

一种结合网络编码的路径代价衡量方法^①肖 潇^② 杨路明 王伟平 张 帅

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘 要 针对无线路由协议中的路径代价衡量问题,结合网络编码改善无线节点信息互换的思想,提出了一种结合网络编码的路径代价衡量方法——RMNC,其核心思想是利用流量参数反映信息流的网络编码“搭乘”程度和逐节点计算路径的代价。通过将传输流量参数和路径中节点左右链路信息流流量参数进行运算,获得路径上的各个节点的传输代价;网络中某一条路径的代价等于组成这条路径的节点传输代价之和,通过比较不同路径的逐节点计算代价值,获得最短路径。分析和模拟测试结果表明,RMNC 可以有效地获得结合网络编码的最短路径,达到提高传输性能的目的。尽管传输延时有所增加,但可以接受,方法可行。

关键词 网络编码,信息互换,路径代价,流量参数,最短路径

0 引 言

无线路由协议通常是依据一定的链路代价衡量参数来寻找最短路径,建立连接,进行传输。衡量链路代价的参数主要包括跳数(Hop)、每一跳往返时间(RTT)、平均传输次数(ETX)^[1]和平均传输时间(ETT)^[2]。普通的路径代价衡量方法基于一条路径的代价等于组成这条路径的所有链路的链路代价之和的思想。

近年来,网络编码技术在无线网络研究中得到了广泛应用。由于无线信道的广播特性很适合应用编码,因而网络编码被应用在无线网络的各个方向,用于提高网络吞吐量、能量利用效率和安全性^[3-5]。网络编码的应用为无线路由协议中的最短路径寻找提供了一种新的途径。Bin 等人首先提出了调整路由,使得信息包尽可能参与编码,以减少传输代价的思想^[6]。Wu 等人扩展了这一思想,提出将网络编码改善无线传输的思想应用在无线先应式路由协议中,引入马尔可夫参数,通过增加虚拟节点考虑网络编码的影响,以获得最短路径,达到减少网络开销、提高网络吞吐量的目的^[7]。本文针对无线路由协议中的路径代价问题,结合网络编码改善无线传输性能的思想,提出了一种结合网络编码的路径代价衡量方法(routing metric with network coding, RMNC),其

核心思想是基于利用网络编码改善无线节点信息互换的原理,引入传输路径中某个节点的各方向信息流流量参数,获得结合网络编码的节点传输代价,网络中某一条路径的代价等于组成这条路径的节点传输代价之和。通过 RMNC 路径代价衡量方法,最短路径即结合网络编码传输的最佳路径,该路径传输,可以有效地提高传输性能。

1 网络编码改善无线信息互换原理

利用无线网络的广播信道传输特性,网络编码可以用来改善无线节点间信息互换性能。图 1 给出了利用网络编码改善无线节点互换的基本原理。

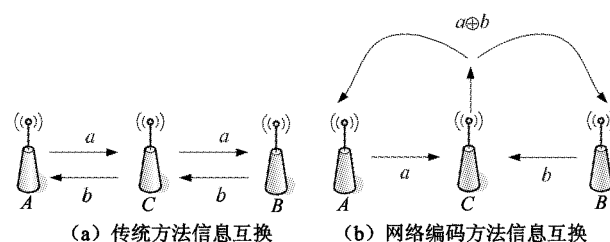


图 1 网络编码改善信息互换的基本原理

图 1(a)表示在没有网络编码情况下的信息互换。首先,节点 A 和 B 分别传输信息 a 和 b 到节点 C,中间节点 C 分别广播信息 a 和 b,完成信息互换

① 973 计划(2008CB317107),国家自然科学基金(60673164, 60873265)和湖南省杰出青年基金(06JJ10009)资助项目。

② 男,1981 年生,博士生;研究方向:网络编码和网络优化;联系人,E-mail: xiaogentleman@163.com
(收稿日期:2008-06-18)

需要传输 4 次。图 1(b)表示使用网络编码后的信息互换,中间节点 C 对 a 和 b 进行编码组合得到 $a \oplus b$,然后广播 $a \oplus b$ 。由于节点 A 和节点 B 分别有信息 a 和 b ,通过异或操作,分别解出 b 和 a ,完成信息互换只需要传输 3 次。相对于传统方法,使用了网络编码的信息互换减少了传输次数,提高了网络性能。

