

# 认知无线网络中基于包调度算法的主动频谱切换

马 彬<sup>1,2</sup>, 廖晓峰<sup>1</sup>, 谢显中<sup>2</sup>

(1. 重庆大学计算机学院 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;  
2. 重庆邮电大学计算机学院 重庆市计算机网络与通信技术重点实验室, 重庆 400065)

**摘要:** 认知无线网络中, 主用户出现在自己的授权频段, 但被次用户占用, 此时次用户进行频谱切换. 主动频谱切换机制是一种可以提高网络的带宽利用率, 同时降低丢包率的方法. 基于一个有效的包调度算法, 提出一个主动频谱切换机制, 以期减少频谱切换发生时的不可用信道. 该包调度算法有效地集成了两个算法: 频谱空洞填充算法和包迁移算法, 来减少丢包率和带宽碎片. 实验仿真结果验证了该主动频谱切换机制的有效性.

**关键词:** 认知无线网络; 频谱切换; 包调度

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1628-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.028

## Proactive Spectrum Handover Based on Packet Scheduling Algorithm in Cognitive Radio Networks

MA Bin<sup>1,2</sup>, LIAO Xiao-feng<sup>1</sup>, XIE Xian-zhong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communication Technology of China, College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In cognitive radio networks, spectrum handover occurs when a secondary user changes frequency due to the appearance of a primary user. Proactive spectrum handover may result in aggregated bandwidth utilization performance and degraded packet loss probability. Here, we develop a proactive spectrum handover mechanism by using an efficient packet scheduling algorithm, to reduce unusable channel. It effectively integrates two algorithms: spectrum hole filling algorithm and packet migration algorithm, to minimize packet loss probability and reduce the bandwidth fragment. The efficiency of the mechanism is validated by simulation results.

**Key words:** cognitive radio networks; spectrum handover; packet scheduling

## 1 引言

认知无线电 (CR)<sup>[1~4]</sup>是实现动态频谱接入的一项关键技术,使得未授权用户(即次级用户, SU)自适应地调整操作参数,采用机会使用模式,利用被授权用户(主用户, PU)空闲的频谱来进行数据传输. 认知无线网络最重要的一个特征就是频谱移动. 频谱移动引起的新切换叫做频谱切换(SHO),它是指一个次级用户在未授权频段上不可用时,次级用户需要立即暂停正在进行的传输,让出信道给 PU 授权用户,并选择一个新的可用信道让其继续传输的过程. 然而,根据主用户或者次级用户出现在信道上的随机性,要想获得快速、无缝的切换,以期减少包丢失性能,同时,最大化带宽利用效

率,这是一个极富挑战性的研究工作. 在认知无线网络研究中,已引起学术界的关注.

目前,仅有少量研究讨论了频谱切换问题. 现存的一些优秀研究工作主要被分成了两类方法. 一种方法是<sup>[5,6]</sup>次级用户实时监测到主用户的出现,进行频谱转换和射频前端重构的方法,称为被动频谱切换机制(简称 RSHO). 在这种方法中,因为存在不可忽略的实时信道检测时间和重新配置切换参数的时延,从而不可避免引起主用户和次级用户数据传输不定时长的中断. 另一种方法<sup>[7~10]</sup>是次级用户能够利用主用户占用信道的历史统计信息,预估信道未来的使用状态,进而预先完成频谱转换和射频前端重构的方法,称为主动频谱切换(简称 PSHO). 这种方法可以显著降低次级用户的检测

和传输时延, 保证数据传输的连续性和一致性, 从而提高系统的传输性能。

相比被动频谱切换机制, 由于主动频谱切换没有实时的频谱检测时间, 主动频谱切换机制能够减少切换延迟。此外, PSHO 机制更易让发送端和接收端得到理论上的连续数据传输, 且更易保证数据的一致性。在动态频谱接入中, 利用信道的历史占用数据, 许多预测模型被提出<sup>[11, 12]</sup>。然而, 在先前的研究中, 当没有空闲信道分配给次级用户传输时, 等待切换的次级用户数据包只能在当前繁忙信道等待, 直到存在空闲信道为止。然而, 信道中存在大量的带宽碎片没被充分利用。

