

基于速率自适应的中继协作 MAC 协议设计

李方敏^{1,2}, 张韬¹, 胡双印², 刘新华²

(1. 长沙学院计算机工程与应用数学学院, 湖南 长沙 410022; 2. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 现有无线协作 MAC 协议算法很少综合考虑信道状态和节点能量等因素的速率自适应优化设计。针对这一问题, 设计一种新的协作 MAC 协议方案, 该方案融合随机线性网络编码, 并为隐藏终端问题引入请求中继帧机制; 还根据接收信号的强度自适应的选择随机值, 以协作传输条件为判断依据, 来选择中继节点, 从而进一步提升网络性能。仿真结果表明, 所提方案能够达到提升网络性能的目的。

关键词: 速率自适应; 中继; 协作; 协议设计

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Relay-based cooperative MAC protocol with rate adaptation

LI Fang-min^{1,2}, ZHANG Tao¹, HU Shuang-yin², LIU Xin-hua²

(1. School of Computer Engineering and Applied Mathematics, Changsha University, Changsha 410022, China;

2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The existing wireless cooperative MAC protocols rarely consider the impact of channel condition and node energy consumption. To this issue, a new wireless cooperative MAC protocol was proposed, which used the random linear network coding, and introduced a mechanism of request relay frame to solve the hidden terminal problem. Specifically, the proposed method adaptively adjusted the node rate according to RSSI, and determined the relay node based on the requirements of cooperative transmission. The simulation results show that the network performance can be improved through deploying the proposed protocol.

Key words: rate adaption, relay, collaboration, protocol design

1 引言

近年来, 物联网和移动终端持续发展以及各种新型业务的不断涌现, 无线网络用户和节点数量越来越多, 但是网络的带宽资源是有限的, 而面临越来越多和越来越好的业务需求, 这些都要求更高的传输速率和更好的通信质量。然而随着网络的密集化部署, 用户的接入选择、小区间干扰、无线资源的利用等问题亟待解决, 因此, 无线网络通信技术仍存在许多问题需要进一步研究。在车载网络、无线传感器网络、移动网络、物联网、认知网络中, 无线协作以及协作 MAC 协议都被应用其中。所以, 无线协作通信网络中 MAC 协议技术的研究具有重

要意义。

对于无线协作 MAC 协议的算法设计, 已经有很多文献对这方面进行了研究。Shahen 等^[1]针对分布式无线网络提出了一种新的协作式 MAC 协议, 该协议主要包括了 3 种数据传输模式, 即直接传输、合作中继和多跳中继, 定义了新的算法来选择合适的的数据传输模式, 并选择最佳中继节点, 以提高系统吞吐量为目标, 得出了基于马尔可夫链模型的分析模型以及获得最佳中继节点的概率。Liu 等^[2]提出了一种具有快速中继选择的协作式 MAC 协议, 以提高无线自组织网络中的协作效率和性能。在该协议算法中, 采用有效的速率差分、优先级差分和 k 轮竞争的解决方案, 快速、准确地选择最优中继,

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61373042); 长沙市科技计划基金资助项目 (No.ZD1601004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61373042), The Science and Technology Project of Changsha (No.ZD1601004)

提高了协作效率；同时，引入了分组背负机制以减少预留开销，并加速数据分组传输。Saifullah 等^[3]提出了一种用于车载自组织网络的基于网络编码的协作式的新型 MAC 协议，同时，采用协作自动重传请求和网络编码技术^[6-10]增强吞吐量。该算法具体分为 2 个阶段，第一阶段——合作，数据被发送到中继节点；第二阶段——网络编码^[11-14]，最大化接收的分组。Achuthan 等^[4]提出应用于无线网状网络的新型媒体接入控制策略，为中继节点提供额外的信道接入优先级；该协作 MAC 协议算法的关键是中继节点将根据输入和输出分组比例来调整其后退窗口的大小，分析了双向中继和交叉拓扑两个基本网络结构，分析结果显示了该算法明显提高了网络吞吐量。尽管协作 MAC 协议的算法很多，然而并没有考虑信道状态和节点能量等因素的影响，同时，结合速率自适应算法来选择中继节点，并对隐藏终端问题进行处理，因此，本文提出了速率自适应的中继协作方案。

