

文章编号: 1004-4353(2018)04-0328-04

# 基于 OFDM 的协作通信系统的资源分配研究

留黎钦<sup>1</sup>, 高赞<sup>2</sup>, 王保云<sup>2</sup>

(1. 莆田学院 信息工程学院, 福建 莆田 351100;  
2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为了在 OFDM 的协作通信系统中能够充分利用无线频谱资源, 将携能无线通信和中继技术相结合, 把认知中继的子载波分为两部分(一部分用于自身的信息传输, 另一部分用于主用户的数据转发), 并用分支定界法优化了最大次用户网络吞吐量. 实验表明, 优化后的最大化次用户网络的吞吐量明显优于填充式认知无线电和下垫式认知无线电, 频谱资源也得到了充分的利用.

**关键词:** 资源分配; 正交频分复用; 协作通信; 能量收集

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

## A study on resource allocation of OFDM based on co-communication system

LIU Liqin<sup>1</sup>, GAO Zan<sup>2</sup>, WANG Baoyun<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Putian University, Putian 351100, China;  
2. College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In order to make full use of the radio spectrum resources in OFDM cooperative communication system, combined with wireless communication and relay technology, the cognitive relay subcarrier is divided into two parts (a part used in information transmission, the other part is used for primary user data forwarding), and the maximum throughput of subuser network is optimized by branch and bound method. Experiments show that the throughput of the optimized maximized subuser network is obviously better than that of the Overlay cognitive radio and the Underlay cognitive radio. The throughput of the subuser network is greatly improved and the spectrum resources are fully utilized.

**Keywords:** resource allocation; OFDM; co-communication; energy harvesting

## 0 引言

随着人们对通信传输质量和传输速度要求的日益提高, 传统的无线通信方式已经难以满足人们的需求, 而且通信频谱资源也越来越匮乏. 为了解决通信频谱资源匮乏问题, Zhou X 等<sup>[1]</sup>和 Ng D W K 等<sup>[2]</sup>研究了下行多用户正交频分复用(OFDM)系统中同步无线信息与功率传输的优化问题, 结果显示 OFDM 子载波的峰值功率约束和系统中的用户数量对速率-能量的性能起关键作用. Timotheou S 等<sup>[3]</sup>针对 MISO 信道中信息和能量同步传输问题, 研究了数据传输能量效率最大化的资源分配算法, 该算法能够在较小迭代次数内获得支持 QoS 和 RF-EH 约束的最优解. 研究<sup>[4]</sup>表明, 无线携能通信技术可以

为认知无线电中的协作中继传输提供能量合作,即能够增加系统容量、扩大覆盖范围以及提高能量. 用具有认知能力的次用户作为中继,不仅可以帮助传输主用户的数据,也可以使次用户的数据得到传输. 本文利用无线携能通信中能量合作技术,结合主次用户间能量和信息的合作,对中继发送信号的子载波分配问题进行优化.

### 1 系统模型

本文研究的认知无线网络由一对主用户收发端和一对次用户收发端组成,如图 1 所示. 每个节点分配 1 根天线,并以 OFDM 方式工作. 发送端把子载波分为两部分:一部分子载波用于发送次用户信息,另一部分用于转发主用户的信息. 携能接收机的 ST 接收端采用功率分割技术.

