

网络编码感知的无线机会路由性能分析模型

陶雯¹ 金玲² 白光伟² 沈航²

(江苏第二师范学院数学与信息技术学院 南京 210013)¹

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 211816)²

摘要 结合基于优先级的 ACK 回复策略,提出网络编码感知的无线机会路由性能分析模型。该模型探讨多个中继节点时无线信道丢包对网络性能的影响。为此,建立二维马尔科夫链模型对 802.11 DCF 信道接入机制进行数学建模分析,从而得到数据包成功投递概率和网络吞吐量公式。数学分析结果表明:结合机会路由和网络编码,通过增加中继节点数量,可以提高数据包的投递概率和网络吞吐量。

关键词 网络编码,机会路由,信道接入,马尔科夫链

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.9.030

Performance Model for Network-coding-aware Opportunistic Routing in Wireless Networks

TAO Wen¹ JIN Ling² BAI Guang-wei² SHEN Hang²

(College of Mathematics and Information Technology, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China)¹

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)²

Abstract This paper proposed a performance model for network-coding-aware opportunistic routing in wireless networks working together with multi-priority ACK response strategy, where the focus is on exploring the impact of the packet loss of wireless channel on the network's performance as relay nodes increases. A Markov chain model is developed to characterize DCF random channel access mechanism, thus the important parameters with respect to network performance are obtained. The mathematical results show that the joint design of opportunistic routing and network coding can greatly improve the packet delivery ratio and end-to-end throughput when increasing the number of relays.

Keywords Network coding, Opportunistic routing, Channel access, Markov chain

1 引言

机会路由 (opportunistic routing)^[1,2] 通过利用无线网络的信道广播特性,将多个弱链路合并为一组强链路,以此增加传输可靠性。数据包的发送不是按照固定的路径传输,其允许数据包根据所定义的转发列表(forward list)同时投递给多个下一跳节点。这些节点根据特定的度量(如到达目的节点的通信开销)来确定转发优先级,高优先级节点有更高的概率转发数据包。

无线网络编码是一种融合编码和路由的信息交换技术,可以实现中继节点对不同链路的数据包的编码^[3-5],在此基础上再将其发送,从而可以减少转发次数,有效地提高网络吞吐量。

研究表明,网络编码结合机会路由能够有效提高无线网络的数据通信性能^[6,7]。本文提出网络编码感知的无线机会路由性能分析模型;考虑无线信道丢包,构建融合机会路由机制和 ACK 回复策略的二维马尔科夫链模型^[8]对 802.11

DCF^[9]信道接入机制进行数学建模分析;最后,通过数学分析对该模型进行验证、分析以及评价。

本文第 2 节对网络场景和问题进行描述;第 3 节重点分析无线机会路由模型的建立;第 4 节对建立的模型进行验证;最后对全文进行总结。

2 网络场景和问题描述

首先对无线网络场景进行假设:节点工作在单信道和半双工模式下,即节点时分共享无线带宽,且不能同时收发数据。如图 1 所示,中继节点对编码流进行传输,并且流上的数据包有机会参与编码,图中 m 表示的是编码流的数量。源节点发送原始包,中继节点发送编码包(本文使用 COPE 协议^[10]进行网络编码)。假设 n 个中继节点处于圆的中部区域,将其中第 j 个节点记为 R_j ($1 \leq j \leq n$),满足:

(1) 每个源节点选择与其相对应的节点作为目的节点,如节点 S_i 和 D_i ;

到稿日期:2016-02-15 返修日期:2016-05-29 本文受国家自然科学基金(60673185,61073197),江苏省自然科学基金(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)(BE2011186),江苏省未来网络前瞻性研究项目(BY2013095-4-09),南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金资助课题项目(NYKL201304),江苏省六大高峰人才基金(第八批)资助课题资助。

陶雯(1979-),女,硕士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为无线网络编码,E-mail:awen_tao@163.com;金玲(1988-),女,硕士,主要研究方向为无线网络编码、协议性能分析;白光伟(1961-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等;沈航(1984-),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等。

(2)除 D_i 之外, S_i 的传输可以被圆上其它所有节点侦听到;