2 系统模型

系统模型如图 1 所示。系统模型中各个节点均有一个通信范围 *Range*。节点 D 作为目的节点，接收从其他 *K* 个节点发送来的数据分组，并且这 *K* 个节点随机分布在节点 D 的通信范围内，有些节点彼此在 *Range* 的通信范围内成为邻居节点，而有些节点彼此超过了 *Range* 的通信范围而成为隐藏节点。将节点 S 作为源节点，持续向目的节点发送数据，而其他节点 H_1, H_2, H_3 将作为源节点 S 的隐藏终端节点。图 1 仅展示了若干隐藏终端节点，在这里使用 $H=\{H_1, H_2, H_3, \dots\}$ 来进行表示。

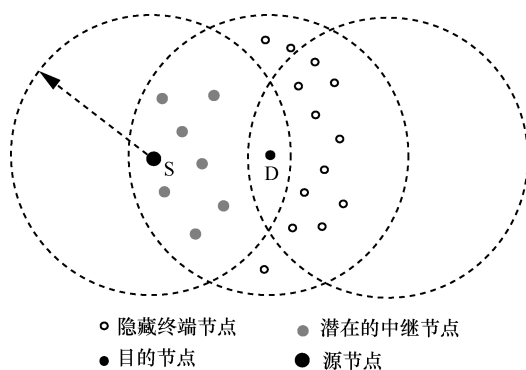


图 1 系统模型

对于该模型来说，隐藏终端节点对于网络性能

的影响严重，随着隐藏终端节点个数的增加，碰撞事件发生得越来越频繁，碰撞概率随之增加，进一步导致的问题就是网络吞吐量下降。因此，本文对数据帧结构进行重定义并引入请求中继帧，对中继选择应该速率自适应算法，来达到提高网络性能的目的。

3 新的帧结构

重新定义的数据帧结构将有效载荷部分进行划分，平均分成 *N* 个片段，每一个片段包含 3 个部分：编码片段、编码向量和循环冗余校验^[15-17]。其中，编码片段是原始数据经过编码向量编码之后的数据，循环冗余检验是为了校验编码片段和编码向量是否在传输过程中出现了错误。如果循环冗余检验显示该片段出现了错误，则说明这一片段没有被正确传输，但是不影响其他片段被正确接收。

假设原始有效载荷字节数为 *L*，按照重新定义的数据帧结构，将原始有效载荷分成相同大小的 *N* 个片段，对于每个片段来说，比特大小用 *l* 来表示，则 *l* 可表示为

$$[l] = \frac{8 \times L}{N} \quad (1)$$

需要注意的是，有效载荷大小可能并不是片段大小 *l* 的整数倍。此时可以在有效载荷最后一位后补“0”来填充。可通过向量 \mathbf{D}_{data} 来进行表示

$$\mathbf{D}_{\text{data}} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T \quad (2)$$

根据随机线性网络编码技术的核心思想，在节点处，对应于每一个有效载荷片段产生随机的编码系数，并且编码系数是线性独立的，这样一来编码系数组成了系数矩阵，矩阵大小为 $N \times N$ ，在此使用矩阵 \mathbf{C} 来进行表示。其中， \mathbf{c}_n 表示第 *n* 个有效载荷片段所对应的系数向量。 \mathbf{c}_n 是一个 $1 \times N$ 的向量。由上述分析表示出了数据向量和编码系数向量。在此使用 $\mathbf{D}'_{\text{data}}$ 表示经过编码后的数据向量，其具体表示为

$$\mathbf{D}'_{\text{data}} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

此处的编码系数矩阵并不是唯一的，这里对编码系数矩阵的唯一要求就是系数向量间是线性独立的。完全可以使用其他线性独立的系数矩阵来对原始数据进行编码，当接收端节点接收到 N 个片段之后，就可以通过编码系数解码出原始数据。更重要的是，接收端节点并不要求一次性接收到全部片段，可以通过其他节点（如中继节点）来接收编码后的数据片段，将原始数据解析出来。由于编码系数矩阵各向量之间是线性独立的，所以矩阵的秩为 N ，即系数矩阵是可逆的，因此可得

