

无线网络链路质量感知的机会网络编码机制

葛青¹ 白光伟^{1,2} 沈航² 张芃¹ 曹磊³

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)¹

(南京理工大学高维信息智能感知与系统教育部重点实验室 南京 210094)²

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)³

摘要 现有的无线网络编码机制大多没有考虑无线链路质量对于通信性能的影响,导致网络吞吐量降低。针对这一问题,提出一种链路质量感知的机会网络编码机制(LONC)。该机制充分利用无线媒介的共享特性,将网络编码和机会转发技术相结合,通过期望传输次数来计算数据包传输效用值,用于衡量数据包传输效率。在此基础上,根据效用值动态分配数据包调度优先级,使得高优先级的数据包有更高的概率获得转发机会,从而有利于提高网络吞吐量。仿真结果表明,LONC机制能够显著提高网络的吞吐量,在一定程度上保证了数据的可靠传输。

关键词 无线网络编码,链路质量感知,机会转发,动态优先级

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Link-quality-aware Opportunistic Network Coding Mechanism in Wireless Networks

GE Qing¹ BAI Guang-wei^{1,2} SHEN Hang² ZHANG Peng¹ CAO Lei³

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)¹

(Key Laboratory of Intelligent Perception and System for High-dimensional Information of Ministry of

Education of China, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)²

(State Key Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)³

Abstract Wireless link quality has a significant impact on communication performance, which is currently not taken by most existing wireless network coding mechanisms into account, resulting in degradation of network throughput. To address this problem, this paper proposed a link-quality-aware opportunistic network coding mechanism(LONC) for wireless networks. By taking advantage of broadcast nature of wireless communication, this mechanism combines network coding with opportunistic forwarding techniques. As a metric for measuring transmission efficiency, the expected number of transmissions is used to compute the utility value of data transmission. On this basis, we assigned dynamic priority with each packet to be sent in accordance with their utility value. The objective is to ensure that packets with high-priority have a better chance to be forwarded, thus achieving much higher throughput. Our simulation results demonstrate that LONC can not only achieve performance improvement of network throughput, but also enhance data transmission quality to some certain extent.

Keywords Wireless network coding, Link-quality-aware, Opportunistic forwarding, Dynamic priority

1 引言

无线网络包括移动自组网、无线网状网、无线传感器网络等。一方面,无线网络资源有限,如何最大化地利用网络资源,提高网络的吞吐量,是值得研究的问题;另一方面,考虑到无线网络拓扑结构的多变性、应用环境的复杂性等特征,如何保证无线环境下数据通信的服务质量,提供可靠的服务面临

严峻的挑战^[1]。

近年来,研究人员将网络编码技术^[2-6]应用于无线网络中,以提高网络的吞吐量。网络编码最初提出是为了解决最小割问题,从信息论角度分析证明,通过网络编码技术可以达到网络的最大容量^[7]。无线网络编码的核心思想是允许网络中的节点将接收到的数据包编码组合后发送,而不仅仅是对接收到的数据包进行简单的存储转发。现有的研究成果表

到稿日期:2013-01-30 返修日期:2013-04-29 本文受国家自然科学基金项目(60673185, 61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2011186),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11_0262, CXZZ12_0425),江苏省六大高峰人才基金资助项目(第八批),南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2010B08)资助。

葛青(1989—),女,硕士生,主要研究方向为无线网络编码, E-mail: geqing_njut@yahoo. cn; **白光伟**(1961—),男,博士,教授,博士生导师, CCF 高级会员,主要研究方向为移动互联网、无线传感器网络、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, E-mail: bai@njut. edu. cn(通信作者); **沈航**(1984—),男,博士生, CCF 学生会员,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; **张芃**(1965—),女,副教授, CCF 会员,主要研究方向为无线网络; **曹磊**(1980—),男,博士生, CCF 学生会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线传感器网络等。

明:相对于确定的单一路径,机会转发策略有助于提高整个网络的吞吐量^[8,9]。网络中的节点在选择下一跳转发节点时,根据转发条件选出机会转发节点集合,使得更多的节点有机会参与数据包的转发。然而,现有的无线网络编码机制大多没有考虑链路质量对通信性能的影响,导致网络吞吐量降低。

针对上述现有无线网络编码机制存在的问题,本文提出一种链路质量感知的机会网络编码机制(LONC)。该机制充分利用无线信道的广播特性,将网络编码与机会转发技术相结合,通过期望传输次数来计算数据包传输效用值,用于衡量数据包传输效率。在此基础上,根据效用值动态分配数据包调度优先级,使得高优先级的数据包有更高的概率获得转发机会,从而有利于提高网络吞吐量。

本文第2节分析现有无线网络编码协议及其存在的问题;第3节提出无线网络链路质量感知的机会网络编码机制(LONC),并对其进行详细描述;第4节通过仿真的方法对LONC机制进行性能分析与评价;最后总结全文。

