

文章编号:1007-5321(2009)03-0022-05

具有网络编码意识的无线路由判据

宋 谱, 贺志强, 牛 凯, 许文俊, 吴伟陵

(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 为显著提高系统吞吐量,提出一种新的具有编码意识的判据(ECTX)用于无线路由,在路由阶段,首先根据路由发现找到编码机会及基于优化的编码节点,再根据统计获得的无线链路信道信息,充分考虑无线广播特性,使用能体现网络编码性能优势的判据进行路由选择.使用C++实现性能仿真,结果表明,该机制在无线多跳网络中,能有效地增强节点对数据的处理能力,相比于不使用网络编码的系统,具有5%~20%的系统吞吐量增益.

关键词: 网络层;网络编码;具有编码意识的路由

中图分类号: TN911.2

文献标识码: A

A Network Coding-Aware Routing Metrics for Wireless Multi-Hop Network

SONG Pu, HE Zhi-qiang, NIU Kai, XU Wen-jun, WU Wei-ling

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To improve network spectral efficiency, a network coding-aware metrics for wireless routing expected coding-aware transmission count (ECTX) is proposed. In general, there are two steps in coding-aware routing communication: one is finding coding opportunity and network-coded node in the routing discovery phase, the other is determining the optimum path from the coding-available paths and the coding-unavailable ones. The expected coding-aware transmission count fairly quantifies the network coding gain while considering the wireless transmission conditions. We implement the ECTX routing in wireless mesh system in C++ and conduct extensive evaluation. Simulation results illustrate that, compared with the ones which oblivious of coding gains using, the transmission efficiency can be sharply increased in the whole network and achieves 5%~20% throughput gains.

Key words: network layer; network coding; multi-channel routing; coding-aware

0 引言

在无线网络中由于传输功率受限,相距多跳距离的2个节点通信需使用路由,根据路由指示路径,数据流由这条路径上的中间节点进行转发.本质上,路由的作用与调度类似,即从候选路径中选出最符合所关注性能指标的对象,不能凭空制造,然而网络编码^[4-5]突破了这一限制,通过允许传输节点的编码操作,虚拟出多条数据流在相同的资源(时间、频率等)上传输,从而达到网络流领域的容量,这是

现有路由技术不能实现的.

将网络编码应用于无线单播的研究,从最早的完全机会网络编码^[4](COPE, complete opportunity encoding)开始,将网络编码与机会路由相结合,提出了实用化的网络编码与优化传输模型,能有效增强系统吞吐量.然而由于路由与网络编码相互独立进行,这种完全机会式的路由-编码机制并不能完全获得网络编码的增益.

2007年以来,学术界开始讨论具有编码意识(coding-aware)的路由机制^[6-10],即在寻找路由时充

分考虑选择可以增加网络编码的路由形式. 虽然有些文献对使用网络编码意识的路由进行了优化建模^[6-7], 并从理论上证明了这种基于优化的编码节点进行路由选择的做法可以获得更高的系统性能增益, 但由于没有提出能充分体现网络编码增益的路由判据, 因此目前没有1个可操作的路由协议能实现完全编码意识. 例如, 文献[8]认为只要可以使用网络编码, 新来的数据流即可直接在现有数据流上进行传输, 即捎带(free ride)的传输方式. 这一点并不合理, 因为对于多个可以进行网络编码的数据流, 由于各自接收节点相互独立、传输信道状况不同, 为保证所有节点能正确接收, 以广播形式发送的编码数据包, 其期望传输次数将取决于其中较差信道的用户. 这一缺陷在节点间的信道状态差异较大的情况下, 表现得尤为突出.

如上可知, 现有基于网络编码的路由协议不能完全获取网络编码增益. 为了在路由过程中真正实现网络编码意识, 以获取更多的性能增益, 本文提出了一种新的路由判据——ECTX, 它根据无线链路的期望传输次数(ETX, expected transmission count), 以及使用网络编码后期望传输次数来确定路由选择的判据, 由于综合考虑了无线链路的质量以及使用网络编码后的性能增益, 与 COPE 算法相比, 可以获得更高的系统吞吐量, 并且简单易行、配置方便. 从仿真结果也可以看出, 对于不同类型的拓扑及业务形式, ECTX 路由算法在吞吐量上有较大幅度的提高.

