

基于网络编码与空时编码的协作 MAC 协议

陈前斌¹, 刘剑¹, 鄢勇², 唐伦¹

(1. 重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆市公安局, 重庆 400012)

摘要: 针对无线 ad hoc 网络中协作造成的中继效率低以及不同 QoS 需求难以满足等问题, 提出了一种联合网络编码和空时编码的协作 MAC 协议(NSTCMAC)。NSTCMAC 将网络编码与空时编码技术相结合, 设计出区分业务类型的协作 MAC 协议传输机制, 以满足不同业务类型的 QoS 需求; 进一步通过马尔科夫链模型分析了区分业务类型的协作机制及性能。仿真结果表明, 相比传统的 DCF、COOPMAC 以及 CD-MAC 协议, NSTCMAC 协议能更好地保证不同的 QoS 需求, 并能有效地解决协作造成的中继效率低的问题。

关键词: ad hoc 网络; 协作通信; 媒体接入控制; 网络编码; 空时编码

中图分类号: TP311.134.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0053-08

Cooperative MAC protocol based on network coding and space-time coding

CHEN Qian-bin¹, LIU Jian¹, FENG Yong², TANG Lun¹

(1. Chongqing Key Lab of Mobile Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Public Security Bureau, Chongqing 400012, China)

Abstract: Aiming at the problems in wireless ad hoc networks, such as relays' low efficiency caused by cooperation and difficult to meet the different QoS requirements, a cooperative MAC protocol was proposed based on the combination of network coding and space-time coding(NSTCMAC). Based on NSTCMAC protocol with the combination of Network coding and space-time coding techniques, a kind of cooperative MAC transmission mechanism that could distinguish the type of DATA packet was designed in order to meet the QoS requirements of different types of transmission. Furthermore, cooperative transmission mechanism and its performance were analyzed through Markov chain model. When transmitting the non-real-time(NR) packets, network coding was adopted to improve the efficiency of relay nodes; when transmitting the real-time(R) packets, randomized distributed space-time coding(R-DSTC) was used to enhance the reliability of transmission. Simulation results show that NSTCMAC protocol can meet different QoS requirements better, and solve the problem of relays' low efficiency more effectively, when compared with legacy DCF, COOPMAC and CD-MAC protocol.

Key words: ad hoc network; cooperative communication; MAC; networking coding; space-time coding

1 引言

传统无线网络受带宽、传输功率以及多径衰落等因素的影响, 很难获得理想的传输容量和可靠性。为了解决无线信道传输容量的瓶颈问题, 人们提出了协作通信^[1] (cooperative communication) 的

概念, 在不增加硬件复杂度的情况下, 获得分集增益, 提升系统性能。物理层的协作通信已得到广泛研究^[2,3], 但只有物理层的协作并不能最大化协作通信的优势, 需要针对 MAC (medium access control) 协议做进一步设计, 以提升系统性能。

目前, 在协作 MAC 协议设计方面进行了大量

收稿日期: 2012-08-16; 修回日期: 2013-08-15

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT1299); 国家自然科学基金资助项目(60972070, 61171111); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2011jjA40046); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(KJ120524)

Foundation Items: The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT1299); The National Natural Science Foundation of China (60972070, 61171111); The Natural Science Foundation Project of Chongqing (CSTC2011jjA40046); The Science and Technology Research Projects of Chongqing Municipal Education Commission (KJ120524)

研究。其中, CoopMAC^[4]和 rDCF^[5]是 2 种类似的协作 MAC 协议, 采用集中式中继选取方式提高网络的吞吐量, 但其需要维护一个协作表(cooptable), 增加了网络开销, 且都没有区分业务类型, 难以保证传输的 QoS 需求。CD-MAC^[6]利用了物理层 (PHY) 协作通信能力来改善无线网络的顽健性, 终端通过主动选择一个中继节点协作传输数据, CD-MAC 在数据分组投递率和端到端延迟方面的性能显著优于 802.11 MAC, 且误码率较低, 但其集中式的中继选取方式增加了系统的负荷, 无法满足业务类型日益多元化的 QoS 需求。

虽然, 协作 MAC 协议大大提高源节点数据的传输质量, 但在协作的过程中, 中继节点需要贡献部分带宽去帮助源节点转发数据分组, 因此, 难以及时处理自身的数据。在基于二进制指数退避的 CSMA/CA 机制中, 中继节点帮助源端转发数据之后, 将大大增加自身的退避窗口, 降低了其接入信道的概率。从中继节点的角度出发, 帮助其他节点转发数据会降低自身的性能, 是一种不符合自身利益的行为, 这就是所谓的协作传输中的中继效率低问题^[7]。网络编码^[8]技术能很好地解决这一问题。NCCMAC^[9]协议利用网络编码技术有效地解决了中继效率低的问题, 但并未针对不同业务类型做具体设计, 因而难以满足不同业务类型的 QoS 需求。