2 相关工作和问题分析

Katti等人提出的COPE协议^[2]是网络编码技术在真实的无线网络环境下的第一次实践,其工作原理如图1所示。节点X需要发送数据包 P_1 给节点Y,节点Y需要发送数据包 P_2 给节点X,若使用传统方法,节点X和节点Y通过中间节点R转发得到对方的数据包共需要4次传输;若使用COPE协议,中间节点R对接收到的数据包 P_1 和 P_2 进行异或操作,然后广播异或包 $P_1 \oplus P_2$,节点X收到异或包后通过 $P_1 \oplus (P_1 \oplus P_2)$ 得到数据包 P_2 ,同样地,节点Y通过计算 $P_2 \oplus (P_1 \oplus P_2)$ 得到数据包 P_1 ,完成此过程共需要3次传输。与传统方法相比较,COPE减少了1次传输次数,有利于提高网络的吞吐量。

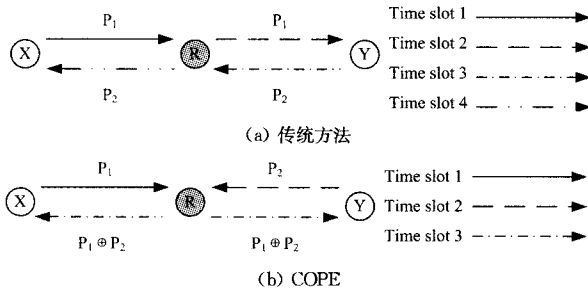


图1 传统方法和 COPE 的比较

文献[3]针对COPE协议的局限性,调整了数据包的队列结构和数据包的调度策略,提出了一种更有效的网络编码算法。文献[4]巧妙地把编码感知和带宽感知集于一体,一方面最大化网络编码,尽可能减少数据的传输次数;另一方面均衡负载,避免拥塞,保证数据投递率。但是这些机制一方面没有考虑链路的传输质量,另一方面没有充分利用无线媒介的共享特性,使得某些有机会编码的节点没有参与编码,不利于提高网络的整体性能。

Zhang等人提出的BEND^[5]协议将机会转发思想融入网络编码,见图2。图中节点 X_1 要通过节点A发送数据包 P_1 给节点 Y_1 ,节点 X_2 要通过节点C发送数据包 P_2 给节点 Y_2 。节点 B_1 、 B_2 和 B_3 能够监听到 P_1 和 P_2 的传输,通过竞争主动创造编码机会转发数据,相对于被动等待编码机会的COPE协议,它能够在一定程度上使网络获得更高的吞吐量。但该协议在链路质量不好的情况下,性能会有所下降。

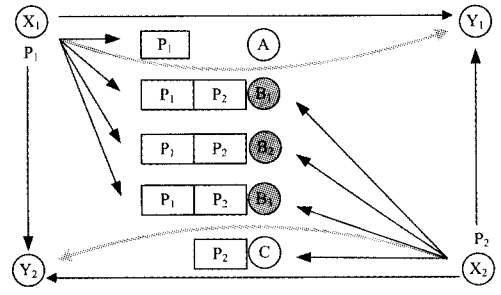


图2 BEND协议

Chachulski提出的基于网络编码的机会路由协议MORE^[10],能够在链路丢包的情况下获得较高的吞吐量。该协议虽然结合网络编码和机会转发应用于无线网络中,但是其涉及的网络编码是流内网络编码,不同于本文研究的简单的COPE类型的流间网络编码。

本文用链路的期望传输次数作为评价链路传输质量的参数,以保障多跳无线网络吞吐量和传输质量为前提,采用机会转发机制,构造了基于网络编码的效用函数。根据数据包传输效用值大小,分配数据包调度优先级,从而实现链路质量感知的机会网络编码机制(LONC),并用NS2仿真的方法对该机制的有效性和性能进行分析与评价。

3 LONC 机制描述

网络中处于不同状态下的节点会拥有不同的编码机会、链路可靠性等,如何区分节点的转发优先级,高效地利用机会网络编码,是一个关键问题。本节主要描述一种无线网络链路质量感知的机会网络编码机制,此机制综合考虑网络编码、链路质量和机会转发3个方面,根据网络状态信息选择合适的转发节点。该机制定义一个效用函数来反映当前网络状态下网络中的节点如何传输并且传输何种组合的数据包能够获得最大增益。该函数使用编码包数、链路期望传输次数等参数评估节点转发策略的有效性。

3.1 网络模型和相关假设

假设在一个多跳无线网络中存在 M 条数据流,每一条数据流 $f_i (i=1,2,\dots,M)$ 都有源节点 s_i 、转发节点和目的节点 d_i 。对于网络中的 m 个中继节点,某一个当前转发节点 $n_c (c=1,2,\dots,m)$ 接收到的原始包为 $N, N \leq M$ 。通过当前转发节点 n_c 转发的每个数据包 $p_i \in f_i$ 都有其对应的下一跳转发节点集合 S_i ,其中 $|S_i| = J_i$,即任一转发节点 $n_{i,j} \in S_i, j=1,2,\dots,J_i$ 。