(3)中继节点每次仅对 2 个目的地址不同的数据包进行异或编码转发。

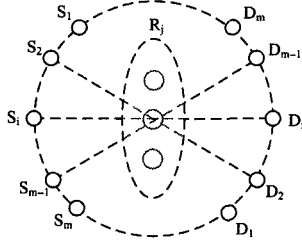


图1 无线网络场景

3 网络编码感知的无线机会路由建模

本节首先介绍信道丢包率和 ACK 回复策略,对 DCF 信道接入机制建立数学模型,采用的模型为二维马尔科夫链模型,由此可得出数据包成功投递概率和网络吞吐量的计算方法。

3.1 信道丢包率

除了分组冲突和丢弃造成的丢失之外,数据包因为时变、链路质量等原因产生丢包的参数称为信道丢包率。记源节点 S_i 到中继节点 R_j 的信道丢包率为 α_{ij} , 中继节点 R_j 到目的节点 D_i 的信道丢包率为 β_{ji} , 则源节点至中继节点的链路投递率为 $1-\alpha_{ij}$, 中继节点至目的节点的链路投递率为 $1-\beta_{ji}$ 。

3.2 ACK 回复策略

传统 DCF 转发原始包的中继节点是由路由算法确定的。当中继节点没有成功收到数据包时,源节点就进行重传。而本文网络拓扑中存在多个中继节点使用机会路由策略,只要有一个中继节点收到源节点发送的数据包,就可以进行编码转发,大大提高了原始包的投递概率。所以,我们改变原始包的 IP 包结构,增加多个目的地址。ACK 回复规则如下:

(1)设置源节点 S_i 发送的数据包头部的目的地址列表为 $(R_{g1}, R_{g2}, \dots, R_{gj}, \dots, R_{gn})$, 中继节点的优先级 $R_{g1} > R_{g2} > \dots > R_{gn} > \dots > R_{gn}$ 。

中继节点通过某些度量来确定转发优先级。本文将该度量标准设置为源节点 S_i 至中继节点 R_j 的信道丢包率 α_{ij} 。

当 α_{ij} 不同时, α_{ij} 越小, 其对应中继节点的优先级越高。

当 α_{ij} 相同时, 为避免同一中继节点一直处于高优先级转发数据包消耗过多能量, 利用如下方法对中继节点设置节点轮转。

$$g = (i+n+1) \bmod n; 1 \leq i \leq m$$

$$g_1 = g, g_2 = g_1 + 1, g_3 = g_2 + 1, \dots, g_n = g_{n-1} + 1$$

$$\text{若 } g_j + 1 > n, g_j + 1 = 1, 1 \leq g \leq n-1.$$

以 $i=10, n=3$ 为例, 此时 $g = (10+3+1) \bmod 3 = 2$, $g_1 = 2, g_2 = 3, g_3 = 1$ 。源节点 S_{10} 发送数据包的目的地址列表为 (R_2, R_3, R_1) , 以此类推。

(2)目的地址列表 $(R_{g1}, R_{g2}, \dots, R_{gj}, \dots, R_{gn})$ 中, 优先级高的中继节点优先回复 ACK, 一个中继节点 R_{gj} 对应一个回复时间 ACK_j 。 n 个中继节点只需一个节点进行 ACK 回复, 其他中继节点即使收到原始包, 也不会回复 ACK, 并且该数据包的转发由已回复 ACK 的中继节点完成。

R_{g1} 若收到数据包, 在第 1 个 ACK 时间内进行回复, 此时 R_{g2}, R_{g3} 等即使收到数据包, 也不回复 ACK。

若 R_{g1} 未收到数据包而 R_{g2} 收到, R_{g2} 将在第 2 个 ACK 时

间内进行回复, 此时 R_{g3}, R_{g4} 等即使收到数据包, 也不回复 ACK。以此类推。

(3)源节点 S_i 等待 n 个 ACK 回复时间, 只有所有的中继节点均没有收到数据包, 即等待 n 个 ACK 回复时间后仍未有收到 ACK 回复, 源节点才会进行重传。

3.3 马尔科夫链模型

为了与标准的 802.11 兼容, 本文基于以下假设: 1) 网络中源节点始终有数据包等待发送; 2) 信道丢包概率恒定且独立, 同时忽略源节点至中继节点之间的 ACK 分组的信道丢包; 3) 若出现丢包, 则执行重传; 4) 在传输过程中, 数据包发生冲突的概率是独立并且恒定的。

