

无线 mesh 网络中编码感知且负载均衡的多播路由

沈小建^{1,2}, 陈志刚¹, 刘立²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 提出一种新的基于网络编码的负载均衡路由度量 CRM-LB(coding-aware routing metric with load balancing), CRM-LB 在 CRM(coding-aware routing metric)的基础上增加了对路径 p 上所有节点通信密集程度与网络拥塞程度的考虑。进一步提出了基于 CRM-LB 的无线 mesh 网络多播路由 CLR(coding and load-balancing routing)。该协议可以增加网络编码机会, 同时考虑到网络中的负载均衡。通过性能分析和仿真实验表明, 该协议在提高多播吞吐量的前提下, 不仅能更好地支持网络编码, 而且网络负载基本均衡。

关键词: 无线 mesh 网络; 网络编码; 负载均衡; 多播路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Load balancing multicast routing based on network coding in wireless mesh network

SHEN Xiao-jian^{1,2}, CHEN Zhi-gang¹, LIU Li²

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A new load balancing routing measure CRM-LB based on network coding was presented, the CRM-LB increased the considerations of traffic concentration level congestion level all nodes on the path p based on CRM. Wireless mesh network multicast routing CLR based on the CRM-LB was put forward. The protocol can increase network coding opportunities considering the load balancing in network. The performance analysis and simulation results show that the protocol, under the premise of improving multicast throughput, not only to support network coding better, and achieve load balancing in network.

Key words: wireless mesh network; network coding; load balancing; multicast routing

1 引言

网络编码是通信领域里的重大研究成果, 2000年由 Ahlswede R 等提出^[1]。网络编码允许中间节点对接收到的信息编码后再转发出去, 提高了单次转发的信息量, 从而提高网络的整体吞吐量。

负载均衡其目标是使各路由器的负载比较均衡合理的分布, 从而获得较高网络传输性能, 合理地利用资源。无线 mesh 网络的多跳传输特性使 mesh 路由器承载的流量包含 2 部分。其一为本地流量; 其二为来自其他 mesh 路由器的转发流量。本

地流量是 mesh 路由器必须承载的, 而转发流量的多少则与路由协议有关。无线 mesh 网络中路由器之间的负载不均衡会形成一些流量高度集中的区域。流量过于集中会产生拥塞, 使网络传输的可靠性下降, 网络的利用率差。因此, 无线 mesh 网络中流量负载均衡对网络性能优化有重要意义。为实现 mesh 路由器之间负载均衡, 应选择具有负载感知的路由协议。无线 mesh 网络中基于网络编码的负载均衡路由的研究是现在研究的热点^[2~7]。文献[2]分析了无线 mesh 网络的多种路由协议及其使用的路由量度, 并对它们的性能进行了对比分析。文献

收稿日期: 2014-06-19; 修回日期: 2015-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902044, 60873082, 60903058); 湖南省教育厅科研基金资助项目(12C0070)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(60902044, 60873082, 60903058); Hunan Provincial Education Department Research Projects (12C0070)