网络中转发节点会根据待转发数据包是否满足编码条件决定转发数据包的类型,即原始包和编码包。

对于数据流 f_i 和数据流 f_j ,其原始包 p_i 和 p_j 可以编码需要满足的条件是:

- 1) p_i 的下一跳转发节点必须是 p_j 的上一跳转发节点,或者是其上一跳转发节点的邻居节点;
- 2) p_j 的下一跳转发节点必须是 p_i 的上一跳转发节点,或者是其上一跳转发节点的邻居节点。

本文假设网络中 V 个节点随机均匀分布在给定拓扑内,数据传输框架如图3所示,并假设该网络具有如下性质:

- 1) 网络中节点部署后不再移动,即静态多跳无线网络;
- 2) 网络中的所有节点都工作在单信道模式下,共享无线信道带宽资源;

3) 网络中所有数据流的数据包大小都是相同的;

4) 节点输出队列都按照 FIFO 的原则, 转发发送队列队首的数据包, 因此当前转发节点 n_c 最多可编码的原始包数目为 N 。

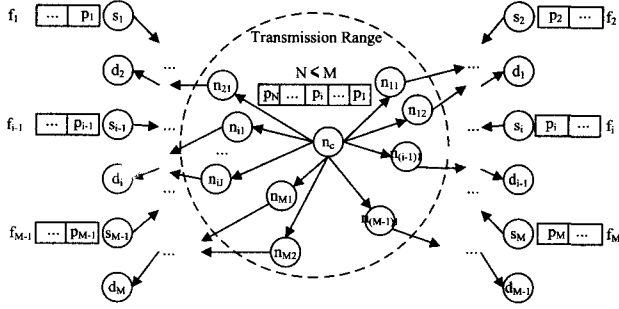


图3 数据传输框架

3.2 基于网络编码的期望传输次数计算

在动态变化的无线网络中, 选择高质量的链路进行数据传输是保证无线网络通信可靠性的有效方法。本节考虑了网络中链路的质量和数据包的类型, 用链路的期望传输次数 ETX 作为衡量参数, 计算了基于网络编码的期望传输次数。

定义 1(链路正向投递率 $p_{u,v}^f$) 表示由节点 u 发送的数据包成功传输到接收节点 v 的正向概率。

定义 2(链路反向投递率 $p_{u,v}^r$) 表示由接收节点 v 发送的 ACK 应答包成功传输到发送节点 u 的反向概率。

令:

$$p_{u,v} = p_{u,v}^f \times p_{u,v}^r \quad (1)$$

式(1)表示通过链路 $l(u,v)$ 发送一次数据成功接收并且成功确认的双向成功传输期望概率。

本文采用 ETX^[8] 机制, 即通过链路成功传输一个数据包(包括重传)的期望传输次数, 其表达式如式(2)所示:

$$ETX_{u,v} = \frac{1}{p_{u,v}} = \frac{1}{p_{u,v}^f \times p_{u,v}^r} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 链路 ETX 值越小, 数据包被下一跳转发节点成功接收的概率就越大。对于某条路径, 其路径 ETX 指的是该路径上所有链路 ETX 值之和。

本文第 2 节提到网络中节点转发的数据包分为原始包和编码包, 对于这两种类型的数据包, 本节结合转发节点与其邻居节点间链路的期望传输次数, 分别给出转发节点发送原始包和编码包的期望传输次数计算方法。

对于原始包, 当前转发节点 n_c 发送给下一跳节点 n_i 的期望传输次数记为 ET_1 , 即:

$$ET_1 = ETX_{n_c, n_i} \quad (3)$$

对于编码包, 由于多个下一跳接收节点都需要解码出相应的原始包, 即要确保指定的下一跳都能成功接收到该编码包, 因此这里借鉴了文献[11]中的编码包期望传输次数计算方法。

假设当前转发节点为 n_c , 待发送的编码包是 $p_1 \oplus p_2$, 接收节点分别是 n_1 和 n_2 。假设编码包成功被下一跳接收之前, 需要 n 次重传, 用 p_{n_c, n_1}^n 表示节点 n_1 仅在第 n 次成功接收到节点 n_c 发送的编码包, 并且节点 n_2 在第 n 次之前(包括第 n 次)就成功接收到节点 n_c 发送的编码包的概率, 即:

$$p_{n_c, n_1}^n = (1 - p_{n_c, n_1})^{n-1} p_{n_c, n_1} \sum_{k=1}^n (1 - p_{n_c, n_2})^{k-1} p_{n_c, n_2} \quad (4)$$

同样地, 用 p_{n_c, n_2}^n 表示节点 n_2 仅在第 n 次成功接收节点

n_c 发送的编码包, 并且节点 n_1 在第 n 次之前(包括第 n 次)就成功接收到节点 n_c 发送的编码包的概率, 即:

$$p_{n_c, n_2}^n = (1 - p_{n_c, n_2})^{n-1} p_{n_c, n_2} \sum_{k=1}^n (1 - p_{n_c, n_1})^{k-1} p_{n_c, n_1} \quad (5)$$