针对上述问题, 本文提出了一个考虑包调度算法的主动频谱切换机制, 其包括了包填充和包迁移, 该包调度算法对于包丢失概率 (PLP, 即数据包最终被丢弃的概率) 和带宽利用性能的改善起到主要作用。其基本思路是: 一个新到数据包或者等待切换的数据包, 当找不到任何空闲信道时, 系统就迁移部分已有信道上的次级用户数据包, 使得存在空闲信道; 否则就重复其他信道迁移或频谱空洞填充或等待信道进程; 最后, 对于主用户业务负载量比较大, 信道已经比较繁忙时, 上述方法也仍然很难找到空闲信道, 系统将丢弃部分次级用户的数据包。本文的主要贡献可以概括如下:

(1) 本文首次将数据包调度算法引入频谱切换研究中。将所提出的频谱空洞填充和包迁移算法相结合来提高频谱切换的可用信道数。通过把上述两种算法有效的结合到频谱切换中, 降低了次级用户的数据丢包率, 增强了信道的有效利用率, 进而提高了系统的切换性能。据我所知, 把包迁移集成到主动频谱切换机制研究中, 还未见报道。

(2) 在首次使用二维平面坐标来刻画主用户和次级用户的信道利用情况, 并利用二维平面坐标来分析和建模了频谱空洞填充算法和包迁移算法。通过采用平衡二叉查找树来组织信道信息, 使得包含两种算法的包调度算法的计算复杂度小于等于  $O((2n)\log n)$ 。

## 2 基于二维坐标系的包调度算法

### 2.1 问题描述与建模

基于平面坐标系, 本文把频谱空洞映射成二维坐标系中的一个点, 其中  $x$  坐标和  $y$  坐标分别代表空洞的开始时刻和结束时刻。换句话说, 坐标点  $(s_i, e_i)$  表示第  $i$  信道上一个频谱空洞。相似的, 一个新数据包 (新数据包可以是信道中被中断传输等待切换的数据包) 也能表示成一个坐标点  $(T_1, T_2)$ , 其中  $T_1$  表示新数据包的到达开始时刻,  $T_2$  表示新数据包的结束时刻, 且二者之间存在  $T_2 = T_1 + L_{packet}$  的关系 ( $L_{packet}$  表示新到数据包的传输时间长度)。

由于频谱空洞和数据包的结束时刻不可能小于其开始时刻, 即位于图 1 中线  $s = e$  下 (即  $s > e$ ) 的区域是一个绝对不可调度区域, 空洞坐标点绝对不可能落入这个区域, 称这个区域为第 V 分区。同时, 新数据包  $(T_1, T_2)$  的  $T_1$  和  $T_2$  坐标线把  $s = e$  上 (即  $s < e$ ) 的区域分成了四个子区域 I、II、III 和 IV, 频谱空洞和数据包的坐标点均有可能落入这些区域, 称这些区域为可调度区域。

通过对信道历史状态进行统计分析, 预测出图 2 所示的信道状态信息图。从图可以清楚的看出新数据包前后的信道占用情况, 系统中共有 4 个传输信道, 分别是信道 1 ~ 信道 4。图中给出了总计 13 个数据包在传输信道中占用情况。把这些数据包和新数据包按照开始时刻和结束时刻在图 1 中画出坐标点, 就可得出图 1。对应于图 2 的坐标点分布如图 1 所示。可以得出, 位于区域 IV 中的空洞点可以满足新数据包需求 (即空洞的开始时刻小于等于新数据包开始时刻, 结束时刻大于等于新数据包结束时刻), 可作为新数据包的切换候选频谱空洞。然而 I、II、III 所代表的区域均是空洞长度太短, 无法满足新数据包需求, 不能用于频谱切换候选空洞, 但这三个区域可在一定调度算法的辅助下, 让其变得可用, 因此把这三个区域称为条件调度区域。