为了更好地满足不同业务类型的 QoS 需求, 并解决中继由于协作造成效率低的问题, 本文结合网络编码与 R-DSTC^[10], 设计了一种新型协作 MAC 协议 (NSTCMAC, a cooperative medium access control based on network coding and space-time coding)。该协议是一种分布式多中继的协作 MAC 方案, 其主要思想是在协作传输时, 中间节点根据控制帧的指示确定数据类型 (实时或非实时数据), 并在协作过程中, 针对不同的数据类型做相应处理 (对数据进行网络编码或 R-DSTC 编码), 以实现区分业务类型的协作传输, 在满足 QoS 需求的同

时, 有效地解决协作造成的中继效率低的问题。

2 NSTCMAC 协议

2.1 网络拓扑模型

图 1 所示为网络的拓扑结构示意图, 包含一个源节点、一个目的节点以及 n 个中间节点, 其中, 每个节点均能侦听到其他节点的发送。各中间节点根据自身情况, 决定是否参与协作以及是否对数据进行网络编码与空时编码。

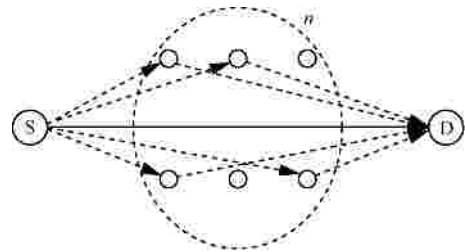


图 1 网络拓扑结构示意图

2.2 NSTCMAC 协议描述

为了提升系统吞吐量并有效保证实时业务的可靠传输, 协议将网络编码与空时编码 (R-DSTC) 相结合, 采用多中继共同协作的方式来完成传输。图 2 为中继节点处的物理层处理框图。通过此处理流程, 中继节点能很好地区分业务类型, 并针对不同的业务进行不同的处理, 以达到保证不同业务 QoS 需求的目的, 并尽量解决协作造成的中继效率低的问题。NSTCMAC 协议具体执行流程分为以下 2 个部分。

1) 握手阶段 :主要用于中继节点的招募及确定工作。经过一个 DIFS(distributed coordination function inter frame space)帧间间隔之后, 竞争成功的节点(S)开始接入信道, 首先它将发送 RTS(ready to send)帧, 接着在一个 SIFS(short inter frame Space)帧之后, 发送 HR(helper recruit)帧来初始化中继节点的招募进程, 经过一个 SIFS 间隔之后, 接收到 HR 帧的中间节点将发送一个 OHTS(opportunistic helper to send)来标明自身的潜在中继身份, 再经过