Wu 等人将无线节点互换的基本原理推广到了多个节点情况^[8]。在一串无线节点的信息包互换(同信息量)中,信息流互换在局部可以看作是图 1(b)所示的编码互换,节点对左右二条链路获得的不同信息包进行编码,广播发送,邻居节点解码,达到信息互换的目的,无线信道可以具有和单方向传输一样的网络性能。

Katti 等人将无线编码互换的思想实际化,提出了在节点的网络层和媒体接入控制(MAC)层之间加入网络编码子层的思想^[9]。网络编码子层使得信息包在发送时考虑能否进行互换编码,有效地减少了传输次数。

直观地看,当无线网络传输中存在二条信息流同链路互换时,可以使用网络编码技术,在节点上设置网络编码子层,当数据流传输时在中间节点上和反向流进行网络编码互换,有效地减低信息流传输代价,达到一条信息流传输“搭乘”另外一条信息流的效果。

2 RMNC 方法

2.1 传输模型和问题描述

路径代价衡量方法需要一个接近现实环境的模型。我们假设一个包含若干个无线静态节点的无线网络。

假设 1 每一对无线节点链路代价完全相同且链路代价值为 λ (这里的代价值可以是跳数、RTT、ETX、ETT,或以上参数的混合代价值)。

假设 2 无线网络中,源节点发起一个目的节点为网络中某一节点的信息流传输操作,信息流传输的流量为已知。

假设 3 无线网络中,存在一条或者多条长效传输流,长效传输流的经过节点和流量为已知。

图 2 给出了一个满足该模型的四节点无线模型,传输任务是从节点 a 发起一个信息流 $X(n)$ 传输到目的节点 d ,网络中存在一个 $d-c-b$ 的长效传输流 $Y(n)$ 。

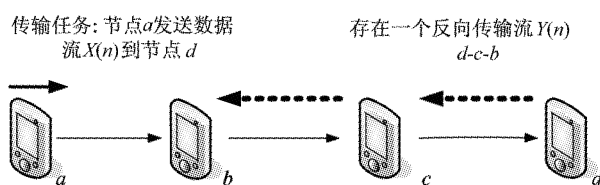


图 2 四个节点传输路径代价衡量示例

图 2 所示的模型中,应用普通的路径代价衡量方法,路径 $a-d$ 的代价 $Cost(a-d)$ 为

$$\begin{aligned} Cost(a-d) &= Cost(a-b) + Cost(b-c) \\ &\quad + Cost(c-d) \\ &= \lambda + \lambda + \lambda \\ &= 3\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

然而,结合网络编码,由网络编码改善无线互换的原理, $d-c-b$ 的长效传输流 $Y(n)$ 可以和 $b-c-d$ 的传输流进行编码互换,通过传输流“搭乘”来减少代价。此时 $b-c$ 和 $c-d$ 的路径代价不仅仅与自身链路传输代价相关,其代价还需要考虑前一跳的传输代价。当满足互换条件后,还需要考虑相邻链路的情况,用普通的路径代价衡量方法无法进行计算。

同时,结合网络编码,需要对原有的路径代价衡量方法进行改进,以获得结合网络编码传输的最佳路径。RMNC 所要解决的问题就是,通过新的衡量方法反映网络编码对信息流的“搭乘”影响和路径代价描述。

2.2 RMNC 的基本思想

RMNC 包括两个基本思想:逐节点计算路径代价的思想和利用流量参数反映信息流网络编码“搭乘”的思想。

由网络编码互换模型可以看到,无线网络节点的广播特性使得中间节点最为重要,它对左右边的不同信息包进行编码,广播发送,使得互换成为可能。由无线网络编码的这一特性,RMNC 采用逐节点计算代价的方法,即网络中某一条路径的代价等于组成这条路径的节点传输代价之和。

