

基于功率分配与中继选择联合优化的协作 MAC

喻超¹,芮雄丽²,曹雪虹²

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;
2. 南京工程学院 通信工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:针对传统中继选择算法中信道条件利用不足及等功率分配资源利用率低等问题,在解码转发协作无线传感器网络中,提出基于信道状态的中继选择与功率分配算法,以达到最小化系统发射功率的目标。在最大发射功率、平均误比特率及最大信道信噪比限制下,对候选中继节点进行最优功率分配,并根据传输距离和对应的能量消耗完成中继选择。以生命周期为主要性能指标对 OcoopMAC (Optimal wireless sensor network cooperative MAC) 和现有的 MAC 协议进行仿真和比较,给出了联合优化下的协作 MAC 协议流程,有效提高了系统的资源分配。仿真结果表明,该功率分配方案和中继选择策略在提高系统网络生命周期方面比现有算法有显著提高。

关键词:协作通信;MAC 协议;功率分配;中继选择;生命周期

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)10-0006-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.10.002

A Cooperative MAC Based on Joint Optimization of Power Allocation and Relay Selection

YU Chao¹, RUI Xiong-li², CAO Xue-hong²

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. College of Communication Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: As the under-utilization channel condition and low power allocation resource utilization of traditional relay selection algorithm, a relay selection and power allocation algorithm based on the channel state information is proposed to minimize the transmission power for Decode-and-Forward (DF) cooperative wireless sensor networks. Power is optimally allocated to source and relay nodes with the objective of minimizing the total transmission power under the limit of maximum transmitted power, the average bit error rate and maximum channel Signal-to-Noise Ratio (SNR), and relay is selected according to the transmission distance and the corresponding energy consumption. The simulation and comparison between OcoopMAC (Optimal wireless sensor network cooperative MAC) and existing MAC protocol are made by using the lifetime as the key performance indicators. Results verify that OcoopMAC significantly improves network performance.

Key words: cooperative communication; MAC protocol; power allocation; relay selection; lifetime

1 概述

协作通信通过节点间的协作获得很好的空间分集,引起了广泛关注。通过无线信道的传播,使目标节点接收的信号功率更强、更稳定,进而提升系统性能,使通信的传播范围更广。无线传感器网络由许多个传感器节点组成。由于地理位置及环境等因素的影响,节点能源的更换与续充非常困难,且节点受大小、功率和硬件复杂度的约束,这为协作通信和无线传感器网

络的结合提供了可能。在保证端到端传输的通信质量要求下,协作通信比传统通信有明显的节能效果。因此,结合使用协作通信技术,可以减少无线传感网络的传输能耗^[1],从而延长网络生命周期。

研究表明,协作通信中通过合理选择中继节点、分配中继节点功率,能降低传输能耗,提高系统性能。文献[2]提出基于放大转发下的中继分配方案,在收发端信噪比限制下使中继节点功率达到最小化。文献

收稿日期:2016-01-06

修回日期:2016-05-10

网络出版时间:2016-09-19

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划基金项目(CXZZ12_0475)

作者简介:喻超(1994-),男,硕士,研究方向为无线通信中的智能信号处理;曹雪虹,博士生导师,研究方向为无线通信中的智能信号处理。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160919.0842.042.html>

[3]提出一种节省能量的中继分配方案,该方案利用时隙的信道状态和所剩余的能量选择出性能最优的中继节点,使功耗最小及网络生命周期更长。文献[4]提出一种单个中继节点的分配方案和中继节点的功率分配,选出总发送功率最小的节点作为最好的中继节点。文献[5]提出一种无线传感网中单中继选择算法,该算法基于MAC层RTS-CTS信号的功率控制。Liu Pei等^[6]提出基于无线局域网的Coop-MAC,性能优于802.11b,但存在节点需要数据发送请求的限制。文献[7]提出由竞争成为中继节点时发送节点控制帧,但会产生接收端的碰撞。文献[8]提出不同的退避时隙,但功率资源利用率不高。文献[9]提出基于能效分析和功率分配的协作MAC协议,但没有对中继节点选择进行研究。文献[10]提出无线传感网中的能效传输方案,缺少对中继的协作。文献[11]提出在无线传感网下的协作传输,但功率分配方案没有进一步优化。文献[12]是多节点对多节点的传输方案,存在能耗较大的问题。文献[13]提出基于距离选择中继的方案,但缺少对功率分配的优化。文献[14]提出无线通信中基于能效的中继选择,在功率分配方面需进一步的分析和优化。