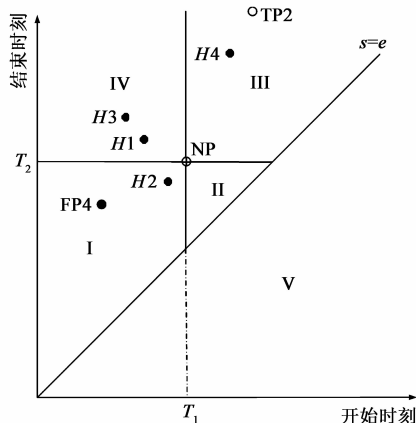


图1 对应于图2的点映射平面

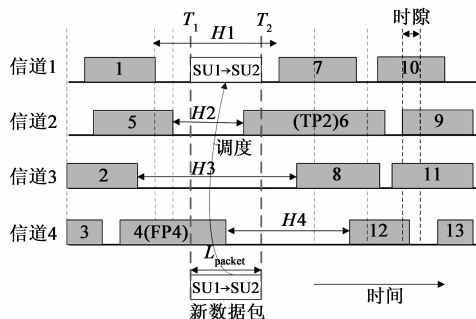


图2 认知无线网络中一个信道实例

根据新数据包的到达时刻和结束时刻,以及和信道传输数据包之间的重叠关系,可以把信道上的传输数据包分成两类:尾重叠包(tail-overlapping packet,简称:TP)和首重叠包(font-overlapping packet,简称:FP).尾重叠包是指信道上的数据包和新数据包的尾部重叠,即新数据包的结束时刻小于信道数据包的开始时刻.首重叠包是指信道上的数据包和新数据包的首部重叠,即新数据包的开始时刻小于信道数据包的结束时刻.从而在图1中,区域I的数据包全部是尾重叠包,区域III的数据包全部是首重叠包,而区域II中的数据包全部是和新数据包全部重叠;

在图1中,用实心点·描述频谱空洞坐标点, $H$ 是空洞的简称, $H$ 后的序号是信道序号,表示相应序号信道上的空洞信息;十字空点描述新数据包坐标点,NP是新数据包的简称;空心点·描述尾重叠包坐标点,TP是尾重叠包的简称,TP后的序号是信道序号,表示相应序号信道上的尾重叠包信息;带阴影的空心点描述首重叠包坐标点,FP是首重叠包的简称,FP后的序号是信道序号,表示相应序号信道上的首重叠包信息;显然图1中的坐标点分布是与新数据包NP密切相关.新数据包NP的到达时刻和包长度不同,就会形成不同的点分布,从而带来不同的调度效果.从图1的区域IV中,信道1和信道3存在可供切换候选的频谱空洞 $H1$ 和 $H3$ ,所以信道1和信道3均可作为切换候选信道.

现有的主动频谱切换机制均可以通过这个二维坐标系来建模切换过程.其实就是在二维坐标系中寻找落入指定区域IV的坐标点.如:参考文献8和9中的切换机制就是在区域IV中寻找空洞点,以期把新数据包调度切换到相应信道的空洞中.但当在区域IV中不存在这样的空洞点时,这些论文就只能在当前信道等待或者丢弃数据包.通过数据包调度算法,怎样有效的把空洞点从条件调度区调整到新的绝对可调度区域IV中,是本文关注的主要问题.

## 2.2 频谱空洞填充算法(HF算法)

频谱空洞填充算法的主要思想就是通过选择最近可用的未占用信道给新数据包切换,从而减少频谱空洞,提高信道的利用率.当给出到达时刻为 $T_1$ ,长度为 $L_{\text{packet}}$ 的新数据包,调度器首先检查在 $T_1$ 时刻有无可供利用的信道,如果存在至少一个信道中的空洞可以满足新数据包的切换请求,就选择一个最近可以使用的信道来满足新数据包,进而,基于空洞填充的算法被提出.显然空洞填充算法可以有效利用空洞来调度数据包到其他信道,同时一定程度减少了信道的带宽碎片.当前,空洞填充算法被广泛的应用到已有算法中<sup>[8,9]</sup>.

对应图2的点映射平面如图1所示.信道1和信道3是可用候选信道,因为其上的空洞能够被用来调度新数据包.但是信道1是最近可用的信道,所以新到数据包被调度到信道1来完成频谱切换.

## 2.3 包迁移算法(PM算法)

在某些情况下仅仅是空洞填充算法来减少带宽碎片显然是不够的.如图3所示的信道占用情况,新数据包不能找到任何合适的信道来切换,但是信道中却存在很多频谱空洞适合调度.在认知无线网络中,争用方法往往可以从时域(如文献8和9采用等待策略)和空域两个方面研究.因而在切换过程中,仅仅考虑使用包填充算法或等待策略是不够的.必须在空域考虑相应的策略来增强切换的效率.

