

网络编码在认知无线电中的应用

张 波, 黄本雄, 戴 彬, 徐 奎, 朱 江

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 研究了网络编码应用到认知无线电中的可能, 发现在认知无线电中应用网络编码技术, 可以减少非授权用户和授权用户的冲突概率, 增加无线网络的实际吞吐率. 最后通过仿真验证了网络编码优化认知无线电网络性能的有效性.

关键词: 认知无线电; 无线网络; 网络编码; 吞吐率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)01-0013-04

Applications of Network Coding in Cognitive Radio Systems

ZHANG Bo, HUANG Ben-xiong, DAI Bin, XU Kui, ZHU Jiang

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

Abstract: The paper studies the probability of applications of network coding in cognitive radio. Network coding can decrease the probability of collision between second users and primary users, and increase the real throughput of wireless networks in cognitive radio environment. At last, simulation results validate efficiency of applications of network coding in cognitive radio systems.

Key words: cognitive radio; wireless networking; network coding; throughput

1 引言

传统技术中, 无线通信设备所使用的载频是预先分配的, 但是在实际运行中, 这些无线频谱资源每隔一段时间就会处于空闲的状态, 造成频谱的浪费. 认知无线电技术将通信用户分为授权和非授权两类, 非授权用户利用处于空闲状态的授权频段进行通信^[1-2], 当授权用户出现时, 抢占了授权频段的非授权用户必须及时地让出授权频段, 寻找新的频谱空洞, 在不产生干扰的前提下继续通信. 在这种工作模式下, 无线通信网路的频谱利用率大大提高, 网络性能得到提升. 授权用户的出现和持续的通信时间造成非授权用户通信的中断和拥塞^[1-2]. 因此, 对于提高无线网络性能的问题, 传统的认知无线电技术还不能达到最优.

网络编码是通信领域的重大突破^[3], 从图论的

最大流最小割的理论基础出发, 融合了路由和编码的概念, 在实现了网络编码的无线通信环境中, 节点不再只是简单的存储和转发所受到的数据, 还对数据进行编码和译码操作, 因此, 节点可以对来自不同链路的信息进行编码组合, 既实现了路由功能又实现了编码功能, 使网络性能达到理论的极限, 网络编码技术可以平衡各链路的负载, 减小网络时延, 节省了传输成本, 增大网络的吞吐量. 认知无线电技术为实现网络编码提供了非常好的平台.

2 问题分析

授权用户的总个数为 N , 授权用户请求通信的概率为 P , 在观测时间内, 授权用户的出现过程服从伯努利分布 $B(N, p)$ ^[3]. 因此, 在时间段内没有授权用户出现的概率如式(1)所示.

收稿日期: 2008-12-17; 修回日期: 2009-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(60803005)

$$P_a = \binom{N}{0} p^0 (1-p)^{N-D} = (1-p)^N = \left(1 - \lambda \frac{T}{N}\right)^N \quad (1)$$

式中, λ 是单位时间内授权用户的平均出现个数. 因此, 授权用户和非授权用户冲突的概率如式(2)所示.

$$P_{\text{collision}} = 1 - P_a = \left(1 - \lambda \frac{T}{N}\right)^N \quad (2)$$

不难证明, 非授权用户的通信持续时间越短, 在该时间段内, 没有授权用户出现的概率越大, 非授权用户和授权用户发生冲突的概率越小, 非授权用户改频的次数越少. 用户的通信持续时间可以用式(3)表示^[4].

$$T(p_n, l_k) = \frac{S(p_n)}{R(l_k)} \quad (3)$$

式中, l_k 表示无线链路 k , $R(l_k)$ 表示链路 l_k 的有效吞吐率, $S(p_n)$ 表示数据包 p_n 的大小, $T(p_n, l_k)$ 表示数据包 p_n 在链路 l_k 上的传输时间. 在时分复用的无线通信环境中, 可能有多个用户复用相同的频谱资源, 计算用户的预计通信持续时间要针对所有使用该频段的链路和数据包, 因此, 在本文中, 网络中使用相同频谱的用户的预计通信持续时间, 如式 4 所示.

$$T_{\text{total}}^e = \sum_{k=1}^N T(p_k, l_k) \quad (4)$$

式中, p_k 为分配给 l_k 链路的数据包, T_{total}^e 是占用该频谱资源的用户的预计通信持续时间. 由以上分析可知, 优化认知无线网络的性能, 需要提高频谱资源的利用率, 也就是通过均衡各链路的通信负载和调整链路的通信速率, 让 T_{total}^e 的值最小, 在 T_{total}^e 时间段内没有授权用户出现的概率最大.