在无线传感器网络中,文中采用解码转发的协作通信方式,以最小化系统发射功率为目标,在满足最大发射功率限制和平均误比特率限制及最大信道信噪比限制下,对候选中继节点进行功率分配,并由源节点根据源节点到候选中继节点的传输距离和对应的能量消耗完成中继选择,从而减少能量损耗,延长网络生命周期。

2 系统模型

协作通信模型如图1所示。

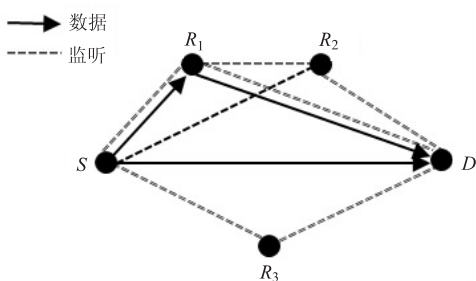


图1 协作通信模型

该模型由1个源节点、 N 个候选中继节点和1个目的节点组成,分别记为 S 、 R_i 和 D ,其中 $i=0,1,\dots,N$ 。协作方式采用解码转发协议。假设 S 与 R_i 之间和 R_i 与 D 之间的信道为相互独立的瑞利衰落信道,所有信道链路的噪声是均值为零的独立加性高斯白噪声,功率为 N_0 。传输过程主要分为两个阶段:

第1阶段:源节点 S 发送信号 x ,中继 R_i 接收到的信号 y_{sr_i} 为:

$$y_{sr_i} = \sqrt{P_0} h_{sr_i} x + n_{sr_i}, i = 0, 1, \dots, N \quad (1)$$

目的节点的接收信号 y_{sd} 为:

$$y_{sd} = \sqrt{P_0} h_{sd} x + n_{sd} \quad (2)$$

第2阶段:中继节点 R_i 向目的节点转发信息。目的节点接收到的信号 $y_{r_i d}$ 为:

$$y_{r_i d} = \sqrt{P_i} h_{r_i d} x + n_{r_i d} \quad (3)$$

其中, P_0 、 P_i 分别是源节点与中继节点 R_i 的发射功率; n_{sr_i} 、 n_{sd} 、 $n_{r_i d}$ 都是均值为零且方差为 N_0 的高斯白噪声; h_{sd} 、 h_{sr_i} 、 $h_{r_i d}$ 分别为源到目的、源到中继 R_i 、中继到目的的信道衰落系数,是均值为0且方差分别为 σ_{sd}^2 、 $\sigma_{sr_i}^2$ 、 $\sigma_{r_i d}^2$ 的复高斯随机变量,表示为 $(0, \sigma_{sd}^2)$ 、 $(0, \sigma_{sr_i}^2)$ 、 $(0, \sigma_{r_i d}^2)$ 。

信道的方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = \eta \nu^{-\beta} \quad (4)$$

其中, ν 为两个节点之间的距离; β 为传输损耗因子; η 为由传播环境决定的常量。

中继节点和目的节点通过数据报文末尾的循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)来检验收到的信号是否正确,如果中继节点正确解码, $\tilde{P}_i = P_i$,否则 $\tilde{P}_i = 0$ 。目的节点用MRC(Maximum Ratio Combining)合并所接收到的信号。

$$y_d = (\sqrt{P_0} h_{sd}^* x / N_0) y_{sd} + (\sqrt{\tilde{P}_i} h_{r_i d}^* / N_0) y_{r_i d} \quad (5)$$

其中, y_d 表示目的节点收到的信号。

3 功率分配与中继选择

3.1 功率分配

传统传输采用等功率分配的方案没有考虑系统信道状况的变化,不能对功率资源进行有效利用。因此,文中以最小化系统发射功率为目标,在满足最大发射功率限制和平均误比特率限制及最大信道信噪比限制下,对候选中继节点进行功率分配,从而提升整个系统的性能。

$$\Phi = \{ P = (P_0, P_1, \dots, P_n), P_i \leq P_i^{\max}, i = 0, 1, \dots, N, |h_{r_i d}|^2 \frac{P_i}{N_0 W} \leq \text{SNR}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N, \text{BER} \leq \frac{N_0^2 A^2 P_i \sigma_{r_i d}^2 + N_0^2 B P_0 \sigma_{sr_i}^2}{b^2 \log_2^M P_0^2 P_i \sigma_{sd}^2 \sigma_{sr_i}^2 \sigma_{r_i d}^2}, i = 1, 2, \dots, N \} \quad (6)$$

