

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.002

引用格式:石露露,杨守义,张瑞哲,等.协作多组多播认知无线网络的资源优化配置[J].电讯技术,2016,56(12):1310-1315.[SHI Lulu, YANG Shouyi, ZHANG Ruizhe, et al. Optimal resource allocation for cognitive radio networks with multi-group multicast[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12):1310-1315.]

协作多组多播认知无线网络的资源优化配置*

石露露,杨守义**,张瑞哲,李 燕

(郑州大学 信息工程学院,郑州 450001)

摘要:考虑到无线电频谱资源日益紧缺,提出了一种基于组间组内协作传输的多播组新机制,涉及多个多播组并使用同一频谱资源以协作方式传输信息。基于认知无线网络中该机制,研究了系统的资源优化配置,理论分析得出了功率分配方案,进而讨论了系统加权总传输速率的优化,同时考虑了主用户和认知用户之间信号干扰及功率限制对传输速率的影响,最优化用户性能。仿真结果表明,优化方案下多播组传输速率随用户人数的增加而上升,达到最优化用户服务质量;当功率限制时,通过设置加权因子,能够保证主用户拥有良好的通信性能。

关键词:认知无线网络;多播组;干扰限制;功率优化;资源优化配置

中图分类号:TN92 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)12-1310-06

Optimal Resource Allocation for Cognitive Radio Networks with Multi-group Multicast

SHI Lulu, YANG Shouyi, ZHANG Ruizhe, LI Yan

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: For the increasing shortage of radio spectral resource, a new multi-group multicast (MGMC) mechanism based on inter-group and inner-group cooperative transmission is proposed, which relates to multiple multicast groups and uses the same spectrum resource to transmit information in a cooperative way. In cognitive radio (CR) network based on this new transmission mechanism, the optimal resource allocation of system is presented. The power allocation scheme is derived from theoretical analysis, and then the optimization of system weighted overall rate is discussed. Moreover, the impact of the signal interference between primary user (PU) and CR users and the power constraint on the transmission rate is considered to optimize user performance. Simulation result indicates that the transmission rate of multi-group multicast rises with the increasing number of users, and optimal user quality of service (QoS) is achieved; when power is constrained, the PU can be ensured to have good communication performance by setting weighted factors for every multicast group.

Key words: cognitive radio network; multi-group multicast; interference constraint; power optimization; optimal resource allocation

1 引言

随着人们对无线通信数据的传输量和移动多媒

体服务体验的需求越来越大,对有限频谱资源的使用率也越来越高。在多用户使用同一接入网络或接

* 收稿日期:2016-03-25;修回日期:2016-08-05 Received date:2016-03-25;Revised date:2016-08-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271421)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61271421)

** 通信作者:iesyyang@zzu.edu.cn Corresponding author:iesyyang@zzu.edu.cn

入信道前提下,移动多媒体允许用户通过共用资源传输数据,因而使用多播机制可降低带宽消耗,提高频谱利用率。多播技术可将同一数据发送给连接相同基站的数据接收组,其方法是将一个数据包传输给该接收组的所有用户^[1-3]。

无线应用服务种类多样,多播组类别也各不相同,使得多组多播系统可共存于同一个蜂窝网络。然而,由于多媒体服务对数据传输速率要求高,所需频段也更多,所以多组多播所面临的最大挑战之一就是系统频谱资源的匮乏。为解决这一问题,认知无线电技术^[4]得以快速发展。简言之,认知无线电技术允许认知用户与授权用户通过感知一起使用授权频段,提高频谱效率。

多播组总传输速率取决于组中传输情况最差用户^[5],总服务速率也会随多播组用户人数的增长而降低,同时考虑到个别用户位于网络覆盖边缘,服务质量(Quality of Service, QoS)无法得以保证。为此,人们采用协作通信来解决这类问题,它通过形成空间分集的形式,提高吞吐量,并且减小来信号衰落带来的不利影响,改善通信系统性能^[6]。