我们研究如何提高单跳认知无线网络的性能. 将认知无线网络建模成一个有向超图 $H = (N, A)$. 其中, N 为所有节点的集合, 而 A 为所有超弧的集合. 超图和普通图的不同主要在于超图拥有超弧, 超弧表示为一个二元组 (i, J) , 其中 i 是 N 的一个元素, 表示弧的起点, J 则是 N 的一个子集, 表示弧的终点的非空集合. 显然, 一般的图可以看成超图的一个特例. 每条超弧 (i, J) 可以表示一条从节点 i 到集合 J 的一条广播链路, (i, j) 表示链路 l_k , z_{ijk} 表示 j 成功接收到数据包的平均速率. 用户实际通信持续时间表示为

$$T_{\text{total}}^r = \sum_{k=1}^N \frac{S(p_k)}{z_{ijk}} \quad (5)$$

由以上分析可知, 提高认知无线网络性能, 等价于在用户的通信持续时间内降低授权用户与非授权用户冲突的概率 $P_{\text{collision}}$. 因此, 得到以下优化问题.

$$\min \text{imize } P_{\text{collision}} = f(z_{ijk}) =$$

$$1 - \left[1 - \lambda \frac{\sum_{k=1}^N \frac{S(p_k)}{z_{ijk}}}{N} \right]^N$$

$$\text{subject to } c_{ij} \geq z_{ijk}, \forall (i, j) \in A$$

$$z_{ijk} \geq x_{ij}^{(t)} \geq 0, \forall (i, j) \in A, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{j|(i,j) \in A} x_{ij}^{(t)} - \sum_{j|(i,j) \in A} x_{ji}^{(t)} = \delta_i^{(t)}, \forall (j, i) \in A, t \in T.$$

$$\text{where } \delta_i^{(t)} = \begin{cases} R, & \text{if } i = s \\ -R, & \text{if } i = t \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

s 和 t 分别表示数据包的发送节点和接收节点, R 表示节点和间的数据传输率. 通过解决式(5)表示的优化问题, 降低授权用户和非授权用户的冲突概率, 提高基于认知无线电架构的无线网络性能.

由文献[3]可知, 利用网络编码, 有目的地分配各时刻链路所发送数据包的内容, 调整各链路的数据传输率, 可以得到式(5)所示问题的最优解. 网络编码场景示意图如图 1 所示.

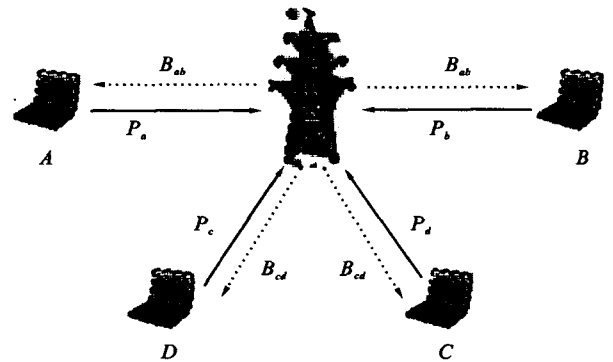


图 1 网络编码场景示意图

3 网络编码在认知无线电中应用

由以上分析可知, 在认知无线电环境中实施网络编码, 利用无线电通信的广播特性, 并且各节点具有对数据包进行编解码的能力, 用最少的发送次数, 发送最大的数据量^[3]. 利用网络编码技术可以有效提高认知无线网络中频谱资源的利用率, 减少用户的通信持续时间, 降低授权用户和非授权用户的冲突几率, 提高无线网络的性能. 具体实现, 需要解决以下问题:

- (1) 编码规则;
- (2) 编解码时机的选择.