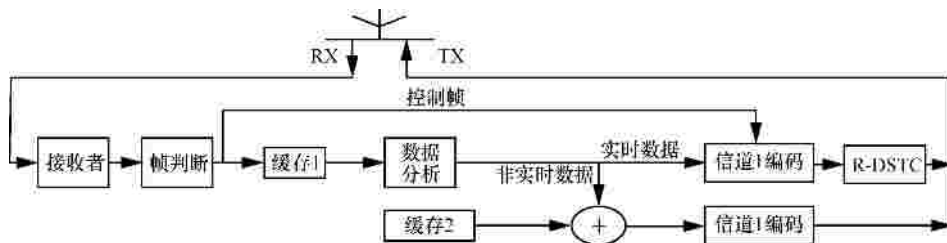


图 2 中继节点处物理层处理流程

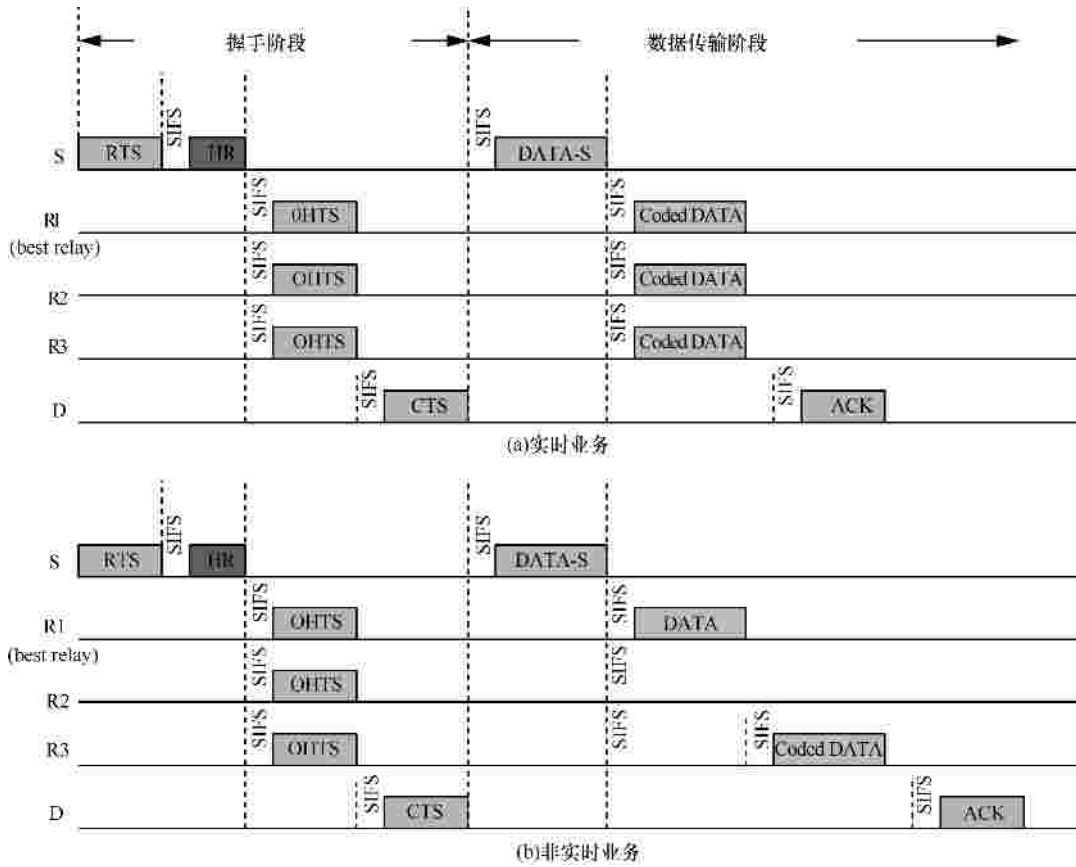


图 3 NSTCMAC 协议传输实时与非实时业务的帧流程

一个 SIFS 间隔之后，目的端将回复一个 CTS(clear to send)来通知源端最终的选取结果，以便在数据传输阶段进行传输。

2) 数据传输阶段：主要包括不同数据类型的区别传输，针对实时数据采用 R-DSTC^[10]的方式保证传输过程的可靠性，如图 3(a)所示；在传输非实时数据时采用网络编码的方式增加系统的吞吐量，以解决中继协作造成效率低的问题，如图 3(b)所示。

若目的端没能正确解码出数据分组，则回复一个 NACK，源端与中继节点在接收到该消息后作出相应重传或丢弃处理。

3 马尔科夫链分析模型

为了能更好地对协议性能进行分析，在文献 [12]提出的马尔科夫链模型基础上引入了区分业务类型的协作机制，图 4 所示为修改后的马尔科夫链模型。

假定系统处于饱和状态，即每个节点的传输队列总是非空。为了能区分不同的业务类型，并体现

协作的概念，在传统的 DCF 分析模型上加入了一系列特殊的状态。

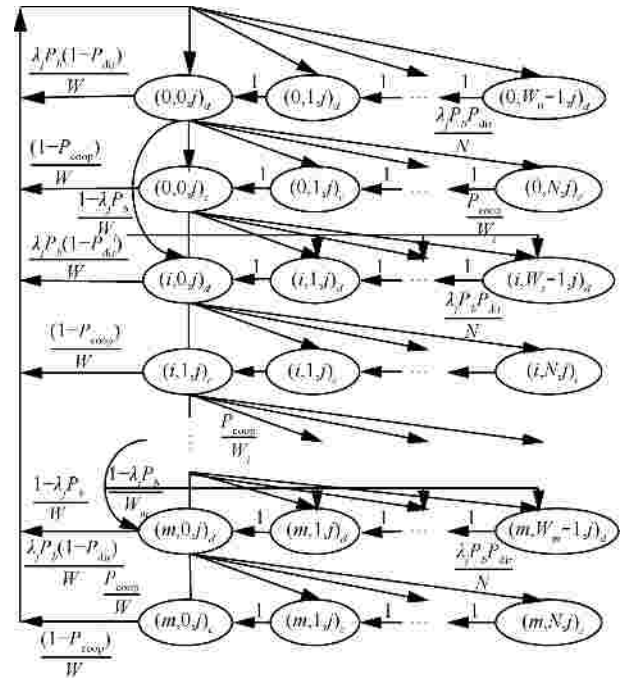


图 4 区分业务类型的协作马尔科夫链模型

在图 4 所示的模型中, $\{s(t), b(t), h(t)\}_d$ 和 $\{s(t), b(t), h(t)\}_c$ 分别代表直传与协作时的马尔科夫进程。 $s(t)$ 表示 t 时刻节点的退避状态, $b(t)$ 表示 t 时刻节点的退避计数状态, $h(t)$ 表示 t 时刻节点的数据业务类型状态。一旦节点竞争信道成功, 则发送数据分组, 如果直传链路较好, 则采用直接传输, 并使该节点回到初始状态。否则, 采用协作传输。若协作传输成功, 则将该节点设置为初始状态, 否则, 节点将继续竞争信道。如果在退避阶数达到最大值时, 传输仍未成功, 节点将丢弃该数据分组。

设 W 为最小竞争窗口, 那么 $W_i = 2^i W, i \in [0, m]$, 其中, m 表示最大退避阶数。图 4 所示的马尔科夫链模型中, N 表示中继节点的最大退避次数, j 表示业务类型 ($j=0$ 表示实时数据, $j=1$ 表示非实时数据), l_j 表示对应业务类型占用信道的申请被接收的概率, 假定为系统已知常量, P_b 表示信道空闲的概率, P_{dir} 和 P_{coop} 分别表示直传和协作传输时的误码率。为了便于表示, 定义一步转移概率为

$$P\{(i_1, k_1, j)_{d/c} | (i_0, k_0, j)_{d/c}\} @ P\{(s(t+1)=i_1, b(t+1)=k_1, h(t+1)=j)_{d/c} | (s(t)=i_0, b(t)=k_0, h(t)=j)_{d/c}\}$$