多播通信和协同通信近期已有研究。例如:文献[7]对信道感知和无线资源分配技术进行了系统性描述,其中后者多应用于基于正交频分多址系统中下行链路的多播服务;文献[8]研究了异构网络最大最小化公平性准则下的多播容量;文献[9]提出了一种被称为多中继的协同多播新方案;文献[10]研究了无线协作组播多用户传输方案,并对所提方案性能和时隙分配策略进行了彻底分析。

上述文献主要研究多播通信系统中组间协作方案及其资源优化配置,均没有考虑到组内协作及其资源优化配置的方案,由此课题组提出了基于组内组间协作传输的多播组(Multi-group Multicast, MGMC)新机制。本文着重探讨认知无线电(Cognitive Radio, CR)网络中该传输机制下无线资源配置优化,并考虑了主用户和认知用户之间的信号干扰及各用户的功率限制问题。

2 系统模型

如图 1 所示,假设两个多播组(Group1 和 Group2)的认知无线网络,该网络与主用户共存。其中,每个多播组由 3 个类型的认知用户(即 CUs)组成:第一类认知用户直接从认知无线电基站接收信号,并用作中继,如图 1 Group1 中的 Relay1;第二类

认知用户在中继的帮助下接收信号,如图 1 Group1 中的 CU2;第三类认知用户直接从认知无线电基站接收信号,但不发挥中继作用,如图 1 Group1 中的 CU1, n 。为方便讨论,将一个多播组中的前两类认知用户数量各设为 1,并将第三类认知用户数量设为多个(表达为 $1-n$)。此处考虑为半双工译码转发中继,此时信号发射和信号接收不能同时进行。

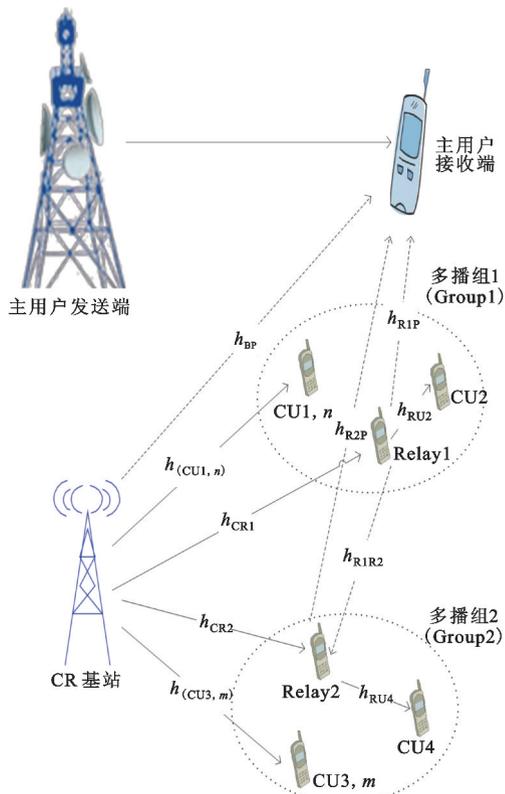


图 1 多播组认知无线网络结构

Fig. 1 The structure of a MGMC CR network

设 h_{BP} 、 $h_{CU1,n}$ 、 h_{CR1} 、 h_{CR2} 和 $h_{CU3,m}$ 分别表示认知无线电基站和主用户接收端、CU1, n 、Relay1、Relay2、CU3, m 之间的信道系数, h_{R1P} 、 h_{RU2} 、 h_{R1R2} 分别表示 Relay1 和主用户接收机、CU2、Relay2 之间的信道系数, h_{R2P} 和 h_{RU4} 分别表示 Relay2 和主用户接收端、CU4 之间的信道系数,假定认知无线电基站了解所有信道状态,则基于多播组的组内组间协同传输机制如下。

该传输方案有 3 个阶段:

(1) 在阶段 1 中,认知无线电基站将数据 x_1 传输给 Group1, CU1, n 和 Relay1 均接收到 x_1 ,同时, Group2 中的 Relay2 也接收到该数据。

(2) 在阶段 2 中,Relay1 将数据 x_1 传输给 CU2,而认知无线电基站则将数据 x_2 传输给 Group2,

CU3, m 和 Relay2 均接收到 x_2 , 同时, Relay2 还从 Relay1 接收到 x_1 。因此, 本阶段中 Relay2 可使用其在阶段 1 所获信息抵消从 Relay1 接收的干扰信号。

(3) 在阶段 3 中, Relay2 将信号 x_2 发送给 CU4, 从而提高系统吞吐量。

由于认知无线网络对主用户来说是透明的, 来自主用户的干扰信号是不可控的, 通常将其视为噪声, 并在下文分析中将其忽略。

在阶段 1 中, CU1, n 、Relay1 和 Relay2 接收的信号分别为

$$y_{cu1,n}[1] = \sqrt{P_1} h_{CU1,n} x_1 + n_{CU1,n}[1], \quad (1)$$

$$y_{R1}[1] = \sqrt{P_1} h_{CR1} x_1 + n_{R1}[1], \quad (2)$$

$$y_{R2}[1] = \sqrt{P_1} h_{CR2} x_1 + n_{R2}[1]. \quad (3)$$

式中: P_1 是认知无线电基站在阶段 1 采用的信号功率; $n_{CU1,n}[1]$ 、 $n_{R1}[1]$ 和 $n_{R2}[1]$ 分别是 CU1, n 、Relay1、Relay2 的复高斯白噪声, 服从复高斯白噪声分布 $CN(0, \sigma^2)$ 。

在阶段 2 中, CU2、CU3, m 和 Relay2 接收的信号分别为

$$y_{cu2}[2] = \sqrt{P_2} h_{RU2} x_1 + n_{CU2}[2], \quad (4)$$

$$y_{cu3,m}[2] = \sqrt{P_3} h_{CU3,m} x_2 + n_{CU3,m}[2], \quad (5)$$

$$y_{R2}[2] = \sqrt{P_3} h_{CR2} x_2 + \sqrt{P_2} h_{R1R2} x_1 + n_{R2}[2]. \quad (6)$$

式中: P_2 和 P_3 分别是 Relay2 和认知无线电基站在阶段 2 中采用的信号功率; $n_{CU2}[2]$ 、 $n_{CU3,m}[2]$ 和 $n_{R2}[2]$ 分别是 CU2、CU3, m 和 Relay 2 的复高斯白噪声, 并服从复高斯白噪声分布 $CN(0, \sigma^2)$ 。

在阶段 3 中, CU4 接收的信号为

$$y_{cu4}[3] = \sqrt{P_4} h_{RU4} x_2 + n_{CU4}[3]. \quad (7)$$

式中: P_4 是 Relay2 在阶段 3 采用的信号功率。

假设多播组 1 和组 2 中分别有 N 个和 M 个第三类认知用户。由于传输方案将传输过程分为 3 个时隙, 且采用半双工译码转发 (DF) 方式, 信号从源端发送到中继, 在中继进行译码后再转发, 两条链路取最小值, 可知 x_1 的传输速率为

$$R_1(P_1, P_2) = \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+r_{1,1}), \dots, \frac{1}{3} \text{lb}(1+r_{1,N}), \right. \\ \left. \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{1,2}), \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{1,3}) \right\} \right\}. \quad (8)$$

其中:

$$r_{1,1} = \frac{P_1 |h_{CU1,1}|^2}{\sigma^2}, r_{1,N} = \frac{P_1 |h_{CU1,N}|^2}{\sigma^2}, \\ \beta_{1,2} = \frac{P_1 |h_{CR1}|^2}{\sigma^2}, \beta_{1,3} = \frac{P_2 |h_{RU2}|^2}{\sigma^2}.$$

x_2 的传输速率为

$$R_2(P_3, P_4) = \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+r_{2,1}), \dots, \frac{1}{3} \text{lb}(1+r_{2,M}), \right. \\ \left. \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{2,2}), \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{2,3}) \right\} \right\}. \quad (9)$$