这里, 数据包的类别用 r 来定义, 取值分别为 0 (原始包) 和 1 (编码包)。式(1)表示两种数据包的竞争窗口值:

$$W_{r,s} = \begin{cases} 2^s W_{r,0}, & s \in [0, x-1], \text{ if } (L_r > x) \\ 2^x W_{r,0} = W_{r,x}, & s \in [x, L_r], \text{ if } (L_r > x) \\ 2^s W_{r,0}, & s \in [0, L_r], \text{ if } (L_r \leq x) \end{cases} \quad (1)$$

其中, 数据包 r 的最小和最大竞争窗口分别用符号 $W_{r,0}$ 和 $W_{r,m}$ 表示, x 和 s 分别表示最大退避次数和退避计数器的退避范围, r 在 MAC 层的最大重传次数则用 L_r 表示^[9]。

p_r 表示传输数据包 r 的过程中发生冲突的概率。发送 r 的节点在退避过程中会对信道忙闲程度进行检测, 信道忙闲概率定义为 $p_{r,b}$ 。节点在 t 时间内退避阶段和退避计数器的值分别用 $S(r,t)$ 和 $B(r,t)$ 表示。 $\{S(r,t), B(r,t)\}$ 构成如图 2 所示的二维马尔科夫链模型^[11]。

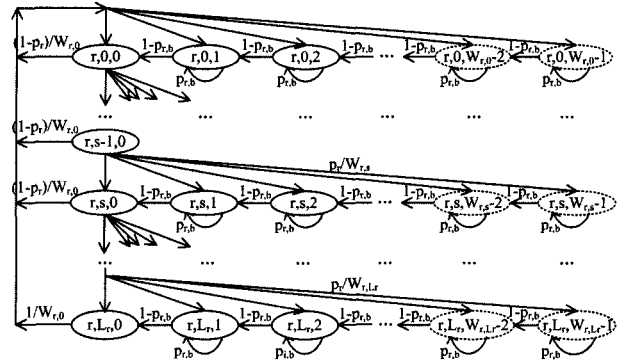


图2 二维马尔科夫链模型

该模型的单步转移概率如式(2)所示:

$$\begin{cases} P\{r,s,k|r,s,k+1\} = 1 - P_{r,b}, & k \in [0, W_{r,s} - 2] \\ P\{r,0,k|r,s,0\} = (1 - P_r) / W_{r,0}, & k \in [0, W_{r,0} - 1] \\ P\{r,s,k|r,s-1,0\} = P_r / W_{r,s}, & k \in [0, W_{r,s} - 1] \\ P\{r,0,k|r,L_r,0\} = 1 / W_{r,0}, & k \in [0, W_{r,0} - 1] \\ P\{r,s,k|r,s,k\} = P_{r,b}, & k \in [0, W_{r,s} - 1] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $s \in [0, L_r]$ 。

记 $b_{r,s,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{S(r,t) = s, B(r,t) = k\}$ 为马尔科夫链的稳态概率分布, 通过其性质以及图 2 所示模型, 可以得到如下公式:

$$b_{r,s,0} = p_r b_{r,0,0}, s \in [0, L_r] \quad (3)$$

$$b_{r,s,k} = \frac{W_{r,s} - k}{W_{r,s}} \frac{1}{1 - p_{r,b}} b_{r,s,0}, s \in [0, L_r], k \in [1, W_{r,s} - 1] \quad (4)$$

$$\sum_{s=0}^{L_r} \sum_{k=0}^{W_{r,s}-1} b_{r,s,k} = 1 \quad (5)$$

由式(3)式(5)可以得出, 在第 0 退避阶段退避次数为 0 时的稳态概率为:

$$b_{r,0,0} = \frac{1}{\sum_{s=0}^{L_r} (1 + \frac{1}{1-p_{r,b}} \frac{W_{r,s}-1}{2}) p_r^s} \quad (6)$$

其中,发送 r 的节点在某时隙中发送 RTS 帧或者数据包的概率,即在任何退避阶段退避计数器减少至 0 的概率用 τ_r 表示:

$$\tau_r = \sum_{s=0}^{L_r} b_{r,s,0} = b_{r,0,0} \frac{1-p_r^{L_r+1}}{1-p_r} \quad (7)$$