则各状态的一步转移概率可以表示为

$$\left\{ \begin{aligned} &P\{(i, k, j)_d | (i, k+1, j)_d\} = 1 \\ &i \in (0, m] \quad k \in [0, W_i - 2] \\ &P\{(i, k, j)_c | (i, k+1, j)_c\} = 1 \\ &i \in (0, m] \quad k \in [0, N - 2] \\ &P\{(i, k, j)_d | (i-1, 0, j)_d\} = \frac{1-l_j P_b}{W_i} \\ &i \in (0, m] \quad k \in [0, W_i - 1] \\ &P\{(i, k, j)_d | (i-1, 0, j)_c\} = \frac{P_{coop}}{W_i} \\ &i \in (0, m] \quad k \in [0, W_i - 1] \\ &P\{(i, k, j)_c | (i, 0, j)_d\} = \frac{l_j P_b P_{dir}}{N} \\ &i \in (0, m] \quad k \in [0, N - 1] \\ &P\{(0, k, j)_d | (i, 0, j)_d\} = \frac{l_j P_b (1-P_{dir})}{W} \\ &i \in (0, m] \quad k \in [0, W - 1] \\ &P\{(0, k, j)_d | (i, 0, j)_c\} = \frac{(1-P_{coop})}{W} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} &i \in (0, m] \quad k \in [0, W - 1] \\ &P\{(0, k, j)_d | (m, 0, j)_c\} = \frac{P_{coop}}{W} \\ &k \in [0, W - 1] \\ &P\{(0, k, j)_d | (m, 0, j)_d\} = \frac{1-l_j P_b}{W} \\ &k \in [0, W - 1] \\ &b_{i,k,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t)=i, b(t)=k, h(t)=j\}_d \\ &i \in [0, m] \quad k \in [0, W_i - 1] \\ &\pi_{i,k,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t)=i, b(t)=k, h(t)=j\}_c \\ &i \in [0, m] \quad k \in [0, N - 1] \end{aligned} \right.$$

继而可以推导出以下公式

$$\left\{ \begin{aligned} &b_{1,0,j} = (1-l_j P_b) b_{0,0,j} + P_{coop} p_{0,0,j} \\ &p_{0,0,j} = P_{dir} l_j P_b b_{0,0,j} \end{aligned} \right.$$

由以上公式可以得出

$$b_{1,0,j} = ((1-l_j P_b) + P_{dir} l_j P_b P_{coop}) b_{0,0,j} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &b_{i,0,j} = ((1-l_j P_b) + P_{dir} l_j P_b P_{coop})^i b_{0,0,j} \quad i \in (0, m] \\ &p_{i,0,j} = P_{dir} l_j P_b b_{i,0,j} \end{aligned} \right.$$

进一步可以得出

$$\left\{ \begin{aligned} &b_{i,k,j} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0,j}, \quad i \in (0, m], \quad k \in [0, W_i - 1] \\ &p_{i,k,j} = \frac{N - k}{N} p_{i,0,j}, \quad i \in (0, m], \quad k \in [0, N - 1] \end{aligned} \right. \quad (2)$$

则有

$$b_{0,k,j} = \frac{W - k}{W} \cdot \left[(1-P_{dir}) l_j P_b \sum_{i=0}^m b_{i,0,j} + (1-P_{coop}) \sum_{i=0}^m p_{i,0,j} + P_{coop} p_{m,0,j} + (1-l_j P_b) b_{m,0,j} \right], \quad k \in [0, W - 1]$$

根据有限马尔科夫链的稳态分布恒存在与唯一性定理, 可以得出稳态分布概率的关系如下

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k,j} + \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{N-1} p_{i,k,j} + \sum_{k=0}^{W-1} b_{0,k,j} = 1 \quad (3)$$

由于 $b_{i,k,j}$ 、 $p_{i,k,j}$ 以及 $b_{0,k,j}$ 均能由 $b_{0,0,j}$ 表示出来, 因此, 可以计算出 $b_{0,0,j}$ 的值。而在一个随机时刻不同业务类型的数据流的接入概率可以表示为

$$t_j = \sum_{i=0}^m b_{i,0,j} = \frac{1 - \left((1 - l_j P_b) + P_{\text{dir}} l_j P_b P_{\text{coop}} \right)^{m+1}}{1 - \left((1 - l_j P_b) + P_{\text{dir}} l_j P_b P_{\text{coop}} \right)} b_{0,0,j} \quad (4)$$

其中, $P_b = (1 - t_0)^{n_0} (1 - t_1)^{n - n_0}$, t_0 和 t_1 分别表示实时与非实时数据的接入概率。

通过以上公式即可解出不同业务类型在一个随机时刻接入信道的概率值 t_0 和 t_1 。

对比文献[12], 本文针对不同业务类型接入信道能力的不同, 引入了接入申请概率 l_j , 并由此解出了不同业务类型在某一随机时刻接入信道的概率, 在分析协作的同时, 一并分析了业务类型不同对信道接入以及协作的影响, 能更好地适用于提出的新协议。