其中:

$$r_{2,1} = \frac{P_3 |h_{CU3,1}|^2}{\sigma^2}, r_{2,M} = \frac{P_3 |h_{CU3,M}|^2}{\sigma^2}, \\ \beta_{2,2} = \frac{P_3 |h_{CR2}|^2}{\sigma^2}, \beta_{2,3} = \frac{P_4 |h_{RU4}|^2}{\sigma^2}.$$

上述认知无线网络中两个多播组的总传输速率是 Group1 和 Group2 传输速率总和, 它取决于认知无线电基站在阶段 1 和阶段 2 所采用的功率 P_1 和 P_3 , Relay1 和 Relay2 在阶段 2、阶段 3 采用的功率 P_2 、 P_4 。实际上, 考虑到绝大多数用户的满意度, 即当多播组中用户较多时用户可以获得更高传输速率, 本文提出了加权总传输速率, 如下所示:

$$R(P_1, P_2, P_3, P_4) = \frac{N+2}{N+M+4} R_1(P_1, P_2) + \\ \frac{M+2}{N+M+4} R_2(P_3, P_4). \quad (10)$$

第三部分将着重探讨功率分配方案, 以优化这两个多播组的总传输速率。

3 总传输速率的优化

本文研究允许认知无线网络与主用户同时传输数据的接入方案。主用户拥有对授权频段的优先使用权, 应当受到保护, 因此, 控制认知无线网络的功率是非常重要的。在主用户所受干扰处于可接受范围的前提下, 为求最大限度提高上述总传输速率, 本文提出了数据传输功率控制问题, 解决方法是在考虑实际限制的同时优化数据传输功率 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 。

考虑到各认知用户所受限制, 该优化问题所述如下:

$$P_1, P_2, P_3, P_4 \leq P_{\max}, \quad (11)$$

$$P_1 |h_{BP}|^2 \leq I, \quad (12)$$

$$P_2 |h_{R1P}|^2 + P_3 |h_{BP}|^2 \leq I, \quad (13)$$

$$P_4 |h_{R2P}|^2 \leq I, \quad (14)$$

$$P_1 \leq P_{CR}, \quad (15)$$

$$P_2 \leq P_{R1}, \quad (16)$$

$$P_3 \leq P_{CR}, \quad (17)$$

$$P_4 \leq P_{R2}, \quad (18)$$

$$P_1, P_2, P_3, P_4 \geq 0. \quad (19)$$

方程 (12) ~ (14) 得出了上述阶段 1、阶段 2 和

阶段 3 中的干扰限制,以防认知无线网络对主用户产生不利干扰,其中 I 是主用户接收端可容忍的干扰阈值。方程(15)~(18)分别给出了认知无线电基站、Relay1 和 Relay2 的数据传输峰值功率限制。

在实际中,第一和第三类认知用户一般比第二类认知用户拥有更好的性能,而多播组总传输速率取决于组内情况最差的认知用户^[5]。由此,本文简化了问题(11),并设第三类认知用户只含一个用户。简化问题后各多播组的传输速率所示如下:

$$R_1(P_1, P_2) = \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+r_{1,1}), \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{1,2}), \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{1,3}) \right\} \right\}, \quad (20)$$

$$R_2(P_3, P_4) = \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+r_{2,1}), \min \left\{ \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{2,2}), \frac{1}{3} \text{lb}(1+\beta_{2,3}) \right\} \right\}. \quad (21)$$

