

基于网络编码的感知无线网多中继机制

王蔚^{*①} 喻莉^① 朱光喜^① 李挥^②

^①(华中科技大学光电国家实验室 武汉 430074)

^②(北京大学深圳研究生院集成微系统重点实验室 深圳 518055)

摘要: 多中继感知协作通信技术是无线通信领域中,利用时空分集提升网络吞吐量的热门研究方向。该文首次提出了感知无线网中分布式译码转发后的中继冗余问题,并在理论与仿真上证明了现有传输协议不仅不足以支持多中继感知通信,而且由于其衍生了大量冗余而降低了网络吞吐量。针对该问题,该文提出了在缓存队列中结合随机网络编码的中继机制,从而有效地避免了中继冗余,使得多中继感知的吞吐量接近理想上界,减少缓存空间的占用,仿真结果表明该文提出的机制是一种高效实用的感知中继传输机制。

关键词: 无线网络; 感知中继; 译码转发; 随机网络编码

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0869-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00830

A Novel Transmission Scheme of Multiple Cognitive Relay Based on Network Coding

Wang Wei^① Yu Li^① Zhu Guang-xi^① Li Hui^②

^①(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

^②(Key Laboratory of Integrated Microsystems, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: It is already theoretically presented in previous work that multiple cognitive relay improves the throughput of cognitive networks by increasing diversity in both spatial and temporary domain. According to observation and analysis, huge amounts of redundancies exist when implementing Decode-and-Forward (DF) in a distributed relay network. To solve the issue, a so-called code-assist scheme is proposed in this paper to eliminate redundancies. By such a scheme, network coding is integrated with multiple cognitive relay. It is proved that the achievable throughput of cognitive users approaches to its theoretical upper-bound under the scheme. Moreover, this scheme also helps to decrease the effective buffer size for relay. Simulation results show that the scheme is promising and efficient.

Key words: Wireless network; Cognitive relay; Decode-and-Forward (DF); Random network coding

1 引言

为了解决无线资源日益紧缺的问题,感知无线电技术因其高效复用频谱资源的特点,成为当前解决该问题的热点方法^[1]。通过该技术,感知无线网下的感知用户(SU)在主用户(PU)暂停通信时可以“透明”地传输数据包,从而实现时分复用下的频谱重分配。为此,2004年IEEE802.22协议确定了感知无线网的基本通信机制^[2]。随后,感知中继(cognitive relay)的引入进一步优化了感知无线网的传输性能^[3,4]。然而,由于现有工作均直接采用传统的译码转发技术(Decode-and-Forward, DF),因此缺少对

物理层以上协议的分析和改进^[5,6]。而这类工作在实际应用多感知中继(multiple cognitive relay)的感知网中尤为重要。

此前,大量研究主要集中于如何减少信道间干扰^[7]、降低感知失速率^[8]以及联合编解码^[9,10]的最大化频谱利用率问题。然而忽略了在传输层进行分布式中继的过程中存在大量被多个感知用户同时感知并转发的冗余数据包,并且随着参与中继的用户数增大这类冗余将进一步增加的问题(本文将该问题称之为中继冗余危害)。针对这一问题,本文将引入网络编码理论对传输协议进行改进。

研究表明,网络编码技术可以有效地支持中继节点对已接收的多个数据包编码后再转发,而终端通过相应的译码可得到完整信息^[11,12]。特别是在分布式无线网络中的应用尤为广泛的随机网络编

2010-08-09 收到, 2010-12-06 改回

国家自然科学基金(60872010;60972016), 国家 863 计划项目(2009AA01Z205)和国家实验室基金(P080010)资助课题

*通信作者: 王蔚 viviaawang@126.com

码^[13,14],其可以有效减少网络中继冗余^[15-17]。然而,随机网络编码应用在感知中继系统的难点在于对转发编码包个数的控制。因此,本文将在感知无线网的理想情况(即传输信道参数一致的网络场景)下,针对该难点进行研究分析。

针对上述问题,本文贡献如下:(1)发现传统中继机制对感知无线网带来的冗余问题,并从理论上论证问题的存在。(2)为了解决该问题,提出基于随机网络编码的中继机制(简称为编码中继),同时配合高效的缓存编码算法。该机制的应用可增大感知用户信道容量上限,提高中继效率,减少中继节点所需缓存空间。最后,通过仿真实验验证了本文提出的编码中继机制的性能。