4 NSTCMAC 协议吞吐量分析

设 P_1 为一个时隙内至少有一个节点发送分组的概率, P_s 为 P_1 条件下无冲突传输的概率, 其具体表达式如下

$$P_1 = 1 - (1 - t_0)^{n_0} (1 - t_1)^{n - n_0} \quad (5)$$

$$P_s = \frac{l_0 n_0 t_0 (1 - t_0)^{n_0 - 1} (1 - t_1)^{n - n_0} + l_1 (n - n_0) t_1 (1 - t_0)^{n_0} (1 - t_1)^{n - n_0 - 1}}{1 - (1 - t_0)^{n_0} (1 - t_1)^{n - n_0}}$$

在一个时隙内进行数据传输通常有以下 4 种情况^[9]: 1) 信道处于空闲状态; 2) 目的端正确接收该数据分组; 3) 多个节点同时竞争信道导致的冲突; 4) 因为噪声或衰落而导致目的端未能正确接收数据分组。由于本协议采用了 R-DSTC 的编码传输方式, 对情况 4) 有极大的改善, 因此, 本文中在计算传输时间时忽略情况 4) 的影响。

设 s 为一个时隙的时长, 信道空闲的平均时长 $E[T_d]$ 可以表示为

$$E[T_d] = (1 - P_1)d \quad (6)$$

设 T_s 为传输成功的时长, 则单位时隙内成功传输的平均时长 $E[T_s]$ 可以表示为

$$E[T_s] = P_1 P_s T_s \quad (7)$$

令 T_s^{dir} 、 T_{S-R}^{coop} 和 T_{S-NR}^{coop} 分别为直接传输、协作传输实时与非实时数据所需的时长, L_x 为相应分组的长度, R_c 和 R_d 分别表示传输控制帧和数据分组的链路速率。通常情况下需要在经过网络编码后的数据分组中包含一个用于解码的系数因子, 但本文

中只采用简单的异或方式进行网络编码, 故无需添加解码系数因子^[11]。因此, 可以得出

$$T_s^{\text{dir}} = DIFS + 5SIFS +$$

$$\frac{L_{RTS} + L_{HR} + L_{OHTS} + L_{CTS} + L_{ACK}}{R_c} + \frac{L_{DATA} + L_{\text{head}}}{R_d}$$

$$T_{S-NR}^{\text{coop}} = DIFS + 6SIFS + \frac{L_{RTS} + L_{HR} + L_{OHTS} + L_{CTS} + L_{ACK}}{R_c} +$$

$$\frac{L_{DATA} + L_{\text{head}}}{R_d} + w \left(\frac{L_{C-DATA} + L_{\text{head}}}{R_d} + SIFS \right)$$

$$T_{S-R}^{\text{coop}} = DIFS + 6SIFS + \frac{L_{RTS} + L_{HR} + L_{OHTS} + L_{CTS} + L_{ACK}}{R_c} +$$

$$\frac{L_{DATA} + L_{\text{head}}}{R_d} + \frac{L_{DATA} + L_{\text{head}}}{R_d}$$

节点发送冲突所需的时长为

$$T_c = DIFS + \frac{L_{RTS}}{R_c} + SIFS \quad (8)$$

则单位时隙内发生碰撞的平均时长 $E[T_c]$ 为

$$E[T_c] = P_1 (1 - P_s) T_c \quad (9)$$

最后, 分析单位时隙内源端传输有效负载所需的时长 $E[T_p]$, 由于网络编码的作用, 单位时隙内可以传输一个数据分组变为传输 2 个数据分组, 增加了传输效率, 所以有

$$E[T_p^{\text{dir}}] = \frac{P_1 P_s (1 - P_{\text{dir}}) L_{DATA}}{R_d} \quad (10)$$

$$E[T_{p-R}^{\text{coop}}] = \frac{P_{\text{dir}} P_1 P_s (1 - P_{\text{coop}}) L_{DATA}}{R_d} \quad (11)$$

$$E[T_{p-NR}^{\text{coop}}] = \frac{P_{\text{dir}} P_1 P_s (1 - P_{\text{coop}}) [(w+1)L_{DATA} + \sum_{i=0}^w P_i L_i]}{R_d} \quad (12)$$

