

基于编码收益的 Mesh 网络机会路由协议

任海峰, 史雨朦, 张义兵, 束永安

(安徽大学 计算机科学与技术学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了充分利用无线 Mesh 网络广播传输的特性, 并提高网络吞吐量, 提出一种基于编码收益的 Mesh 网络机会路由协议(The Coding-Revenue Opportunistic Routing, CROR)。该协议对多个数据包实行先编码再发送, 并以期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)定义编码收益函数, 使用编码收益函数定义下一跳转发节点集中节点的优先级。由下一跳转发节点集中优先级最高的节点将解码出的源数据包以相同的方式继续转发, 直至目的节点。仿真实验结果表明, CROR 提高了网络吞吐量和机会路由的传输性能, 并增加了网络的编码传输百分比。

关键词: 网状网络; 机会路由; 网络编码; 期望传输次数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)06-0092-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.06.020

An Opportunistic Routing Protocol Based on Coding-revenue for Wireless Mesh Network

REN Hai-feng, SHI Yu-meng, ZHANG Yi-bing, SHU Yong-an

(School of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to make full use of the broadcast characteristic of the wireless Mesh network and improve the network throughput, a Coding-Revenue Opportunistic Routing (CROR) protocol for wireless Mesh networks is proposed. The protocol codes multiple packets into one packet before transmission, and it uses the forward distance of the ETX (Expected Transmission Count) to define the coding-revenue function, then use coding-revenue function to define the priority of the nodes in the next-hop forwarding nodes set. The highest priority node in the next-hop node set which decodes the source packet will forward the packet towards the destination in the same way. Simulation experiments show that the CROR can improve network throughput and transmission performance of opportunistic routing, and increase the network coding transmission percentage.

Key words: Mesh network; opportunistic routing; network coding; ETX

0 引言

无线 Mesh 网络是一种提高无线宽带网络带宽的有效解决方案。在无线 Mesh 网络中, 节点通过一个有损耗的无线信道以广播的方式传输数据。路由策略是保证数据正确传输的关键。所以, 为了提高网络性能, 路由协议的设计必须考虑无线信道传输的特点。

机会路由^[1-2]是一种可以有效提高传输可靠性和网络吞吐量的路由策略。在机会路由中, 转发节点以某种判据挑选它的邻居节点组成一个集合, 作为到达目的节点的下一跳转发节点集。并以广播形式发送数据包到该节点集。当该集合中的节点收到数据包后, 通过局部调度策略, 选择出一个优先级最高的节点, 由

该节点将数据包以同样方式继续转发到下一个下一跳节点集, 直至目的节点收到数据包。这种转发方式, 使得下一跳节点集中尽可能多的节点接收到数据包, 可以最大限度减少网络重传, 增加网络吞吐量。

网络编码^[3-4]是一种有效利用无线网络广播传递特点的技术。在传统转发模式下, 中间节点只进行“存储-转发”操作。而网络编码允许网络中间节点对所接收到的多个数据流的数据包实施先编码再转发的操作。网络编码有效减少了中间节点发送数据包的次数, 提高了无线网络的吞吐量。

文中考虑在无线 Mesh 网络中应用网络编码和机会路由, 提出一种基于编码收益的 Mesh 网络机会路由协议 (Coding - Revenue Opportunistic Routing,

收稿日期: 2014-07-16

修回日期: 2014-10-23

网络出版时间: 2015-05-06

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (1408085MF125)

作者简介: 任海峰 (1988-), 男, 硕士, 研究方向为无线网络; 束永安, 博士, 研究方向为无线网络、下一代网络体系结构。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150506.1630.022.html>

CROR)。该协议定义了编码收益函数,使用编码收益函数确定下一跳转发节点集中节点的优先级。仿真实验表明,该路由策略有效提高了网络吞吐量和机会路由的传输性能,并增加了网络的编码传输百分比。

1 编码收益

文中以期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)^[5]来计算节点间的链路质量。例如:节点 X 和 Y 之间传输数据包的成功率为 P_{xy} ,则链路 $X-Y$ 的 ETX 值为 $\frac{1}{P_{xy}}$ 。