2 问题模型

本文研究背景为支持WiMAX通信协议的感知无线网。感知用户接入方式采用分时接入(TDMA)以及轮询(round robin)机制平均分配系统空闲频段,从而实现公平竞争空闲频段。为了简化分析,对文献[5]中提出的单中继模型进行扩展时,忽略感知用户对主用户的监听错误和通信信道的ACK误帧率。

令扩展后的独立无干扰瑞利衰落信道模型为 $\Omega(P, S, C)$,其中 P 为系统中唯一的主用户, S 为 n 个被授权的感知用户的集合 $\{SU_1, SU_2, \dots, SU_n\}$, C 为时分复用下通信子信道的集合。

基于模型 Ω ,图1(a)和1(b)分别描述了无协作和有协作状态下信道共享模式。在图1中,PR为PU对应的接收端,而 $\{SR_1, SR_2, \dots, SR_n\}$ 是 S 对应的感知用户接收集合。模型对 C 中的任意子信道都配设独立缓存队列,缓存队列标示为 Q_p 或 Q_s 以便区分PU的队列和SU的队列。为了保证系统运行稳定性,式(1)成立,即 Q_p 空闲概率非0为必要条件。

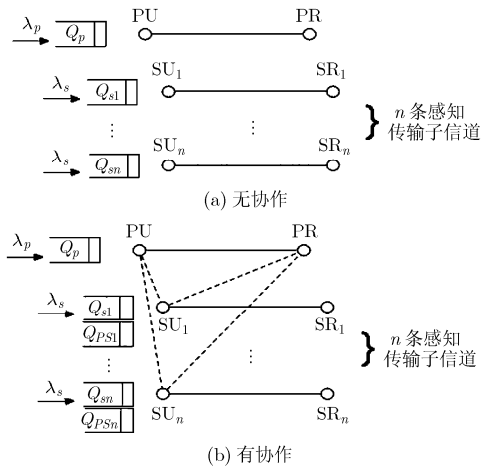


图1 多用户共享下感知无线网信道模型 Ω

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Pr[Q_p(t)=0] \neq 0 \quad (1)$$

设定 C 中信道为瑞利衰落信道,通过已知信道参数 $(\beta_p, \beta_s, \lambda_p)$ 以及信道增益 $\gamma_i (i = P, S)$,可以计算信道传输译码中的误码率:

$$P_{e,i} = \Pr[\gamma_i | h(t)|^2 P < \beta_i] = 1 - \exp(-\beta_i/\gamma_i) \quad (2)$$

其中 $i = P, S$, P 为信息发射能量(在本文中统一为单位1), $h(t)$ 是均方为1的平稳过程。式(2)同样适用于计算感知信道和转发信道的误码率,当 γ_{ps} 为感知过程中的信道增益而 γ_{sp} 为中继过程中的信道增益。

在感知网中,感知信道参数决定用户感知性能。当用户间感知性能差异大时,网络采用“拍卖(auction)”机制,如文献[18],挑选最佳中继用户并予以授权。只有当感知性能相差无几的时候,网络才会考虑到公平性问题。为了方便理论研究,本文采用一致的模型信道参数。

3 理论分析

本节将结合排队论给出感知用户在多感知中继下的信道传输上限。

对于系统内所有缓存队列,令 λ 为数据包输入速率(单位为packet/slot)、 μ 为输出速率。文献[5,6]给出图1(a)两种用户的输出速率上界。

$$\begin{aligned} \mu_p^{\max} &= 1 - P_{e,p} = 1 - P[\gamma_p | h(t)|^2 P < \beta_p] \\ &= \exp(-\beta_p/\gamma_p) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mu_s^{\max} = \exp(-\beta_s/\gamma_s)(1 - \lambda_p/\mu_p^{\max}) \quad (4)$$

在图1(b)的多感知中继模型中,系统为 n 条感知中继信道配备 n 个相应的中继缓存队列 $\{Q_{ps,1}, \dots, Q_{ps,n}\}$ 。并根据排队论, n 条中继缓存队列的输入速率为

$$\lambda_{ps} = \frac{\lambda_p}{\mu_p^{\max}} P_{e,p} (1 - P_{e,ps}) \quad (5)$$