其中, P_0 为源节点的发射功率; P_i 为中继节点的发射功率, P_i^{\max} 为节点 i 的最大发射功率, $\{ P_i \leq P_i^{\max} \}$ 是对每个节点的发射功率进行限制; $h_{r_i d}$ 为中继到目的节点的信道衰落系数,是均值为0、方差为 $\sigma_{r_i d}^2$ 的复高

斯随机变量,表示为 $(0, \sigma_{r,d}^2)$; SNR^{\max} 为信道中允许的最大信噪比; N_0 为加性高斯白噪声; W 为信道带宽。

由文献[11]的平均误比特率上限得出 $\text{BER} \leq \frac{N_0^2 A^2 P_i \sigma_{r,d}^2 + N_0^2 B P_0 \sigma_{sr,i}^2}{b^2 \log_2^M P_0^2 P_i \sigma_{sd}^2 \sigma_{sr,i}^2 \sigma_{r,d}^2}$, 其中: P_i 为中继 R_i 的发射功率; P_0 为源节点的发射功率; σ_{sd}^2 、 $\sigma_{sr,i}^2$ 、 $\sigma_{r,d}^2$ 为信道方差; $b = \sin^2(\pi/M)$, M 为进制数。

$$A = (M - 1) / 2M + \sin(2\pi/M) / 4\pi \quad (7)$$

$$B = 3(M - 1) / 8M + \sin(2\pi/M) / 4\pi - \sin(4\pi/M) / 32\pi \quad (8)$$

定义 $P_f = \sum_i P_i$ 为系统总功率,以最小化功率消耗为目标进行功率分配,则有:

$$\min: P_f \quad (9)$$

$$\text{s. t. } P \in \Phi$$

即 $\min: \sum_i P_i, i = 1, 2, \dots, n$, 由拉格朗日公式可知:

$$\max: - \sum_i P_i - \sum_i \lambda_i (P_i - P_i^{\max}), \min \lambda$$

化简为:

$$\max: [- \sum_i P_i - \sum_i \lambda_i P_i] + \sum_i \lambda_i P_i^{\max}, \min \lambda \quad (10)$$

可把该式分为两部分:

$$\max: [- \sum_i P_i - \sum_i \lambda_i P_i] \quad (11)$$

$$\lambda_i (t + 1) = [\lambda_i (t) + \alpha(t) (P_i - P_i^{\max})]^+ \quad (12)$$

其中, $[a]^+$ 等于 $\max(a, 0)$; P_i 为节点 i 的功率;

$\alpha(t)$ 为迭代步长, t 为迭代指数, $\alpha(t) = \frac{1}{t}$; λ_i 为拉格朗日乘子,通过调整 λ_i 来收敛到最优解。

功率分配算法如下:

初始化:设置 $t = 0$ 。

步骤如下:

(1) 中继 i 选择自己的初始非负值 λ_i , 并将 λ_i 及中继节点 i 的接收功率 $P_{r,i}$ 传给源节点。

(2) 源节点通过式(11)、式(12)更新 P_i 、 $\lambda_i(t + 1)$ 。

(3) 令 $t = t + 1$, 回到步骤 2 直到满足限制条件 Φ 。

输出: 中继 i 的最优 P_i 。

3.2 中继选择

在系统功率分配结束之后,源节点根据源节点-候选中继节点距离与源节点-目的节点直传距离比及其对应的能量损耗与剩余能量比的最小乘积值,选择出最优的中继节点。

文中的中继选择算法如下:

输入: 节点数据、剩余能量 $Q_{res,i}$ 、源节点发射功率 P_0 、

候选中继 i 的接收功率 $P_{r,i}$ 、中继 i 的功率 P_i 、数据包长度 L 、源到目的直传距离 d_{dir} 、传输数据速率 a 、常数 c 、路径衰耗因子 β 。

步骤如下:

(1) 计算源节点到中继节点 i 的距离 d_i :

$$P_{r,i} = cP_0/d_i^\beta, \beta = 2 \rightarrow d_i = \sqrt{cP_0/P_{r,i}}$$

(2) 计算能量消耗:

$$q_i = P_i 8L/a + P_0 8L/a$$

(3) 分别计算 Q_i 和 τ_i :

$$Q_i = q_i / Q_{res,i}$$

$$\tau_i = d_i / d_{dir}$$

(4) 计算 φ_i 的值:

$$\varphi_i = Q_i \times \tau_i$$

输出: $\min \varphi_i$

4 协议流程

(1) 源节点有数据要发送时,对信道监听,等待信道空闲后持续 DIFS,发出 RTS 信号。

(2) 目的节点正确解码出 RTS 信号,则返回 CTS 信号。源节点收到 CTS 信号后等待中继节点的 HTS 信号,HTS 帧格式如图 2(a) 所示。在不同的时隙 slots 内,候选中继节点将包含自身剩余能量、接收功率 $P_{r,i}$ 及 λ_i 的 HTS 信号传给源节点,若源节点在两个时隙内仍未收到 HTS 信号,则进行非协作传输。若源节点收到 HTS 信号,则根据最优功率分配算法,在满足 Φ 条件下进行功率分配,得出源节点和候选中继节点的功率。

2	2	6	6	1	1	1	4
Frame Control	Duration	Transmitter Address (Helper ID)	Receiver Address (Source ID)	$Q_{res,i}$	λ_i	$P_{r,i}$	FCS

(a) HTS 帧格式

Frame Control	Duration	Receiver Address (Helper ID)	P_i	FCS
---------------	----------	------------------------------	-------	-----

(b) RTH 帧格式

图 2 帧格式

(3) 功率分配结束后,源节点根据收到的 HTS 信号,利用 $P_{r,i}$ 和 P_i 分别得出源到候选中继的传输距离 d 和能量消耗 q_i ,由中继选择算法选出使 φ_i 最小的最优中继。

(4) 源节点在等待 SIFS 后,向最优中继发送 RTH (Request To Help) 信号,RTH 帧格式如图 2(b) 所示。RTH 中携带有最优中继的发射功率,源发送数据。没有被选中的中继进入休眠状态。

(5) 目的节点接收到数据包,则向源节点反馈 ACK 信号。若源节点在发送数据后的 SIFS 间隔内没有收到 ACK 信号,表明传输失败,重新进入信道监听,

准备重新发送 RTS。

(6)源节点收到 ACK 信号后,此次传输过程结束。当网络中所有节点的信道状态和剩余能量都小于数据

传输所需要的损耗时,整个传感器网络的生命周期结束。源节点、中继节点和目的节点的时序图如图 3 所示。

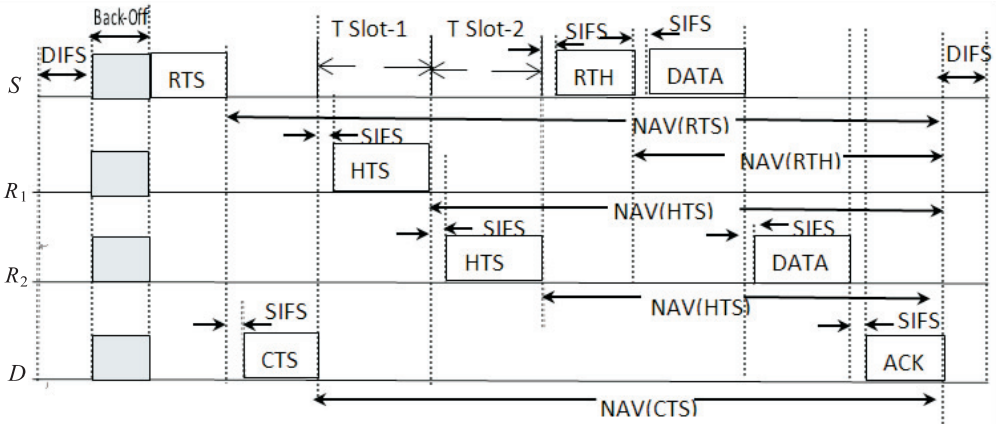


图 3 协作传输下的 MAC 时序

5 仿真结果分析

在所有的仿真中,采用 BPSK 调制。假定目的节点在圆中心位置,其他节点在半径为 50 m 的圆形区域内随机地均匀分布。传输损失因子 $\alpha = 2$, $\eta = 1$, 每个节点起始具有的能量 $E_{init} = 1 \text{ J}$, 发送一个数据包的电路损耗能量 $E_c = 0.01 \text{ J}$, 中继节点对数据信号进行处理消耗的能量 $E_p = 0.005 \text{ J}$, $N_0 = -40 \text{ dBm}$, P_i^{max} 为 0.2 W , 报文长度为 8 192 bits, 数据速率为 1 Mbit/s, 最大平均误比特率为 $\epsilon = 10^{-3}$, 信道中允许的最大信噪比 $SNR^{max} = 6 \text{ dB}$ 。其中,与 MAC 和能耗相关的参数引用文献[11-12]。网络的生命周期定义为网络从节点的传输过程开始到网络中所有节点的信道状态和剩余能量均不足以支持数据传输产生的损耗时的周期。文中无线传感网的网络生命周期通过传输过程结束后目的节点所收到的数据包数目来衡量。