其中, P_i 和 L_i 分别表示中继节点传输队列中发往目的端的数据分组的概率和长度, w 为参与协作的中继个数, P_{coop} 和 P_{dir} 分别表示目的端在噪声干扰下, 通过协作和直传的方式接收源端数据时的误码率。所以总吞吐量 S_{total} 可以表示为

$$S_{\text{total}} = \frac{E[T_p]}{E[T_d] + E[T_s] + E[T_c]} \quad (13)$$

5 仿真结果及分析

本节将对 NSTCMAC 协议按数据类型的不同,

对吞吐量和中断概率进行仿真分析，并和 IEEE 802.11 DCF、COOPMAC 以及 CD-MAC 协议性能进行比较。假定信道服从独立同分布的准静态瑞利衰落，且具有加性高斯白噪声；调制方式采用 BPSK；基本控制帧传输速率为 R_c ，基本数据传输速率为 R_d ，参与网络编码的中继自身包含发往原始目的端的数据分组的概率均为 0.5。其他仿真参数设置参照表 1。

| 表 1 | | 参数设置 | |
|------------|------------|-------|------------|
| 参数名称 | 仿真数值 | 参数名称 | 仿真数值 |
| RTS | 160 bit | DIFS | 50 μ s |
| HR | 112 bit | SIFS | 20 μ s |
| HTS | 112 bit | m | 5 |
| CTS | 112 bit | W | 32 |
| ACK | 112 bit | N | 8 |
| MAC Header | 272 bit | d | 10 μ s |
| PHY Header | 128 bit | R_c | 1 Mbit/s |
| 负载 | 1 000 byte | R_d | 1 Mbit/s |

5.1 不同业务类型占用信道申请被接收的概率对系统吞吐量的影响

如图 5 所示为 NSTCMAC 协议中系统吞吐量随不同业务类型（非实时与实时业务）占用信道申请被接收概率的变化曲线。可以发现，随着占用信道申请被接收概率的增加，系统吞吐量也随之增加，这是由于占用信道申请被接收的概率的增加增大了节点成功接入信道的概率，进而提升了整个系统的吞吐量性能。通常实际通信系统中，为了保证各种不同业务的 QoS 需求，会对相应的业务类型设置不同的占用信道申请被接收的概率，以实现区分业务类型的数据传输。

5.2 数据分组长度对系统吞吐量的影响

图 6 表示在网络节点数相同，并且具备相同的平均信噪比条件下，各协议吞吐量随数据分组大小变化的情况。从图中可以看出，随着数据分组长度的不断增大，各协议的吞吐量也随之增加。其中，NSTC-MAC 协议在传输非实时数据时的吞吐量高于其他的协议，主要得益于网络编码的使用。而当 NSTC-MAC 协议在传输实时数据时需要满足相应的 QoS 需求（时延），只是简单地使用 R-DSTC 的方式协作发送数据分组，并未采用网络编码的方式，所以吞吐量较低。随着数据分组

长度增大到大约 700 byte 时，NSTC-MAC 协议传输实时业务的吞吐量将逐渐大于 CD-MAC，这是由于 NSTC-MAC 协议较 CD-MAC 所选中继的链路质量更优，因此，随着数据分组长度的增加，开销所占比例逐渐减小，NSTC-MAC 协议传输实时数据时的吞吐量将逐渐高于 CD-MAC。

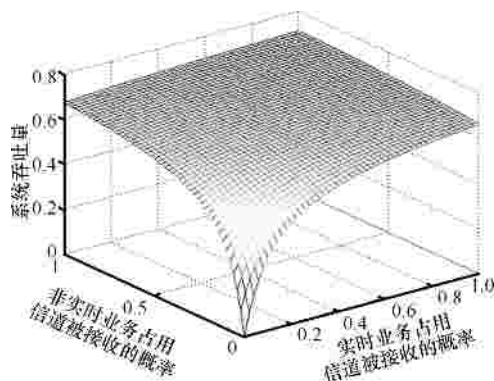


图 5 系统吞吐量随占用信道申请被接受概率的变化曲线

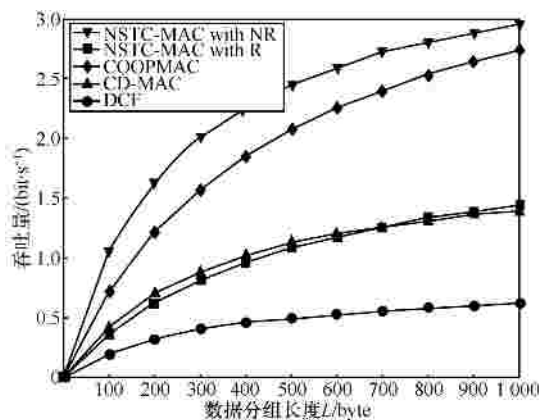


图 6 吞吐量随数据分组长度的变化曲线($P_{dir}=0.6, P_{coop}=0.1$)

5.3 协作传输误码率对系统归一化吞吐量的影响

图 7 所示为 DCF、COOPMAC、CD-MAC、实时业务 NSTCMAC 协议(NSTC-MAC with R)以及非实时业务 NSTCMAC 协议(NSTC-MAC with NR)的归一化系统吞吐量随协作传输误码率 P_{coop} 的变化情况。从图中可以看出，当 P_{coop} 较小时，NSTCMAC 协议传输非实时业务时引入了网络编码，故而能获得最好的吞吐量性能；随着 P_{coop} 不断增大（表示协作链路不断恶化），有协作参与的 COOPMAC、CD-MAC 以及 NSTCMAC 协议的吞吐量均呈现了不同程度的降低，而无协作传输的 DCF 则不受影响。当 P_{coop} 0.9 时，NSTCMAC 协议的吞吐量将低于 COOPMAC 和 CD-MAC 协议。这是由于此时的协作链路质量很差，协作带来的吞