其中 μ_p^{\max} 表示系统升级到多个中继后新的主通信传输上界。

在中继模型中,主用户获得的信道容量为自身通信信道和 n 个中继信道的容量总和。因此,主用户新的传输上界为

$$\bar{\mu}_p^{\max} = 1 - P_{e,p} \prod_n P_{e,ps_i} \quad (6)$$

其中 P_{e,ps_i} 为第 $i (i < n)$ 条中继信道在感知过程中的误码率。对于同构感知用户,所有感知中继过程为独立同分布,因此有 $P_{e,ps_1} = \dots = P_{e,ps_n} = P_{e,ps}$ 。

由于在分布式通信下多个感知用户由于缺少交互信息,因此重复中继同样的数据包,浪费了大量传输带宽。下面将详细分析中继冗余的危害。

设定感知用户以概率 ε 发送中继队列中的数据

包, 则感知用户两条队列的输出速率上界分别为

$$\mu s_i = 1/n \cdot \Pr[Q_p(t)=0](1 - P_{e,s})(1 - \varepsilon) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mu_{ps}^{\max}(\varepsilon) &= \frac{1}{n} \Pr[Q_p(t)=0](1 - P_{e,sp})\varepsilon \\ &= \frac{1 - \lambda_p / \bar{\mu}_p^{\max}}{n} \exp(-\beta_p / \gamma_{sp})\varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $P_{e,sp}$ 为转发过程中的信道误码率。整个中继过程保持稳定的条件为 $\lambda_{ps} < \mu_{ps}^{\max}$, 因此 ε 的取值必须满足式(9)。

$$\varepsilon \geq n \frac{\lambda_p}{\bar{\mu}_p^{\max} - \lambda_p} (1 - \exp(-\beta_p / \gamma_p)) \frac{\exp(-\beta_p / \gamma_{ps})}{\exp(-\beta_p / \gamma_{sp})} \quad (9)$$

当式(9)中等号成立时, 系统处于亚稳定状态。由此结合式(7)和式(9), 可以算出

$$\begin{aligned} \mu s_i^{\max} &= \frac{1}{n} \Pr[Q_p(t)=0](1 - P_{e,s})(1 - \varepsilon_{\min}) \\ &= \frac{1}{n} \frac{\bar{\mu}_p^{\max} - \lambda_p}{\bar{\mu}_p^{\max}} \exp(-\beta_s / \gamma_s) \left(1 - n \frac{\lambda_p}{\bar{\mu}_p^{\max} - \lambda_p} \right. \\ &\quad \left. (1 - \exp(-\beta_p / \gamma_p)) \frac{\exp(-\beta_p / \gamma_{ps})}{\exp(-\beta_p / \gamma_{sp})} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

最终, 根据式(10)可以看出, 当 n 变大时, $\mu s_i^{\max}(i = 1, \dots, n)$ 趋近于0甚至小于0, 从而验证了中继的冗余危害性。

4 基于网络编码的编码中继机制

上一节中提到, 多中继系统中的中继冗余严重危害到系统的性能, 而集中管理的解决方案又需要加入大量交互信息。因此考虑到不必要的信息负载, 本文结合网络编码和感知中继提出一种编码中继的协作机制, 从而消除中继冗余、避免大量信息交互。

4.1 感知缓存中网络编码的实现

本文引入随机网络编码的核心思想^[13,14]: 将传输文件分块传输并随机加权编码成为多个编码包发送给接收端, 接收段接收到一定量编码包后还原文件。整个中继机制主要步骤如下:

(1)主用户传输时, 感知用户同步感知;

(2)感知用户对感知到的数据包进行网络编码并进行中继;

(3)待中继完成后, 主用户补充进行网络编码重传, 等收到ACK后结束本次主通信。

其中(3)是对(2)之后未被中继覆盖的少数数据包的重传。在第(2)和(3)步中仅对为未接收到ACK的数据包进行编码, 从而可以降低系统的编码复杂度。

定义1 定义执行一次完整随机网络编码为一代(generation), 每一代的数据包个数为常数 M ^[14]。

由定义1可知, 在每一代里 M 个原始数据包生

成1个编码包, 系统需要在GF(2⁸)域上随机生成 M 个编码系数。而当中继信道需要转发的编码包有 m 个时, 所需编码矩阵为一个 $M \times m$ 随机系数矩阵。由此, 下文将给出在第(2)步中执行的缓存编码算法。