[3]通过博弈的方法解决单播网络编码合作的问题。考虑到多径衰落信道网络编码的实现,提出了基于重复博弈理论模型的负载均衡的合作激励机制。理论分析和仿真结果表明,其设计可以刺激节点合作,并实现良好的网络负载均衡。文献[4]提出了一个新的网络编码方案以减少2个阶段的负载均衡结构的数据分组的丢失。分析和仿真表明,该网络编码方案明显削减负载均衡多径路由交换数据分组的丢失。文献[5]提出了一个无线 mesh 网络中的负载均衡且编码感知的启发式路由量度 HPMCL (heuristic path metric for coding and load-balancing) 以及配套的路由协议:负载均衡且编码感知的启发式路由协议 HLCR (heuristic load-balanced coding-aware routing) 将多种因素综合考虑以有效地衡量路径的性能。HPMCL 对路径进行评估时考虑网络的传输负荷、期望传输次数和潜在的编码机会。因此, HLCR 可以有效地发现有编码机会的高吞吐量路径,以较低的成本实现良好的负载平衡。仿真表明,相比 COPE^[8], HLCR 方案能够获得更高的网络吞吐量。文献[6]通过考虑无线媒体的争用和空间复用解决2个优化目标。第一个目标是利用空间复用最大限度地提高吞吐量,而第二个是确保不同链路的公平。设计了一个同时考虑 MAC 层和网络层的跨层算法。仿真结果表明,其联合优化算法可以显著增加吞吐量和公平。文献[7]提出了负载均衡的编码感知多径路由 LCMR (load balanced coding aware multipath routing)。通过复杂度分析与仿真实验证明,LCMR 虽然牺牲了小部分的网络编码机会,但能够实现全网负载的均衡分布。

本文主要研究无线 mesh 网络中编码感知且负载均衡的多播路由。目标是:减少无线多播业务的传输次数,均衡网络负载,减少网络资源的消耗,提升网络的整体性能。这也是网络编码与负载均衡相结合的优势。经查阅相关文献,目前,针对无线 mesh 网络中编码感知且负载均衡的多播路由的研究还很少。

本文创新点如下:提出一种新的基于网络编码的负载均衡路由量度 CRM-LB, CRM-LB 在 CRM 的基础上增加了对路径上所有节点通信密集程度与网络拥塞程度的考虑:进一步提出了基于 CRM-LB 的无线 mesh 网络多播路由 CLR, 该协议可以增加网络编码机会,同时考虑到网络中的负载均衡。通过性能分析和仿真实验表明,该协议在提

高多播吞吐量的前提下,不仅能更好地支持网络编码,而且使网络达到负载均衡。

2 无线 mesh 网络的路由量度

2.1 常用路由量度

1) HOP

HOP 最早被用于路由信息协议 RIP (routing information protocol)。HOP 最大的特点就是简单有效,但是同时它也有一些显而易见的缺点。HOP 认为一条链路的质量只有可用和不可用2种状态,从而忽略了分组丢失率和链路带宽对路径性能的影响,在链路分组丢失率不为零的网络中将 HOP 作为路由量度所发现的路径经常具有高分组丢失率。目前, HOP 是应用最为广泛的路由量度之一。

2) ETX

为选择高可靠性的数据传输路径,文献[9]首次提出一种基于期望传输次数的路由量度 ETX (expected transmission count)。ETX 量度使用链路分组丢失率来预测每条链路的传输性能,ETX 值越小表示路径的传输性能越高。每条链路的 ETX 量度被定义为该链路成功传输一个数据分组的所期望的发送次数(包括重传)。令 P_l 为链路 l 的分组丢失率,则 ETX_l 如式(1)所示。一条路径 p 的 ETX 量度为该路径上每条链路的 ETX 量度之和 $\sum_{l \in p} ETX_l$ 。

$$ETX_l = \frac{1}{1 - P_l} \quad (1)$$

3) ETT

文献[10]对 ETX 量度进行改进,在考虑数据传输率的基础上提出被称为期望传输时间的路由量度 ETT (expected transmission time)。令 A 表示数据分组的大小, B_l 表示链路 l 的带宽,则一条链路 l 的 ETT_l 值如式(2)所示。ETT 量度刻画了大小为 A 的数据分组在带宽为 B_l 的链路 l 上成功传输所期望的时间,因此 ETT 又被称为“带宽修正的 ETX”。与路径的 ETX 量度定义相同一条路径 p 的 ETT 值为该路径的每条链路 ETT 值的累加和 $\sum_{l \in p} ETT_l$ 。

$$ETT_l = ETX_l \frac{A}{B_l} \quad (2)$$

上述3种路由量度的设计均针对单信道网络,不适用多信道网络的路径衡量。目前,考虑多信道

情况的路由量度常见的有加权期望传输时间 WCETT 量度和考虑了负载均衡因素后它的改进 WCETT-LB 量度^[11]。除此之外,目前,对无线 mesh 网络路由量度研究的一个分支还有基于负载的路由量度研究^[12,13]等。