用 $p_{(n_c, n_1), (n_c, n_2)}^n$ 表示节点 n_1 和节点 n_2 都仅在第 n 次成功接收到节点 n_c 发送的编码包的概率, 则:

$$p_{(n_c, n_1), (n_c, n_2)}^n = (1 - p_{n_c, n_1})^{n-1} p_{n_c, n_1} (1 - p_{n_c, n_2})^{n-1} p_{n_c, n_2} \quad (6)$$

所以, 对于当前节点 n_c 发送的编码包 $p_1 \oplus p_2$, 期望传输次数为:

$$ET_2 = \sum_{n=1}^{\infty} n (p_{n_c, n_1}^n + p_{n_c, n_2}^n - p_{(n_c, n_1), (n_c, n_2)}^n) \quad (7)$$

通过化简, 可以得到的:

$$\begin{aligned} ET_2 &= \frac{1}{p_{n_c, n_1}} + \frac{1}{p_{n_c, n_2}} - \frac{1}{p_{n_c, n_1} + p_{n_c, n_2} - p_{n_c, n_1} p_{n_c, n_2}} \\ &= ETX_{n_c, n_1} + ETX_{n_c, n_2} - \frac{ETX_{n_c, n_1} ETX_{n_c, n_2}}{ETX_{n_c, n_1} + ETX_{n_c, n_2} - 1} \end{aligned} \quad (8)$$

同理, 若当前节点 n_c 发送编码包 $p_1 \oplus p_2 \oplus p_3$, 接收节点分别是 n_1, n_2 和 n_3 , 则得到的期望传输次数是:

$$\begin{aligned} ET_3 &= \sum_{k_1=1}^3 \frac{1}{p_{n_c, n_{k_1}}} - \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq 3} \frac{1}{p_{n_c, n_{k_1}} + p_{n_c, n_{k_2}} - p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}}} + \\ &\quad \frac{1}{\sum_{k_1=1}^3 p_{n_c, n_{k_1}} - \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq 3} p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}} + p_{n_c, n_1} p_{n_c, n_2} p_{n_c, n_3}} \end{aligned} \quad (9)$$

更一般的情况, 若当前节点 n_c 发送编码包 $p_1 \oplus p_2 \oplus \dots \oplus p_N$, 接收节点分别是 $n_1, n_2, \dots, n_N$, 则得到的期望传输次数如式(14)所示。展开式中一共有 $2^N - 1$ 项, 形式相同的表达式分别为 $C_N^1, C_N^2, \dots, C_N^N$ 项。

令 $a_1 = p_{n_c, n_{k_1}}, a_2 = p_{n_c, n_{k_2}}, a_3 = p_{n_c, n_{k_3}}$, 展开式中形如 $1/a_1$ 的表达式共有 C_N^1 项, 其和表示为 ETC_N^1 , 即:

$$ETC_N^1 = \sum_{k_1=1}^N \frac{1}{p_{n_c, n_{k_1}}} \quad (10)$$

形如 $\frac{1}{a_1 + a_2 - a_1 a_2}$ 的表达式共有 C_N^2 项, 其和表示为 ETC_N^2 , 如式(11)所示:

$$ETC_N^2 = \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq N} \frac{1}{p_{n_c, n_{k_1}} + p_{n_c, n_{k_2}} - p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}}} \quad (11)$$

形如 $\frac{1}{a_1 + a_2 + a_3 - a_1 a_2 - a_1 a_3 - a_2 a_3 + a_1 a_2 a_3}$ 的表达式共有 C_N^3 项, 其和如式(12)所示:

$$\begin{aligned} ETC_N^3 &= \sum_{1 \leq k_1 < k_2 < k_3 \leq N} (1 / (p_{n_c, n_{k_1}} + p_{n_c, n_{k_2}} + p_{n_c, n_{k_3}} - \\ &\quad p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}} - p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_3}} - p_{n_c, n_{k_2}} p_{n_c, n_{k_3}} \\ &\quad + p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}} p_{n_c, n_{k_3}})) \end{aligned} \quad (12)$$

依此类推, 可以得到展开式中的所有项, 最后一项表示为:

$$\begin{aligned} ETC_N^N &= 1 / (\sum_{k_1=1}^N p_{n_c, n_{k_1}} - \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq N} p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}} + \\ &\quad \sum_{1 \leq k_1 < k_2 < k_3 \leq N} p_{n_c, n_{k_1}} p_{n_c, n_{k_2}} p_{n_c, n_{k_3}} + \dots + \\ &\quad (-1)^{N-1} p_{n_c, n_1} p_{n_c, n_2} \dots p_{n_c, n_N}) \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 当前节点发送此编码包的期望传输次数可表示为:

$$ET_N = ETC_N^1 - ETC_N^2 + ETC_N^3 - \dots + (-1)^{N-1} ETC_N^N \quad (14)$$

根据不同的链路成功接收并确认的双向成功传输期望概

率,即不同的链路期望传输次数得到的基于网络编码的数据包期望值传输次数是不一样的。编码节点与其一下跳节点间链路双向成功传输期望概率越大,表明链路质量越好,数据包的期望传输次数越小。

