

一种基于流水线架构的协作式频谱感知方法

高峰 袁巍 刘威 程文青 王殊

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 协作式频谱感知在提高认知无线网络频谱感知性能的同时,也带来额外的通信开销。针对此问题,提出了一种基于流水线架构的协作式频谱感知方法,并给出了与之相配合的快速数据融合算法。该方法采用流水线架构来调度各参与感知节点的频谱测量操作和结果回传操作,使得用于感知结果回传的时间开销也可用于频谱测量,从而拓宽了频谱测量的时间窗口。快速数据融合算法通过多线程序贯似然比检测技术消除了在检测过程中由于频谱状态变化而产生的不良影响,进一步提高了协作感知效率。

关键词 认知无线电,频谱感知,序贯似然比检测

中图分类号 TN915.65 **文献标识码** A

Pipelined Cooperative Spectrum Sensing Method in Cognitive Radio Networks

GAO Feng YUAN Wei LIU Wei CHENG Wen-qing WANG Shu

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract It has been shown that cooperation can improve the performance of spectrum sensing effectively. However, Cooperation also introduces additional overheads. To deal with this problem, we proposed a pipelined spectrum sensing framework, in which secondary users conduct spectrum sensing and results reporting in a pipelined way, and the time consumed by reporting can be also utilized for sensing, resulting in an improved time efficiency and a much wider observing window for spectrum sensing. Besides, we also presented a multi-threaded sequential probability ratio test method (MTSPRT), which is very suitable for the pipelined framework as the data fusion technique. Simulation results indicate that our pipelined sensing scheme incorporating with MTSPRT can significantly improve the performance of cooperative spectrum sensing.

Keywords Cognitive radio, Spectrum sensing, Sequential probability ratio test

认知无线电(Cognitive Radio, CR)^[1]被认为是实现动态频谱接入策略(Dynamic Spectrum Access, DSA)的关键技术,它允许次级用户在不对主用户造成有害干扰的前提下,使用空闲的授权频谱资源,从而大幅提高频谱的利用率。为了高效利用空闲带宽,同时尽可能地避免对主用户的干扰,次级用户必须快速准确地实施频谱感知。由于无线信道的不确定性,以及次级用户本身硬件条件的限制,单个次级用户很难达到令人满意的频谱感知效果。文献表明,多个次级用户之间的协作可以提高频谱感知的性能^[2,3]。但是,协作在提升频谱感知性能的同时也引入了额外的通信开销^[4]。因此,如何提高协作感知的工作效率成为一个亟待解决的问题。

1 研究动机

1.1 协作式频谱感知的通信开销

由于诸多因素的不利影响(例如噪声/干扰、衰落/衰减),单个次级用户很难可靠地实施频谱感知。注意到在认知无线网络中多个位置独立的次级用户都处于不利位置的可能性

将远小于单个次级用户处于不利位置的可能性,因此可以利用多个次级用户之间的协作来提高频谱感知的性能。在协作感知中,参与感知的次级用户首先在本地产执行频谱感知操作,然后将感知结果传送给数据融合节点;数据融合节点根据收集到的感知结果对当前频谱状态做出判断。目前,协作式频谱感知已成为研究热点,相关研究内容包括协作感知所带来的分集增益^[2,3]、协作感知所引入的额外通信^[4]和同步开销^[5],以及数据融合规则对协作感知性能的影响^[6,7]。

但是协作机制在带来分集增益的同时,也带来了额外的通信开销,因为次级用户需要通过公共控制信道将本地的感知结果汇报给数据融合节点。虽然可以采用扩频技术,或为每一个参与节点分配一条独立控制信道,使得参与节点可以同时汇报它的感知结果,以减少回传所带来的时间开销,但前者会增加系统实现的复杂度,而后者则会耗费大量宝贵的频谱资源。所以,现有大多数协作感知解决方案都采用时分复用的方式,令参与节点依次将自己的感知结果报告给数据融合节点。显然在这种方式下,给定公共控制信道的带宽,参与