2.2 网络编码感知的路由量度

1) SPMC

樊凯在文献[14]中给出了网络编码感知的路由协议 OCR 所使用的路由量度 SPMC。SPMC 量度基于跳数,认为通过编码减少了数据分组传输过程中被路由节点发送的次数等价于减少了数据分组所经路径的跳数。因此 SPMC 量度被定义为路径跳数减去路径上存在的编码机会数目的值。SPMC 量度的设计比较简单,计算所需的开销小。

2) CRM

文献[15]在链路分组丢失率不为零的无线网络条件下提出一个编码感知的路由量度 CRM (coding-aware routing metric)来衡量拥有潜在编码机会的路径的性能。CRM 量度使用节点 v 的数据发送队列长度来指示 v 当前的繁忙程度,并使用一个被称为修正队列长度 $MQ(v)$ 的量度来表征经过 v 的多条数据流若能进行编码时获得的收益。 $MQ(v)$ 的计算方法可通过下面的简单例子来进行说明。

假设当前节点 v 只转发数据流 f_1 和 f_2 , 且它们的数据分组在 v 数据发送队列中的数量分别为 Q_1 和 Q_2 。若 f_1 和 f_2 的数据分组能够在 v 处进行编码发送,则拥有分组数量少的数据流实质上并不会增加 v 数据发送队列的长度,从而可以认为 $MQ(v) = \max(Q_1, Q_2)$, 否则 $MQ(v) = Q_1 + Q_2$ 。为了能够区分当前节点所处的状态(有新数据流的加入时为动态,反之为静态), CRM 量度将 $MQ(v)$ 分为静态修正队列长度 $MQ_s(v)$ 和动态修正队列长度 $MQ_d(v)$, 并使用修正干涉队列长度 $MIQ(v)$ 来表示 v 所处局部拓扑的繁忙程度。令 $I(v)$ 表示与 v 相互干涉的节点集合, 则 v 对应的静态修正干涉队列长度 $MIQ_s(v)$ 和动态修正干涉队列长度 $MIQ_d(v)$ 如式(3)和式(4)所示。

$$MIQ_s(v) = MQ_s(v) + \sum_{i \in I(v)} MQ_s(i) \quad (3)$$

$$MIQ_d(v) = MQ_d(v) + \sum_{i \in I(v)} MQ_d(i) \quad (4)$$

在定义了 $MIQ(v)$ 之后, 路径 p 上的每一条链路 l 的 CRM 量度被定义成式(5)。其中 P_l 表示 p 的每

一条链路 l 的分组丢失率, $MIQ_d(l)$ 为链路 l 发送节点的 MIQ_d 值。 p 的 CRM 量度将被定义为 p 拥有的所有链路的 CRM 量度值之和。

$$CRM_p = \frac{1 + MIQ_d(l)}{1 - P_l} \quad (5)$$

3) ECTX

文献[16]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, 首先找到编码节点, 再使用能体现网络编码性能优势的判据进行路由选择。基于 ECTX 的路由实质上是在引入网络编码前提下寻找最优路径, 使网络中数据流传输代价最小。

4) WCECTT

文献[17]提出一种新的具有网络编码意识的多信道路由判据(WCECTT), 在路由阶段, 量化网络编码后传输的性能优势, 考虑无线传输信道的干扰, 使用能体现网络编码性能优势的判据进行多信道路由选择。相比于传统多信道判据, 基于网络编码的 WCECTT 判据体现出延迟与吞吐量的折中。