3.3 效用值计算

经过编码操作后的数据,通过一次发送达到转发多个原始包的效果,从某种意义上来说节省了网络带宽,提高了网络吞吐量。为了尽可能使网络吞吐量达到最大,希望编码包中包含的原始包越多越好。但是这仅仅意味着通过一次发送有可能转发更多的原始包,考虑到编码节点和接收节点之间的链路状况,原始包的数目不能准确衡量数据传输效率。

通过 3.2 节的分析,可以得到当前转发节点 n_c 发送编码包 $p_1 \oplus p_2 \oplus \dots \oplus p_N$ 的期望传输次数。显然,数据包期望传输次数是和链路 ETX 有关的,链路 ETX 值越小,成功接收并确认编码包的期望概率越大,链路质量越好,期望传输次数越小。不同的编码包组合,是通过不同的链路传输数据的,链路质量的好坏会影响传输的质量和效率。因此,综合考虑编码组合的类型和传输次数期望值既讲究了数据传输的有效性,又保障了数据传输的可靠性。同时,本文充分利用无线信道的广播特性,将网络编码与机会转发相结合,以进一步最大化网络编码的效用,提高无线网络的整体性能。

根据 3.1 节的网络模型和相关假设,当前转发节点 n_c ($c=1,2,\dots,m$)接收到的每个原始包 $p_i \in f_i$ ($i=1,2,\dots,M$)都有相应的转发节点集合,本文选择相应的下一跳转发节点 $n_{i,j}$ ($j=1,2,\dots,h_i, h_i \leq J_i$)时需要满足转发条件:

$$ETX(n_{i,j}, d_i) < ETX(n_c, d_i), \forall n_{i,j} \in S_i \quad (15)$$

当前转发节点选择的下一跳转发节点 $n_{i,j}$ 到目的节点的 ETX 值要小于当前转发节点 n_c 到目的节点的 ETX 值。

由于存在机会转发,原始包 p_i 可能有多个下一跳转发节点,因此对 3.2 节中基于网络编码的数据包期望传输次数计算稍作近似修改,假设原始包 $p_i \in f_i$ 有 h_i 个满足条件的转发节点,那么用至少有一个转发节点接收到数据包的概率代替 3.2 节中的链路的双向成功传输期望概率,即:

$$p(n_c, n_i) = 1 - \prod_{j=1}^{h_i} (1 - p(n_c, n_{i,j})) \quad (16)$$

用 N_c 表示当前转发节点 n_c 待发送的数据包,如 $p_1 \oplus p_2 \oplus \dots \oplus p_{N_c}$, $|N_c|$ 表示数据包中包含的原始包数目, $ET|_{N_c}$ 表示考虑机会转发后该数据包到达下一跳的期望传输次数,结合式(16),得到:

$$ETC|_{N_c} = \sum_{k_1=1}^{|N_c|} \frac{1}{p(n_c, n_{k_1})} \quad (17)$$

$$ETC|_{N_c}^2 = \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq |N_c|} (1/(p(n_c, n_{k_1}) + p(n_c, n_{k_2}) - p(n_c, n_{k_1})p(n_c, n_{k_2}))) \quad (18)$$

依此类推,则式(14)可以写成如下表达式:

$$ET|_{N_c} = ETC|_{N_c} - ETC|_{N_c}^2 + ETC|_{N_c}^3 - \dots + (-1)^{|N_c|-1} ETC|_{N_c}^{|N_c|} \quad (19)$$

定义 3(效用函数 $U_e(n_c)$) 表示对于当前转发节点 n_c 待发送的数据包 N_c ,在期望传输次数中平均每次传输的原始包数目,即数据包有效传输数。

$$U_e(n_c) = \frac{|N_c|}{ET|_{N_c}}, 1 \leq |N_c| \leq M \quad (20)$$

通过式(20)可以得到数据包有效传输数,把数据包有效

传输数作为效用的参考函数,当编码包数相同时,数据包传输次数期望值越小的效用值越大,反之越小;当数据包传输次数期望值相同时,编码包个数越多,效用值越大,反之越小。

3.4 动态优先级分配策略

发送数据包时,由于考虑了转发节点与其下一跳转发节点之间的链路状况,衡量了数据包的期望传输次数,可以采用多优先级的调度机制。根据 3.3 节中的效用函数,可以计算出当前转发节点 n_c 待转发数据包的效用值,根据数据包传输效用值的大小,设置效用优先级,即相当于设置「数据包传输优先级,使高优先级的数据包能够以更大的概率更快地接入无线信道。