1.1 机会路由中节点的 ETX 值

机会路由中,节点通过下一跳转发节点集转发数据包。在当前转发节点的一跳邻居节点中,选择处在当前节点相对于目的节点方向下游位置的节点构成下游节点集。而下一跳转发节点集是下游节点集的子集。在机会路由中,使用广播方式发送数据包给下一跳转发节点集。文中定义机会路由中节点的 ETX 值如下:

定义:节点 Q 相对于目的节点 D 方向的下游节点集为 C 。 C_j 为 C 中任意一个节点,可求得节点 Q 通过链路 $Q-C_j$ 和节点 C_j 到达 D 的概率。记链路 $Q-C_j$ 的 ETX 值和节点 C_j 的 ETX 值之和为 W_j ,则 W_1, W_2, \dots, W_n 的期望即为节点 Q 的 ETX 值。

节点的 ETX 值在路由发现阶段,由目的节点向源节点迭代求得。

设节点 A 的下游节点集^[6-7]为 C , C 中包含 $n(n \geq 1)$ 个节点,以 ETX 值从小到大排序为 $F_{C_1}, F_{C_2}, \dots, F_{C_j}, \dots, F_{C_n}$,这些节点的 ETX 值分别为 $E_{C_1}, E_{C_2}, \dots, E_{C_j}, \dots, E_{C_n}$,且满足 $E_{C_1} < E_{C_2} < \dots < E_{C_j} < \dots < E_{C_n}$ 。 P_{AC_j} 表示节点 A 和节点集 C 中第 j 个节点 F_{C_j} 之间传输数据包的成功率。

节点 A 通过节点集 C 完成传输,则节点集 C 中至少有一个节点收到数据包,设收到数据包的节点中 ETX 值最小的节点为 F_{C_j} 。此时,节点 A 通过节点 F_{C_j} 转发数据包给目的节点。该事件发生的条件概率可由公式(1)计算:

$$R_{F_{C_j}} = \begin{cases} \frac{P_{AC_1}}{1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_{AC_k})}, j = 1 \\ \frac{P_{AC_j} \prod_{i=1}^{j-1} (1 - P_{AC_i})}{1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_{AC_k})}, j \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

该式表示,在节点集 C 中至少有一个节点收到节点 A 所发数据包的前提下,收到数据包的节点中 ETX

值最小的节点是节点 F_{C_j} 的概率。分母表示节点集 C 中至少有一个节点收到节点 A 发送的数据包的概率。分子表示节点集 C 中至少有一个节点收到节点 A 所发数据包,且收到数据包的节点中 ETX 值最小的节点为 F_{C_j} 的概率。可由集合 C 中节点的 ETX 值和节点 A 到达集合 C 中各个节点的链路 ETX 值计算节点 A 的 ETX 值:

$$ETX_A = \sum_{j=1}^n R_{F_{C_j}} (E_{C_j} + \frac{1}{P_{AC_j}}) \quad (2)$$

当节点 A 为目的节点 D 的直接邻居节点时,下游节点集 C 中只包含目的节点 D ,此时,目的节点 D 的 ETX 值 $E_D = 0$,使用公式(1)计算得 $R_D = 1$ 。 A 和目的节点 D 之间传输数据包的成功率为 P_{AD} ,则 A 的 ETX 值可简化为:

$$ETX_A = \frac{1}{P_{AD}} \quad (3)$$

1.2 编码收益函数

使用网络编码的机会路由在转发过程中,只要下一跳转发节点集中至少一个节点正确接收数据包并解码出源数据包(由源节点发送到目的节点的原始数据包),转发节点就完成了它的机会路由任务,而由下一跳转发节点集中正确获得源数据包的节点通过协调选择一个最佳下一跳节点执行下一跳机会路由转发。

设节点 A 的下一跳转发节点集为 N (N 是下游节点集 C 的子集), N 中包含 m 个节点,以 ETX 值从小到大排序为 $F_{N_1}, F_{N_2}, \dots, F_{N_j}, \dots, F_{N_m}$,这些节点的 ETX 值分别为 $E_{N_1}, E_{N_2}, \dots, E_{N_j}, \dots, E_{N_m}$,则满足 $E_{N_1} < E_{N_2} < \dots < E_{N_j} < \dots < E_{N_m}$ 。 P_{AN_j} 表示节点 A 和集合 N 中第 j 个节点之间传输数据包的成功率。