吐量提升大幅减小，因此各协议的吞吐量趋近于直传时的吞吐量。而 NSTCMAC 协议较传统的 DCF 引入了更多的控制开销，因此当 $P_{coop}=1$ 时，NSTCMAC 协议的吞吐量略低于传统的 DCF 直传的吞吐量。

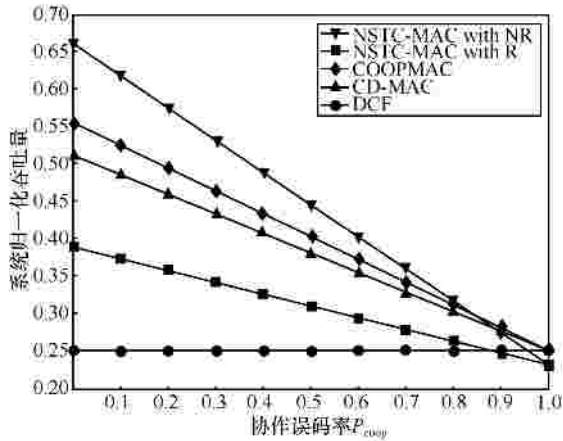


图 7 系统归一化吞吐量随协作传输误码率的变化曲线($P_{dir}=0.6$)

5.4 网络节点数对系统归一化吞吐量的影响

图 8 所示为各协议归一化吞吐量随网络节点数增加的变化曲线。可以看出随着节点数的不断增加，各协议的吞吐量均出现不同程度的增加，尤其是有协作参与的 MAC 协议，如 $n=10$ 时，NSTCMAC(with NR)、CD-MAC、COOPMAC 以及 DCF 的吞吐量分别较 $n=2$ 时提高了 0.071、0.088、0.087、0.038。这主要是由于节点数增加增大了中继选取的范围，提高了备选中继的链路质量。NSTCMAC 协议在传输非实时数据时，参与网络编码的中继个数增加，因此具备较高的系统吞吐量，当网络节点数 $n=10$ 时，NSTCMAC 协议的吞吐量较 CD-MAC、COOPMAC 以及 DCF 分别高出 0.155 3、0.122 7 和 0.429 4。

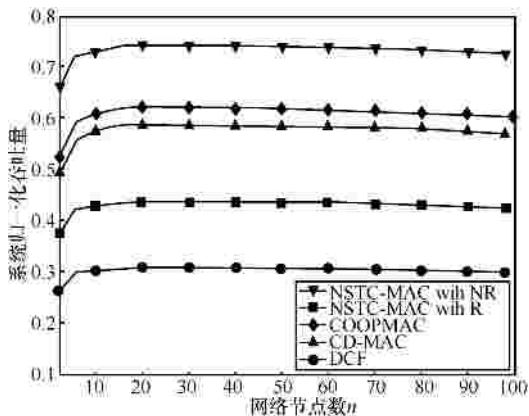


图 8 系统归一化吞吐量随网络节点数的变化曲线($P_{dir}=0.6, P_{coop}=0.2$)

当网络节点数增大到一定程度时，系统处于饱和的临界点(如图 8 中所示 $n=30$ 时)，此时吞吐量将不再增加，若继续增大网络节点数，由于碰撞的缘故，系统归一化吞吐量将逐渐下降。

图 9 所示为系统归一化吞吐量随网络中实时业务节点数 n_0 的变化情况。可以看出，由于实时业务节点相对非实时业务具备更高的信道接入概率，因此，随着其数量的增加 DCF、COOPMAC、CD-MAC、实时业务 NSTCMAC 协议(NSTC-MAC with R)以及非实时业务 NSTCMAC 协议(NSTC-MAC with NR)的归一化系统吞吐量都有不同程度的提高，如当实时业务节点数 n_0 从 0 增加到 15 时，以上各协议的吞吐量分别增加了 0.133、0.281、0.274、0.185、0.273。

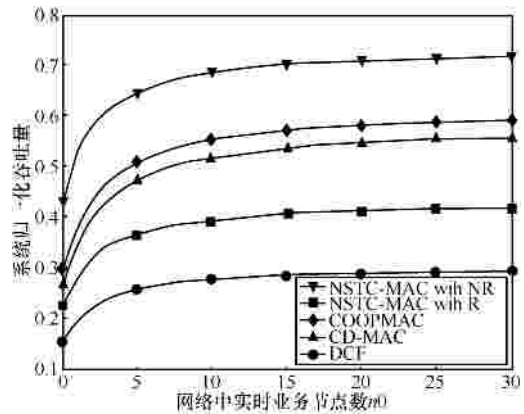


图 9 系统归一化吞吐量随实时业务节点数的变化曲线

而从图中并未得出 NSTCMAC 在传输实时业务时吞吐量有较大的提高，这是由于实时业务节点数 n_0 的增加只是提高了节点在竞争信道时成功的概率，而 NSTCMAC 协议在传输实时业务时，采用 R-DSTC 的方式协作传输数据分组，旨在提升传输可靠性，并未对吞吐量性能进行优化处理。

