能提高的表现也就越明显。

在图 4 中我们仿真了主用户子载波的占用情况对认知用户传输速率的影响。设定认知用户通过检测得到可用的子载波总数目为 10, 主用户在各个子载波上的干扰功率门限值为 10 dB。可以看到, 随着主用户占用子载波数目的不断增加, 认知用户在超帧内可以达到的总传输速率逐渐降低。这是因为出于对主用户的保护, 认知用户和固定中继站在各个传输帧内主用户占用的子载波上进行了干扰控

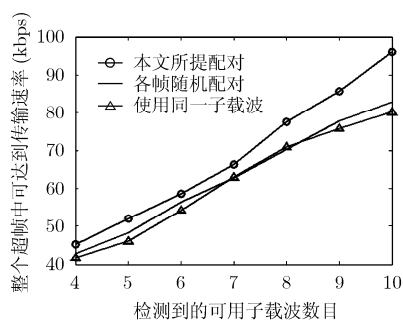


图 3 不同子载波配对方案的性能表现图

制, 由式(14)可以看到, 发送功率受到了更多的限制, 因此传输速率出现了下降。

## 5 结束语

针对基于 OFDM 的无线协同认知网络, 本文研究其中的资源调度问题。在该网络中, 为了节省资源调度信令的开销, 认知用户的数据帧采用超帧结构。本文通过对超帧所有传输帧上的传输链路和干扰链路的信道增益进行有效的估计, 在调度帧上实现整个超帧中子载波的最优配对, 并为配对子载波分配最优的发送功率。通过分步求解的方法, 所形成的优化问题得到了有效解决。仿真结果与理论分析表明, 本文所提的调度方法提高了认知用户的传输速率, 这为认知系统的构建研究提供了一种可选方案。

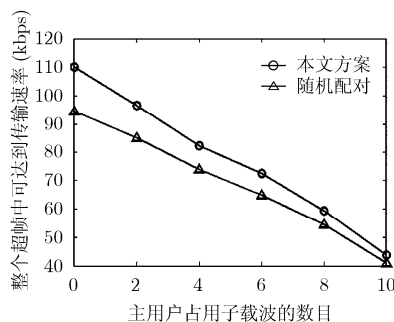


图 4 主用户占用子载波的对认知用户传输影响

## 参考文献

- [1] Federal Communications Commission. Cognitive radio technologies proceeding [R]. Rep. ET Docket, No. 03-108, 2003.
- [2] Mitola J, et al. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. *IEEE Wireless Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [3] Zhang Qian, Jia Jun-cheng, and Zhang Jin. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 2(1): 111-117.
- [4] Ding L, Melodia T, Batalama S N, Matyjas D J, and Medley M J. Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio Ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(4): 1969-1979.
- [5] Weiss T, Hillenbrand J, Krohn A, and Jondral F. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C]. *IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*, Los Angeles, USA, 2004: 1873-1877.
- [6] Zhang Yonghong and Leung Cyril. Resource allocation in an OFDM-based cognitive radio system [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(7): 1928-1931.
- [7] Zhang Yonghong and Leung Cyril. Cross-layer resource allocation for mixed services in multiuser OFDM-based cognitive radio systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(8): 4605-4619.
- [8] Derrick Wing Kwan Ng and Robert Schober. Cross-layer scheduling design for OFDMA two-way amplify-and-forward relay networks [C]. *IEEE Wireless Communication and Networking Conf. (WCNC)*, Sydney, Australia, 2010: 1-5.
- [9] IEEE 802.16m System Description Document [R]. Tech. Rep., 2009, [OL]. Available at: [http://wirelessman.org/tgm/docs/80216m-08\\_003r9a.doc.zip](http://wirelessman.org/tgm/docs/80216m-08_003r9a.doc.zip).
- [10] Rankov B and Wittneben A. Spectral efficient protocols for half duplex fading relay channels [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2007, 25(2): 379-389.
- [11] Boyd S and L Vandenberghe. *Convex Optimization* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, Chapter 3.4,9.

刘忠军: 男, 1986年生, 硕士生, 研究方向为认知无线电、协同通信中无线资源管理技术。

徐友云: 男, 1966年生, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事无线通信新技术、智能天线和信号处理等方面研究。

张冬梅: 女, 1972年生, 副教授, 从事下一代移动通信关键技术和信号处理方面的研究。