由于 $m, M \in \mathbb{Z}$, 计算中采用取整运算[•]。当任意一条感知信道感知到 M 个数据包且未感知相应ACK时, 信道执行以下算法:

(1)缓存队列建立。对于每一个感知信道建立一个 m 个单位数据包容量的缓存队列, 每一个缓存单位由 M byte的编码系数和数值部分组成, 并且初始化缓存, 数值归0, 计数器归0;

(2)每接收一个数据包 $a_j (1 \leq a_j \leq M)$, 计数器加1。当SU感知到数据包 a_j 而未感知到对应的ACK时, 会随机生成 m 维编码系数矢量 $\mathbf{H}_j^T = (h_1, \dots, h_m)^T$ 与 a_j 数据部分相乘, 然后加至缓存队列矢量上并记录下编码系数。当计数器小于 M 时, 重复步骤(2), 否则, 转步骤(3);

(3)转发缓存队列中的所有编码数据包。

该算法的流程图如图2。对于每条感知信道需要发送的数据包个数的期望, 设定其在缓存编码算法和传统中继算法下的比值为 α , 则有 $m = [\alpha M]$ 。因此, 本文定义 α 为编码中继的预编码率, 在 $P_{e,ps}$ 趋近零的时候 α 逼近 $1/n$ (n 为参加中继的感知用户数量), 由此证明系统软硬件性能均可得到提升。

4.2 预编码率的预测

本文的编码中继机制至关重要的一步就是预测

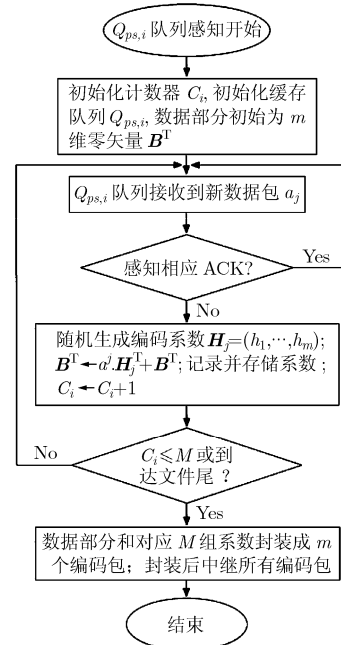


图2 缓存编码算法流程图

预编码率 α 。这需要进一步对分布式系统下每个中继结点需要传送编码包个数的期望 m 进行预测。在本文提出的中继机制里, 当实际值大于 m 时, 会有主用户重传机制弥补缺失编码包; 反之, 中继系统存在少量冗余。然而, 多次统计结果将平滑此类冗余。因此, 本文以这一期望确定中继缓存大小。

在一次完整的中继过程中, 定义 R 为主用户丢失数据包集合, R_{S_i} 为感知用户 S_i ($i = 1, \dots, n$) 需要进行中继的原始数据包子集, $R_{\Sigma S}$ 为全体子集 $\{R_{S_i} | i = 1, \dots, n\}$ 的并集。因此, 每个感知用户感知到数据包个数的期望为 $M = [|R| \times (1 - P_{e,ps})]$, 同时该期望也是进行网络编码的编码域大小。则中继子系统整体感知概率为

$$P_{\text{sense}} = 1 - P_{e,ps}^n = 1 - (1 - \exp(-\beta_p / \gamma_{ps}))^n \quad (11)$$

而全体中继数据包的数量为

$$|R_{\Sigma S}| = |R| \times P_{\text{sense}} \quad (12)$$

由网络编码理论可知, 收方至少需要接收到 $|R_{\Sigma S}|$ 个编码包才能还原完整数据包。考虑中继信道公平性, 即 n 个感知用户平均承担中继任务。因此, 从 m 个编码数据包还原 M 个原始数据包的必要条件为

$$\alpha \geq \frac{1}{n} \frac{1 - P_{e,ps}^n}{1 - P_{e,ps}} \quad (13)$$

当式(13)中的等号成立时, 表明感知中继系统中的中继冗余消除, 传输速率达到理论上界。因此采用编码中继算法后, 可以计算出式(14),

$$\epsilon_{\min} = n \frac{1 - P_{e,ps}^n}{1 - P_{e,ps}} \frac{\lambda_p}{\mu_p^{\max}} (1 - \exp(-\beta_p / \gamma_p)) \frac{\exp(-\beta_p / \gamma_{ps})}{\exp(-\beta_p / \gamma_{sp})} \quad (14)$$