现有典型的多优先级数据包调度机制是借鉴了 IEEE 802.11e 中改进的 EDCF 机制^[5]。这些机制中节点发送数据包时,首先根据数据包的优先级,等待相应的 AIFS 时间间隔,然后节点进入退避阶段,竞争窗口值在 $(0, CW)$ 中选取。起初,节点的竞争窗口 CW 设置为 CW_{min} ,一旦传输失败,竞争窗口加倍增加,直到达到指定的最大竞争窗口值 CW_{max} 。该机制通过设定不同的 AIFS 时间间隔和竞争窗口值设定数据包的优先级。当 CW_{min} 、 CW_{max} 和 AIFS 越小时,数据包的优先级越高,反之,优先级越低。但是这种多优先级调度策略或者根据某一个参数,例如编码包中原始包个数,给予包含更多原始包的编码包更高的优先级;或者按某种需求为数据包分配若干个固定区间,给予包含在相同区间内的数据包相同的优先级。然而,考虑到本文数据包传输效用函数,采用上述固定多优先级数据包调度机制是不合适的,本文借鉴文献[12]的动态优先级分配策略,更加细致准确地为数据包分配优先级。

节点转发数据包时会相互竞争无线信道,为其动态分配不同的退避时间可以有效区分数据包调度优先级。数据包传输效用值越大,此数据包应该具有越高的优先级,即能够以更高的概率接入无线信道。根据 3.3 节中效用函数的表达式可知,数据包的期望传输次数至少为一次,最小值必定大于零。根据节点转发数据包效用值大小,采用式(21)和式(22)为其动态分配 CW_{min} 、 CW_{max} ,实现多优先级调度。

$$CW_{min} = \left\lceil \frac{128}{2^{U_e(n_c)} + \lg U_e(n_c)} \right\rceil \quad (21)$$

$$CW_{max} = \left\lceil \frac{1024}{2^{U_e(n_c)} + \lg U_e(n_c)} \right\rceil \quad (22)$$

通过公式(21)和(22)为数据包传输效用值较大的数据包分配较小的 CW_{min} 、 CW_{max} ,使其能够以较高的优先级接入无线信道。反之,如果节点待发送的数据包效用值越小,则为其分配较大的 CW_{min} 、 CW_{max} ,这些数据包接入信道的概率就相对降低了。

该策略根据数据包效用值的大小设置不同的优先级,在缓解竞争和减少碰撞的情况下能够实现比较有效的数据传输,在一定程度上提高数据交换增益和吞吐量增益,从而提高整个网络的通信性能。

综上,链路质量感知的机会网络编码执行算法如下所示。

算法 1 链路质量感知的机会网络编码执行算法

Input: $U_i, i \in [1, M]$

Output: $U_e(n_c)$ and CW_{min}, CW_{max}

(1) for $c=1, 2, \dots, m$

(2) for each node $n_c \in V$ has data packet N_c

```

(3)   for each  $p_i \in N_c, i=1,2,\dots,|N_c|$ 
(4)       calculate  $p(n_c, n_i)$ 
(5)   end for
(6) end for
(7)end for
(8)for  $c=1,2,\dots,m$ 
(9)   calculate  $EN_{|N_c|, U_c}(n_c), CW_{\min}, CW_{\max}$ 
(10)end for

```

4 性能分析与评价

对于 LONC 机制,本节有针对性地设计了一系列的仿真实验对其全面的性能分析和评价。本节首先介绍仿真环境和参数设置,然后对仿真结果进行分析和讨论。

4.1 实验设计

本文在 NS2 平台中实现链路质量感知的机会网络编码机制(LONC),并将其与 BEND、COPE 和 801.11 协议作性能进行比较。

仿真实验采用 4×4 网络场景,如图 4 所示。图中的实线表示的是较高质量的链路,链路丢包率(Loss Packet Rate, LPR)为 0.05,虚线表示的是低质量的链路,其丢包率至少为 0.1。 4×4 网络场景中,最大距离是 3 跳,共有 16 个节点,相邻节点的水平距离和垂直距离都是 150m,4 个顶点各有 3 个邻居节点,边缘节点各有 5 个邻居节点,其余非边界节点各有 8 个邻居节点。

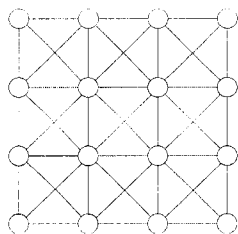


图 4 4×4 网络场景

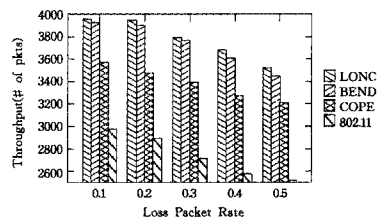
实验中,节点的通信距离是 250m,数据流是 CBR 流,数据包的长度均设为 1000byte,发送时间间隔是 0.1s,信道速率是 1Mbps。

本文设置了 3 组仿真实验,第一组实验在仿真场景中随机布置了若干条 CBR 数据流,比较了随着低质量链路丢包率的变化,LONC、BEND、COPE 和 802.11 协议的吞吐量变化情况;第二组实验对低质量链路设定了特定的丢包率,比较了随着 CBR 数据流数量的变化,LONC、BEND 以及 COPE 协议的吞吐量变化情况;第三组实验固定了低质量链路的丢包率和数据流的数量,比较了 LONC 机制、BEND 和 COPE 协议的单位时间吞吐量变化情况。