1 具有网络编码意识的路由判据

具有编码意识判据的最大特点在于定义可使用网络编码时的链路开销. 传统的 ETX 刻画了在考虑重传的情况下, 将1个数据包正确单播出去的期望传输次数, 它是对数据包传输所消耗资源的定量估计; 而使用网络编码后, 多个数据包可以进行编码在相同的资源上共享传输, 在接收端只需要做译码处理. 这样由于多个数据包使用相同资源(频率、时间或码道)传输, 对应每个参与编码的数据包所消耗的资源(如传输次数)必然减小, 然而这种减少的情况不能直接体现在现有的判据机制中. 本文提出使用一种具有网络编码意识的判据, 即 ECTX 来具体衡量使用网络编码对传输开销的影响.

1.1 网络编码的优势

在网络中, 如果若干数据流可以进行网络编码,

在可编码节点处进行的是广播传输; 假定每个数据流数据包大小固定且相同, 那么进行网络编码后的数据包传输次数与各数据流分别传输的传输次数之间的关系如定理1给出.

定理1 给定 N 个数据流 t_1, t_2, \dots, t_N , 在交叉节点 c 处可以进行网络编码, 由于每个数据流的接收节点 R_1, R_1, \dots, R_N 信道状况相对独立, 期望传输次数分别是 $ETX_{1c}, ETX_{2c}, \dots, ETX_{Nc}$, 那么在可编码节点 c 处, 这 N 个可编码数据流传输次数为

$$\max(ETX_{1c}, ETX_{2c}, \dots, ETX_{Nc}) \quad (1)$$

在该场景下, 节点 c 广播1次网络编码数据包, 不同的接收节点传输信道不同, 假定反馈及时, 一旦 NAK 反馈有用户已经正确接收, 那么节点 c 即可以根据反馈动态地调整网络编码数据包, 以减少传输次数.

证明 从2个数据流开始. 不失一般性, 假定 $ETX_{1c} < ETX_{2c}$, 即数据流 t_2 的接收用户信道状况差于数据流 t_1 的接收用户. 在1个长期的过程中, 传输数据包的个数主要由所有接收者中信道状况最差的用户决定, 即 R_2 . 因此, 要正确广播数据流到2个用户的总传输次数等于将数据流单独传输给 R_2 的次数, 即 $\max(ETX_{1c}, ETX_{2c})$. 使用类似的推导方法, 可以得出结论: 如果有 N 个数据流可以进行网络编码, 那么这 N 个数据流的期望编码次数等于 $\max(ETX_{1c}, ETX_{2c}, \dots, ETX_{Nc})$.

推论1 假定2个数据流 t_1 与 t_2 可以进行网络编码, 那么在编码节点 c 的编码数据包的期望传输次数为 $\max(ETX_{1c}, ETX_{2c})$.

1.2 适用于具有网络编码意识路由判据公式

对于每个在路由发现阶段寻找到的路径 L , 路径中的每跳表示为链路 $l(i \leftrightarrow j)$, 具有网络编码意识的路由判据公式为

$$ECTX_L = \sum_{i \in L} ETX_{i,j} + \alpha \sum_{c \in C} METX_{i,c,j} \quad (2)$$

其中, α 是网络编码节点的表征因子, 如果候选路径 L 中存在可以进行网络编码的节点 $c \in C$, 那么 $\alpha = 1$, 否则 $\alpha = 0$; C 是路径 L 中可以进行网络编码的节点集合. 公式右边第1项是传统的 ETX 判据, 对于第2项, 如果在 C 集合中的元素 c 处具有网络编码机会, 需要对编码节点 c 的期望传输次数做修正. 以2个数据流 t_1 和 t_2 为例, 给定数据流 t_1 , 如果候选数据流 t_2 使得2个数据流在节点 c 处可以进行网络编码, 要发送这2个数据流的期望传输次数为