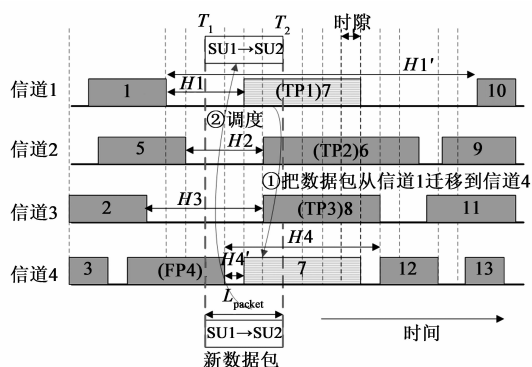


图3 包迁移算法成功调度的情景

基于上面的思路,包迁移算法被提出.认知基站通过迁移次用户正在传输的部分数据包到别的信道,进而在当前信道上形成更长的空洞,利用这个空洞就可以对新数据包进行频谱切换.如图3所示.当新数据包到达系统时,没有适合的可用信道,但是通过迁移信道1中的7号数据包到信道4,这样信道1就存在一个可以容纳新数据包的空洞,进而采用包填充算法把新数据包调度到信道1的空洞,以完成一次频谱切换.

对应图3的点映射平面如图4所示.系统中存在4个信道和13个数据包,其中数据包有主用户的,也有次用户,但是只有次用户的数据包可以被认知基站迁移.算法根据次用户TP1尾重叠包的开始和结束时刻对坐标系进行重新划分区域,并在区域IV'中寻找是否存在空洞坐标点.通过搜索操作找到 $H4$ 落入区域IV'中,因此调度器迁移次用户的TP1到信道4.经过迁移操作后,信道1和信道4中的空洞信息均会被调整到新的坐标位置,比如图4中的 $H1'$ 和 $H4'$ .进而,调度器再次执行包填充算法.综上,在图4中,除了空洞 $H4$ 以外,没有其他空洞点落入由TP1建立的新分区IV'中.也就是说,在图3中的7号数据包仅能被迁移到信道4中,同时,利用包填充算法,新数据包被调度到信道1中来完

成频谱切换.

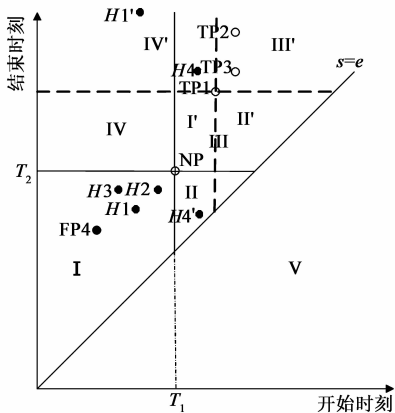


图4 对应于图3的点映射平面及包迁移操作

### 2.4 基于 HF 和 PM 算法的包调度算法

在图 5 中,包调度算法通过下面的步骤调度新到数据包.当没有频谱空洞适合新到数据包时,调度器迁移次级用户的 TP 或者 FP 数据包到其他信道.假如迁移失败,数据包就被要求等待一个随机时间,然后重复上述过程.根据这个处理过程,算法被分成了两个阶段:空洞填充和包迁移.在图 1 和图 4 中分别描述了这两个阶段相应的二维坐标映射点分布示意图.