3.1 编码规则

由文献[5]可知,在无线网络节点进行异或的编解码运算,无线网络的性能明显提高.本文中,中继节点在收到各方发送的数据包,提取源节点和目的节点相互对应的各数据包的数据部分,对数据进行异或运算,实现编码,将编码后的数据向各节点广播.各节点接收到广播消息后,用已知的数据异或接收到的广播数据,实现解码,从而得到通信链路目的节点要发送给自己的数据.例如在图1所示的场景中, R 为中继节点, A 和 B 分别是通信链路的两端节点, C 和 D 是另一组相互通信的节点,他们通过节点 R 实现链接关系.某一时刻,节点 R 拥有 A 和 B 相互发送给对方的消息 P_a, P_b ,以及 C 和 D 的消息 P_c, P_d .经过底层协议的处理,节点 R 可知 P_a 和 P_b 的源节点和目的节点相互对应, P_c 和 P_d 的相互对应,提取各数据包的数据部分得到 D_a, D_b, D_c 和 D_d ,进行编码($D_a \oplus D_b, D_c \oplus D_d$),得到 D_{ab} 和 D_{cd} ,进而得到广播消息 B_{ab} 和 B_{cd} ,分别向 A, B 节点和 C, D 节点广播. A 节点收到 B_{ab} 后,进行解码($D_a \oplus D_{ab}$),得到前一时节点 B 发送的数据 D_b ,其他节点通过同样的方式得到相应的数据.

3.2 编码时机的选择

无线信道是有损信道,可能导致一方节点的数据长时间无法接受,由前文可知,节点至少需要收到两个数据包才可以进行编码,节点必须缓存先到达的数据包,当有符合编码条件的其他数据包出现时,提取缓存的数据包进行编码.当缓存的数据包等待时间过长时,网络性能下降.因此,选择恰当的时机进行编码,有助于网络编码提高认知无线电网络的性能.

文中采用机会编码的时机选择策略,当有等待编码的数据包被缓存时,根据网络的数据传输率,编码节点设定数据包缓存时间阈值 T_{ur} ,在该阈值范围内出现符合编码条件的数据包时,节点进行编码并广播编码后的数据包,当数据包等待时间超过该阈值时,提取缓存数据包并正常发送.使用该策略,可以缓解等待编码时间过长的问题,避免因节点长时间等待而造成的吞吐率下降.

3.3 认知无线网络实施网络编码的优点

在认知无线网络中实施网络编码,主要有以下优势:

- (1) 缩短通信持续时间,降低授权用户和非授

权用户的冲突概率;

- (2) 灵活的编码时机选择策略,避免网络的长时间拥塞.

4 性能分析

定理1 在认知无线网络中实施网络编码,非授权用户与授权用户的冲突概率可以达到理论上的最小值.

证明:由式(1)可知,在非授权用户的预计通信持续时间内,授权用户出现并与非授权用户发生冲突的概率为

$$P_{\text{collision}} = 1 - P_a = 1 - \left(1 - \lambda \frac{T_{\text{total}}}{N}\right)^N \quad (7)$$

由最大流-最小割定理可得,在网络编码策略下,节点间的有效吞吐率 z_{ij} 可以无限逼近理论上的最大值.因此,非授权用户的通信持续时间 T_{total} 可以达到理论上的最小值.

由式(7)可知, $P_{\text{collision}}$ 是 T_{total} 的单调增函数,因此,当 T_{total} 为最小值时, $P_{\text{collision}}$ 也最小.

所以,在认知无线网络中实施网络编码,当非授权用户通信时,在他们的预计通信持续时间内,与非授权用户发生冲突的概率达到理论上的最小值.

5 仿真与效能评估

为了研究网络编码技术对认知无线网络性能的优化作用,本节通过仿真分析网络编码对认知无线网络中用户冲突次数以及吞吐率的影响.仿真中的主要参数设置如下:

- (1) 网络中每个节点的传输率都为1Mb/s;
- (2) 网络中授权用户的总个数为120;
- (3) 单位时间内,授权用户请求通信的概率为10%.