$\max(\text{ETX}_{1c}, \text{ETX}_{2c})$, 那么对于新来数据流 t_2 , 期望传输次数为 $\max(\text{ETX}_{2c} - \text{ETX}_{1c}, 0)$. 如果 $\text{ETX}_{2c} < \text{ETX}_{1c}$, 新来的数据流完全可以在给定的数据流 t_1 上进行捎带传输. 但是如果 $\text{ETX}_{2c} > \text{ETX}_{1c}$, 此时还需要另外 $\text{ETX}_{2c} - \text{ETX}_{1c}$ 次传输. 因此

$$\text{METX}_{1,c,2} = -\min(\text{ETX}_{1c}, \text{ETX}_{2c}) \quad (3)$$

1.3 ECTX 路由优化算法建模及性能分析

ECTX 路由优化算法实质上是在引入网络编码前提下寻找最优路径, 使得网络中数据流正确传输代价最小. ECTX 路由优化可以建模为 1 个线性规划问题, 算法所需的变量定义如下: N 为网络中的节点个数, $\text{ETX}_{i,j}$ 为 i 与 j 间链路的期望传输次数, $\text{METX}_{k,i,j}$ 为链路在编码节点 i 处的判据修正因子, 与节点 k, j 有关, T 为业务流个数, P_t 为数据流 t 的业务量, (s_t, d_t) 为数据流 t 的源节点和目的节点对, $p_{i,j,k}^t$ 为数据流 t 在链路 (i, j) 下一跳 k 时的代数表示, $x_{i,j}$ 为链路 (k, i) 上传输的总业务量, $f_{i,j}^t$ 为数据流 t 在链路 (k, i) 下一跳 j 时的总业务量, $\omega_{k,i,j}$ 为链路 (k, i) 下一跳 j 时的总业务量, $\text{fc}_{k,i,j}$ 为节点 k, j 之间可以在节点 i 处进行编码传输的业务量.

$$\min \sum_{i,j=1}^N x_{i,j} \text{ETX}_{i,j} + \alpha \sum_{i,j,k=1}^N \text{fc}_{k,i,j} \text{METX}_{k,i,j} \quad (4)$$

满足约束条件

$$\sum_{t=1}^T f_{i,j}^t = x_{i,j} \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{i,j,k}^t = \omega_{i,j,k} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T f_{s_t,i}^t = P_t \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T f_{i,d_t}^t = P_t \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^N p_{i,j,k}^t = f_{i,j}^t (j \neq d_t) \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^N p_{i,j,k}^t = f_{i,j}^t (i \neq s_i) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N f_{i,s_i}^t = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N f_{d_t,i}^t = 0 \quad (12)$$

$$\text{fc}_{k,i,j} \leq \omega_{k,i,j} \quad (13)$$

$$\text{fc}_{k,i,j} \leq \omega_{j,i,k} \quad (14)$$

$$\text{fc}_{k,i,j} = \text{fc}_{j,i,k} \quad (15)$$

对算法性能分析如下.

1) 式(5)~(15)是对网络中流量守恒的限制, 是对编码节点可进行网络编码数据包个数的限制. 如式(4)所示, 考虑算法的收敛速度, 该问题可用线性规划法求解, 由于该问题总存在最优解, 记为 $\{p_{k,i,j}^{t*}\}$, 它代表了网络中数据流的路由分配, 即所求的具有最小传输代价的路径, 同时也给出了编码节点 i .

2) 相比于现有网络编码意识的路由机制模型, 做了如下改进.

① 修正了路由判据, 文献[7]使用 ETX 作为判据, 这一点不是很合理, 本文提出了一种更合理的 ECTX 判据.

② 运用了判定网络编码机会的充要条件, COPE^[4]及文献[7]都只是 1 跳以内的情况, 而本机制的网络编码机会判定条件认为, 多跳以内的网络编码机会都可以利用.

③ 该算法对网络编码的编码算法没有限制.

2 仿真实现及结果

本文采用 C++ 编程工具, 采用洪泛法的路由发现机制, 结合 3 种路由选择判据, 即 ETX、COPE 以及本文提出的 ECTX 算法进行了仿真. 仿真的基本参数及各层算法模块如表 1 所示.