定义 1 假定无线网络中存在某一条路径 $L = N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3 \cdots \rightarrow N_n$,采用 RMNC 逐节点计算代价的方法,该条路径的代价为

$$\begin{aligned} Cost(L) &= Cost(N_1) + Cost(N_2) + Cost(N_3) \\ &\quad + \cdots + Cost(N_n) \end{aligned} \quad (2)$$

其中的 $Cost(N_i) (1 \leq i \leq n)$ 表示路径 L 上节点 i 的传输代价。

在式(2)中,结合网络编码,如何定义节点传输代价反映信息流“搭乘”影响成为关键。

直观的看编码互换原理,结合网络编码,传输流的流量是一个很重要的参数,它反映了网络编码的“搭乘”程度。理想状态下,当反向流的流量大于正向流流量时,通过编码互换传输,正向流可以完全地“搭乘”反向流,不需要传输代价。基于此,RMNC 将流量参数引入代价分析中,对链路代价进行处理。图 3 给出了逐节点计算代价时节点的分析例子。

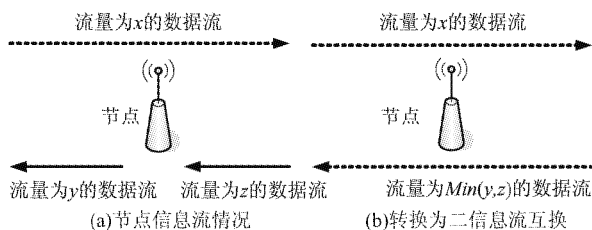


图 3 逐节点计算代价示例

图 3(a) 给出了节点的情况,由现有的网络机制,节点可以获得它在某条路径上的左右链路的流量情况,节点流出左边的流量(可以是多条传输流流量之和)为 y ,从右边流入节点的流量(可以是多条传输流流量之和)为 z 。在知道该路径发起的传输流量为 x 的情况下, x 、 y 、 z 三条传输流(其中的 y 和 z 可能为多条流的组合)组成图 1(b) 所示的局部网络编码互换。此时,如图 3(b),可以将节点情况看成是一条流量为 y 和 z 中最小值的反向流和流量为 x 的正向传输流在进行编码互换,“搭乘”程度由正反流量的大小来比较决定。

定义 2 假定无线网络中存在某一条路径 $L = N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3 \cdots \rightarrow N_n$,每一对无线节点链路代价完全相同且代价值为 λ 。路径发起一个流量 x 的传输流,此时,路径上的某节点 N_i 左右链路对应路径传输流的反向传输流流量分别为 y 和 z ,采用 RMNC 逐节点计算代价的方法,节点 N_i 的传输代价为

$$Cost(N_i) = \lambda \times \text{Max}(0, (\frac{x - \text{Min}(y, z)}{x})) \quad (3)$$

其中 $1 < i < n$ 。当 $i = 1, n$ 时,有

$$Cost(N_i) = \frac{1}{2} \lambda \times \text{Max}(0, (\frac{x - \text{Min}(y, z)}{x})) = \frac{1}{2} \lambda \quad (4)$$

结合引入传输路径中某个节点的各方向信息流流量参数获得节点代价和逐节点计算路径代价的思想, RMNC 可以获得结合网络编码传输的路径代价。

2.3 RMNC

实际应用中,按照路由建立的方式不同,现有的无线路由协议可以分为先应式路由协议和按需路由

协议两大类,不同类型的路由协议中所进行的操作是不一样的。

RMNC 应用于实际协议中,传输发起流的流量参数是实时产生的,先应式路由协议较难快速地反映传输发起流对路径的影响,因而按需路由协议更加适用。

为简化分析 RMNC 的应用,我们选取无线按需路由协议中最具有代表性的协议——动态源路由(dynamic source routing, DSR)协议进行分析描述。

DSR 协议是一个典型的按需路由协议,当节点需要发送时,发起一次路由建立,源节点洪泛一个具有唯一 ID 的路由请求报文(RREQ);收到报文的节点后,根据一定的判定原则(防止循环处理)进行转发并将自己的地址信息附加到 RREQ 的路由序列中。当目的节点收到多个 RREQ 时,选取 RREQ 中跳数最小的路径,节点将沿着该 RREQ 经过的路径反向发送一个包含路径信息的路由应答报文(RREP)。源节点获得 RREP 后,按照该路径建立连接和传输。