到稿日期:2009-09-28 返修日期:2009-11-20 本文受国家自然科学基金项目(No. 60602029, 60772088)资助。

高峰(1982-),男,博士生,主要研究方向为认知无线网络的频谱感知技术, E-mail: fgaowarg@gmail.com;袁巍(1978-),男,博士,讲师,主要研究方向为认知无线网络的频谱共享技术;刘威(1977-),男,副教授,主要研究方向为认知网络技术、网络服务质量;程文青(1964-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为无线网络与宽带网络;王殊(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为CT图像重建理论、气体探测、智能信号检测、传输、处理及应用。

协作的节点数目越多,在一个感知周期内消耗在结果回传上的时间便越多。

1.2 现有协作式频谱感知方案的不足

为了避免对主用户造成干扰,次级用户应该周期性地对主用户工作频段进行检测。现有协作式频谱感知方案将时间轴划分为一系列的时间帧,每个时间帧对应一个感知周期,其帧结构如图 1 所示。

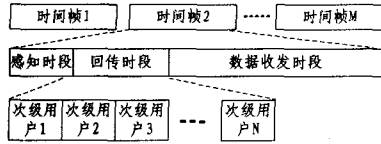


图 1 现有协作式频谱感知方案

从图 1 可以看出,每个时间帧由 3 个时段组成,分别是感知时段、回传时段和数据收发时段。在感知时段,所有参与感知的次级用户同时执行频谱感知操作。在回传时段,本地感知结果依次通过公共控制信道传送到数据融合节点,然后数据融合节点对当前被检测频段的状态做出判断。如果当前没有主用户在工作,次级用户则在接下来的数据收发时段进行数据传输;反之继续进行频谱感知,直到发现传输机会。通过合理设置感知周期,即时间帧的长度,主用户的通信可以得到可靠保护。

虽然上述机制在一定程度上满足了频谱感知的需求,但本文认为其时间帧的结构并不利于提高协作式频谱感知的利用效率。因为在该帧结构中,回传时段只能用于感知结果传送,而频谱检测操作则被局限在感知时段。

显然,如果能够在回传时段进行频谱检测操作,则用于频谱检测的时间窗口将得到显著加宽。对于频谱感知来说,大时间窗口要比小时间窗口更有利于提高性能,因为大时间窗口更易于捕捉到频谱状态的变化。在对主用户频段的检测过程中,及时检测到一次从闲到忙的状态变化,将减少次级用户对主用户的干扰。而及时检测到一次从忙到闲的状态变化,则意味着有更多的空闲时段得到有效利用。由此可知,利用回传时段来增大检测时间窗口,是提升协作感知性能的一种有效手段。

2 基于流水线架构的协作式频谱感知

针对现有协作式频谱感知方案的不足,本文提出了一种新的协作感知方案。新方案在协作感知中引入了流水线架构,其目的是将频谱检测操作从感知时段延伸到回传时段,从而尽可能地增宽用于频谱检测的时间窗口。

图 2 给出了新方案的示意图。从图中可以看出,为了提高时间利用效率,流水线方案将不同次级用户的频谱检测操作和结果回传操作以流水线的方式交错开来,使得原本专用于结果回传的回传时段也可以用于频谱检测。对比图 1 中的传统方案,流水线方案同样采用时分复用的方式将本地感知结果通过公共控制信道依次送往数据融合节点。但是应该注意,流水线方案中的本地感知结果采集于不同的时间点,这些采样时间点共同作用形成了一个加宽的频谱检测时间窗口。

需要指出,为了方便演示,图 2 中假设次级用户的频谱检测时间开销等于其结果回传的时间开销,但这并非必要条件。因为对于参与协作感知的次级用户来说,它们的频谱检测操作彼此相互独立,所以只要合理安排相邻检测操作之间的时