$$D_{data} = C^{-1} D'_{data} \quad (4)$$

4 请求中继帧

为了缓和隐藏终端问题的影响和提高协作效率，在此提出请求中继帧的策略。当源节点向目的地节点发送数据帧，如果目的节点正确接收到数据帧，则发送 ACK 帧作为响应完成此次传输。但是如果目的节点没有正确地接收到数据帧，则发送广播请求中继帧（RRF, request relay frame），则源节点和目的节点监听到此中继请求帧后，竞争信道优先获取到信道访问权的节点成为中继，协助发送数据帧，直到目的节点完整接收到数据帧为止，即接收到目的节点发送的 ACK 帧为止，其基本的协作传输过程如图 2 所示。



图 2 协作时序

另外，节点只有在侦听到目的节点发送的 ACK 帧后，其随机回退值才会递减，参与信道竞争，如果侦听到信道忙状态，回退值保持不变。这样一来，重复的碰撞就可以避免了。需要说明的是，即使采用上述策略可以从很大程度上缓解由于碰撞导致的接收失败的问题，但是不能忽略的是目的节点在一次传输过程中没有发送 ACK 帧，即一次数据传输达到了最大重传次数，此时隐藏终端节点回退值保持不变是不合理的，因为，此时信道状态已经空

闲。对于这种情况，只需要在每一个节点缓存一个目的节点广播的 RRF 帧重传次数的变量即可。当该值达到最大重传次数，说明信道状态空闲，节点的随机回退值减小，参与信道竞争，开始新一轮数据传输。

为了适应本文所提出的对隐藏终端问题的处理策略，需要对传统 IEEE 802.11 协议中的 ACK 帧结构进行重新的设计，增加源节点地址，以便中继节点判断清理缓存的工作。

另一个重要的是 RRF 帧结构的设计，如图 3 所示。中继节点应该从 RRF 帧中获取到源节点地址、目的节点地址以及需要传输的数据片段信息和源节点与目的节点之间的传输速率 S_{sd} 。

中继请求帧

2	2	6	6	6	2	1	4
帧控制	持续期	广播地址	目的地址	源地址	片段信息	S_{sd}	CRC

图 3 RRF 帧结构

5 中继节点选择算法

中继节点选择算法的核心思想是根据测量的接收信号强度（RSS, receive signal strength）来自适应调节传输速率，并选择性能更好的中继节点完成协作传输。

具体过程为中继节点侦听来自接入点 AP 发送的广播帧或其他帧，它将根据接收帧测量的 RSS 来保存在队列中，当新的数据帧被接收后，根据重传次数和已有的 RSS 使用评估算法来评估 RSS，并将帧的重传次数考虑在内，尝试选择该帧的最佳速率进行协作传输。如果以某种速率导致帧传输不成功，则应该根据最新的接收信号强度和重传次数，下次数据传输尝试使用较低的数据传输速率，确保数据帧被正确接收。

关于评估算法，本文采用最小平方误差的线性估计方案来评估 RSS。假设队列中保存一系列 RSS 数据，利用这些数据来预测当前时刻的 RSS 值。即

$$RSS_n = - \sum_{k=1}^n \alpha_n(k) RSS_{n-k} \quad (5)$$

其中， RSS_n 表示第 n 个评估值， RSS_{n-k} 表示第 $n-k$ 个信号强度值， $\alpha_n(k)$ 表示的是预测系数，该系数的计算关系式为

$$\alpha_n(k) = \alpha_{n-1}(k) + \alpha_n(n) \alpha_{n-1}(n-k), k=1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