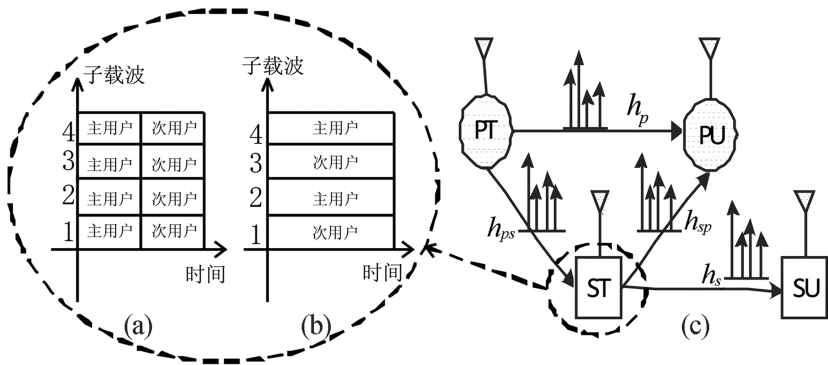


图 1 系统模型

### 2 子载波分配的协作通信系统的资源分配

#### 2.1 子载波分配的协作通信的数学模型

本协作通信方案采用 2 个时隙. PT 先用  $\tau_1$  的时隙给 ST 传送信息和能量. ST 将接收到的信号分割成两部分,一部分用于解码主用户信息,另一部分用于转换能量. 在  $\tau_2$  时间内,ST 在一部分子载波信道中向 SU 发送自己的信息,在另一部分子载信道中向 PU 转发主用户数据,其中  $\tau_1 + \tau_2 \leq 1$ . 为方便计算,本文令  $\tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{2}$ . 整个通信分成两个阶段来完成.

阶段 1 是能量和信息合作阶段. 在第  $k$  个子载波中,PT 向 ST 广播信号  $x_{p,k}$  并要求合作(功率为  $p_{p,k}$ ),PU 对接收到的信号进行信息解码. 这个阶段 ST 和 PU 收到的信号分别表示为:

$$y_k^{\text{ST}} = \sqrt{p_{p,k}} h_{ps,k} x_{p,k} + w_k, \tag{1}$$

$$y_k^{\text{PU1}} = \sqrt{p_{p,k}} h_{p,k} x_{p,k} + z_{k1}, \tag{2}$$

其中  $w_k$  和  $z_{k1}$  都服从  $N(0, \sigma_k^2)$  的高斯白噪声,  $h$  是 PT 和 ST 之间的信道增益. PU 的传输速率表示为

$$R_k^{\text{PU1}}(p_{p,k}) = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{p,k} |h_{p,k}|^2}{\sigma_k^2} \right). \tag{3}$$

ST 接收到的信号由  $\rho$  和  $(1-\rho)$  两部分组成.  $\rho$  部分的信号用于解码转发,其中  $0 \leq \rho \leq 1$ ;  $(1-\rho)$  部分被用于能量收集. 基带信号通过转换解码转发的信号得到,被解码转发的信号表示为

$$\tilde{y}_k^{\text{ST}} = \sqrt{\rho} (\sqrt{p_{p,k}} h_{ps,k} x_{p,k} + w_k) + \tilde{w}_k, \tag{4}$$

其中  $\tilde{w}_k$  是 RF 信号向基带转换时产生的服从  $N(0, \sigma_k^2)$  的高斯白噪声. 在 ST 处解码的主用户信息速率为

$$R_k^{\text{ST}}(p_{p,k}, \rho) = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{p,k} |h_{ps,k}|^2 \rho}{\sigma_k^2 (1 + \rho)} \right). \tag{5}$$

用于 ST 收集能量的信号表示为

$$\hat{y}_k^{\text{ST}} = \sqrt{1 - \rho} (\sqrt{p_{p,k}} h_{ps,k} x_{p,k} + w_k). \quad (6)$$

收集到的能量表示为

$$E = \eta \tau_{11} (1 - \rho) \sum_k (p_{p,k} |h_{ps,k}|^2 + \sigma_k^2), \quad (7)$$

其中  $\eta$  表示 RF 能量的转换效率.

在阶段 2 中, ST 先用一部分子载波信道进行信息解码, 并利用解码转发协议中继转发接收到的主用户信号 PU; 然后再利用剩下的子载波信道把自己的信息发送给次用户 SU. 其中, PT 没有工作. 将子载波信道  $k$  标记为  $t_{p,k} = 1$ , 表示中继转发主用户的信息; 将子载波信道  $k$  标记为  $t_{p,k} = 0$ , 表示发送次用户信息. 在第  $k$  个子载波中, ST 的发射功率为  $p_{s,k}$ . PU 从接收的信号解码信息获得的传输速率为

$$R_k^{\text{PU2}}(t_{p,k}, p_{s,k}) = \frac{1}{2} t_{s,k} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{s,k} |h_{sp,k}|^2}{\sigma_k^2} \right). \quad (8)$$

由解码转发协议, 在整个信息合作传输中 PU 可达到的速率可表示为

$$R_{p,k}(t_{p,k}, p_{p,k}, p_{s,k}, \rho) = \min[R_k^{\text{ST}}(p_{p,k}, \rho), R_k^{\text{PU1}}(p_{p,k}) + R_k^{\text{PU2}}(t_{p,k}, p_{s,k})], \quad (9)$$