间间隔,流水线方案就可以有效运行。

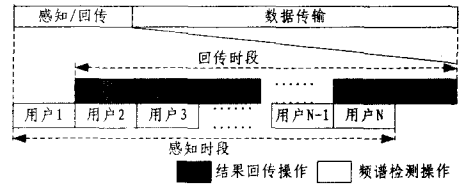


图 2 基于流水线架构的协作式频谱感知方案

下面对流水线方案与传统方案进行性能对比。假设进行数据融合操作的时间开销可以忽略不计,令 T_s 表示本地频谱检测操作所需的时间开销, T_r 表示结果回传操作所需的时间开销。

由图 2 知,流水线方案在一个周期内的频谱感知总开销 T_p 可由下式表示:

$$T_p = T_s + NT_r \quad (1)$$

式中, N 表示参与协作感知的次级用户的数目。于是流水线方案在一个周期内用于频谱检测的时间窗口的宽度为:

$$W_p = T_s + (N-1)T_r \quad (2)$$

由图 1 知,传统方案在一个周期内的频谱感知总开销 T_g 可由下式表示:

$$T_g = T_s + NT_r \quad (3)$$

其频谱检测的时间窗口宽度为

$$W_g = T_s \quad (4)$$

由式(1)至式(4)可知,流水线方案在一个周期内的频谱感知总开销与传统方案相同。但由于流水线方案对回传时段进行了充分利用,并能够提供一更宽的频谱检测时间窗口,因此,该方案能够及时捕捉主用户频段的状态变化。综上所述,本文所提出的流水线方案将会使得协作式频谱感知更加可靠与高效。

3 多线程贯似然比检测方法

为了进一步提高协作式频谱感知的性能,本文结合流水线方案的特点,在序贯似然比检测(SPRT)的基础上进行改进,提出了一种多线程贯似然比检测(MTSPRT)的快速数据融合算法。与 SRPT 相比,MTSPRT 显著提高了协作感知对频谱状态变化的反应速度。下面将首先简要介绍 SPRT 在协作感知中的应用,然后给出 MTSPRT 快速数据融合算法。

3.1 SPRT 在协作感知中的应用

SPRT 在协作式频谱感知中的应用机制如下:首先每个参与感知的次级用户把本地感知结果以似然比的形式依次发送给数据融合节点。每当一个新感知结果到达数据融合节点,融合节点便根据当前已收集到的感知结果执行一次假设检验,判断主用户频段当前是处于空闲状态(用 H_0 表示)还是处于繁忙状态(用 H_1 表示)。如果当前收集到的感知结果足以作出决定,融合节点则停止接受感知结果,并给出对当前频谱状态的最终判断。否则,便会继续接收感知结果,直到判决条件满足为止。

本文假设单个次级用户采用能量检测器进行本地频谱感知。令 Y 表示次级用户能量检测器的输出,根据文献[8], Y 具有以下分布特性:

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2m}^2, & H_0 \\ \chi_{2m}^2(2\gamma), & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, χ_{2m}^2 表示自由度为 $2m$ 的中心化卡方分布, $\chi_{2m}^2(2\gamma)$ 表示

自由度为 $2m$ 、非中心参量为 2γ 的非中心化卡方分布, $m = TW$ 为能量检测器的时间带宽积, γ 为信噪比。

假设所有本地检测结果都是独立同分布的, 在接收到第 n 个感知结果时, 数据融合节点根据下式进行数据融合:

$$S_n = \prod_{i=1}^n \frac{P[Y_i | H_1]}{P[Y_i | H_0]} \quad (6)$$

其判决结果由下列规则决定:

$$\begin{cases} S_n \geq \eta_1, & H_1 \text{ 为真} \\ S_n \leq \eta_0, & H_0 \text{ 为真} \\ \eta_0 < S_n < \eta_1, & \text{继续假设检验} \end{cases} \quad (7)$$

上式中阈值 η_1 和 η_0 分别表示如下:

$$\eta_1 = \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad \eta_0 = \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (8)$$