首先,讨论认知无线电基站在阶段 1 时的信号功率 P_1 。由式(8)可知, $\beta_{1,2}$ 和 $r_{1,1}$ 是 P_1 的单调递增函数,而 $\beta_{1,3}$ 和 R_2 不受 P_1 支配。因此,在满足限制条件(12)和(15)的情况下, P_1 应取最大,即

$$P_1^* = \min \left\{ P_{\text{CR}}, \frac{I}{|h_{\text{BP}}|^2} \right\}. \quad (22)$$

同理, P_4 的特点与 P_1 相似,在满足限制条件(14)和(18)的情况下,它也应取最大,即

$$P_4^* = \min \left\{ P_{\text{R2}}, \frac{I}{|h_{\text{R2P}}|^2} \right\}. \quad (23)$$

根据(13)及各限制条件,对于 P_2 和 P_3 的最优解将分为两种情况讨论。

$$(1) \beta_{1,2} \geq \beta_{1,3}, \gamma_{1,1} \geq \beta_{1,3}, \beta_{2,2} \geq \beta_{2,3}, \gamma_{2,1} \leq \beta_{2,3}$$

可得 $\gamma_{2,1} \leq \beta_{2,3} \leq \beta_{2,2}$ 。进而可知

$$\begin{aligned} P_1^* |h_{\text{CR1}}|^2 &\geq P_2^* |h_{\text{RU2}}|^2, P_1^* |h_{\text{CU1}}|^2 \geq P_2^* |h_{\text{RU2}}|^2, \\ P_3^* |h_{\text{CR2}}|^2 &\geq P_4^* |h_{\text{RU4}}|^2, P_3^* |h_{\text{CU3,1}}|^2 \leq P_4^* |h_{\text{RU4}}|^2. \end{aligned}$$

故问题(11)可简化为

$$R(P_1, P_2, P_3, P_4) = \frac{N+2}{3(N+M+4)} \text{lb}(1+\beta_{1,3}) + \frac{M+2}{3(N+M+4)} \text{lb}(1+\gamma_{2,1}). \quad (24)$$

由式(24)可知 P_2 、 P_3 是 R 的单调递增函数,结合方程(13)、(16)、(17)干扰阈值限制条件, P_2 和 P_3 应取最大,故 P_2 和 P_3 的最优值应为

$$P_2^* = \min \left\{ P_{\text{R1}}, \frac{P_1^* |h_{\text{CR1}}|^2}{|h_{\text{RU2}}|^2}, \frac{P_1^* |h_{\text{CU1,1}}|^2}{|h_{\text{RU2}}|^2}, \frac{I-P_3^* |h_{\text{BP}}|^2}{|h_{\text{RIP}}|^2} \right\}, \quad (25)$$

$$P_3^* = \min \left\{ P_{\text{CR}}, \frac{P_4^* |h_{\text{RU4}}|^2}{|h_{\text{CR2}}|^2}, \frac{P_4^* |h_{\text{RU4}}|^2}{|h_{\text{CU3,1}}|^2}, \frac{I-P_2^* |h_{\text{RIP}}|^2}{|h_{\text{BP}}|^2} \right\}. \quad (26)$$

$$(2) \beta_{1,2} \geq \beta_{1,3}, \gamma_{1,1} \leq \beta_{1,3}, \beta_{2,2} \geq \beta_{2,3}, \gamma_{2,1} \leq \beta_{2,3}$$

得出 $\gamma_{2,1} \leq \beta_{2,3} \leq \beta_{2,2}$, $\gamma_{1,1} \leq \beta_{1,3} \leq \beta_{1,2}$ 。同理,问题(11)可简化为

$$R(P_1, P_2, P_3, P_4) = \frac{N+2}{3(N+M+4)} \text{lb}(1+\gamma_{1,1}) + \frac{M+2}{3(N+M+4)} \text{lb}(1+\gamma_{2,1}). \quad (27)$$