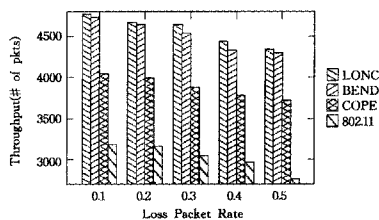
4.2 结果分析

图 5 显示了网络中随机布置 8 条 CRB 数据流和 12 条 CRB 数据流时,随着低质量链路的丢包率从 0.1 变化到 0.5,LONC 机制和 BEND、COPE、802.11 协议吞吐量的比较。从图中可以看出,随着低质量链路丢包率的增加,即链路质量越来越差,4 种机制的吞吐量都是呈下降趋势的,其中 LONC 机制较其他 3 种协议具有最高的吞吐量,其次是 BEND 协议。图 5(a)中,LONC 机制优于 BEND 协议,其吞吐量较 COPE 协议提高了近 11.64%,而比 802.11 协议的吞吐量提高了近 38.45%。图 5(b)中,采用 LONC 机制获得的吞吐量较 COPE

协议提高了近 17.63%,比 802.11 协议提高了近 51.02%,大幅度地提高了网络的通信性能。同时,图 5 直观地反映即使在链路丢包率极其严重的情况下,LONC 机制也能获得较高的吞吐量。LONC 机制由于在网络编码中融合了机会转发,转发节点能够主动创造更多的编码机会来实现数据的高效传输。另一方面,该机制考虑了数据包类型和链路质量,采用动态优先级调度策略,在尽量减少竞争和碰撞的情况下,使得优先级越高的数据包越先发送,提高了传输效率。因此,LONC 机制比其余 3 种协议吞吐量都有所提高,在一定程度上保证了数据传输的可靠性。



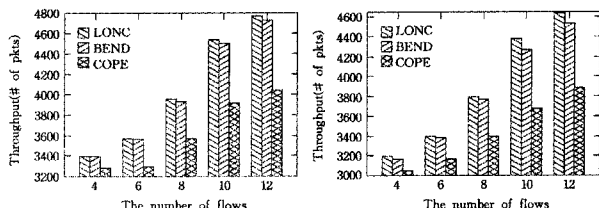
(a) 8 条 CBR 流



(b) 12 条 CBR 流

图 5 吞吐量随链路丢包率的变化情况

图 6 显示了当低质量链路的丢包率分别为 0.1 和 0.3 时,LONC 机制和 BEND、COPE 协议的吞吐量随着网络中数据流数目增加的变化情况。从图中可以看出,低质量链路在特定的链路丢包率下,随着网络中数据流数目从 4 条增加到 12 条,3 种机制的网络吞吐量都是呈上升趋势的。图 6 中,当网络中存在 4 条数据流时,LONC 机制的吞吐量约为 COPE 协议的 1.04 倍,而在 12 条流时,其吞吐量是 COPE 协议的近 1.18 倍,对于网络性能有显著提高。图 6(a)中,在低质量链路丢包率为 0.1 时,LONC 机制吞吐量与 BEND 协议相近,随着数据流数量的增加,吞吐量较 BEND 有所提高。图 6(b)中,低质量链路丢包率为 0.3,随着网络中数据流数从 4 条增加到 12 条,LONC 机制的性能始终优于 BEND 和 COPE 协议,并且当数据流数为 10 和 12 时,与图 6(a)相比,较 BEND 协议的优势更加明显。原因是 LONC 机制考虑到了链路状况,能够在链路质量比较差的情况下,保证整个网络的吞吐量。该机制采用的效用函数是与数据包种类相关的,网络中存在的数据流越多,传输的数据包编码组合越丰富,采用该机制达到的效果越好。



(a) LPR=0.1

(b) LPR=0.3

图 6 吞吐量随 CBR 数据流数量的变化情况

图 7 显示了当低质量链路 $LPR=0.3$ 、网络中随机布置 12 条 CBR 数据流、仿真实验运行 100s 时, LONC 机制、BEND 和 COPE 协议单位时间吞吐量变化情况。从图 7(a) 可以看出, 初始时刻, 网络中刚加入数据流, 3 种机制的单位时间吞吐量都较低, 随着时间的推移, 网络状况趋于稳定, 单位时间吞吐量比初始时刻高。仿真结果显示, COPE 协议单位时间吞吐量最低, 平均值大约为 38pkt/s, LONC 和 BEND 单位吞吐量都较 COPE 有所提高, 分别约为 46pkt/s 和 45pkt/s。从运行总体趋势观察, LONC 机制单位时间吞吐量最高, 并且波动最小。图 7(b) 的累积分布函数直观地表明, LONC 机制单位时间吞吐量最高, 其次是 BEND 协议, COPE 协议的单位吞吐量最低。COPE 协议的编码包种类有限, 大多数情况是两个包进行编码, 而 LONC 和 BEND 都采用机会转发, 潜在的编码机会会变多, 吞吐量提高。LONC 机制考虑了链路质量, 各个数据包受链路质量的影响都是通过统一的效用函数计算的, 效用值直接影响数据包的调度优先级。相比于仅依据编码包中原始包数调度数据包的 BEND 协议, 链路质量对 LONC 的影响越稳定, 其单位时间吞吐量越平稳。