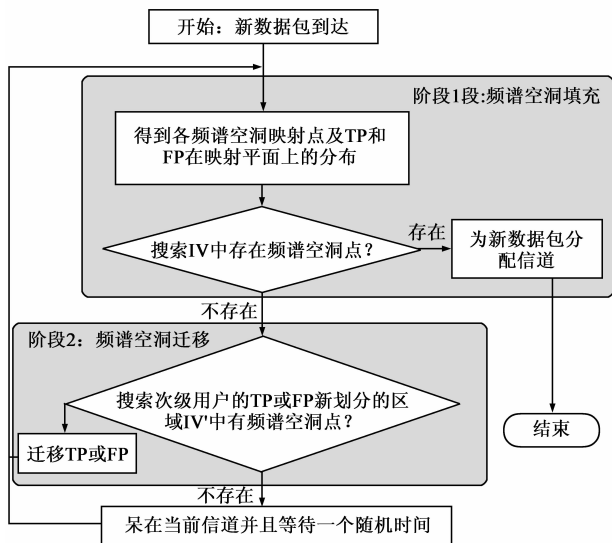


图5 包调度算法的流程图

阶段 1 分成两个子过程:生成映射点分布和搜索区域操作.生成映射点分布得到各频谱空洞映射点及 TP 和 FP 在映射平面上的分布;搜索区域 IV 是否有频谱空洞点,如果有,则使用空洞填充算法,以最近信道选择原则,从中选择一个空洞  $H_i$  ( $i$  表示信道的序号) 分配给新数据包.

假如第 1 阶段选择失败,则进行第 2 阶段的搜索和迁移操作.搜索是在次级用户的重叠包  $FP_i$  或  $TP_i$  坐标

线重新划分的区域 IV' 中进行.若搜索到一个频谱空洞映射点  $H_j$  ( $i \neq j$ ),则将  $FP_i$  或  $TP_i$  数据包迁移到信道  $j$  上.通过迁移操作,频谱空洞映射点的区域归属得以重新调整,然后返回第 1 阶段继续执行.当然,第 2 阶段也失败的话,次级用户将保留数据包在当前信道,等待一个随机时长,然后继续从第 1 阶段开始搜索和选择可用信道.

在该算法中,所涉及到的信息较多.假如包调度算法没有有效的组织这些信息,上述两阶段的最坏时间复杂度将达到  $O(n^3)$ ,其中  $n$  表示信道的总数.因此,设计一个有效的数据结构来组织这些信息,以降低前面两个阶段的操作时间复杂度尤为重要.从算法的流程中可以发现,算法的主要开销在搜索操作,所以选取平衡二叉查找树组织数据结构,可以有效的降低算法的时间复杂度.搜索操作采用顺序搜索到平衡二叉树搜索,它的时间复杂度将从  $O(n)$  降低到  $O(\log n)$ ,这样整个算法将大幅度地降低为  $O((2n)\log n)$ .因此,本文所提的包调度算法在一定数据结构组织下,其计算复杂度较低,同时还比现有算法具备更好的带宽利用性能.

### 3 基于包调度的主动频谱切换机制

在该机制中,频谱切换发生在两种情况,其一是主用户被预测出现在自己的授权频段,而该频段正被次级用户使用;其二是一个次级用户新数据包被生成,并发出传输请求.该机制主要包括 5 个关键步骤.

(1)首先,假设次级用户 1 和次级用户 2 在信道 5 上通信.当主用户被预测到会出现在信道 5 上,且次级用户 1 能够准确检测到主用户的出现,次级用户必须进行频谱切换过程.

(2)其次,基于如图 5 所示的包调度算法,次级用户 1 和次级用户 2 能够继续其未完成的传输数据.当其他信道还有频谱空洞存在,次级用户均可使用频谱空洞填充算法,重启各自的未完成传输数据(如图 1 和图 2 所示),频谱切换过程结束.

(3)新数据包到来后,系统中所有信道均处于繁忙状态,但是其中一个信道处于“动态空闲”状态,即可通过迁移信道中某一次级用户的数据包到其他信道(该信道相对于新数据包为繁忙不可用,但是相对正在传输的其他次级用户数据包却可以看作空闲状态),使该信道变为空闲状态(参见图 3 和图 4 中的步骤①).进而,返回第 2)步,继续采用空洞填充算法找到动态空闲信道,切换新数据包到该信道进行传输(参见图 3 和图 4 的步骤②).