并将式(14)代入式(7)后得到改进的感知系统吞吐量上限 μ_s^{\max} 。显而易见, 对比传统中继算法, μ_s^{\max} 在编码中继算法中得到提升。

4.3 编码中继系统仿真结果

仿真系统中同构感知用户的信道参数设定为

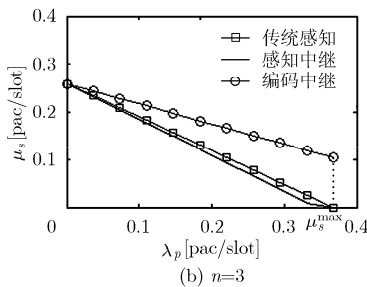
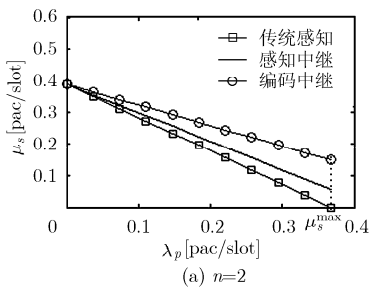


图3 编码中继下主通信对感知通信上限的影响

$$\gamma_p = 6 \text{ dB}, \quad \gamma_s = \gamma_{sp} = \gamma_{ps} = 10 \text{ dB}, \quad \beta_p = \beta_s = 6 \text{ dB}.$$

图3比较了编码中继和未编码的感知中继以及传统感知3种机制下系统的性能。

在多中继下, 由于冗余中继的存在导致系统性能随着感知用户的增多而降低, 进而远离理论上界, 这与增加感知用户的协作通信, 从而提升感知通信传输上界的初衷相悖。如图3中, 当 $n = 2$ 时, 感知中继性能优于无中继情况; 而当 $n = 3$ 时则相反。这种与理论值相悖的试验结果进一步说明了冗余中继的危害性。图3(a)和3(b)中最高的线表明通过编码中继算法消除了传统中继方式下的中继冗余, 不仅避免了系统性能的损失, 同时感知用户的通信上限也得到明显的提升。

图4验证了在 $\lambda_p = \bar{\mu}_p^{\max} / 2$ 下, 感知用户的通信总量提升与参与协作的用户个数之间的关系, 其中 x 轴变量为感知用户数目 n , y 轴为感知用户通信总量 $\mu_s^{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n \mu_{s_i}^{\text{max}}$ 。

$$\text{Ratio} = \frac{\text{有协作通信下的 } \mu_s^{\text{sum}}}{\text{无协作通信下的 } \mu_s^{\text{sum}}} \quad (15)$$

进一步地, 根据式(15)定义的感知网下中继算法的中继效率, 图5展示了不同中继算法的效率与参与中继的用户个数之间的关系。

通过图4可观察到, 参与中继的感知用户越多, 获得的频谱带宽也会越大。而通过图5的比较可以看到, 编码中继算法维持了多中继对系统性能的提升, 消除了传统中继方式下的中继冗余。在理想环境下, 对比传统感知中继算法, 编码中继算法能保持性能曲线一定程度的上升趋势, 并保持增长率大于1, 证明系统在使用编码中继后得到性能上的提升。

然而即使是在理想环境下, 中继系统的性能在第4-5个感知用户参与后也会趋于平稳。如果考虑到实际系统中存在的中继信道干扰和信令冗余, 感知通信的流量会在 n 增加到一定程度时出现下降的趋势。因此, 系统中参与中继的感知用户数目不宜无限制的增大。而当候选的感知用户过多时, 可以采用文献[19]中的中继选择算法进行筛选。