为了方便计算, 通常采用似然比的对数形式。令 L_i 表示第 i 个似然比分量的对数形式, 那么式(6)的对数形式可以表示为:

$$LR_n = \ln S_n = \sum_{i=1}^n L_i \quad (9)$$

判决规则相应调整为:

$$\begin{cases} LR_n \geq \ln \eta_1, & H_1 \text{ 为真} \\ LR_n \leq \ln \eta_0, & H_0 \text{ 为真} \\ \ln \eta_0 < LR_n < \ln \eta_1, & \text{继续假设检验} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 MTSPRT 快速数据融合算法

文献[9]证明, 如果不考虑频谱状态在检测时间窗口内发生变化, 相比其它数据融合技术, SPRT 达成一个感知判决所需的平均感知结果数目最小。所以由式(1)和式(3)可知, 在这种情况下 SPRT 可以最小化频谱感知的平均时间开销。但是, 一旦考虑在检测时间窗口内发生频谱状态切换, SPRT 的性能将会受到负面影响, 这是由其本身特点造成的。为了说明问题, 图 3 给出了一个简单的例子。如图 3 所示, 在一次频谱感知过程中, 主用户频段从第 5 个感知结果起由空闲转变为繁忙, 在图中表现为对数似然比之和 LR_n 在前 4 个感知结果中呈下降趋势, 从第 5 个感知结果起呈上升趋势。可以看出, 虽然前 4 个感知结果由于频谱状态变化而失效了, 但是它们的累积效应却依然存在。为了抵消该效应, 数据融合节点必须收集更多的本地感知结果, 从而造成频谱感知开销上升。

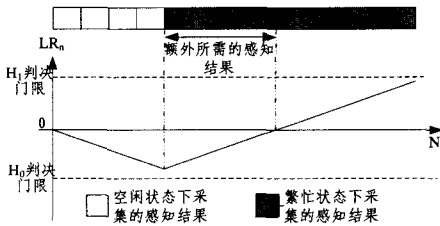


图 3 检测时间窗口内发生的频谱状态切换

针对这一问题, 本文提出了一种改进算法。该算法在保留 SPRT 优点的前提下克服了其固有缺陷, 从而能够更好地应对频谱状态变化。图 4 给出了改进方法的示意图。由图可知, 采用改进算法的数据融合节点每收到一个本地感知结果便发起一个新的 SPRT 进程, 新 SPRT 进程以刚收到的感知结果作为起点。因此, 如果数据融合节点接收了 N 个感知结果, 那么将会有 N 个 SPRT 进程在同时工作。无论哪一个 SPRT 进程率先达到判决门限, 数据融合节点都会立即作出判决。因为改进算法包含多个 SPRT 进程, 本文将其称为多线程程序贯似然比检测方法 (Multi-Threaded SPRT, MTSPRT)。

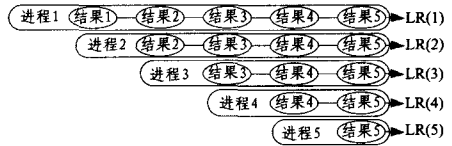


图 4 一个多线程程序贯似然比检测方法的示例

假设数据融合节点当前共收到 N 个感知结果, 令 $LR(K)$ 表示第 K 个 SPRT 进程的对数似然比之和:

$$LR(K) = \sum_{i=k}^N L_i \quad (11)$$

MTSPRT 的判决规则如下。对于 $\forall K \in [1, N]$:

$$\begin{cases} LR(K) \geq \ln \eta_1, & H_1 \text{ 为真} \\ LR(K) \leq \ln \eta_0, & H_0 \text{ 为真} \\ \ln \eta_0 < LR(K) < \ln \eta_1, & \text{继续假设检验} \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可知, 在 MTSPRT 中, 每个 SPRT 进程都假设频谱状态刚刚发生变化, 所以把所有在其发起之前收到的感知结果都做失效处理, 赋予权值 0, 而对之后收到的感知结果赋予权值 1。通过这种方式, 无论频谱状态在检测窗口什么位置发生变化, 总会有一个 SPRT 进程与之相对应, 该进程会及时作出判决, 无需额外的感知结果。由上可知, 与原 SPRT 相比, MTSPRT 能够更好地应对频谱状态变化, 提高次级用户对频谱状态变化的反应速度。