SU 接收次用户信息的速率可表示为

$$R_{s,k}(t_{p,k}, p_{s,k}) = \frac{1}{2} (1 - t_{p,k}) \log_2 \left( 1 + \frac{p_{s,k} |h_{sp,k}|^2}{\sigma_k^2} \right). \quad (10)$$

为了便于求解, 令  $t_{s,k} = 1 - t_{p,k}$ ,  $t_{p,k} \in \{0, 1\}$ ,  $t_{s,k} + t_{p,k} = 1$ , 则  $R_{s,k}(t_{p,k}, p_{s,k})$  可以表示为

$$R_{s,k}(t_{p,k}, p_{s,k}) = \frac{1}{2} t_{s,k} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{s,k} |h_{sp,k}|^2}{\sigma_k^2} \right). \quad (11)$$

## 2.2 优化问题

定义 PT 和 ST 的发射功率分配为  $\mathbf{p}_k = [p_{p,k}, p_{s1,k}, p_{s2,k}]$ , ST 的子载波分配为  $\mathbf{t}_k = [t_{p,k}, t_{s,k}]$ . 在 PT 和 ST 功率受限、主用户网络速率受限的条件下, 吞吐量的优化问题可以归纳为:

$$\underset{\substack{p_{p,k}, p'_{s,k}, p''_{s,k} \\ t_{p,k}, t_{s,k}}}{\text{maximize}} \quad \frac{1}{2} \sum_k t_{s,k} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{s,k} |h_{sp,k}|^2}{\sigma_k^2} \right), \quad (12)$$

其中:  $t_{s,k} \in \{0, 1\}, \forall k; t_{p,k} \in \{0, 1\}, \forall k; 0 \leq t_{s,k} + t_{p,k} \leq 1, \forall k$ .

## 2.3 分支定界的联合资源分配算法

根据分时松弛规则<sup>[5]</sup>, 将组合限制  $t_{s,k} \in \{0, 1\}, \forall k$  和  $t_{p,k} \in \{0, 1\}, \forall k$  松弛在 0 到 1 之间的实数, 即  $0 \leq t_{p,k} \leq 1, 0 \leq t_{s,k} \leq 1$ , 它们分别表示第  $k$  个子载波分配发送次用户信息和转发主用户信息的分享时间参数. 引进辅助变量  $p'_{s,k} = p_{s,k} t_{s,k}$  和  $p'_{p,k} = p_{s,k} t_{p,k}$ , 并记新的发射功率分配  $\mathbf{p}'_k = [p_{p,k}, p'_{s,k}, p''_{p,k}]$ , ST 的子载波分配  $\mathbf{t}_k = [t_{p,k}, t_{s,k}]$ . 则式(12) 可转化为式(13), 即:

$$\begin{aligned} & \underset{\substack{p_{p,k}, p'_{s,k}, p''_{s,k} \\ t_{p,k}, t_{s,k}}}{\text{maximize}} \quad \frac{1}{2} \sum_k t_{s,k} \log_2 \left( 1 + \frac{p'_{s,k} |h_{sp,k}|^2}{t_{s,k} \sigma_k^2} \right), \\ & \text{等价于} \quad \frac{1}{2} \sum_k \log_2 \left( 1 + \frac{p_{p,k} |h_{ps,k}|^2 \rho}{\sigma_k^2 (1 + \rho)} \right) \geq R_p; \\ & \quad \frac{1}{2} \sum_k \log_2 \left( 1 + \frac{p_{p,k} |h_{p,k}|^2}{\sigma_k^2} \right) + \frac{1}{2} \sum_k t_{p,k} \log_2 \left( 1 + \frac{p''_{p,k} |h_{sp,k}|^2}{t_{p,k} \sigma_k^2} \right) \geq R_p; \\ & \quad \frac{1}{2} \sum_k (p'_{s,k} + p''_{s,k}) \leq \frac{1}{2} \sum_k (p_{p,k} |h_{ps,k}|^2 + \sigma_k^2) (1 - \rho) \eta; \\ & \quad \frac{1}{2} \sum_k p_{p,k} \tau_1 \leq P_t; \\ & \quad 0 \leq t_{s,k} + t_{p,k} \leq 1, \forall k; t_{s,k} \in [0, 1], \forall k; t_{p,k} \in [0, 1], \forall k. \end{aligned} \quad (13)$$