3 “编码感知+负载均衡”的路由量度 CRM-LB

常用的编码可能性判断规则有 CC (coding condition)^[15] 和 CJC(coding judging condition)^[16]。本文选用文献[18]中的方法作为编码可能性判断规则。

CRM 是基于网络编码的路由量度, 并且适用于无线 mesh 网络, 所以本文在 CRM 基础上加入负载均衡的考虑。负载均衡可以分为 2 部分: 网络拥塞程度和通信密集程度。网络拥塞程度可以通过节点队列长度来度量, 这里采用 CRM 中的动态修正干涉队列长度 $MIQ_d(v)$ 来表示, 因此整个路径的负载情况表示如下

$$\sum \frac{MIQ_d(v)}{b_v} \quad (6)$$

其中, b_v 是一个节点的发送速率。 $\frac{MIQ_d(v)}{b_v}$ 表示节点 v 实际需要的传输时间, 相对于 CRM 计算, 其增加的计算开销很小。

通信密集程度, 假设通信集中节点 v , 如果更多的子节点选择 v 作为它们的下一跳发送报文, 该节点流量将增加。因此, 这样的节点更易形成网络拥塞。通过式(7)计算出相应的值。

$$\sum_{v \in p} \min(ETT)_v \quad (7)$$

$\min(ETT)$ 是整个网络中最小的 ETT。较高的 $\min(ETT)_v$ 值表示更多的流量集中在节点 v 。计算一条路径上所有节点的相应值来表示通信密集程度, $\min(ETT)$ 的值参考文献[10]进行计算, 计算中增加的开销对于目前无线 mesh 网络节点的计算能力是可以承受的。现在, 形成编码感知且负载均衡的路由量度如下

$$CRM-LB(p) = CRM(p) + L(p) \quad (8)$$

其中,

$$L(p) = \sum_{v \in p} \frac{MIQ_d(v)}{b_v} + \min(ETT)_v \quad (9)$$

至此, CRM-LB 在 CRM 的基础上增加了对路径 p 上所有节点拥塞程度与通信密集程度的考虑, 可以作为编码感知且负载均衡的路由判据使用。这样做的优点是: 能减少无线多播业务的传输次数, 均衡网络负载, 提升网络的整体性能; 缺点是: 考虑负载均衡之后, 会增加式(9)的计算开销, 但对于目前无线 mesh 网络节点的计算能力, 还是可以承受的。当某条路径过载时, CRM-LB 值就会超过预设的阈值, 结合下文所述的编码感知且负载均衡的路由协议 CLR 来实现无线 mesh 网络的编码感知且负载均衡。

4 基于 CRM-LB 的无线 mesh 网络多播路由 CLR

4.1 CLR 路由

基于 CRM-LB 的无线 mesh 网络路由发现过程简单地叙述如下。

步骤 1 源节点通过广播一个 RREQ 分组来开始路由发现。RREQ 分组包含以下信息。

- 1) 源节点单跳内的邻居节点。
- 2) 已经过的路径。

步骤 2 中间节点 v 在收到一个 RREQ 分组时, 需要完成以下几步。

1) 检查该 RREQ 分组是否经过环路, 若没有则临时储存该 RREQ 分组, 否则丢弃该分组。

2) 进行编码链路探测, 并在 RREQ 分组的潜在编码链路集合 PCS 中保存得到的探测结果。潜在编码链路集合 PCS 依据文献[18]中的编码节点选取来获得。

3) 计算 RREQ 分组所经路径的 CRM-LB 值来决定是否继续转发该 RREQ 分组。中间节点在收到 RREQ 报文后, 将检查 RREQ 报文中的下列项目: ①当前节点是否已经出现在 RREQ 保存的路径信息中; ②RREQ 所经路径的 CRM-LB 值是否超过预先定义的阈值 TTL, 超过将不转发。

步骤 3 目的节点 D 根据收到的 RREQ 分组保存每一条其经过链路的 CRM-LB 值来进行路径选择; 之后沿着所选路径向源节点 S 发送一个 RREP 分组。