节点 A 通过节点集 N 完成传输,则节点集 N 中至少有一个节点收到节点 A 所发数据包,并正确解码出源数据包。设收到源数据包的节点中 ETX 值最小的节点为 F_{N_j} 。

文中定义数据包的 ETX 前进距离为转发节点的 ETX 值减去下一跳转发节点集中节点的 ETX 值的期望所得的数值。此时,通过节点 A 转发的源数据包的 ETX 前进距离为:

$$U = ETX_A - ETX_N \quad (4)$$

其中, ETX_A 为节点 A 的 ETX 值; ETX_N 为集合 N 中节点的 ETX 值的期望。由公式(1)求得 N 中每个节点正确得到源数据包并转发的概率 $R_{F_{N_j}}$,代入公式(5)中:

$$ETX_N = \sum_{j=1}^n (R_{F_{N_j}} \times E_{N_j}) \quad (5)$$

文中定义编码收益函数为以下两部分之和:

(1)网络编码后,数据包携带的源数据包的 ETX 前进距离;

(2)网络编码后,数据包携带的其他数据包的 ETX 前进距离。

设节点 A 将源数据包和 q 个数据包编码后再转发,则编码收益函数可通过如下公式求得:

$$G = U_s + \sum_{k=1}^q U_k \quad (6)$$

其中, U_s 为源数据包的 ETX 前进距离; $\sum_{k=1}^q U_k$ 为捎带的 q 个数据包的 ETX 前进距离之和。 U_s 和 U_k 可由公式(4)求得。

2 CROR

文中提出的 CROR 是一种可以提高无线 Mesh 网络传输性能的基于编码收益的机会路由协议。CROR 综合了机会转发和网络编码的优点,使得 CROR 可以充分利用无线 Mesh 网络通过广播传递数据的特性。通过机会转发,CROR 最大限度减少了重传;通过网络编码,CROR 尝试在一次发送过程中携带尽可能多的数据包,以获得最大的网络编码收益。

在 CROR 中,当一个节点要发送一个数据包时,首先计算出使编码收益函数取最大值的下一跳转发节点集,然后通过广播的方式将编码后的数据包发送出去。当下一跳转发节点集中的节点收到并解码出源数据后,通过协调选择一个最佳转发节点。由该节点继续同样的机会路由转发策略,直到目的节点收到源数据包。

1) 节点的 ETX 值。

CROR 协议通过洪泛路由请求报文 RREQ 寻找转发路径,并在路由回复报文 RREP 中携带下游节点的 ETX 值,供上游节点迭代计算自己的 ETX 值。在 RREQ 分组中加入当前节点、源节点和目的节点的位置信息,当邻居节点收到 RREQ 分组后,首先比较是否自己更靠近目的节点,如果是则转发并记录上游节点信息,否则直接丢弃。这种方法有效避免了环路并减少了洪泛次数。

2) 下一跳转发节点集。

需符合以下两个条件:

- (1)必须是当前转发节点的一跳邻居节点;
- (2)必须比当前转发节点更靠近目的节点。

3) 计算编码收益。

在 CROR 中,使用 COPE^[8-10] 的机会监听机制。COPE 使用确定的下一跳路由策略,在进行网络编码时,只有已经被确定的下一跳节点监听到的数据包才能和将要发送的源数据包一起编码。相比较而言,在 CROR 中,使用机会路由策略,每一个源数据包的下一跳节点都是不确定的,所以可以在发送队列中对数据

包进行编码组合,选择出使编码收益函数取最大值的下一跳转发节点集。

在 CROR 中,当一个节点需要转发一个源数据包 p 时,首先将 p 从发送队列取出,考虑 p 之后的 $k(k > 1)$ 个数据包是否可以和 p 进行网络编码。转发节点对不同的编码组合模式使用公式(6)计算其编码收益。编码收益最大的模式即为最优的编码方案。其中,能够将此编码包解码并正确获得数据包 p 的下游节点集,即为节点对于数据包 p 的下一跳转发节点集。