5.5 传输实时数据时的可靠性保证

图 10 为传输实时数据时，各协议的中断概率随 SNR 的变化情况。由于 NSTCMAC 协议对数据采取区分类型的传输，因此，在传输实时数据时 NSTCMAC 协议放弃了网络编码，只采用 R-DSTC 的方式协作传输数据分组。由于 NSTCMAC 协议获取的协作分集增益均来自于中继，而 CD-MAC 协议的分集增益来自于源端和中继，因此 NSTCMAC 协议能获得较 CD-MAC 更低的中断概率，如当 $SNR=10$ dB 时，CD-MAC 的中断概率较 NSTCMAC 协议高出 10 倍；而 COOPMAC 方案，虽然也选择最

优链路质量的中继进行数据的转发,但它属于两跳的转发,没有获得协作分集增益,因此,它的中断概率较高,同样在 $SNR=10$ dB 处, NSTCMAC 协议的中断概率较 COOPMAC 低 2 个数量级。

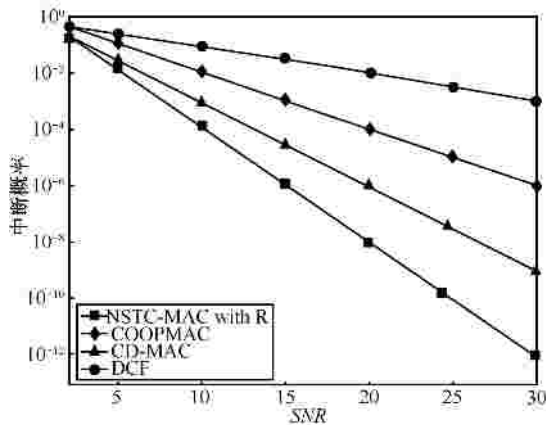


图 10 系统中断概率随 SNR 的变化曲线

虽然, NSTCMAC 协议较传统的 DCF 增加了一定的控制开销,在传输实时数据时,增加了些许延迟,但仍能满足系统对传输实时数据的 QoS 需求; NSTCMAC 协议能很大程度地降低系统中断的概率,有助于实时数据,尤其是安全类应急消息的传输。

6 结束语

本文针对无线 ad hoc 网络,提出了一种联合网络编码和空时编码的新型协作 MAC 协议——NSTCMAC 协议。该协议在协作机制的基础上,引入了网络编码和 R-DSTC,不仅解决了协作中继效率低的问题,还兼顾考虑了不同数据类型的 QoS 需求。虽然在一定程度上增加了硬件的复杂程度,但 NSTCMAC 协议大大提高了 MAC 协议对不同类型数据的传输适应能力;为了进一步使协议具有更好的实用性(例如用于车载自组织网络),下一步将引入移动场景进行分析。

参考文献:

[1] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):74-80.
 [2] DONG L, HAN Z, PETROPULU A P. Improving wireless physical layer security via cooperating relays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3):1875-1888.
 [3] LI J Y, PETROPULU A P, WEBER S. On cooperative relaying schemes for wireless physical layer security[J]. IEEE Transactions on

Signal Processing, 2011, 59(10):4985-4997.
 [4] LIU P, TAO Z F, SATHYA N. CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2):340-354.
 [5] ZHU H, CAO G H. RDCF: A relay-enabled medium access control protocol for wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(9):1201-1214.
 [6] SANGMAN M, CHANSU Y. A cooperative diversity-based robust MAC protocol in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(3):353-363.
 [7] MUNARI A, ROSSETTO F, ZORZI M. On the viability of a cooperative network coding protocol in clustered networks[A]. IEEE Military Communications Conference[C]. 2008.1-8,16-19.
 [8] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4):1204-1216.
 [9] 李楠, 戚进勇, 蔡跃明等. 无线 ad hoc 网络中一种基于网络编码的协同 MAC 协议[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12):2971-2977.
 LI N, QI J Y, CAI Y M, et al. A cooperative MAC with network coding for ad hoc networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12):2971-2977.
 [10] LIU P, NIE C, KORAKIS T A. STiCMAC: a MAC protocol for robust space-time coding in cooperative wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(4):1358-1369.
 [11] HO T, KOETTER R, MEDARD M. The benefits of coding over routing in a randomized setting[A]. IEEE International Symposium on Information Theory 2003 Proceedings[C]. 2003.
 [12] LI N, CHENG N P, CAI Y M. Performance analysis of a cooperative MAC based on opportunistic relaying for ad hoc networks[A]. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)[C]. 2010. 1-6, 21-23.

作者简介:



陈前斌(1967-),男,四川营山人,博士,重庆邮电大学通信与信息工程学院院长、教授、博士生导师,主要研究方向为宽带无线网络技术、多媒体信息处理与传输。



刘剑(1989-),男,重庆人,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为车载自组织网络协作 MAC 协议设计。

鄧勇(1976-),男,江西丰城人,硕士,重庆市公安局高级工程师,主要研究方向为无线通信、模式识别。

唐伦(1973-),男,重庆人,博士,重庆邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为宽带无线网络技术。