考虑一个九节点的无线 Mesh 网络(或者节点静态网络)模型,传输使用 DSR 协议,节点拓扑结构情况如图 4 所示。

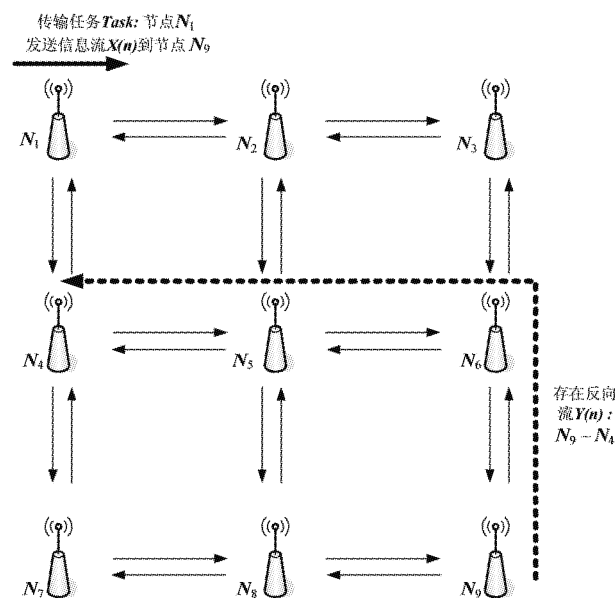


图 4 九节点的 Mesh 网络示例

图 4 的网络中,存在 N_1 到 N_9 九个节点,节点 N_1 发起一个目的节点到 N_9 的传输流 $X(n)$,网络已经存在一个长效传输流 $Y(n)$,路径节点为 $N_9 - N_6 - N_5 - N_4$ 。很显然,若传输流 $X(n)$ 的传输路径经过 $N_4 - N_5 - N_6 - N_9$ 可以和长效传输流 $Y(n)$ 进

行编码互换,减少传输代价,这也是结合网络编码的最短路径。

典型的按需路由协议——DSR 协议中,应用 RMNC 可使得协议能够获得结合网络编码的最短路径,要实现这一点,需要解决以下两个关键问题:(1) 现有的路由协议如何改进来应用 RMNC;(2) 无线节点如何操作,需要运算和保存什么数据。

对于关键问题(1),原有 DSR 协议中 RREQ 包格式中包含源节点 ID 号、目的节点 ID 号、路由记录(用于记录经过节点位置信息)、路由请求包序列号(唯一的标志该请求包)。这些信息足够使得路由请求包找到目的节点并记录经过路径的信息。

结合网络编码,应用 RMNC,为在各个节点运算节点代价,RREQ 的内容需要进行扩展。在原有基础上,需要增加记录传输发起流流量的域,该域中记录发起信息流的流量值;需要增加记录路径节点代价的域,记录各个节点的代价,该域中最后将会保存 RREQ 经过的路径上所有节点的 RMNC 代价。通过扩展,新的 RREQ 可以有效地携带路径的信息,从而获得结合网络编码传输的最佳路径。

如图 4 中的网络中,当节点 N_1 发起请求 RREQ 时,RREQ 中记录发起传输流 $X(n)$ 流量,该 RREQ 经过 $N_1 - N_4 - N_5 - N_6 - N_9$ 路径后,RREQ 除记录这些节点的序列号外,同时记录所经过节点的代价 $Cost(N_1)$ 、 $Cost(N_4)$ 、 $Cost(N_5)$ 、 $Cost(N_6)$ 和 $Cost(N_9)$ 。当多个 RREQ 到达目的节点 N_9 时,该节点通过逐节点计算路径代价的思想,可以获得不同 RREQ 经过路径的路径代价值,选取其中最小代价值的路径作为传输路径,该路径也是结合网络编码传输的最佳路径。

