

文章编号:2095-6134(2015)01-0140-05

简 报

基于地理位置和多阶邻节点辅助的编码感知无线多跳网络路由协议^{*}

郭冠华¹, 焦臻桢^{1†}, 周 猛², 张宝贤¹

(1 中国科学院大学 泛在与传感网研究中心, 北京 100049; 2 中国移动通信集团公司技术部, 北京 100033)
(2014 年 3 月 21 日收稿; 2014 年 5 月 5 日收修改稿)

Guo G H, Jiao Z Z, Zhou M, et al. A location-based multi-level-neighbor-assisted coding-aware routing protocol for wireless multi-hop networks[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(1):140-144.

摘 要 提出一种适用于无线多跳网络的基于地理位置的多阶邻节点辅助的编码感知路由协议(LFCR). LFCR 基于数据流间编码思想,借助地理位置信息,在建立路由时,综合考虑编码机会和传输能够带来的数据包正向前进位移,在创造具有编码机会路径时,避免了路由过度绕远. 仿真结果表明,相比于经典编码路由协议 COPE, LFCR 能够显著提高网络性能.

关键词 无线多跳网络; 地理位置; 路由协议; 网络编码

中图分类号:TP393 文献标志码:A doi:10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 01. 023

A location-based multi-level-neighbor-assisted coding-aware routing protocol for wireless multi-hop networks

GUO Guanhua¹, JIAO Zhenzhen¹, ZHOU Meng², ZHANG Baoxian¹

(1 Research Center of Ubiquitous Sensor Networks, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2 Department of Technology, China Mobile, Beijing 100033, China)

Abstract We propose a location-based multi-level-neighbor-assisted coding-aware routing protocol (LFCR) for wireless multi-hop networks. LFCR is based on the concept of inter-flow network coding and utilizes location information for establishing routes, which takes into account not only the potential network coding opportunities but also the positive progress brought by each transmission. Simulation results show that, compared to COPE, LFCR significantly improves performance of the network.

Key words wireless multi-hop networks; location information; routing protocol; network coding

近些年来,无线多跳网络(无线传感器网络、移动 Ad hoc 网络、无线 mesh 网络)相关技术得到学术界和工业界的广泛关注,取得了迅猛发展. 其中,网络编码(network coding)技术^[1]及其在无线

^{*} 国家科技重大专项(2012ZX03005019)资助
[†] 通信作者, E-mail: jiaozhenzhen11b@mails.ucas.ac.cn

多跳网络中的应用,日益受到研究人员的关注.

网络编码技术通过在数据传输中合理地对数据包进行编码,在一次传输中完成多个数据包的投递,已被证明是可以逼近网络容量理论极限的有效方法.在无线网络中,无线链路的不可靠性和广播特性,使网络编码技术尤其适用于无线网络环境.自 COPE^[2]提出以来,实践的网络编码在无线多跳网络环境中,被日益广泛采用.其中,将网络编码与路由选择相结合,形成编码感知的路由协议以提高网络吞吐量,成为一个重要的研究方向.

COPE^[2]是首个应用于无线多跳网络中的实践网络编码机制.然而,COPE 仅能够在已建立的路由上寻找编码机会,而不能主动在建立路由过程中创造编码机会.因而,大量改进工作在其基础上展开^[3-9].文献[3]提出一种基于线性规划算法的流间编码路由协议,综合考虑网络拓扑、数据流特征、编码机会和信道干扰等因素,以进行路由选择;与之类似,文献[4]同样基于线性规划算法.然而,这2种协议均为集中式,在实践中并不适用于大多数无线多跳网络.文献[5]提出一种分布式编码感知的单播路由协议(DCAR),通过引入一种新的编码感知路由权重(CRM),在选择路由时综合考虑编码机会和网络拥塞状况;文献[6]提出一种基于马尔科夫模型路由选取权重的编码感知路由协议;文献[7]提出一种综合考虑无线干扰和网络编码机会的路由方法;类似地,文献[8]在考虑编码机会的同时,引入对带宽和链路质量的权衡,并提出一种新的路由度量及路由框架;文献[9]提出利用移动代理来发现路由以寻找编码机会,并通过利用多路径路由的方式,均衡网络负载和能量消耗.然而,这些现有的分布式编码感知路由协议在建立路由时,均忽视了过度追求编码可能带来的路径绕远问题,而路由绕远往往会对网络的吞吐量造成负面影响,且极不适用于资源受限型无线多跳网络(例如无线传感器网络等).

本文提出一种适用于无线多跳网络的基于地理位置的多阶邻节点辅助编码感知路由协议(LFCR).LFCR 基于 COPE 的数据流间编码思想,利用地理位置信息,在建立路由时,综合考虑编码机会和每次传输能给数据包带来的正向前进位移,从而在创造具有更多编码机会的路径同时,避

免路由过度绕远.