由图 1 可知网络编码流对数为 m ,源节点数目为 m ,中继节点数目为 n 。节点在退避阶段监测到信道忙的概率可表示为某时隙内除了本节点外剩下的 $(m+n-1)$ 个节点中至少有一个节点发送数据包的概率:

$$p_{0,b} = 1 - (1-\tau_0)^{m-1} (1-\tau_1)^n \quad (8)$$

$$p_{1,b} = 1 - (1-\tau_0)^m (1-\tau_1)^{n-1} \quad (9)$$

假设 p_r 表示数据包 r 在发送过程中发生冲突的概率,有:

$$p_0 = 1 - (1-\tau_0)^{m-1} (1-\tau_1)^n \quad (10)$$

$$p_1 = 1 - (1-\tau_0)^m (1-\tau_1)^{n-1} \quad (11)$$

式(6)一式(11)构成关于 p 和 τ 的非线性方程组。已知源节点数量 m ,中继节点数量 n ,最大退避次数 x ,MAC 层最大重传次数 L_r 等参数,可以计算出唯一的 τ_r, p_r, b_r, p_r 值。

定义某时隙内网络中信道忙的概率即该时隙内 $(m+n)$ 个节点中至少有一个节点发送数据包的概率为 P_r ;该时隙内源节点和中继节点成功竞争到信道的概率分别用 P_0 和 P_1 表示。

$$P_r = 1 - (1-\tau_0)^m (1-\tau_1)^n \quad (12)$$

$$P_0 = m\tau_0 (1-\tau_0)^{m-1} (1-\tau_1)^n / P_r \quad (13)$$

$$P_1 = n\tau_1 (1-\tau_0)^m (1-\tau_1)^{n-1} / P_r \quad (14)$$

考虑源节点至中继节点的信道丢包率 α_{ij} 和中继节点至目的节点的信道丢包率 β_{ji} ,可以得到源节点至中继节点的数据包成功投递率 P_S 和中继节点至目的节点的数据包成功投递率 P_R 。 P_{SR} 表示在任意时隙内任何一种数据包成功投递的概率。

$$P_S = P_0 (1-\alpha_{11}\alpha_{12}\cdots\alpha_{1n}) \quad (15)$$

$$P_R = P_1 (1-\beta_{11})(1-\beta_{12}) \quad (16)$$

$$P_{SR} = P_S + P_R \quad (17)$$

系统饱和吞吐量 S 代表传送有效载荷时间与总信道时间的比值:

$$S =$$

$$\frac{E(\text{在一个时隙内用于发送数据包总的有效载荷的时间})}{E(\text{时隙的长度})} \quad (18)$$

则数据包 r 在网络中的吞吐量 S_r 可表示为:

$$S_r =$$

$$\frac{E(\text{在一个时隙内用于发送 } r \text{ 类数据包有效载荷的时间})}{E(\text{时隙的长度})} \quad (19)$$

S_0 表示源节点发送原始包的吞吐量,中继节点对原始包进行编码转发, S_1 为其实际的吞吐量,如下式所示:

$$S_0 = \frac{P_r P_S T_{E(p_0)}}{(1-P_r)\sigma + P_r P_S T_{0,s} + P_r (1-P_{SR}) T_{0,c}} \quad (20)$$

$$S_1 = \frac{2P_r P_R T_{E(p_1)}}{(1-P_r)\sigma + P_r P_R T_{1,s} + P_r (1-P_R) T_{1,c}} \quad (21)$$

其中, $E(p_r)$ 和 $T_{E(p_r)}$ 分别表示的是 r 的有效载荷的平均值和平均传输时间。假设网络中的数据包的数量是固定的,那么原始数据包和编码数据包有效载荷的平均值 $E(p_r)$ 是相等

的,即平均传输时间 $T_{E(p_r)}$ 必然相等。 $T_{r,s}$ 和 $T_{r,c}$ 分别表示在 r 的传输过程中一次数据包成功发送或冲突而使信道检测为忙的时间; σ 为空闲时隙的持续时间。参数 $T_{E(p_0)}$, $T_{E(p_1)}$, $T_{r,s}$, $T_{r,c}$, σ 的单位相同。