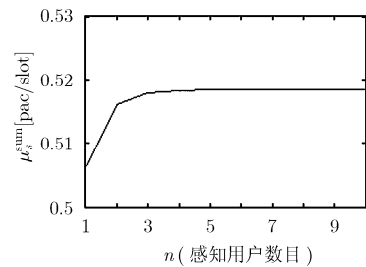


图4 编码中继下感知通信总流量上限与参与中继用户个数的关系

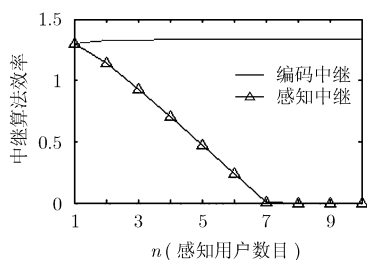


图5 不同中继算法的中继效率与中继用户个数的关系

5 结束语

本文对感知无线电的多感知中继系统进行了理论研究和协议改进。首先, 本文证明了在传统中继模式下分布式感知无线网性能无法达到理论上限, 其主要原因在于系统中存在大量的中继冗余。继而本文提出一种编码中继传输机制, 通过在缓存实现网络编码从而消除中继冗余。而且该机制的有效性在理论分析与仿真结果上均得到验证: 它使得多中继系统的流量接近理想上界, 并减少了中继所需的缓存空间, 是一种高效实用的传输机制。在今后的工作中, 我们还会考虑理想环境外其他负载的影响, 进一步完善编码中继的实用性。

参考文献

- [1] Akyildiz I, Lee W, Vuran M, and Mohanty S. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [2] Stevenson C, Chouinard G, Lei Z, Hu W, Shellhammer S, and Caldwell W. IEEE 802.22: the first cognitive radio wireless regional area network standard[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2009, 47(1): 120-138.
- [3] Krikidis I, Sun Z, Laneman J N, and Thompson J. Cognitive legacy networks via cooperative diversity [J]. *IEEE Communication Letters*, 2009, 13(2): 106-108.
- [4] Zhang Q, Jia J, and Zhang J. Cooperative relay to improve diversity in cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(2): 111-117.
- [5] Simeone O, Bar-Ness Y, and Spagnolini U. Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(12): 2351-2360.
- [6] Gambini J, Simeone O, and Spagnolini U. Cognitive relaying and opportunistic spectrum sensing in unlicensed multiple access channels [C]. IEEE ISSSTA Proceedings, Bologna, Italy, Aug. 2008: 371-375.
- [7] Devroye N, Mitran P, and Tarokh V. Limits on communications in a cognitive radio channel [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 44(6): 44-49.
- [8] 杨黎, 王晓湘, 赵堃. 多天线感知无线电中的协作频谱感知算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 30(10): 2338-2342.
Yang L, Wang X, and Zhao K. Cooperative spectrum sensing algorithm in multi-antenna cognitive radio. *Journal of Electronic and Information Technology*, 2009, 30(10): 2338-2342.
- [9] Jovicic A and Viswanath P. Cognitive radio: an information-theoretic perspective[C]. IEEE ISIT, Seattle, USA, Jul. 2006: 2413-2417.
- [10] Sridharan S and Vishwanath S. On the capacity of a class of MIMO cognitive radios [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 103-117.
- [11] Ahlswede R, Cai N, and Li S R, et al. Network information flow [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [12] Li S R, Yueng R W, and Cai N. Linear network coding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(2): 371-381.
- [13] Ho T, Koetter R, Medard M, Karger D, and Effros M. The benefits of coding over routing in a randomized setting [C]. ISIT, Yokohama, Japan, Jun. 2003: 442-447.
- [14] Chou P A, Wu Y, and Jain K. Practical network coding [C]. Allerton Proceedings, Illinois, USA, 2003, 41: 40-49.
- [15] Chachulski S, Jennings M, Katti S, and Katabi D. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing [C]. ACM SIGCOMM, Kyoto, Japan, Aug. 2007: 169-180.
- [16] Chen W, Yu L, Wang W, and Xiong F. Trusted network coding in wireless Ad hoc networks [C]. IEEE Globecom, Miami, USA, Dec. 2010.
- [17] Umehara D, Hirano T, Denno S, Morikura M, and Sugiyama T. Wireless network coding in slotted ALOHA with two-hop unbalanced traffic[J]. *IEEE Journal of Select Areas in Communications*, 2009, 27(5): 647-661.
- [18] Zhang J and Zhang Q. Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks [C]. ACM MobiHoc, New Orleans, USA, May 2009: 23-32.
- [19] 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, 36(1): 92-98.
Zhu J, Zheng B, and Zhou Y. Cooperative spectrum sensing in multiuser cognitive radio networks with best relay selection [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 36(1): 92-98.

王蔚: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为网络编码、无线网络协议及感知无线电。

喻莉: 女, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络编码、无线网络协议及数字视频标准。

朱光喜: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信系统、数字视频编码、传输及应用。