5.1 冲突次数

为了研究网络编码对用户冲突次数的影响,仿真分析非授权用户的节点遇到授权用户请求通信被迫改频的次数,仿真分别统计了节点发送1到10Mb的数据量的情况.仿真结果如图2所示.图2表示了认知无线网络使用了网络编码和未使用网络编码两种情况下,授权用户和非授权用户冲突次数的统计值.可见,在数据量大小相同的情况下,基于网络编码的认知无线网络中,非授权用户与授权用户冲突的次数明显小于未使用网络编码的网络.因此,网络编码有助于降低非授权用户和授权用户冲突的概率^[6-7].

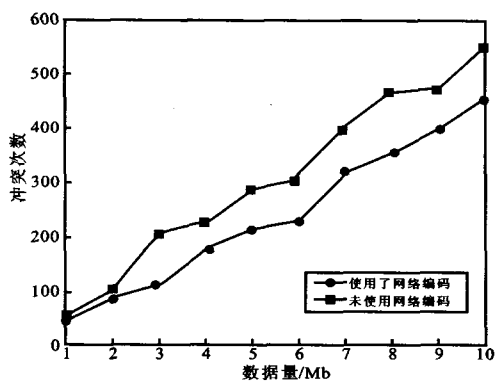


图2 授权用户和非授权用户冲突次数比较

5.2 吞吐量

为了研究网络编码对认知无线网络性能的影响,仿真分析网络的实际吞吐量,分别统计了非授权用户发送1到10Mb数据量的情况.仿真结果如图3所示.

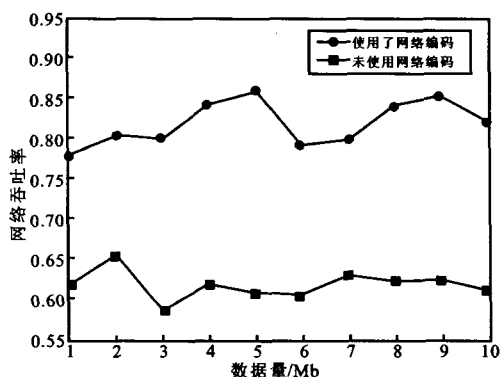


图3 网络实际吞吐量比较

图3表示了使用和未使用网络编码两种情况下,网络的实际吞吐量.当认知无线网络使用了网络编码的时候,网络的实际吞吐量高于未使用网络编码时的值.所以,网络编码可以优化认知无线网络的性能.

6 结束语

文中分析了网络编码在认知无线电中的应用可

能.网络编码策略可以缩短用户的通信持续时间,降低认知无线网络中非授权用户与授权用户冲突的概率,减少非授权用户改频的次数,提高网络的实际吞吐量,有助于优化认知无线网络的性能.

参考文献:

- [1] Peng C, Zheng H, Zhao B Y. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access[J]. ACM Mobile Networks and Applications (MONET), 2006, 11(4):555-576.
- [2] Subramanian A P. Fast spectrum allocation in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks[C]// Proceeding of DySPAN. USA, IEEE, 2007:320-330.
- [3] Ahlswede R, Cai N, Yeung R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4):1204-1216.
- [4] Taniguchi N, Aust S. Packet allocation for efficient use of multiple wireless links in cognitive radio networks[C]// Proceeding of GUIS. Morocco, IEEE, 2007:27-34.
- [5] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. Crowcroft, XORs in the air: practical wireless network coding[C]// Proceeding of SIG-COMM. USA, ACM, 2006:497-510.
- [6] Xiukui Li, Zekavat S A. Traffic pattern prediction and performance investigation for cognitive radio systems[C]// Proceeding of WCNC. USA, IEEE, 2008:894-899.
- [7] 陈国震. 无线网络通信系统研究[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(5):190-193.

作者简介:

张波 男, (1982-), 博士. 研究方向为认知无线电以及网络编码.

黄本雄 男, (1966-), 教授, 博士生导师. 研究方向为通信理论、通信信号处理、通信对抗.

戴彬 男, (1977-), 博士. 研究方向为无线网络、P2P技术.

徐奎 男, (1979-), 博士. 研究方向为无线传感器网络以及网络编码相关技术.

朱江 男, (1982-), 博士. 研究方向为认知无线电.