关键问题(2)涉及无线节点的操作、运算和保存数据的问题。在典型的按需路由协议步骤中,无线节点的主要操作包括数据传输中的操作和路由请求中的操作。节点数据传输操作中,由 Katti 等人的网络编码子层^[9],节点的网络编码互换操作在 MAC 层和网络层之间完成,当节点发现其具有编码机遇,会进行网络编码,有效减少传输代价。节点路由请求操作中,由关键问题(1),RREQ 中记录了发起传输流 $X(n)$ 流量,此时路径中的节点只需要参照其左右链路的流量情况以及传输流的流量情况,进行 RMNC 节点计算代价方法,获得节点代价,并将该代价记录在 RREQ 中。需要重点指出的是,具体的应用中,某个节点的代价可能是多个,因为其下一跳的目标可能为多个。此时,这些代价均需要记录在

RREQ 中,当 RREQ 到达下一跳节点时,通过路由序列将冗余的节点代价进行删除。

如图 4 中的网络中,当节点 N_5 从节点 N_4 收到 RREQ 时,节点 N_5 将会获得:(a)从 RREQ 中取出的本次路由请求信息流的流量;(b)节点 N_5 到节点 N_4 链路的传输流流量;(c)除 RREQ 来源链路节点 N_4 外的所有的下一跳节点(包括 N_2 、 N_6 、 N_8)到节点 N_5 的传输流流量。结合(a)、(b)、(c),节点根据 RMNC 节点计算代价方法,可获得三个节点代价值(分别对应下一跳节点 N_2 、 N_6 、 N_8)。将这三个代价值和代价值对应的下一跳节点地址信息记录在 RREQ 中。若 RREQ 下一跳到达 N_6 ,将冗余的节点代价(包括节点 N_2 、 N_8 的代价值)删除,减少冗余信息量。

通过增加 RREQ 的信息和扩展节点操作,RMNC 可以应用于典型的按需路由协议中,获得结合网络编码的最短路径。

将 RMNC 应用于典型的按需路由协议中和路由查找步骤中,网络中所有的节点均要遍历,相应的路由协议时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

将 RMNC 应用于典型的按需路由协议中,网络节点只需要保存其到邻居节点的代价 $Cost(N_i)$,相应的路由协议空间复杂度为 $O(n^2)$ 。

路由协议在动态环境下的收敛是指从网络发生变化开始直到所有路由器识别到变化并针对该变化做出适应为止的这段时间。将 RMNC 应用于典型的按需路由协议中,在网络发生变化(链路变化及链路流量发生变化)时,路由器需要对新的节点代价进行运算,并触发新的路径查找,建立新的路径连接。此时,采用 RMNC 的按需路由协议收敛时间相比传统按需路由协议的差异表现在节点运算节点代价 $Cost(N_i)$ 的时间。通常情况下,该运算时间是较小的。因而,采用 RMNC 的按需路由协议的收敛时间与传统按需路由协议是基本一致的。

3 模拟测试与分析

本节给出了 RMNC 路径代价衡量方法的模拟测试结果与分析。实验中使用 Pentium-Dual Core 1.73GHz CPU, 1GB 内存, 80GB SATA5400 转硬盘的笔记本环境,操作系统为 Windows Xp sp2 版,仿真软件为离散网络模拟器工具 OMNET++,使用 DSR 协议对 RMNC 路径代价衡量方法的传输性能与普通路径代价衡量方法进行了比较。为方便无线节点的布网操作和信息包操作,仿真中结合运用了 Mobility

Framework 插件。

模拟测试的无线网络拓扑结构如图 5 所示,在 600×600 的区域范围内随机散布 40 个无线节点(节点随机方案固定),网络中无线链路最大传输流量为 800kbps,节点互相之间产生随机数(0-200kbps 之间)的传输流,节点延时时间为 200ms,节点计算代价时间忽略不计。为分析这两种路径代价方法的所建路径传输性能,设计了以下三组实验。