步骤 4 每个收到这个 RREP 分组的中间节点在更新路由表中相应的路由项之后继续转发该 RREP 分组。

步骤 5 源节点 S 在收到 RREP 分组后将沿该分组所经路径的逆向发送数据分组。

多播的解决方案实际上是一棵多播树, 多播树的花费即为构成多播树的所有无线链路的权值之和。多播源点到任一目的节点的花费即为源点到目的节点所对应路径的所有无线链路的权值之和。目标是构造负载均衡的多播树。

CLR 路由的核心思想是: 以负载均衡的无线链路权值 CRM-LB(p) 作为权重采用上述方法求源目的节点之间的路径。

$p(S_p, D_i)$ 表示多播源点 S_p 到目的节点 D_i 的最优路径, $J(S_p, D_i)$ 表示路径 $p(S_p, D_i)$ 的花费, 其计算公式如式(10)所示。

$$J(S_p, D_i) = \sum_{(u,v) \in p(S_p, D_i)} CRM-LB(u,v) \quad (10)$$

CLR 路由使用 CRM-LB 作为路由量度, CLR 在路由选择时倾向于选择具有编码机会且负载较轻的节点形成路由。这是因为在相同的条件下, 存在编码机会的路径, 其 CRM-LB 值要低于不存在编码机会路径的 CRM-LB 值。在相同的链路长度和链路质量的条件下, 当一条链路上节点的负载较轻时, 根据式(8)和式(9)的定义, 该链路的 CRM-LB 值也较小, 该条路径的 CRM-LB 值要低于其他路径的 CRM-LB 值。根据 CRM-LB 的定义, CRM-LB 值越小的路径, 其路径质量越高。因此, CLR 路由倾向于选择 CRM-LB 值小的路径, 而 CRM-LB 值小的路径, 通常是由存在编码机会且负载较轻的节点组成的, 这样 CLR 路由既能实现网络负载均衡, 又能提高网络吞吐量等性能。

4.2 复杂度分析

在 CLR 路由中, 计算开销主要是 CRM-LB 值的计算。由于一条路由的 CRM-LB 值的计算复杂度主要由 CRM 复杂度和 ETT 复杂度决定。相比 ETT, CLR 额外的复杂度主要是由网络编码机会的判定产生的, 因而与 CRM 的复杂度相似。在路由选择阶段, 根据节点存储的数据流进行网络编码机会判定。假定可存储数据流个数为 F , 网络中的节点个数为 N , 每个节点的邻居节点个数为 m , 网络中数据流的平均传输时间为 t , 则运算复杂度为 $O(N^{2m}F^2)$ 。在实际网络中, 复杂度需要根据实际应用场景具体分析, 可以做一些近似的假设, 采用启发式算法尽可能地降低复杂度。虽然 CLR 路由的存储空间及运算复杂度有所增加, 但是吞吐量增益相当大。如果网络编码只使用简单的异或运算, 本路由机制的运算复杂度还是可以接受的。

5 仿真分析

使用 NS2 中的 setdest 产生具有实际网络特性的无线 mesh 网络拓扑^[19], 然后对 NS2 的相关功能进行扩展, 使其能进行网络编码。50 个节点随机分布在一个面积为 $1500\text{ m} \times 1500\text{ m}$ 矩形区域内。实验在微机上, 使用 NS2 仿真工具分 4 组进行, 分别仿真 WCTB^[20]、COPE^[8]、CRM 和 CLR。WCTB 是没有使用网络编码的无线 mesh 网络多播路由, 用于解决多模多信道无线 mesh 网络中最小成本多播树问题; COPE 是基于网络编码的适合无线 mesh 网络的路由, 但没有考虑负载均衡。对节点数为 50 的网络进行了不同负载下路由时延、吞吐量、带宽消耗总量以及带宽消耗均方差的统计。仿真参数如下: 数据分组大小为 512 byte, 节点传输范围为 200 m, 节点干扰半径为 400 m, 节点带宽为 10 Mbit/s, 工作模式为混杂模式, 节点队列长度为 80 个数据分组。图 1~图 4 的仿真场景是网络中存在 3 个多播通信, 每个多播通信有 1 个源节点和 6 个目的节点; 图 5 的仿真场景是网络中存在 2 个多播通信, 每个多播通信有 1 个源节点, 目的节点数从 4 到 20 变化, 数据发送速率为 50 kbit/s。