表 1 仿真条件及设定

仿真类型	参数设置
仿真拓扑	5×5、7×7 网状
仿真步长/ μs	25
仿真时间	10 万步长(共 2.5 s)
节点间距/m	200
Radio 数目/个	2
大尺度衰落	$L = 133.2 + 37.6 \lg R$ (R 单位为 km)
阴影衰落	与 UMTS 30.03, B 1.4.1.4 相符
阴影衰落标准差/dB	8
穿透损耗/dB	20
天线模式	全向天线
载波频率/带宽	3.5 GHz/30 MHz
信道模型	3GPP 25.996 协议 SCM-e 模型
AP 的最大发射功率/W	辅 AP(较小 AP)发送功率:10 主 AP(较大 AP)发送功率:20
节点发现	Slotted Aloha
MAC 机制	竞争式 MAC
路由	修正的 DSR + ETX/COPE/ECTX
频率规划	纯静态分配

1) 格形 mesh 下的系统性能仿真

如图 1 和图 2 所示, 给定 5×5 拓扑, 除了中间节点是主 AP 外, 其余 24 个都是辅 AP. 仿真过程中, 每个 AP 产生一定的业务量负载, 包括辅 AP 到

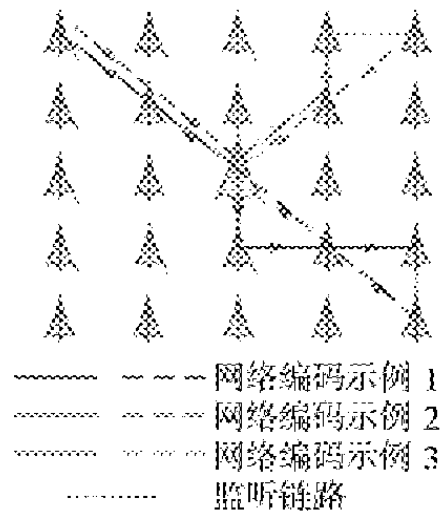
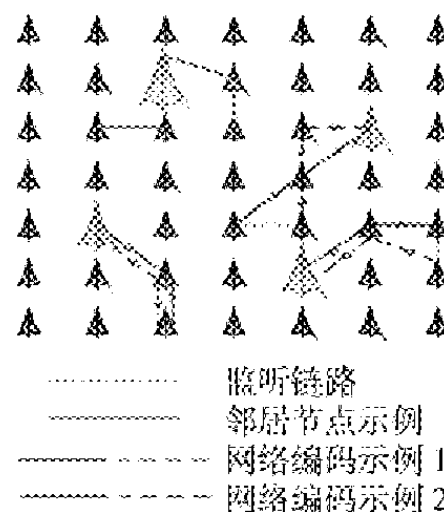
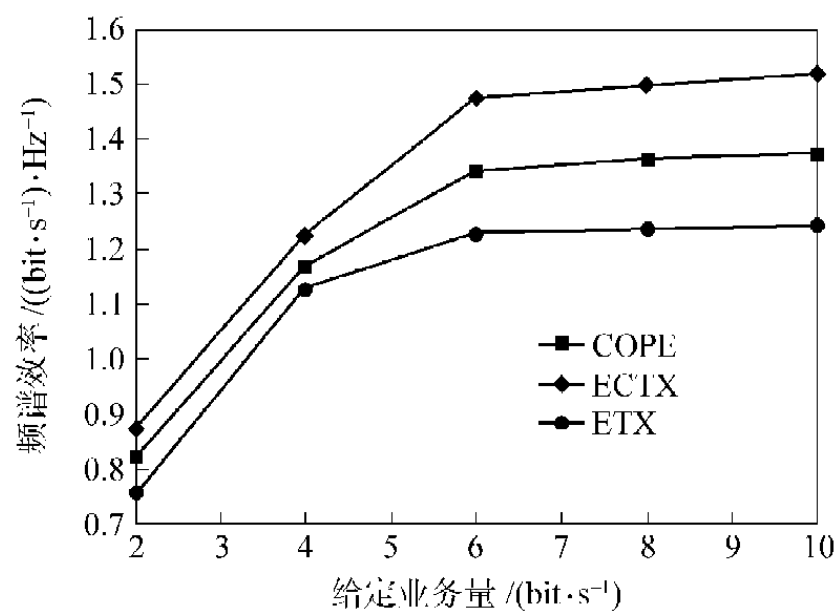
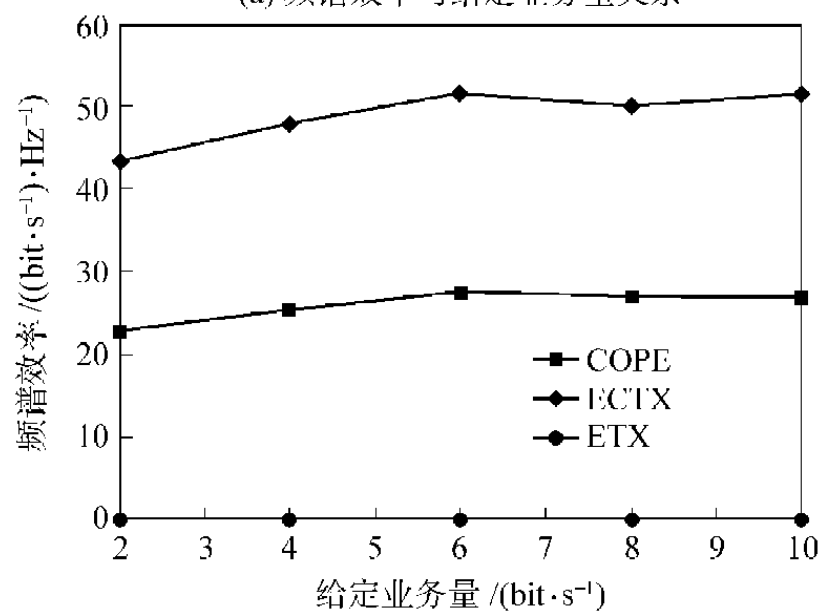
(a) 5×5 (b) 7×7