### 3 实验仿真和性能分析

假设所有终端到次用户 ST 的距离是 1 m, PU 和主用户 PT 之间的线性距离是 2 m. 所有终端的子载波个数  $K=8$ , 信道增益  $h_{p,k}, h_{ps,k}$  都服从复高斯分布  $CN(0, D^{-l})$ , 其中  $D$  为主 / 次用户终端之间的距离,  $l$  是路径衰减系数( $l=4$ ). 系统中所有节点包含的高斯白噪声的功率谱密度为  $-30$  dBW/Hz. 在携能收发机中, RF 能量的转换效率  $\eta=0.5$ . 图 2 为主用户 PT 发射功率为  $P_t=10$  W 下的仿真结果, 图 3 为  $R_p=4$  bps/Hz 下的仿真结果.

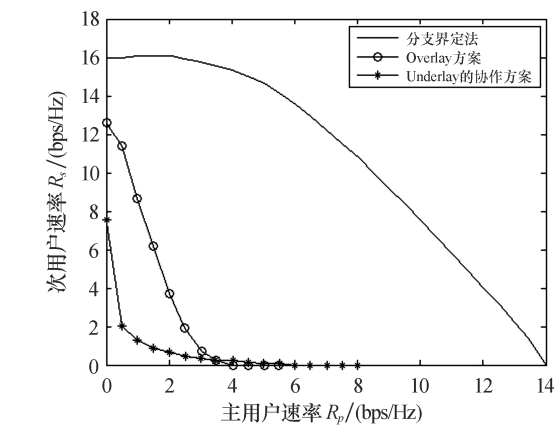


图 2 3 种方案下的次用户和主用户的可达传输速率

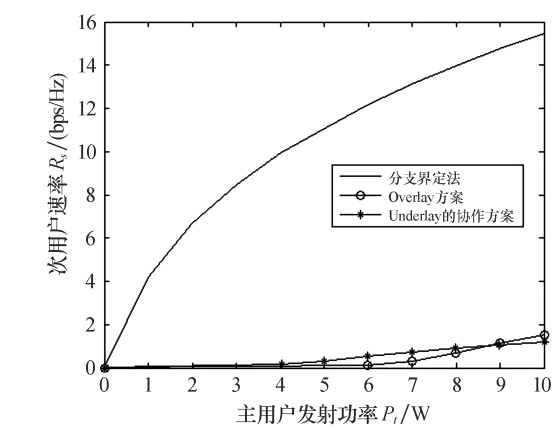


图 3 3 种方案下的次用户网络的最大吞吐量变化

由图 2 和图 3 可以看出, 用分支界定法优化后的次用户最大网络吞吐量明显高于另外两种没有考虑子载波分配的方案(Overlay 和 Underlay 方案), 这说明本文提出的协同通信方案有效地提高了频谱资源的利用率.

### 4 结论

本文在无线携能协作通信网络中考虑了次用户 ST 的子载波分配和优化问题, 即利用 2 个时隙同时传输和转发主次用户信息以提高传输效率, 并采用分支定界法优化次用户子载波频谱资源. 仿真实验结果表明, 优化后的最大次用户网络吞吐量明显高于传统的资源分配方案, 使得功率和子载波得到了很好的分配, 并且频谱利用率也有了很大的提高. 本文只对一对主用户和一对次用户之间的协作传输问题进行了研究, 今后将研究多中继协作间的中继选择和资源联合优化问题.

#### 参考文献:

- [1] Zhou X, Zhang R, Ho C K. Wireless information and power transfer in multiuser OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014,13(4):2282-2294.
- [2] Ng D W K, Lo E S, Schober R. Wireless information and power transfer: energy efficiency optimization in OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013,12(12):6352-6370.
- [3] Timotheou S, Krikidis I, Zheng G, et al. Beamforming for MISO interference channels with QoS and RF energy transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014,13(5):2646-2658.
- [4] 范立行, 华梦, 黄永明, 等. 3D MIMO 在无线携能通信系统中的应用和优化设计[J]. 电子与信息学报, 2018,40(5): 1031-1036.
- [5] Shaat M, Bader F. Asymptotically optimal resource allocation in OFDM-based cognitive networks with multiple relays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012,11(3):892-897.