图 1 表示路由时延与网络负载的关系, 可以看出, 路由时延随着网络负载增大而增加。但是对于 WCTB、COPE 和 CRM 路由, 其路由时延增加较快, 而 CLR 路由的时延增加较慢。这是因为网络编码

使多个数据分组同时被传输, 从而使所有数据分组的平均传输时间即平均端到端延迟能够降低, 因此可以拥有较多编码机会并且负载均衡的 CLR 的平均端到端延迟为最低。

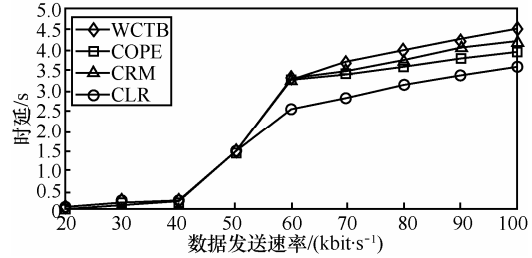


图 1 时延与负载的关系

图 2 表示网络吞吐量与网络负载的关系。从图 2 可以看出, CLR 的网络吞吐量明显大于其他 3 种传输方式。CLR 均能显著提高网络的吞吐量, 其原因是通过网络编码可以一次发送多个数据分组, 从而显著提高网络的吞吐量。由于 CLR 在选取路径时考虑了节点负载的均衡使 CLR 的网络吞吐量在数据发送速率较高时并没有明显的下降。

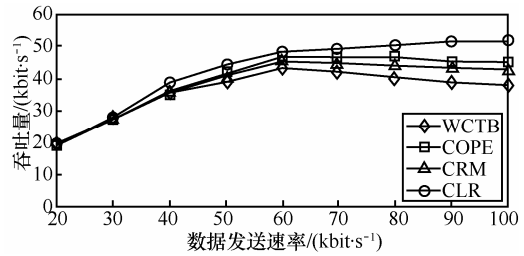


图 2 网络吞吐量与负载的关系

假设一条链路上的带宽资源消耗是 w 。用 W_t 代表所有链路上的带宽资源消耗总和, 则

$$W_t = \sum_{(i,j) \in E} w_{i,j} \quad (11)$$

在式(11)中, $w_{i,j}$ 代表链路 (i,j) 上的带宽资源消耗。对式(11)做如下归一化处理

$$W = W_t / h = (\sum_{(i,j) \in E} w_{i,j}) / h \quad (12)$$

其中, h 为多播网络的传输速率。 W 表示带宽资源消耗, W 越大, 多播传输消耗的带宽资源就越多。

图 3 表示网络带宽资源消耗总量与网络负载的关系。从图 3 可以看出, WCTB 的网络带宽资源消耗总量明显地高于其他 3 种传输方式, 随着网络负载的增加差距拉开越大。COPE、CRM 和 CLR 均