OcoopMAC 协议和非协作方式在不同数据包长度下的生命周期比较如图 4 所示,节点个数为 50,在数据包为 1 kb 时,OcoopMAC 协议的网络生命周期和非协作方式接近。采用协作方式时,由于中继数目的增加,电路消耗增加,数据包长度也随之增加,当进行中继传输节省的能量大于电路损耗能量时,OcoopMAC 协议比非协作方式性能好。

无线传感网中不同 MAC 协议下的网络生命周期的比较如图 4 所示,最优信道 MAC 源节点分布随机,中继通过信道最优来选择。最大剩余能量 MAC 源节点分布随机,中继通过最大剩余能量来选择。非协作方式性能最差,最优信道 MAC 和最大剩余能量 MAC 性能接近,OcoopMAC 协议性能优于 WcoopMAC^[11]。可以看出,提出的 OcoopMAC 协议的性能更好,文中算法在满足最大发射功率限制和平均误比特率限制及最

大信道信噪比限制下,对候选中继节点进行功率分配并充分利用了源节点到候选中继节点的传输距离和对应的能量消耗,选出最优中继进行协作传输,有效地延长了网络的生命周期。当节点数目越多,可以选择的中继节点越多,所选出的最优中继性能越好,网络生命周期越长。

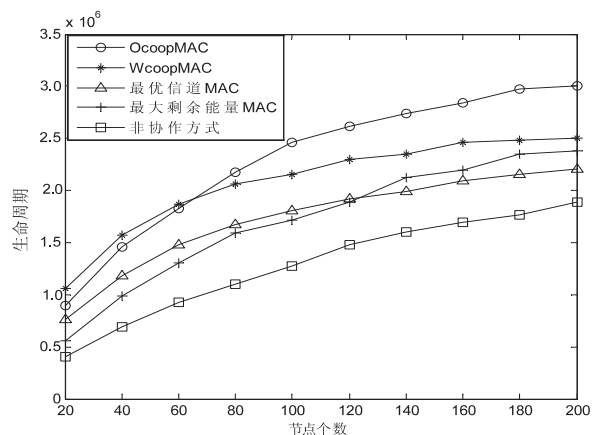
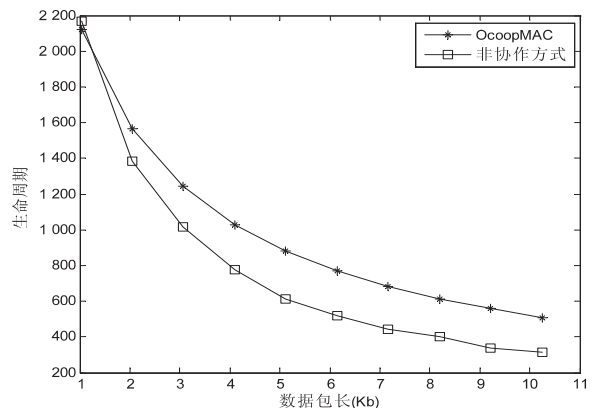


图 4 OcoopMAC 协议和非协作方式及不同 MAC 协议下的网络生命周期的比较

不同 MAC 协议在不同平均误比特率下的网络生命周期比较见图 5,最优信道 MAC 和最大剩余能量

MAC 性能相近,OcoopMAC 性能优于 WcoopMAC。当平均误比特比大于 $10^{-2.1}$ 时,OcoopMAC 在满足最大发射功率限制和平均误比特率限制及最大信道信噪比限制下,通过协作所节省的能量小于因增加中继节点而产生的电路损耗,生命周期比非协作方式的生命周期短。不同 MAC 协议的平均剩余能量的比较见图 5,平均剩余能量为传输过程结束后整个网络的剩余能量。最优信道 MAC 和最大剩余能量 MAC 的平均剩余能量接近,OcoopMAC 的平均剩余能量少于 WcoopMAC,可以看出 OcoopMAC 在减少网络平均剩余能量方面更有效。