有了式(5)和式(6), 就可完成对当前时刻 RSS 值的评估, 进而在有发送请求的时候选择合适的速率发送数据。

6 中继协作

具体的中继协作传输算法以 IEEE802.11b 为例分析如下。

1) 如果源节点向目的节点的传输速率 S_{sd} 为 11 Mbit/s, 源节点和目的节点之间的通信状态良好, 源节点可直接向目的节点传输。此时总的传输时间可表示为

$$T_h = DIFS + \frac{P}{S_{sd}} + E[r] \left(SIFS + RRF + SIFS + \frac{P'_h}{S_{sd}} \right) + SIFS + ACK \quad (7)$$

其中, P 代表的是源节点向目的节点传输的已编码数据帧, 它与 S_{sd} 的比值即为在当前的传输速率下所消耗的传输时延。另外, P'_h 表示的是源节点重传没有被目的节点完整接收的数据帧, 该数据帧与 P 不同, 源节点只需重传还没有被目的节点正确接收的编码片段, $E[r]$ 表示重传次数。

2) 如果中继节点计算所得 S_{sd} 为 5.5 Mbit/s, 只有中继节点到目的节点的传输速率 S_{rd} 达到 11 Mbit/s 情况下, 最后, 所取得的吞吐量要高于直接传输所取得的吞吐量。

如果满足条件的节点有多个, 为避免碰撞一个非常简单的做法便是产生一个随机值 r_s , 由于 S_{sd} 为 5.5 Mbit/s, 而满足协作传输条件的节点的 S_{rd} 为 11 Mbit/s, 既然源节点没有传输成功, 而现在中继节点的速率更高, 应该优先使用中继节点来协作传输。因此, r_s 的取值范围 w_h 应该小一些, 考虑设定为 $[0, w]$, 其中, w 为当前节点回退窗口值, 这里将其初始值设为 31。该情况下总传输时间可表示为

$$T_m = DIFS + \frac{P}{S_{sd}} + E[r] (SIFS + RRF + R_{mrs} + SIFS + \frac{P'_m}{S_{rd}}) + SIFS + ACK \quad (8)$$

其中, R_{mrs} 表示的是中继节点由于需要一个随机值的空闲时隙所消耗的时延。 P 与 P'_m 是不同的, 分别表示的是源节点向目的地节点传输的已编码的数

据帧和中继节点向目的地节点传输的已编码的数据帧。

3) 如果中继节点计算得到的 S_{sd} 的值为 2 Mbit/s, 此种情况下的协作传输条件便是 $S_{rd} \geq 5.5$ Mbit/s。

在该协作条件下, 满足条件的邻近节点可能有多个, 一个简单的方法就是通过选择在不同范围的一个随机值 r_s , 让高传输速率节点的 r_s 取值范围小一些, 而让低数据传输速率节点的 r_s 取值范围大一些, 这样一来高数据传输速率的节点便能够优先获取到信道访问权限。因此, 将 11 Mbit/s 节点的 r_s 取值范围定义为 w_h , 将 5.5 Mbit/s 节点的 r_s 取值范围设定为 $[w+1, 2(w+1)-1]$, 用 w_m 来表示该取值范围。由此便得到了在该种情况下总的传输时间为

$$T_1 = DIFS + \frac{P}{S_{sd}} + E[r] (SIFS + RRF + R_{irs} + SIFS + \frac{P'_l}{S_{rd}}) + SIFS + ACK \quad (9)$$

其中, R_{irs} 表示的是中继节点需要等待的随机值个时隙所消耗的时延。需要说明的是, 如果满足条件的节点没有 S_{rd} 为 11 Mbit/s 的, 那么不得不从满足协作传输条件的 S_{rd} 为 5.5 Mbit/s 的节点中选择作为中继节点。

4) 最后一种情况便是 S_{sd} 为 1 Mbit/s, 这种情况下的协作传输条件便是 $S_{rd} \geq 2$ Mbit/s。

同样在满足协作传输条件的邻近节点有多个的情况下, 将 11 Mbit/s 的节点的 r_s 的取值范围定义为 w_h , 将 5.5 Mbit/s 的节点的 r_s 的取值范围设定为 w_m , 将 2 Mbit/s 的节点的 r_s 的取值范围设定为 $[2w, 4w-1]$, 用 w_l 来进行表示。由此便得到了在该种情况下总的传输时间为

$$T_s = DIFS + \frac{P}{S_{sd}} + E[r] (SIFS + RRF + R_{srs} + SIFS + \frac{P'_s}{S_{rd}}) + SIFS + ACK \quad (10)$$