图 1 仿真拓扑示例



(a) 频谱效率与给定业务量关系



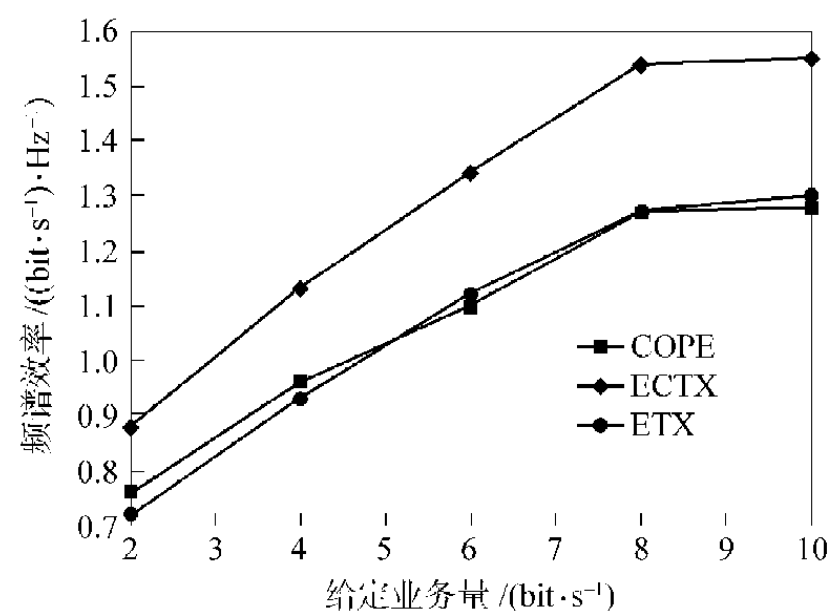
(b) 网络编码机会与给定业务量关系

图 2 格形拓扑下的系统性能

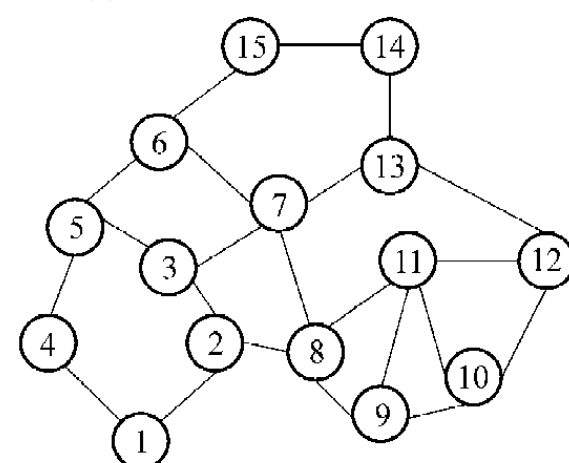
主 AP 及主 AP 到辅 AP 的业务. 分别使用 ETX、COPE 及 ECTX 的判据进行路径选择. 对于 ECTX, 每个节点最多可以存储 10 个附近正在传输的数据流信息, 新来数据流首先判定与现有数据流的网络编码机会, 如果可以进行网络编码, 则在给定编码节点处进行网络编码, 传输新来数据包. 仿真中, 提供 10 个给定数据流候选可以进行网络编码. 从图 2 可以看出, 在给定的 5×5 拓扑中, 使用 ETX 的路由算法, 其频谱利用率小于使用网络编码的 COPE 和 ECTX. 这是由于后者可以使用网络编码传输的数据包, 没有等待及排队时延, 因此能提高系统容量. 相比于 COPE 的路由算法, 使用 ECTX 的路由算法增益将近 10%. 这是由于作为将网络编码与路由选择相互独立进行的算法, COPE 的路径选择主要由路由判据决定, 即 ETX 判据. 编码机会统计也解释了 ECTX 相对于 COPE 的性能, 优势在于可利用编码机会的增多. 7×7 拓扑情况与 5×5 类似, 限于文章篇幅, 不再特别给出.

2) 随机拓扑下的系统性能

如图 3 所示, 在随机拓扑情况下, COPE 的性能趋近于普通的 ETX 情况, 凸显出将网络编码与路由判据之间独立进行的不足. 这是由于在判据算法中, 在很大概率上选出的是距离最短或最快到达目的地的路径, 而这种路径一般不具有网络编码机会,



(a) 频谱效率与给定业务量关系



(b) 随机拓扑结构示意图

图 3 随机拓扑下的系统性能

因而相比于 ECTX 算法,表现没有那么可靠.本文使用的网络拓扑虽然仍是 mesh 形式,但是路由判据对拓扑没有特殊需求.事实上,只要可以进行网络编码的拓扑结构都可以应用,以获得系统性能的增益.

3 结束语

本文对现有的路由判据进行改进,从网络编码的性能优势出发,提出了一种新的路由判据 ECTX.通过这种方法,可以根据路由积累期望传输时间以及网络编码对路径吞吐量的影响,选择出 1 条更优的路由.如果选出的路径具有网络编码机会,在传输过程中,根据网络编码的机会标示进行网络编码操作.相比于一般的传输机制,使用网络编码的系统在牺牲少量算法复杂度的同时,能有效提高系统频谱利用效率.仿真结果表明,该路由判据对网络拓扑没有特殊的要求,结合已有的具有网络编码意识的路由发现机制,建立了一个初步完善的具有网络编码意识的路由算法.

参考文献:

- [1] Couto D. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[C]//Proceedings of ACM MOBICOM. San Diego: ACM Press, 2003: 134-146.