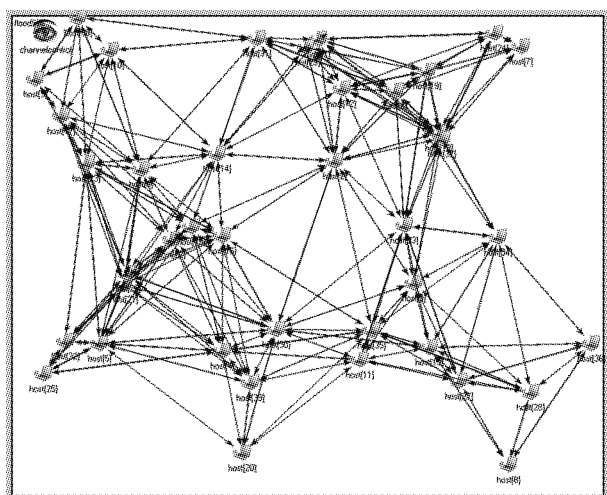


图 5 测试中无线网络结构

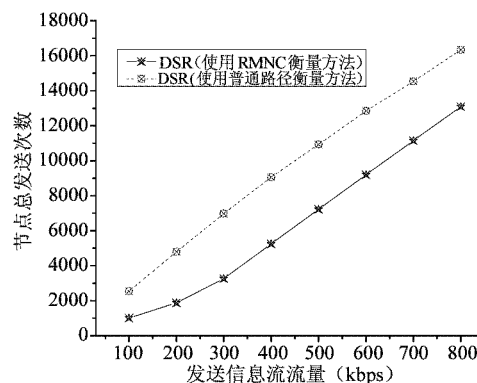
实验 1 发送信息流流量变化。选取网络中的 2 个节点(区域相距的最短距离为 200)通过 RMNC 路径代价衡量方法和普通路径代价衡量方法分别建立路径连接。当发送信息流流量从 100kbps 变化到 800kbps(每次流量变化触发新的路径寻找),每次递增 100kbps,测试网络中节点总发送次数变化。图 6(a)给出了实验 1 的比较曲线。

实验 2 目的节点和发送节点距离变化。取发送信息流流量为 400kbps,节点延时时间为 200ms,目的节点和发送节点距离从区域的最短距离 100 变化到 500,每次递增 50 的区域距离,测试目的节点的传输延时变化。图 6(b)给出了实验 2 的比较曲线。

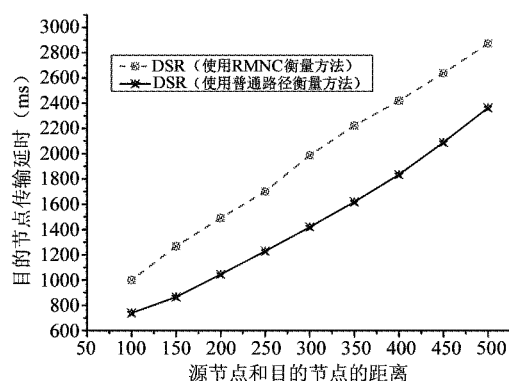
实验 3 节点延时时间变化。选取网络中的 2 个节点(区域距离相距 300 以上)分别建立路径连接。取发送信息流流量为 400kbps,节点延时时间从 200ms 变化到 800ms,每次递增 100ms,测试目的节点的传输延时变化。图 6(c)给出实验 3 的比较曲线。

从图 6(a)可见, RMNC 路径代价衡量方法相比原方法,无线发送次数有明显减少,且在发送信息流流量增大时减少效果更加明显。这可以解释为 RMNC 路径代价衡量方法通过建立可以进行网络编

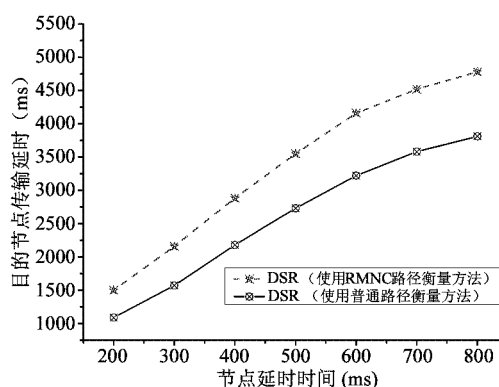
码互换的路径,使得传输中可以“搭载”网络中的传输流,可以有效减少网络开销,降低发送次数。而且发送信息流流量增大时,传输流能够尽量的进行编码互换传输,对“搭载”的效果影响相对更大,传输次数改善更加明显。