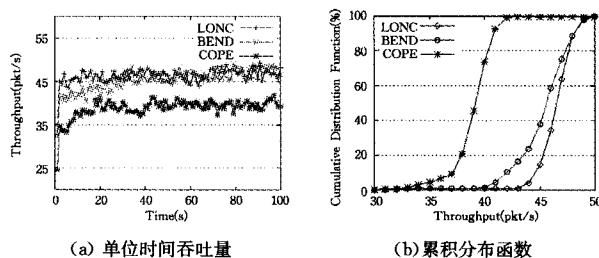


图 7 单位时间吞吐量的变化情况

结束语 本文提出了一种无线网络链路质量感知的机会网络编码机制。该机制使用的是 COPE 类型的流间网络编码协议, 结合机会转发技术来充分利用无线媒介的共享特性。考虑到无线网络的链路质量, 引入期望传输次数作为参考基数, 提出了效用函数的概念, 以此来评价发送数据包的效率。根据节点待转发数据包的效用值, 为其动态分配调度优先级, 使得高优先级的数据包有更高的概率获得转发机会。LONC 机制能够在链路质量较差的环境中, 保证数据传输的可靠性和网络的吞吐量, 其性能较经典的 COPE 协议有明显的提高。由于无线多媒体业务对于链路的质量更敏感, 对于数据可靠性要求更高, 接下来的工作会涉及这方面内容并对此进

行研究。

参考文献

- [1] 沈航, 白光伟, 赵露, 等. 多跳无线网络中具有时间意识的视频流控制协议[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5): 808-813
- [2] 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
- [3] Chi Kai-kai, Jiang Xiao-hong, Horiguchi S. A More Efficient COPE Architecture for Network Coding in Multihop Wireless Networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, E92-B(3): 766-775
- [4] Hang Ming-fong, Lin Sheng-wei, Liao Wan-jiun. C2AR: Coding and Capacity Aware Routing for Wireless Ad Hoc Networks[C]// Proceedings of IEEE ICC, Cape Town, South Africa, May 2010: 1-5
- [5] Zhang Jian, Chen P, Marsic I. MAC-layer Proactive Mixing for Network Coding in Multi-hop Wireless Networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2): 196-207
- [6] USALe J, Lui J C S, Chiu D M. DCAR: Distributed Coding-Aware Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 596-608
- [7] Ahlswede R, Cai N, Li S R, et al. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [8] Douglas S J, De C, Aguayo D, et al. A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing[J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 419-434
- [9] Rozner E, Seshadri J, Mehta Y, et al. Simple Opportunistic Routing Protocol for Wireless Mesh Networks[C]// Proceedings of IEEE, Wireless Mesh Networks, Sept. 2006: 48-54
- [10] Chachulski S, Jennings M, Katti S, et al. Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing[C]// Proceedings of ACM SIGCOMM, New York, USA, October 2007: 169-180
- [11] 陈贵海, 李宏兴, 韩松, 等. 多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1908-1919
- [12] Shen Hang, Bai Guang-wei, Zhao Lu, et al. An Adaptive Opportunistic Network Coding Mechanism in Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012(2012): 13

(上接第 17 页)

- [14] 汪致远. 化学、生物武器与防化装备[M]. 北京: 原子能出版社, 2003
- [15] 李其样, 张振中. 论化学武器的危害及其防护[J]. 山西科技, 2007, 1: 103-106
- [16] 刘永红, 薛青, 曹波伟, 等. 基于指令机制的作战 Agent 体系结构研究[C]// 全国仿真技术学术会议论文集. 2011: 120-123
- [17] General and Specific Characteristics for HPAC Model[EB/OL]. http://www.ofcm.gov/atd_dir/pdf/hpac.pdf, 2006
- [18] Warner S, Platt N, Heagy J F. Application of user-oriented measure of effectiveness to HPAC probabilistic predictions of Prairie Grass field trials[R]. DASW01-98-C-0067. Institute for Defense

Analyses, 2001: 275

- [19] Lee R W. Moving the Hazard Prediction and Assessment Capability to a Distributed, Portable Architecture[R]. Salt Lake City: Springfield, 2002
- [20] Hill A. Using the Hazard Prediction and Assessment Capability (HPAC) Hazard Assessment Program for Radiological Scenarios Relevant to the Australian Defense Force[R]. Victoria: DSTO Platforms Sciences Laboratory, 2003
- [21] 钟自鸣, 黄健, 龚建兴, 等. BOM 组件式仿真系统数据驱动方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6765-6769
- [22] Alberts S, Hayes R. Understanding command and control [M]. Washington D C: CCRP, 2006: 167-177