其中, R_{srs} 表示的是中继节点需要等待的随机值个时隙所消耗的时延。 r_s 的值可以从 3 个范围内选取, 这取决于 S_{rd} 的值, 这也与邻近节点的分布有关。如果邻近节点中没有传输速率为 11 Mbit/s 的节点, 那么相对应 r_s 的取值只能从 w_m 和 w_l 范围内选择了。

通过以上 4 种情况, 将中继协作传输策略做了

详细阐述, 但如果没有符合协作传输条件的中继节点, 则中继协作传输策略就退化为通过源节点来重传了。

其中一个问题是源节点如何处理才能够确定没有符合协作传输条件的中继节点。源节点在发送数据帧后会启动一个定时器, 如果定时器结束仍然没有收到目的地节点发送的 ACK 帧或中继节点协作传输的数据帧, 并不会立即发起重传, 而是用到一个随机值。如果源节点向目的地节点的传输速率在 11 Mbit/s, 那么源节点在接收到目的地节点发送的 RRF 帧后可直接考虑重传没有被正确接收的数据帧。但是如果源节点向目的地节点的传输速率在 5.5 Mbit/s, 如果没有符合协作传输条件的中继节点, 那么源节点可在 $[w+1, 2(w+1)-1]$ 的范围内选择一个随机值, 这样一来, 即使没有符合协作传输条件的中继节点, 源节点也可以启动重传, 完成数据帧的传输, 其他情况以此类推。

5) 考虑到现实环境中通信设备能量有限, 特别是移动设备, 通过采取一定的措施来延长网络生存时间是非常有意义的, 从而能够改善系统的能耗均衡性。

假设节点初始能量值为 E_i , 节点当前的能量值为 E_c , 当节点剩余能量高于门限值时, 节点可以不考虑能量因素, 通过上述协作传输条件来判断是否参与中继节点竞争。如果节点的 E_c 低于门限值, 就需要考虑能量因素, 防止节点能量被快速耗尽, 在此考虑将门限值设为能量初始值的 30%。因此

$$f(E_c) = \begin{cases} 1, E_c \leq 0.3E_i \\ 0, E_c > 0.3E_i \end{cases} \quad (11)$$

当 $f(E_c)$ 的值为 1 时, 说明当前节点需要考虑能量因素, 有上述中继选择策略算法中, 节点需要选择一个随机值 r_s , 其取值范围定义为 w_e 来进行统称, 其值可为 w_h, w_m, w_l , 且 w_e 需要与对应的传输速率进行匹配, 高数据传输速率的取值范围小, 低数据传输速率的取值范围大, 对应到此处考虑节点能量因素时, 希望 E_c 大的节点优先竞争成为中继节点参与协作传输, 而 E_c 小的节点不参与协作传输。因此

$$r_{se} = r_{se}(1 - f(E_c)) + f(E_c)w_l, (w_e = w_h, w_m, w_l) \quad (12)$$

其中, r_{se} 表示的是考虑了节点剩余能量因素之后对产生的随机值 r_s 调整之后的值。经过调整之后的 r_{se}

的值, 将剩余能量高于门限值的节点最终的随机值不作调整, 而将剩余能量低于门限值的节点的最终的随机值调整到了 w_l 的范围。这样一来避免了信道条件好的节点因为频繁参与协作传输而导致能量快速耗尽。