综上所述, S 可以表示为:

$$S = S_0 + S_1 \quad (22)$$

设 δ 为信道的传输时延,将 H_{MAC} 和 H_{PHY} 分别记为 MAC 层和物理层头部长度,则分组头部总长为 $H = H_{MAC} + H_{PHY}$ 。对于基本信道接入机制,有:

$$\begin{cases} T_{0,s}^{ms} = T_H + T_{E(p_0)} + SIFS + \delta + nT_{ACK} + \\ \quad nSIFS + n\delta + DIFS + \delta \\ T_{1,s}^{ms} = T_H + T_{E(p_0)} + SIFS + \delta + T_{ACK} + \\ \quad SIFS + \delta + T_{ACK} + DIFS + \delta \\ T_c^{ms} = T_H + T_{E(p_1)} + DIFS + \delta \end{cases} \quad (23)$$

4 仿真实验

本节通过数值分析对该模型进行验证,主要包括实验环境的搭建、参数设置以及结果分析等。

4.1 实验环境和参数设置

本节主要对实验环境和参数进行设置,拓扑环境如图 1 所示,参数设置如表 1 所列,并且设置 $\alpha_{ij} = \beta_{ji}$ ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$)。

表 1 实验参数设置

实验参数	取值	实验参数	取值
信道速率	1Mbps	时隙宽度(σ)	50 μ s
有效载荷	8200bits	$W_{i,0}$	32
MAC 帧头部	272bits	DIFS	50 μ s
PHY 帧头部	128bits	SIFS	10 μ s
ACK 帧长度	240bits	L_r	6
传播时延	1 μ s	$CW_{i,max}$	1024
ACK 超时	300 μ s	最大退避阶段	5

4.2 结果分析

图 3 显示了源节点数目 $m=15$ 、中继节点数目 $n=3$ 、信道丢包率增大时,数据包成功投递概率的变化情况。显然,随着信道丢包率的增加,原始包、编码包和系统总的成功投递概率均逐渐降低。当信道丢包率增加到 1 时,数据包将无法成功投递,投递概率为 0。原始包数据包成功投递概率高于编码包成功投递概率,是因为本文为避免中继节点过快转发数据包所造成的可编码原始包不足,将中继节点与源节点接入信道优先级设置为相同,即平等接入。所以,在中继节点数目小于源节点数目的情况下,其数据包成功投递概率也是较低的。

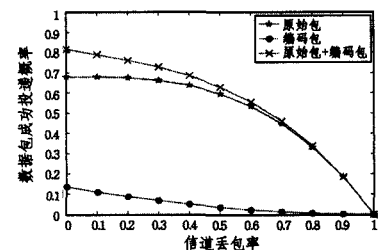


图 3 数据包成功投递概率($m=15, n=3$)

图 4 示出了源节点数目 $m=15$ 、中继节点数目 $n=3$ 、网络吞吐量随着信道丢包率增加时的变化情况。随着信道丢包率的增加,网络吞吐量均呈下降趋势。显然,使用 COPE 时

的网络吞吐量优于传统转发(不使用 COPE)时的网络吞吐量。从图 4 可以看出,使用 COPE 策略时,网络吞吐量最多可提高 13%。

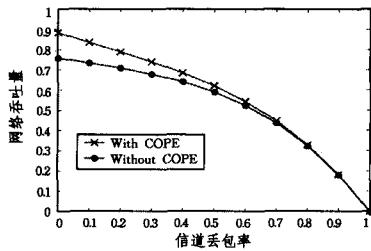


图 4 网络吞吐量($m=15, n=3$)

图 5 示出了 $m=20$ 且 $\alpha_{ij}=\beta_{ji}=0.3$ 时,随着中继节点增加,节点成功竞争到信道的概率和数据包成功投递概率的变化情况。显然,因为信道存在丢包率,所以节点成功竞争到信道的概率会大于数据包成功投递的概率。但是,随着中继节点数目的增加,源节点成功竞争到信道的概率在降低,但原始包成功投递概率却在增加。这是因为随着中继节点的增加,网络中竞争接入信道的节点变多,源节点接入信道的概率就会减小,同时,因为使用了机会路由机制,只要有一个中继节点收到原始包就可以转发,所以原始包的成功投递率得到提高。然而,随着中继节点的数目逐渐增多,节点接入信道的竞争过于激烈,原始包的成功投递率还是会逐渐降低的。