由式(27)可知 P_3 是 R 的单调递增函数,因此,只要满足相关干扰阈值限制条件, P_3 应取最大,故 P_2 和 P_3 的最优值应为

$$P_2^* = \frac{P_1^* |h_{\text{CU1,1}}|^2}{|h_{\text{RU2}}|^2}, \quad (28)$$

$$P_3^* = \min \left\{ P_{\text{CR}}, \frac{I-P_2^* |h_{\text{RIP}}|^2}{|h_{\text{BP}}|^2} \right\}. \quad (29)$$

实际上,根据各用户所受限制可将问题分解成 16 种情况,限于篇幅,我们只讨论上述两种情况,其他情况与其类似。

本文仅描述了两个多播组参与协作通信,然而,如图 2 所示,实际中可能有 3 个及 3 个以上多播组参与协作通信,此时通信效率更高。当有 3 个多播组参与协作通信时,完成数据传输需要 4 个阶段,此时无线网络结构与数据传输方案如下所示:

(1)在阶段 1 中,认知无线电基站将数据 x_1 传输至 Group1, CU1, n 和 Relay1 接收 x_1 ,同时, Group2 中的 Relay2 也接收该数据。

(2)在阶段 2, Relay1 将数据发送给 CU2,而认知无线电基站将数据 x_2 传输给 Group2, CU3, m 和 Relay2, Relay3 均接收数据 x_2 ,与此同时, Relay2 从 Relay1 接收数据 x_1 。因此,在本阶段中 Relay2 可使用在阶段 1 中所获有关 x_1 的信息来撤消从 Relay1 接收干扰信号。

(3)在阶段 3 中, Relay2 将数据 x_2 发送给 CU4,而认知无线电基站将信号 x_3 传输给 Group3, CU5, l 和 Relay3 均接收信号 x_3 ,与此同时, Relay3 还从 Relay2 接收信号 x_2 。因此,在本阶段中 Relay3 可使用其在阶段 1 所获有关 x_2 的信息撤消从 Relay2 接收干扰信号,而只接收 x_3 。

(4)在阶段 4, Relay3 将信号 x_3 发送给 CU6,从而提高系统吞吐量。

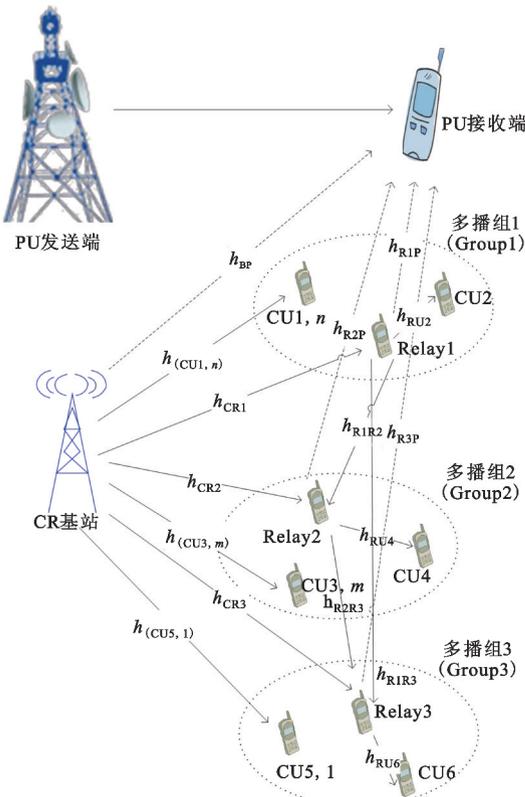


图2 多播组认知无线网络结构(3个多播组)
Fig.2 The structure of a MGMC CR network
(3 multicast groups as a group)

从上述讨论可知,当 M 个多播组参与协同通信时,完成数据传输需要 $M+1$ 个阶段。当使用传统互不相干的多播组时,完成数据传输需要 $2M$ 个阶段,较新传输机制繁琐很多。