(4)当系统中所有的信道均处于繁忙状态,也没有信道处于“动态空闲”状态,次级用户的新数据包只能

等待一个随机时间(如果是被中断传输的次级用户数据包,就在当前信道上等待),利用前述信道调度算法重启搜索和迁移操作,即返回第(2)步顺序执行。

(5)在整个系统中,一个次级用户数据包可能被这样中断多次,上述频谱切换过程可能被执行多次。同时,也存在多个次级用户数据包,上述频谱切换过程也会被多次执行。

注意,在频谱切换过程中,当存在多个候选目标信道时,目标信道的选择问题已经有多种不同的目标信道选择方法。本文采用了最近可用原则来选择目标信道进行频谱切换。

#### 4 实验仿真结果及其分析

基于 Matlab 实验仿真环境,构建了一个认知无线网络仿真环境,通过实验来评估本文提出的主动频谱切换机制。实验中使用了包丢失概率和带宽利用率两个性能指标,比较验证了 PSHO 机制和参考文献 8 和 9 中的方法。为了简单起见,建立一个带认知基站的认知无线网络仿真环境。本文关注的焦点是次级用户之间链路中的调度性能,所以假设物理链路由 8 个传输信道和 1 个通用控制信道组成,每信道速率为 1Mbps。假定次级用户的到达过程服从概率为  $\lambda$  泊松过程,数据包的长度服从以平均长度为  $L$  的指数分布。为简单起见,所有的数据包均具有相同的初始偏移时间  $\tau$ ,其中要求  $L/\tau$  大于传输信道和控制信道数之比,并假定数据包丢失只是传输信道拥塞造成。

在设定的业务负载条件下,本文比较了上述的两个性能指标。图 6 所示为不同算法的全局包丢失概率。显然,全局丢包概率随着业务负载量的增加而增加,这是因为随着业务负载量的增加,信道链路中的数据量也会增加,要找一个可用信道比较困难。但是,总体来看,本文所提的算法比王氏算法<sup>[8]</sup>和宋氏算法<sup>[9]</sup>更好。而且这个趋势随着业务负载量的增加愈发明显。分析其原因,主要是因为本文提出的方法中集成了包迁移算法,能够减少信道中的空洞碎片,并能整理出更大的频谱空洞。对新数据包或待切换数据包而言,就更容易找到合适的频谱来切换,这样就可提高成功切换的机会。

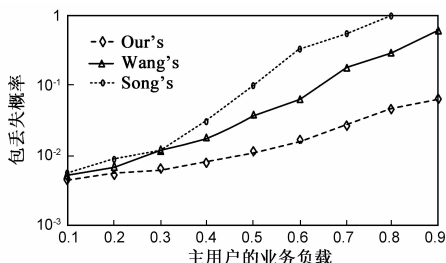


图6 不同算法的全局包丢失概率比较( $L/\tau=10$ )

为了评估方法的带宽利用性能,可以利用传输效率参数  $\eta_{trans}$  和带宽碎片参数  $\eta_{frag}$ ,其可按式(1)分别测量得到:

$$\begin{cases} \eta_{trans} = \frac{L_{packet}}{L_{packet} + L_{hole}} \\ \eta_{frag} = 1 - \eta_{trans} \end{cases} \quad (1)$$

这里,使用带宽碎片参数  $\eta_{frag}$  来评估算法的有效性。基于式(1)的定义,  $\eta_{frag}$  参数就可采用下式来定义:

$$\eta_{frag} = \frac{nT - \sum_m L_{packet_m}}{nT} \quad (2)$$

其中  $n$  表示传输信道的数目,  $m$  表示在采样区间  $T$  内链路上正在传输的数据包数目。式(2)的  $\eta_{frag}$  参数从时间轴上描述了传输信道资源的浪费程度。在实验中,假定采样时间区间为  $L/\tau = T/L = 10$  倍数据包长度。同样的,在不同主用户业务负载条件下,比较了三种算法的带宽碎片率。从仿真结果可以看出,在低业务负载(负载小于 0.4)下,三个算法的性能比较接近。但是当主用户业务负载量超过 0.5,三种算法的带宽碎片比率上的差异就越来越明显。如图 7 所示,从整体上看,本文提出的算法在带宽碎片比率方面比其他两个算法增长的缓慢。也就是说,在相同条件下,本文提出的主动频谱切换机制,可以安排更多的数据包到传输信道。分析可知包调度算法来调整频谱空洞的分布,进而减少了信道中带宽碎片比率。在图 3 所示的情况下,假如没有采用包调度算法,一些频谱空洞将被浪费,甚至信道中存在大量的频谱空洞也如此。从图 7 中三条曲线的明显差异,分析可知 PSHO 机制中的包迁移算法对带宽碎片比率的改善具有重要作用。