- [2] Draves R. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks[C]//Proceedings of ACM MOBICOM. [S.l.]: ACM Press, 2004: 114-128.
- [3] Yang Yaling, Wang Jun, Kravets R. Designing routing metrics for mesh networks[C]//Proceedings of WiMesh. [S.l.]: IEEE Press, 2005: 122-136.
- [4] Katti S, Rahul H, Hu Wenjun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM. [S.l.]: ACM Press, 2006: 241-252.
- [5] Ahlswede R, Cai Ning, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Trans on Informaion Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [6] Ni Bin, Santhapuri N, Zhong Zifei, et al. Routing with opportunistically coded exchanges in WirelessMesh networks[C]//Poster Session of SECON. [S.l.]: IEEE Press, 2006: 157-159.
- [7] Sengupta S, Rayanchu S, Banerjee S. An analysis of wireless network coding for unicast sessions: the case for coding-aware routing[C]//Proceedings of INFOCOM'07. [S.l.]: IEEE Press, 2007: 1028-1036.
- [8] Le Jilin, Lui J C S, Chiu D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[C]//ICDCS Beijing. Beijing: IEEE Press, 2008: 462-469.
- [9] Zhang Jian, Chen Y P, Marsic I. Network coding via opportunistic forwarding in wireless mesh networks[C]//IEEE WCNC. [S.l.]: IEEE Press, 2008: 1775-1780.
- [10] Ma J. Practical coding-aware opportunistic routing mechanism for wireless mesh networks[C]//IEEE ICC. [S.l.]: IEEE Press, 2008: 2871-2876.