7 仿真结果

所有节点随机分布在目的地节点 AP 周围, 并且目的节点 AP 周期性的发送信标。将通信范围 *Range* 的值设置为 100 m, 并且目的节点 AP 设置在圆心的位置, 在同样的自由空间信道模型的无线信道条件下, 将本文协议其他协作 MAC 协议进行对比, 这里将源节点向目的地节点发送的数据传输速率设置为 1 Mbit/s。同时将隐藏终端节点个数 N 从 1~10 进行变化, 在同等条件下比较各个协作 MAC 协作的性能。为了方便将本文协议定义为 RSC-MAC 协议, 同时, 将没有采用速率自适应算法来选择中继的 MAC 协议定义为 RLNC-MAC 协议。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名	参数值
通信范围 <i>Range</i>	100 m
有效载荷字节	400 B
有效载荷分片个数	5
竞争窗口大小	31
RRF 字节	29 B
S_{sd}	1 Mbit/s
最大重传次数	7
时隙大小	10 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS	20 μ s

从图 4 中可以看出, RSC-MAC 协议的吞吐量要高于 RLNC-MAC 协议和 RCHC-MAC^[5]协议所取得的吞吐量值。这就验证了本文提出的中继选择策略能够在一定程度上提高网络性能, 寻找高速中继节点带来吞吐量的提升, 同时随着隐藏终端节点个数增加, 吞吐量随之减小。但是 RSC-MAC 协议带来的吞吐量的提高是有限的。原因在于节点剩余能量的因素, 当节点剩余能量达到门限值时, 高速中继节点就会退化到低速中继节点, 此时中继选择策略的优势并不明显。

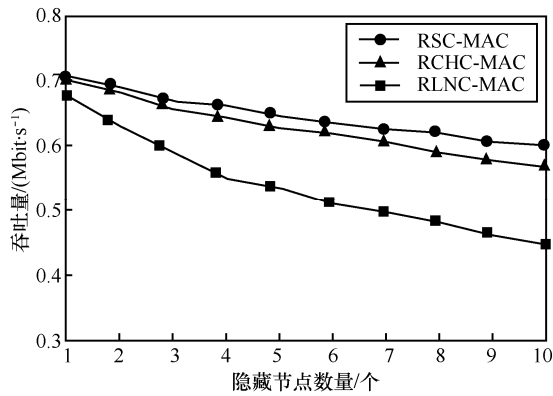


图 4 吞吐量对比

网络生存时间在不同的网络情景中可能有不同的度量方式, 本文以第一个节点的能量消耗完的时刻来计算网络生存时间。这里将源节点附近的近邻节点个数从 5 一直变化到 50, 随着节点密度的增加, 可作为信道条件良好的中继节点的数量也越来越多。为了方便, 考察将最终的网络生存时间进行归一化处理。

从图 5 中可以看出, 协作 MAC 协议的网络生存时间随着节点数目的增多而呈现上升的趋势。当节点的数目增多, 其中, 比源节点性能更好的节点数目也增多, 单个节点持续被选中作为中继协作传输的概率下降, 其网络生存时间也增长。但是 RCHC-MAC^[5]协议由于没有考虑节点能量等因素导致性能好的中继节点频繁被选中, 能量消耗过快。结果表明考虑了节点剩余能量等因素来选择中继节点, 对延长网络生存时间有重要意义。

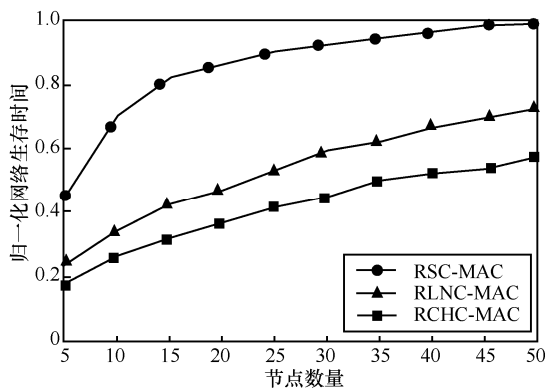


图 5 归一化网络生存时间与节点数之间关系

8 结束语

本文提出了基于速率自适应的协作 MAC 协议, 综合考虑了节点之间的信道状况和节点剩余

能量等因素, 重点提出中继选择策略, 并总结协作传输条件, 这种动态选择中继节点的策略为协作传输提供了新的方法。为了衡量该协议的性能, 最后利用仿真实验对协作协议进行对比, 结果表明不损害吞吐量的情况下使网络生存时间延长, 达到了增强网络性能的目的。但是本文算法有些复杂, 因此, 未来将会从资源优化、功耗时延等方面展开, 进一步结合其他技术优势来增强网络性能。