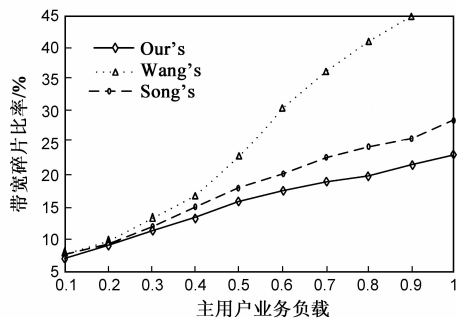


图7 不同算法的带宽碎片率比较( $L/\tau=10$ )

综上所述,本文提出的 PSHO 机制中集成了频谱空洞填充和包迁移,这两个操作可以达到减少信道带宽碎片的目的;减少了带宽碎片,也就可以让更多的次级用户数据包找到合适的频谱空洞来完成切换,进而降低系统全局数据包的丢失概率。

## 5 结束语

本文基于频谱空洞填充算法和包迁移算法, 提出了一个全新的包调度算法, 通过简单分析可知该算法的时间复杂度可控. 在包调度算法基础之上, 我们发展了一个主动频谱切换机制来减少信道中的带宽碎片, 进而减少不可用信道. 该机制达到两个目的: 减少带宽碎片, 同时提高信道的利用率; 最大限度地减少次级用户数据包的全局丢失概率. 此外, 还验证了本方法对性能的改善作用. 同时, 假如频谱空洞和数据包采用平衡二叉查找树的组织结构, 包调度算法的计算复杂度也会比较低.

### 参考文献

- [1] Xianzhong X, et al. Spectrum handoff decision algorithm with dynamic weights in cognitive radio networks[A]. Proc of 2011 Global Mobile Congress[C]. Shanghai: GMC, 2011. 1 - 6.
- [2] Xianzhong, X, et al. Improving physical layer multicast by cooperative communications in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 58 - 63.
- [3] 朱佳, 郑宝玉, 邹玉龙. 基于最佳中继选择的协作频谱感知方案研究[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 92 - 98.  
Zhu Jia, et al. Cooperative spectrum sensing in multiuser cognitive radio networks with best relay selection[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 92 - 98. (in Chinese)
- [4] 王钦辉, 叶保留, 田宇等. 认知无线网络中频谱分配算法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 147 - 154.  
Wang Qin-hui, et al. Survey on spectrum allocation algorithms for cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 147 - 154. (in Chinese)
- [5] Y Zhang. Spectrum handoff in cognitive radio networks: Opportunistic and negotiated situations[A]. Proc of 2009 IEEE International Conference on Communications [C]. Dresden: IEEE ICC, 2009. 1 - 6.
- [6] D. Qu, et al. Detection of non-contiguous OFDM symbols for cognitive radio systems without out-of-band spectrum synchronization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 693 - 701.

- [7] C. Song, et al. Intelligent dynamic spectrum access assisted by channel usage prediction[A]. Proc of 2010 IEEE Conference on Computer Communications Workshops [C]. San Diego, CA: IEEE INFOCOM, 2010. 1 - 6.
- [8] Wang, L, et al. Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(9): 1499 - 1513.
- [9] Song Y, et al. ProSpect: A proactive spectrum handoff framework for cognitive radio Ad Hoc networks without common control channel[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(7): 1127 - 1139.
- [10] Q. Zhao, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in Ad Hoc networks: A POMDP framework [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(3): 589 - 600.
- [11] L. Yang, et al. Proactive channel access in dynamic spectrum networks [J]. Physical Communication, 2008, 1(2): 103 - 111.
- [12] S. Yarkan, et al. Binary time series approach to spectrum prediction for cognitive radio [A]. Proc. of 66th IEEE Vehicular Technology Conference [C] Baltimore, MD: IEEE VTC, 2007. 1563 - 1567.

### 作者简介



马 彬 男, 1978 年出生, 四川人. 博士生, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为认知无线网络、异构无线网络、不确定智能算法等.  
E-mail: mab\_cqupt@sina.com



廖晓峰 男, 1964 年出生, 四川人. 重庆大学教授, 博士生导师, 长江学者. 主要研究方向为人工神经网络、混沌和无线网络等.