能显著减少网络资源消耗总量, 其原因是通过网络编码可以一次发送多个数据分组, 从而显著减少带宽占用量。

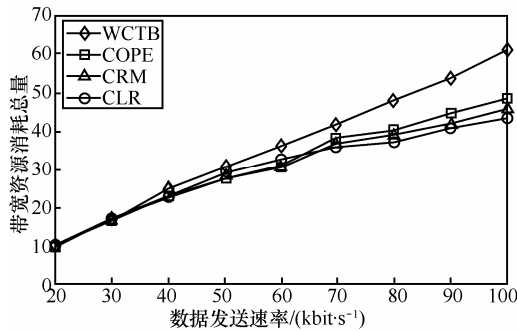


图3 带宽资源消耗总量与负载的关系

用 \bar{w} 代表链路上的平均带宽资源消耗, n 为整个网络中的链路数, 根据式(11)及 \bar{w} 的定义可得 \bar{w}

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in E} w_{i,j} \quad (13)$$

根据式(13)及方差的定义可得 σ^2 为

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in E} w_{i,j}^2 - \bar{w}^2 \quad (14)$$

σ^2 是从无线多播网络的负载均衡波动性的方面来衡量, 受带宽资源消耗量和链路数量的影响小, 可以客观和公平地表示无线多播网络的负载均衡性能, σ^2 越小, 代表负载分布于整个多播网络链路上越均衡^[21]。

图4表示带宽消耗的均方差与网络负载的关系。从图4可以看出, CLR的带宽消耗的均方差明显地低于WCTB传输方式, 也略低于COPE和CRM传输方式。这说明CLR能显著地使网络负载达到基本均衡。其原因是CLR在选择路由时考虑了链路的负载情况, 当一条路由链路负载较大时, 就放弃该条链路改选其他链路, 这样将负载传输均衡到其他负载较轻的链路上, 从而使整个多播网络负载较均衡。

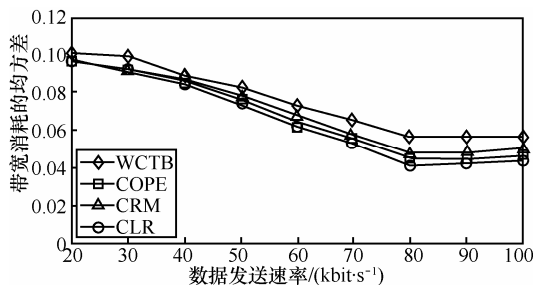


图4 带宽消耗的均方差与负载的关系

图5表示多播目的节点数与带宽消耗的均方差的关系。从图5可以看出, 随着目的节点数的增多, WCTB、COPE、CRM和CLR的带宽消耗的均方差随之减少, 但是CLR的减少的幅度大于WCTB、COPE和CRM。

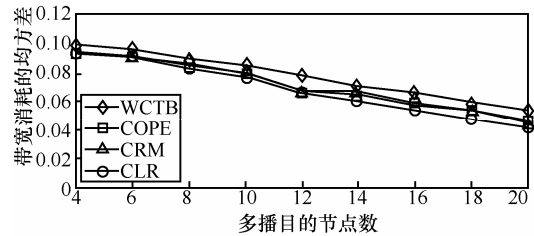


图5 带宽消耗的均方差与多播目的节点数的关系

6 结束语

本文提出了一个在多播通信中编码感知且负载均衡的无线 mesh 网络路由 CLR。文中首先分析了无线 mesh 网络的常用路由度量度和网络编码感知的路由度量度。其次, 在 CRM 的基础上增加了对路径上所有节点通信密集程度与网络拥塞程度的考虑, 提出了“网络编码+负载均衡”路由判据 CRM-LB。进而提出编码感知且负载均衡的多播路由 CLR。通过仿真实验表明, 该协议能更好地支持网络编码, 节省网络资源, 使网络整体负载均衡, 能显著减少路由时延和提高网络吞吐量。在将来的工作中, 需对该协议的具体实现做进一步的研究。

参考文献:

- [1] AHLSSWEDE R, CAI N, LI S R. Network information flow[J]. IEEE Transactions Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [2] MIGUEL E M C, PEDRO M E, MORAES I M. Routing metrics and protocols for wireless mesh networks[J]. IEEE Network, 2008, 32(3): 6-12.
- [3] HUANG L, WANG S H, QIU Z D. A load-balanced cooperation stimulation mechanism for selfish behavior of nodes in wireless network coding[A]. The 4th IET International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks(ICWMMN 2011)[C]. Beijing, China, 2011.329-332.
- [4] XU N, WANG X S. Improving of load-balanced self-routing switch by network code[A]. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)[C]. Wuhan, China, 2011.1-4.
- [5] FAN K, WEI X, LONG D Y. A load-balanced route selection for network coding in wireless mesh networks[A]. IEEE ICC[C]. 2009. 1-6.
- [6] NING Z L, GUO L, PENG Y H. Joint scheduling and routing algorithm with load balancing in wireless mesh network[J]. Computers and Electrical Engineering, 2012, 38(2):533-550.

- [7] 邵星. 无线 mesh 网络中网络编码感知路由技术研究[D]. 南京邮电大学, 2013.
SHAO X. Research on Network Coding Aware Routing for Wireless Mesh Networks[D]. Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [8] KATTI S, RAHUL H S, HU W. XOR in the air: practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497-510.
- [9] COUTO D, AGUAYO D, BICKET J. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[A]. The ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2003)[C]. California, 2003.256-262.
- [10] DRAVES R P J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks[A]. The ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2004) [C]. New York, 2004. 114-128.
- [11] MA L, MIESO K, DENKO A. Routing metric for load-balancing in wireless mesh networks[A]. The 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2007) [C]. Niagara, Canada, USA, 2007. 409-414.
- [12] LEE S, GERLA M. Dynamic load-aware routing in ad-hoc networks[A]. The IEEE International Conference Oil Communications (icc2001) [C]. Finland, 2001.3206-3210.
- [13] YANG Y, WANG J, KRAVETS R. Load-balanced routing for mesh networks[A]. The 11th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM2005) [C]. Cologne, Germany, 2005. 126-131.
- [14] 樊凯, 李令雄, 龙冬阳. 无线 mesh 网中网络编码感知的按需无线路由协议的研究[J]. 通信学报, 2009,30(1): 128-134.
FAN K, LI L X, LONG D Y. Study of on-demand COPE-aware routing protocol in wireless mesh networks[J]. Journal on Communications, 2009,30(1): 128-134.
- [15] LE J, LUI J, CHIU D. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 596-608.
- [16] 宋谱, 贺志强, 牛凯. 具有网络编码意识的无线路由判据[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(3): 22-26.
SONG P, HE Z Q, NIU K. A network coding-aware routing metrics for wireless multi-hop network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(3): 22-26.
- [17] 宋谱, 牛凯, 许文俊. 用于多信道路由的完全编码意识判据[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(4):6-9.
SONG P, NIU K, XU W J. Network coding-aware metrics for multi-radio routing[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(4):6-9.
- [18] 沈小建, 陈志刚, 叶晖. 无线 mesh 网中网络编码节点选取分析[J]. 计算机科学, 2010, 37(10): 71-74.
SHEN X J, CHEN Z G, YE H. Analysis of network coding nodes selection in wireless mesh networks[J]. Computer Science, 2010, 37(10): 71-74.
- [19] 于斌, 孙斌, 温暖. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
YU B, SUN B, WEN N. NS2 and Network Simulation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007.
- [20] LIU T H, LIAO W J. Multicast routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(10): 3031-3039.
- [21] NOGUCHI T, MATSUDA T, YAMAMOTO M. Performance evaluation of new multicast architecture with network coding[J]. IEICE Transactions on Communications, 2003, E86-B(6): 1788-1795.

作者简介:



沈小建(1976-), 男, 湖南永州人, 中南大学博士生, 主要研究方向为无线 mesh 网络与网络编码。



陈志刚(1964-), 男, 湖南益阳人, 博士, 中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络计算与分布式处理、计算机网络。



刘立(1970-), 男, 湖北广水人, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为服务计算、可信计算、网络安全。