参考文献:

- [1] SHAHEN SHAH A F M, MOHAMMAD SHAH A, SHAMIM. A new cooperative MAC protocol for the distributed wireless networks[C]// IEEE Region 10 Conference 2015-TECON. 2015:1-6.
- [2] LIU K, CHANG X Y, LIU F, et al. A cooperative MAC protocol with rapid relay selection for wireless ad hoc networks[J]. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2015, 91(C): 262-282.
- [3] SAIFULLAH K, MUHAMMAD A, NILS M, et al. Cooperation and network coding based MAC protocol for vanets[C]//Vehicular Networking Conference(VNC). 2015: 64-67.
- [4] ACHUTHAN P, PEYMAN P, DANIEL E, et al. On the need of novel medium access control schemes for network coding enabled wireless mesh networks[C]//IEEE International Conference on Communications Workshops(ICC). 2013: 306-311.
- [5] ZHANG N, CHEN S. An improved cooperative MAC layer protocol in WLAN[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(2): 283-288.
- [6] LE J, LUI J C S, CHIU D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[C]//International Conference on Distributed Computing Systems, 2009: 596-608.
- [7] SAGDUYU Y E, EPHREMIDES A. Cross-layer optimization of MAC and network coding in wireless queueing tandem networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(2): 554-571.
- [8] KHREISHAH A, WANG C C, SHROFF N B. Cross-layer optimization for wireless multihop networks with pairwise intersession network coding[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5): 606-621.
- [9] REDDY V, SHAKKOTTAI S, SPRINTSON A, et al. Multipath wireless network coding: a population game perspective[J]. Proceedings-IEEE INFOCOM, 2010, 54(1): 1-9.
- [10] 邓广宏, 曹万华, 张剑, 等. DTN 网络环境下动态随机网络编码方法[J]. 通信学报, 2014, 35(2): 76-86.

DENG G H, CAO W H, ZHANG J, et al. Method of dynamic random

- network coding in DTN environment[J]. Journal on Communications, 2014, 35(2): 76-86.
- [11] LIU Q, FENG G. Improving decoding efficiency of opportunistic network coding via efficient data caching[C]//International Conference on Communications, Circuits and Systems. 2013:173 - 177.
- [12] CHEN J, LEE V C S, LIU K, et al. Efficient cache management for network coding assisted data broadcast environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016.
- [13] ZHANG Y, XU X, WANG X, et al. NC-COCA: network coding-based cooperative caching scheme[C]//International Conference on Computational Science and Engineering. 2014:976-980.
- [14] NAGE T, YU F R, ST-HILAIRE M. Adaptive control of packet overhead in XOR network coding[C]//2010 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2010:1-5.
- [15] CIFTCIOGLU E N, SAGDUYU Y E, Berry R A, et al. Cost-delay tradeoffs for two-way relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(12): 4100-4109.
- [16] HSU Y P, ABEDINI N, GAUTAM N, et al. opportunities for network coding: to wait or not to wait[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. 2011:791-795.
- [17] MOHAPATRA A, GAUTAM N, SHAKKOTTAI S, et al. Network coding decisions for wireless transmissions with delay consideration[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(8): 2965-2976.
- [18] 张娜, 陈曙. 无线局域网 MAC 层协作通信改进方案[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2): 283-288.

ZHANG N, CHEN S. An improved cooperative MAC layer protocol in WLAN[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(2): 283-288.

作者简介:



李方敏 (1968-), 男, 湖南涟源人, 博士, 长沙学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络资源管理和数据分析。



张韬 (1979-), 男, 湖北襄阳人, 博士, 长沙学院讲师, 主要研究方向为无线通信网络和物联网。

胡双印 (1994-), 男, 河南叶县人, 武汉理工大学硕士生, 主要研究方向为无线通信网络。

刘新华 (1974-), 男, 湖南祁阳人, 博士, 武汉理工大学教授, 主要研究方向为无线通信网络与数据处理。