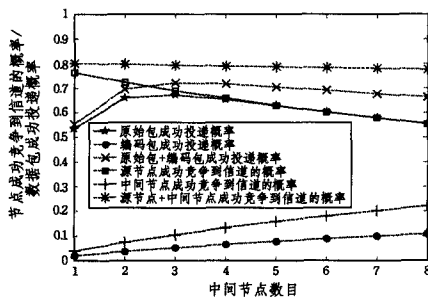
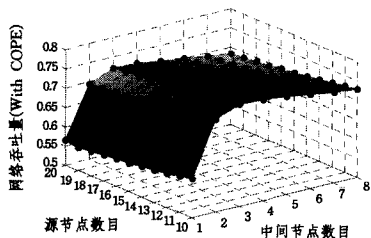
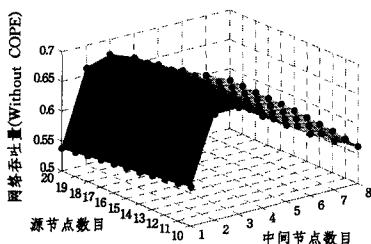


图 5 节点成功竞争到信道的概率/数据包成功投递概率 ($m=20, \alpha_{ij}=\beta_{ji}=0.33$)

图 6 显示了当 $\alpha_{ij}=\beta_{ji}=0.3$ 时,源节点数目 m 在 $[10, 20]$ 间、中继节点数目 n 在 $[1, 8]$ 间变化时,基本接入机制的网络吞吐量。



(a)网络吞吐量(使用 COPE)



(b)网络吞吐量(不使用 COPE)

图 6 网络吞吐量($\alpha_{ij}=\beta_{ji}=0.3, 10 \leq m \leq 20, 1 \leq n \leq 8$)

从图中可以看出,中继节点数目相同时,两者的网络吞吐量会随着源节点数量的增加而降低,这是因为随着网络节点数目的增加,竞争信道日益激烈,节点接入信道概率减小,导致了吞吐量的降低。同时,编码流数目相同时,随着中继节点数目的增加,机会转发提高了数据包的投递概率,所以初始时网络吞吐量均是有所增加的,但是随着中继节点数目的继续增多,节点竞争信道日益激烈,网络吞吐量逐渐呈现下降趋势。图 6(a)因为使用了 COPE 策略,其下降趋势较图 6(b)明显减缓。

结束语 本文研究了在存在信道丢包的无线网络中,使用网络编码感知的无线机会路由机制时,数据包投递成功率和吞吐量的变化情况。利用二维马尔科夫链模型对信道接入机制进行数学建模,得到数据包成功投递概率和网络吞吐量公式。同时,对该模型进行分析和评价,结果表明,适当增加中继节点数量,使用机会路由,可以提高数据包的投递概率;结合网络编码,则更加显著地提高了网络端到端的吞吐量。

参考文献

- [1] Chakchouk N. A Survey on Opportunistic Routing in Wireless Communication Networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2015, 17(4): 2214-2241
- [2] Shen H, Bai G, Zhao L, et al. L2OR: Low-Cost Low-Complexity Opportunistic Routing for Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(1): 401-422
- [3] Bassoli R, Marques H, Rodriguez J, et al. Network coding theory: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1950-1978
- [4] Farooqi M Z, Tabassum S M, Rehmani M H, et al. A survey on network coding: from traditional wireless networks to emerging cognitive radio networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 46: 166-181
- [5] Bai Guang-wei, Jin Ling, Shen Hang, et al. Performance Model of Dynamical Buffer-based Wireless Network Coding[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(10): 2468-2480(in Chinese)
- [6] 白光伟,金铃,沈航,等.基于动态缓存的无线网络编码性能分析模型[J].系统仿真学报,2013,25(10):2468-2480
- [7] Khreishah A, Khalil I, Wu J. Universal network coding-based opportunistic routing for unicast [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(6): 1765-1774
- [8] Yan Y, Zhang B, Mouftah H T, et al. Practical coding-aware mechanism for opportunistic routing in wireless mesh networks [C] // IEEE International Conference on Communications (ICC). 2008: 2871-2876
- [9] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802. 11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547
- [10] IEEE 802. 11 Standards Committee. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, 1999
- [11] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM, Pisa, Italy, September 2006: 243-254
- [12] Jin Ling, Bai Guang-wei, Shen Hang, et al. 802. 11 DCF Channel Access Mechanism Based on Network Coding[J]. Computer Engineering, 2013, 39(8): 147-152(in Chinese)
- [13] 金铃,白光伟,沈航,等.基于网络编码的 802. 11 DCF 信道接入机制[J].计算机工程,2013,39(8):147-152