4 实验及结果分析

4.1 仿真环境

在仿真中, 本文对以下 3 组协作频谱感知方案进行性能对比, 分别是传统方案搭配 SPRT (GF-SPRT)、流水线方案搭配 SPRT (PF-SPRT) 和流水线方案搭配 MTSPRT (PF-MTSPRT)。对比的性能指标包括达成判决所需平均感知结果数目、次级用户对主用户的干扰情况和空闲频谱利用效率。

本文仿真环境设置如下。假设在一个单信道环境中, 存在 50 个次级用户和一个主用户, 数据融合中心采用轮询方式向次级用户收集本地感知结果; 所有的次级用户都采用性能相仿的能量检测器对单信道进行频谱检测, 能量检测器的时间带宽积 $m = 150$; 假设单个次级用户的频谱检测操作与结果回传操作均消耗一个时间单位; 主用户工作状态与空闲状态的持续时间均服从指数分布^[10], 其平均长度为 160 个时间单位; 虚警概率预设为 $\alpha = 0.05$, 漏警概率预设为 $\beta = 0.05$; 周期性频谱感知的周期长度等于 40 个时间单位; 仿真共持续 40000 个时间单位。

4.2 仿真结果分析

1) 达成判决所需的平均感知结果数目。表 1 列出在不同信噪比下 3 组协作感知方案各自达成判决所需的平均感知结果数目。首先可以看出, 在 3 种方案中 PF-MTSPRT 方案所需的平均感知结果数目最小, 这一方面是因为 MTSPRT 提高了对频谱状态变化的反应速度, 另一方面是因为 MTSPRT 在一定程度上减轻了可能存在的极端错误感知结果所带来的负面影响。由表还可知, PF-SPRT 方案所需的平均感知结果数目要比 GF-SPRT 方案略高, 这是因为 PF-SPRT 方案将频谱状态变化所带来的影响纳入考虑之中。由图 3 可知, 一次检测过程中的频谱状态变化总会造成先前收到的感知结果的失效, 从而不可避免地会增加该次频谱检测所需的感知结果数目。

表 1 达成判决所需的平均感知结果数目 ($m = 150$)

信噪比 (dB)	GF-SPRT	PF-SPRT	PF-MTSPRT
----------	---------	---------	-----------

-10	5.242	5.428	4.529
-11	7.835	7.961	6.748
-12	11.619	11.677	9.490
-13	16.732	17.439	13.980
-14	23.141	23.521	19.780

2) 次级用户对主用户的干扰情况。次级用户对主用户的干扰情况如图 5 所示。由图 5 可知,在 3 种方案中,次级用户对主用户的干扰都随着信噪比的降低而减弱。这是因为在低信噪比下,次级用户需要耗费更多的时间进行频谱感知,从而减少了留给数据传输的时间,于是次级用户对主用户可能造成的干扰也相应减轻了。在该评价指标下,采用流水线架构的方案要好于传统方案。这是因为与传统方案相比,流水线架构拓宽了频谱检测时间窗口,从而能够有效地跟踪频谱状态变化,及时检测到授权频段从闲到忙的状态变化。对比 PF-MTSPRT 方案,PF-SPRT 方案对主用户提供了更好的保护,这是因为 SPRT 方法要比 MTSRPT 方法消耗更多的感知时间。