4) 优先级的确定。

文中通过计算转发节点的编码收益函数确定优先级,编码收益函数越大,则优先级越高,反之越低。当一个节点 x 收到广播发送的数据包后,首先对数据包进行解码操作,获得源数据包。之后判断自己是否属于该源数据包的下一跳转发节点集。如果属于,则节点 x 通过上述方法计算自己的编码收益值 G_x ,并且等待一段时间 $T_x = \Delta T / G_x$ 。在这段时间内,如果节点 x 监听到其他节点转发源数据包,则将源数据包丢弃。否则当 T_x 之后,节点 x 转发源数据包。这里 ΔT 是一个时间常数,它的取值由具体的无线网络应用环境确定,包括节点拓扑状态、节点间的物理距离等因素。文中使用 100 ms。

3 仿真实验

使用网络仿真平台 NS-2^[11] 评估 CROR 协议的性能,并与使用最短路径路由的 COPE 协议进行比较。选取的性能评价指标包括:(1)网络吞吐量;(2)编码传输百分比^[12-14],即数据包传输过程中使用网络编码的次数除以总的数据包转发次数乘以 100%。

实验中,使用 802.11b 作为 MAC 层协议。在 800 × 800 m² 范围内,随机放置 200 个静态节点。通过随机产生数据流来调整网络负载。每个数据流的速率从 200 kb/s 到 2 Mb/s 随机选择。每个数据流的源节点和目的节点也随机选择。MAC 层信道速率设置为 11 Mb/s。CROR 中 k 取值 10。假设每两个节点间的链路质量为 (1, 0.7) 随机选取。实验中,随机产生 5 个网络拓扑结构,每个拓扑结构持续实验 900 s。

图 1 显示了 COPE 和 CROR 在不同网络负载条件下的网络吞吐量状况。

从图中可以看到,在不同的网络负载条件下,CROR 相比较 COPE 明显提高了网络的吞吐量。CROR 平均比 COPE 的网络吞吐量高出 22%,最多高出 33%。当网络负载很小时,因为每条路径的重叠机会很小,所以网络编码机会也很小,这时 CROR 和 COPE 的性能比较接近。随着网络负载的增大,CROR 的网络吞吐量明显高于 COPE,这是因为 CROR 可以

主动发现网络中的编码机会,并且由于使用机会路由策略,更加大了获取编码机会的概率。而 COPE 使用确定路由策略,属于被动等待编码机会,编码的概率就相对较小。随着网络负载的增大,CROR 的网络吞吐量更大。

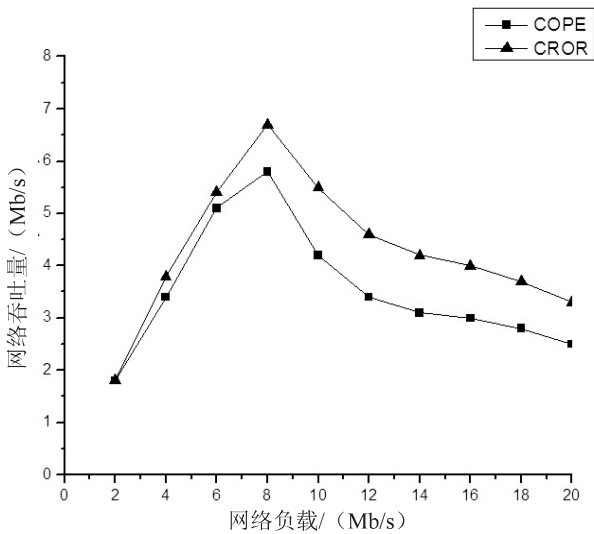


图1 网络吞吐量随网络负载变化

图2显示了全部传输次数中编码传输所占的百分比。虽然随着网络负载的增大,CROR 和 COPE 的编码传输百分比都有所增大并达到一个相对稳定的水平,但是 CROR 的编码传输百分比要高于 COPE。