4 仿真与分析

本节主要讨论功率优化分配方案的性能。假定所有信道均为瑞利衰落信道,且信道增益在传输各个阶段均恒定不变。路径增益服从瑞利分布,并取决于信号发射端与信号接收端之间的距离,表示为

$$H = \sqrt{\varphi} \varepsilon. \tag{30}$$

式中: φ 代表路径损耗,它与传输距离成反比,并含一个路径损耗指数 α ,即 $\varphi = d^{-\alpha}$; ε 为单位方差瑞利分布的随机变量。假定主用户发射端、主用户接收端、认知无线电基站、CU1,1、CU2、CU3,1 和 CU4 的位置固定,它们的坐标分别是(0,1)、(2,1)、(0,0)、(1,0)、(3,0)、(1,-1)和(3,-1);另假定 Relay1 和 Relay2 的坐标分别是(2,0)和(2,-1)。基本仿真参数参考文献[10]设置如下:将 A 组峰值功率限制设为 $P_{CR} = 8, P_{R1} = P_{R2} = 8$; B 组峰值功率限制设为

$P_{CR} = 10, P_{R1} = P_{R2} = 10$,考虑实际限制在对比 Group1、Group2 传输速率的同时,对比 A 组、B 组峰值功率增加对多播组总传输速率的影响;另外,将干扰功率限制设为 $I=0$ 每个信道的噪声功率为 $\sigma^2 = 1$,路径损耗指数为 $\alpha=4$ 。

图3表示功率分配方案下,当 Group2 用户人数不同且 $N=1$ 时,Group1 和 Group2 传输速率的对比情况。从图中可发现,组2的传输速率随用户人数的增加而上升,而组1的情况则相反。这是因为,本文为每个多播组均设置了加权因子,而加权因子会随该组用户人数的增加而减小,验证了在功率一定的情况下此方式可为更多用户提供更高的传输速率。从图3可知,当 $M=6$ 时组2传输速率达到最大值,实现最优化用户服务质量。

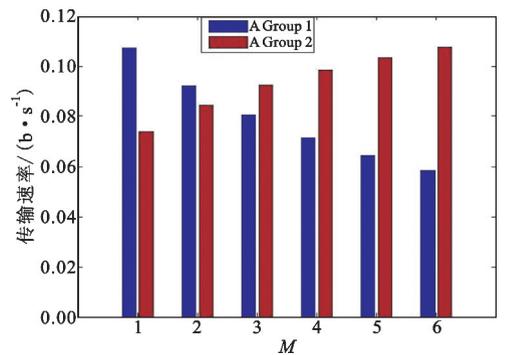


图3 M 值不同且 $N=1$ 时组1和组2传输速率比较
Fig.3 Rate comparison between Group 1 and Group 2 for different M when $N=1$

图4所示的多播组总传输速率与图3相对应,从图中可以发现总传输速率随 M 值的增加而降低,峰值功率增加时总传输速率增加。本文考虑到了多播组的优先级别,多播组用户增加时总传输速率会有所下降,此时可以通过提高峰值功率来缓解这种下降趋势。

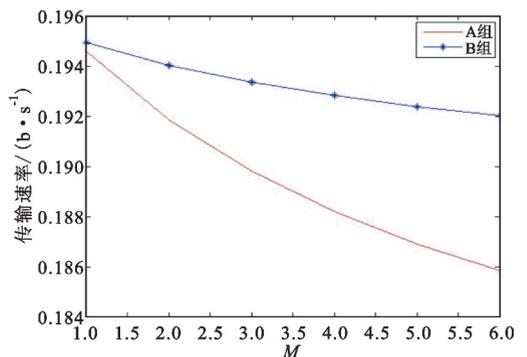


图4 M 值不同、 $N=1$ 且峰值功率不同时总传输速率比较
Fig.4 Sum rate of the system for different M and peak power when $N=1$