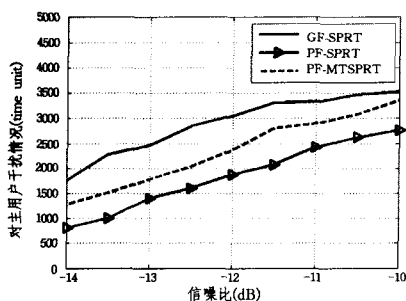


图 5 次级用户对主用户的干扰情况

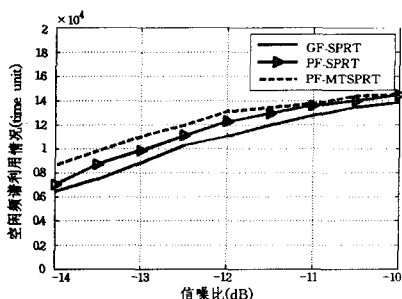


图 6 空闲频谱利用效率

3) 空闲频谱利用效率。图 6 给出了 3 组方案的空闲频谱利用效率的情况。由图 6 可知,采用流水线架构的方案要好于传统方案,其中 PF-MTSPRT 方案的频谱效率最高。可以看出,一个加宽了的频谱检测时间窗口有助于及时发现授权频段从忙到闲的状态变化,从而可以更有效地利用空闲频谱。而 MTSRPT 方法通过加快次级用户对频谱状态变化的反应

速度,进一步地提高了空闲频谱利用效率。可是,随着信噪比的增大,3 种方案之间的性能差异逐渐减少,这是因为随着信噪比的提高,达成判决所需的平均感知结果数目逐渐变小,也意味着检测时间窗口的宽度会逐渐缩小,于是对于流水线方案来说检测到频谱状态变化的可能性也随之降低,因此通过流水线方案得到的增益也会逐渐消失。

结束语 本文提出了一个基于流水线架构的协作式频谱感知方法和与之相搭配的快速数据融合算法。通过充分利用感知结果回传的时间开销,新方案提供了一个更宽的检测时间窗口,提高了协作感知时间效率。通过同时运行多个 SPRT 进程,基于多线程程序贯似然比检测的快速融合算法有效提高了对频谱状态变化的反应速度。实验结果表明,本文提出的流水线方案搭配多线程程序贯似然比检测快速算法能够有效地提高协作式频谱感知的性能。

参考文献

- [1] Mitola J. Software Radio Architecture [M]. John Wiley & Sons, 2000
- [2] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]//Proc. of IEEE DYS-PAN, 2005
- [3] Mishra S M, Sahai A, Brodersen R W, et al. Cooperative sensing among cognitive radios [C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2006
- [4] Ghasemi A, Bian K. Spectrum sensing in cognitive radio networks; the cooperative-processing tradeoff [J]. Wiley Wireless Commun. and Mobile Comp. Special Issue on Cognitive Radio, Software-Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems, 2007, 7 (9): 1049-1060
- [5] Song C, Zhang Q. Sliding-window algorithm for asynchronous cooperative sensing in wireless cognitive networks [C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2008
- [6] Ma J, Li Y G. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [C]//Proc. of IEEE GLOBECOM, 2007
- [7] Zhang W, Mallik R K, Letaief K B, et al. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks [C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2008
- [8] Digham F F, Alouini M-S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC'03), May 2003
- [9] Varshney P K. Distributed Detection and Data Fusion [M]. New York: Springer-Verlag, 1997
- [10] Min A W, Shin K G. Exploiting multi-channel diversity in spectrum-agile networks [C]//Proc. IEEE INFOCOM'08, Apr. 2008

(上接第 69 页)

研究表明,合理利用这些信息可以进一步缩减消息发送时延并减少路由代价。

参考文献

- [1] Phillips T, Karygiannis T, Kuhn R. Security standards for the RFID market [J]. Security & Privacy Magazine, IEEE, 2005
- [2] Pelusi L, Passarella A, Conti M. Beyond MANETs; dissertation on Opportunistic Networking [R]. IIT-CNR, May 2006
- [3] Su J, Chin A, Popivanova A, et al. User Mobility for Opportunistic Ad-Hoc Networking [C]//Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications (WMCSA), UK, December 2004
- [4] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and wait: Efficient routing in intermittently connected mobile networks [C]//Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking (WDTN), 2005
- [5] Abdulla M, Simon R. The Impact of the Mobility Model on Delay Tolerant Networking Performance Analysis [C]//Proceedings of the 40th Annual Simulation Symposium, IEEE, 2007
- [6] Keränen A, Ott J. Increasing Reality for DTN Protocol Simulations [R]. Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, 2007