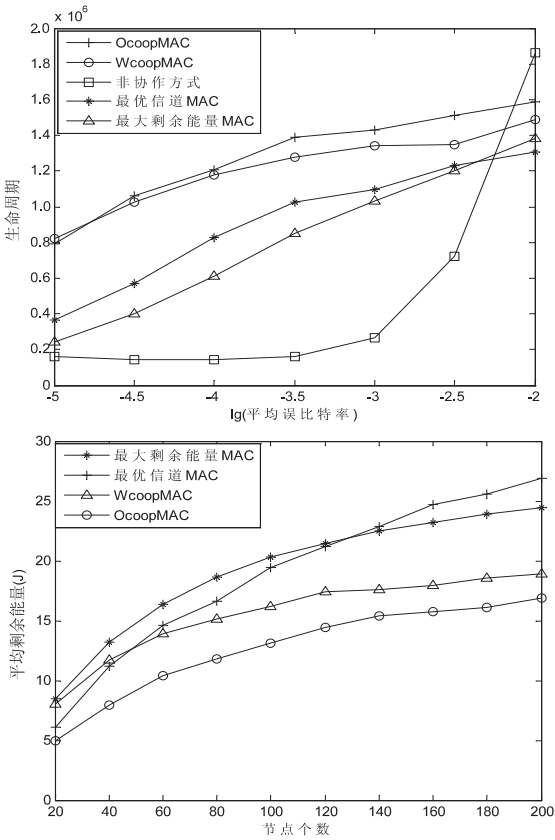


图 5 不同 MAC 协议在不同平均误比特率下的网络生命周期及平均剩余能量的比较

6 结束语

文中主要研究了解码转发协作系统中最优功率分配和中继选择策略。在解码转发协作无线传感器网络中,提出基于信道状态的中继选择与功率分配算法的协作 MAC,以达到最小化系统发射功率的目标。指出在满足最大发射功率限制和平均误比特率限制及最大信道信噪比限制下,对候选中继进行功率分配,源节点通过源到候选中继的传输距离和对应的能量消耗完成中继选择。给出了联合优化下的协作 MAC 协议流程,有效提高了系统的资源分配。仿真结果表明,该功率分配方案和最优中继选择策略在提高系统网络生命周期方

面比现有算法有显著提高。

参考文献:

- [1] Sadek A K, Yu W, Liu K J R. On the energy efficiency of cooperative communications in wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 6(1): 1-20.
- [2] Qi Sun, Li Lihua, Lei Song. Energy efficient relay selection for two-way relay system [C]//Proc of 2012 IEEE vehicular technology conference. Japan: IEEE, 2012: 1-5.
- [3] Wei Yifei, Teng Yinglei, Wang Li, et al. Energy-saving cooperative communication over fading-channels with relay selection and power-control [J]. China-Communications, 2012, 9(6): 124-134.
- [4] Zhou Min, Cui Qimei, Jantti R, et al. Energy-efficient relay selection and power allocation for two-way relay channel with analog network coding [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 816-819.
- [5] Zhou Z, Zhou S, Cui J, et al. Energy-efficient cooperative communications based on power-control and selective single relay in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3066-3078.
- [6] Liu Pei, Tao Zhifeng, Narayanan S, et al. CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 340-354.
- [7] Shan Hanguan, Zhuang Weihua, Wang Zongxin. Distributed cooperative MAC for multi-hop wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(2): 126-133.
- [8] 孙东. 一种新的 WLAN 协作通信 MAC 层协议 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [9] Liu W, Li G, Zhu L. Energy efficiency analysis and power allocation of cooperative communications in wireless sensor networks [J]. Journal of Communications, 2013, 8(12): 870-876.
- [10] Kim J W, Barrado J R R, Jeon D K. An energy-efficient transmission scheme for real-time data in wireless-sensor networks [J]. Sensors, 2014, 15(5): 11628-11652.
- [11] Zhai Chao, Liu Ju, Zheng Lina, et al. Lifetime maximization via a new cooperative MAC protocol in wireless sensor networks [C]//Proc of global telecommunications conference. [s.l.]: IEEE, 2009: 720-725.
- [12] Fang Haoran, Lin Xingqin, Lok T M. Power-allocation for multiuser-cooperative communications networks under relay-selection degree bounds [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2991-3001.
- [13] Rana M R, Hossain M F, Hasan M K, et al. Distance-aware reliable relay selection provisioning in wireless cooperative MAC protocol [C]//Proc of IFOST. [s.l.]: [s.n.], 2014.
- [14] Hang T Z, Hao S Z, Cuthbert L, et al. Energy-efficient cooperative relay selection scheme in MIMO relay cellular networks [C]//Proceeding of the 2010 IEEE international conference on communication systems. Singapore: IEEE, 2010: 269-273.