5 结束语

本文介绍了一种基于组内组间协作传输的多播组新机制,将信号传输过程分为 3 个时隙,进一步探讨该机制下资源优化配置。首先讨论了两个多播组参与协作通信的情况,理论分析得出功率分配方案,提出多播组用户较多时的加权传输速率,为更多的用户提供更好的服务。仿真结果表明,基于组内组间协作传输的多播组认知无线网络,在功率分配方案下,可以使更多用户拥有更高的传输速率,当功率限制时,通过加权因子,可使主用户保持良好的用户性能。另外,本文还描述了 3 个及 3 个以上多播组参与协同通信时的传输方案。下一步将继续深入研究认知无线网络在数据传感不完善情况下的传输机制以及各用户的位置对总传输速率的影响。

参考文献:

- [1] VELLA J M, ZAMMIT S. A survey of multicasting over wireless access networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 15(2): 718-753.
- [2] GRUBER M, ZELLER D. Multimedia broadcast multicast service: new transmission schemes and related challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(12): 176-181.
- [3] 荣玫. 认知无线电网络子空间映射频谱共享[J]. 电讯技术, 2015, 55(8): 829-835.
RONG Mei. Subspace projected spectrum sharing in cognitive radio networks [J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(8): 829-835. (in Chinese)
- [4] TAWK Y, COSTANTINE J, CHRISTODOULOU C G. Cognitive radio and antenna functionalities: tutorial [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56(1): 231-243.
- [5] SUH C, MO J. Resource allocation for multicast services in multicarrier wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 7(1): 27-31.
- [6] SAMI M, NOORDIN N, KHABAZIA M, et al. A survey and taxonomy on medium access control strategies for cooperative communication in wireless networks: research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2493-2521.
- [7] AFOLABI R O, DADLANI A, KIM K. Multicast scheduling and resource allocation algorithms for OFDMA-based systems: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 240-254.
- [8] LI Y, PENG Q, WANG X. Multicast capacity with max-min fairness for heterogeneous networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(2): 622-635.

- [9] HADEF M, APOSTOLARAS A, O'REILLY J, et al. Cooperative multicast resource allocation strategy[C]//Proceedings of 2014 IEEE Wireless Communication and Networking Conference. Istanbul: IEEE, 2014: 2769-2774.
- [10] YANG L, CHEN J, ZHANG H, et al. Cooperative wireless multicast: performance analysis and time allocation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(7): 5810-5819.
- [11] HAO W, YANG S, NING B. Optimal resource allocation for CR networks with multi-group multicast based on inter-group and inner-group cooperation transmission [C]//Proceedings of 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Boston, MA: IEEE, 2015: 1-4.

作者简介:



白露露(1990—),女,河南商丘人,2014 年于郑州大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为认知无线电资源优化分配;

SHI Lulu was born in Shangqiu, Henan Province, in 1990. She received the B. S. degree from Zhengzhou University in 2014. She is now a graduate student. Her research concerns resource allocation and optimization in cognitive radio networks.

Email: aprilshi@foxmail.com

杨守义(1965—),男,河南郑州人,2003 年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信系统、认知无线电、通信信号处理;

YANG Shouyi was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1965. He received the Ph. D. degree in 2003. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns wireless communication systems, cognitive radio, communication signal processing, etc.

Email: iesyyang@zzu.edu.cn

张瑞哲(1989—),男,河南郑州人,2014 年于英国曼彻斯特大学获硕士学位,现为郑州大学信息工程学院博士研究生,主要研究方向为认知无线电资源优化分配;

ZHANG Ruizhe was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1989. He received the M. S. degree from the University of Manchester, UK, in 2014. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns resource allocation and optimization in cognitive radio networks.

Email: iezhangruizhe@gs.zzu.edu.cn

李燕(1989—),女,河南郑州人,现为郑州大学信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为认知无线电资源分配。

LI Yan was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns resource allocation in cognitive radio networks.

Email: liyanzzu@foxmail.com