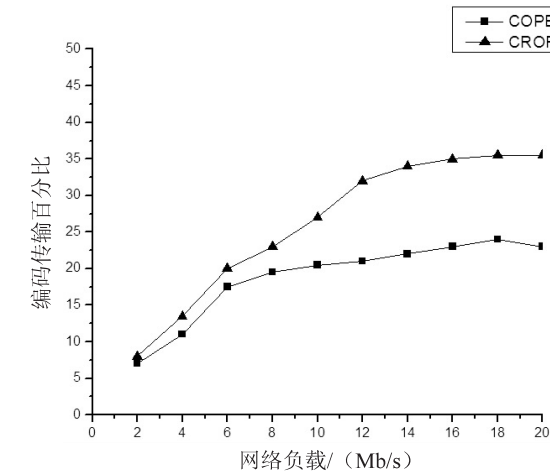


图2 编码传输百分比随网络负载变化

4 结束语

文中尝试将网络编码和机会路由相结合,以数据包的 ETX 前进距离定义机会路由中的编码收益,提出一种应用于无线 Mesh 网络的基于编码收益的机会路由协议。在该协议中,以编码收益函数作为下一跳转

发节点集中优先级排序的标准。仿真实验表明,CROR 协议有效增大了网络的吞吐量,并且提高了编码传输百分比。

参考文献:

[1] 田克,张宝贤,马建,等. 无线多跳网络中的机会路由[J]. 软件学报,2010,21(10):2542-2553.

[2] Rozner E, Seshadri J, Mehta Y, et al. Simple opportunistic routing protocol for wireless mesh networks[C]//Proc of the 2nd IEEE wireless mesh networks. Reston: IEEE Computer Society Press, 2006:48-54.

[3] 陶少国,黄佳庆,杨宗凯,等. 网络编码研究综述[J]. 小型微型计算机系统,2008,29(4):583-592.

[4] 熊志强,黄佳庆,刘威,等. 无线网络编码综述[J]. 计算机科学,2007,34(3):6-9.

[5] Douglas S J, Couto D, Aguayo D, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. Wireless Networks, 2005, 11(4):419-434.

[6] 杨林,郑刚. 无线多跳网中具有网络编码意识的机会路由协议[J]. 清华大学学报:自然科学版,2010,50(10):1713-1717.

[7] 陈伟,魏强,赵玉婷. 传输速率感知的机会路由候选路由节点选择和排序[J]. 计算机应用,2011,31(11):2895-2897.

[8] Katti S, Rahul H, Hu Wenjun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]//Proc of ACM SIGCOMM '06. Pisa, Italy: [s. n.], 2006:243-254.

[9] Biswas S, Morris R. ExOR: opportunistic routing in multi-hop wireless networks[C]//Proc of ACM SIGCOMM '05. Philadelphia, PA: [s. n.], 2005:133-144.

[10] 王宏霞,束永安,任海峰. 基于网络编码感知的能量均衡的 ZigBee 路由策略[J]. 计算机技术与发展,2014,24(5):53-56.

[11] 吴永华,刘广钟. 基于 NS-2 网络仿真协议的功能扩展[J]. 计算机技术与发展,2009,19(12):63-66.

[12] Yan Y, Zhang B X, Zheng J, et al. CORE: a coding-aware opportunistic routing mechanism for wireless mesh networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3):96-103.

[13] Biswas S, Morris R. Opportunistic routing in multihop wireless networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(1):69-74.

[14] Couto D D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[C]//Proc of the ACM/IEEE MobiCom 2003. Washington: IEEE Computer Society Press, 2003:134-146.

基于编码收益的Mesh网络机会路由协议

作者：

[任海峰](#)，[史雨朦](#)，[张义兵](#)，[束永安](#)，[REN Hai-feng](#)，[SHI Yu-meng](#)，[ZHANG Yi-bing](#)，[SHU Yong-an](#)

作者单位：

[安徽大学 计算机科学与技术学院, 安徽 合肥, 230601](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

2015(6)

引用本文格式：[任海峰](#). [史雨朦](#). [张义兵](#). [束永安](#). [REN Hai-feng](#). [SHI Yu-meng](#). [ZHANG Yi-bing](#). [SHU Yong-an](#) [基于编码收益的Mesh网络机会路由协议](#) [期刊论文] - [计算机技术与发展](#) 2015(6)