(a) 发送信息流量变化情况下的总发送次数比较



(b) 发送节点和目的节点距离不同情况下接收节点延时比较



(c) 节点延时变化情况下的接收节点延时比较

图 6 RMNC 传输性能测试比较

从图 6(b)和图 6(c)可见,在发送节点和目的节点区域相距的最短距离变大和节点延时变大的情况下, RMNC 路径代价衡量方法延时有明显增加。这是由于 RMNC 路径代价衡量方法中最佳路径很可能

不是最短路径,传输需要经过更多的节点,累积较大的节点传输总延时。

由模拟数据分析可知, RMNC 路径代价衡量方法相对于原方法提高了传输效率,节省了能量,但是带来了时延的增大。延时的增大一方面说明结合网络编码的较佳路径不一定是经过节点最少的路径,另一方面也说明来自于节点的网络编码运算需要一定的计算延时。然而,由传输效率的分析可知,相比于传输效率带来的增益,较小的传输延时是可以接受的。尤其是在节点延时变化的情况下,延时的差异并不是非常的大。因此,对传输时间参数要求不是很高的无线网络中,相对于传输的增益, RMNC 路径代价衡量方法的延时代价的略微增加是完全可以接受的。在相应的改进方面,我们可以使得节点获得更大的计算能力来减少计算延时,可以通过提高节点的反应延时来减少总的延时时间。

由模拟测试结果看出, RMNC 路径代价衡量方法相对于原有方法可以有效地结合网络编码,选取传输的最佳路径,提高无线网络的传输能力。尽管传输延时比原有方法有所增加,但相对于网络增益这种延时代价是可以接受的。

4 结 论

本文提出了一种结合网络编码的路径代价衡量方法——RMNC。分析和模拟测试结果表明, RMNC 结合流量计算节点代价并运用逐节点计算路径代价的思想,可以有效地减少网络开销,降低无线发送次数,达到提高传输性能的目的。尽管传输延时有增加,但相对增益是可以接受的,方法是可行的。今后的工作可以考虑结合 RMNC 和具体的路由协议,

进一步扩展结合网络编码的无线路由协议的适用范围。

参考文献

- [1] Couto D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In: Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, San Diego, California, USA, 2003. 134-146
- [2] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In: Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking 2004, Philadelphia, USA, 2004. 114-128
- [3] Ahlswede R, Cai N, Li S Y, et al. Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46: 1204-1216
- [4] Widmer J, Fragouli C, Boudec J. Low-complexity energy efficient broadcasting in wireless ad-hoc networks using network coding. In: Proceedings of Workshop on Network Coding, Theory, and Applications, Riva del Garda, Italy, 2005. 114-117
- [5] Cai N, Yeung R W. Network coding and error correction. *Communications in Information and System*, 2006, 6(1): 19-36
- [6] Bin N, Santhapuri N, Zhong Z, et al. Routing with opportunistically coded exchange in wireless mesh network. In: Proceedings of Wireless Mesh Networks, Columbia, America, 2006. 157-159
- [7] Wu Y, Das M, Chandra R. Routing with a markovian metric to promote local mixing. In: Proceeding of IEEE International Conference on Computer Communications 2007, Anchorage, Alaska, USA, 2007. 2381-2385
- [8] Wu Y N, Chou P A, Kung S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast: [technical report]. Seattle, USA: Microsoft Research, 2006
- [9] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. Xors in the air: Practical wireless network coding. *IEEE Transactions on Network coding*, 2008, 16(3): 497-510

A routing cost measurement approach with network coding

Xiao Xiao, Yang Luming, Wang Weiping, Zhang Shuai

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract

Aiming at the problem of routing cost measurement in wireless networks, the RMNC, an improved routing cost metric approach based on network coding is proposed. The key idea of the approach is to use the traffic parameter to measure the "rid" degree of the flow and get the cost of the path while the path uses network coding. The approach operates the node cost metric by the traffic parameter in different links, and the cost of a path is the sum of the costs on the constituting nodes, and the shortest path can be found by comparing the different path costs. The analysis and simulation results indicate that the approach in this paper can effectively find the low cost path and advance the transmission efficiency. The delay is greater than the original approach, but the overhead is reasonable, so the proposed approach is effective.

Key words: network coding, information exchange, routing cost, traffic parameter, the shortest path