1 LFCR 的基本思想

LFCR 属于按需源路由协议.当有数据发送请求时,由源节点发起路由建立请求.LFCR 在建立路由时,能够综合考虑编码机会和传输带给数据包的正向前进位移.这里,首先明确本文中判断节点“是否存在编码机会”和“传输是否带给数据包正向前进位移”的依据如下:

1) 编码机会 在 COPE 编码模式下,假设有2个流同时流经节点 E(记作流 $A \rightarrow E \rightarrow B$ 和 $C \rightarrow E \rightarrow D$,其中节点 A、B 和 C、D 均为流经 E 的流的上下跳节点),若节点 E 将属于这2个流的数据包(分别接收自 A 和 C)编码后广播,能够被节点 B 和 D 正确接收并解码,则认为节点 E 处存在编码机会.

2) 传输带给数据包的正向前进位移 以 L_A 代表节点 A 与最终目的节点的欧氏距离.单次传输给数据包带来正向前进位移,是指该次传输缩短了数据包与目的节点的欧氏距离,即 $L_A - L_B > 0$ (其中 A 为当前节点, B 为下一跳接收节点).下文中将简称正向前进位移为正位移.

为了使 LFCR 了解网络中能够为数据带来正位移,且具有编码机会的可用转发节点和潜在路径信息,我们引入多阶邻居节点的概念.本文中的多阶邻居节点概念,与文献[10]中提出的“友元节点”类似.在文献[10]中,友元节点辅助路由(FADP)中的每个节点,均维护一个友元信息表,以保存友元节点地址及从自身到该友元节点的路径.当源节点需要建立新路由时,会选择地理位置距离目的节点最近的友元节点,按照保存在友元信息表中的路径,将路由建立请求发送给友元节点;收到该请求的友元节点,也通过查询自身的友元信息表,迭代地寻找路由,直到路由建立.通过这种方式,FADP 无须在路由建立阶段广播路由建立请求报文,极大地降低了路由开销.

在本文提出的 LFCR 中,同样记录相似的多阶邻居节点信息,以获知网络中的可用候选转发节点(即既可提供编码机会又能带来正位移的节点),继而在需要的时候利用这些节点建立路由.

在 LFCR 中,我们定义每个节点均具有多个类型的邻居节点,称为多阶邻节点.定义多阶邻节点如下:

定义某节点的直接一跳邻居节点为该节点的一阶邻居节点;定义当前流经某节点的数据流所流经的所有上游节点为该节点的二阶邻居节点;定义当前流经某节点的直接邻居节点(即其一阶邻居节点)的数据流所流经的所有上游节点为该节点的三阶邻居节点. 举例而言,对于节点 x ,假设流 $F = \{s \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow \cdots i \rightarrow j \rightarrow x \rightarrow \cdots d\}$ 流经节点 x ,则 j 为 x 的一阶邻居节点, s, a, b, \cdots, i 为 x 的二阶邻居节点;又例如,流 $F' = \{s' \rightarrow a' \rightarrow b' \rightarrow \cdots i' \rightarrow j \rightarrow \cdots d'\}$ 未流经节点 x ,而是流经了节点 x 的直接邻居节点 j ,则 s', a', b', \cdots, i' 称为节点 x 的三阶邻居节点.

在 LFCR 中,网络中节点需要知道自身及目的节点的地理位置信息,并通过自身所转发的控制报文,获知其各阶邻居节点情况(包括节点 ID 和位置信息). 当网络中某节点有数据需要发送且不存在可用路由时,将启动路由建立过程:节点从自己的所有多阶邻居节点中选择一个节点作为转发节点,并将路由请求报文(RREQ, route request)转发出去;该转发节点收到路由请求报文后,将按照同样的方式继续转发,直到该报文到达目的节点. 选择某个多阶邻节点作为 RREQ 转发节点的依据为:该节点在所有多阶邻居节点中能够带来的传输“性价比”最高.

这里,“性价比”定义为:该次传输获得的正位移大小除以到达该邻节点的“路径代价”. 其含义为:该次转发所带来的距离前进收益和所需的代价(“路径代价”). 显然,性价比越高,说明该次转发获得的每单位前进收益所需代价越低.

定义到达某邻居节点的“路径代价”为:该路径上所有节点的“使用代价”之和(不包含邻节点本身). 例如:节点 x 到其多阶邻节点 y 的路径代价为 x 到 y 的路径上所有节点(包括 x 但不包括 y)的节点“使用代价”之和.

定义节点的“使用代价”如下:

- 1) 无编码机会节点的使用代价为 1;
- 2) 有编码机会的节点的使用代价为 δ , ($0 < \delta < 1$). 这是因为,当网络编码存在时,节点发送每单位数据的发送代价低于无编码情况.

由我们对多阶邻节点的定义可知,从某个节点到其多阶邻节点的路径上必然存在其他流,且必然与将要建立路由的流方向相反. 因而,借助多阶邻节点建立的路由必然存在大量编码机会. 而

依靠“性价比”,LFCR 能够挑选出既具有较多编码机会,路径代价又较低的最优路径进行数据转发.

2 LFCR 的实现细节

2.1 多阶邻节点信息获取与维护

每个节点需要了解其多阶邻节点的信息包括:节点 ID 及其地理位置信息,以及到达该多阶邻节点的路径.

获取一阶邻节点信息 通过在一跳范围内的 HELLO 报文交互,使节点了解其一阶邻居节点(即直接邻居)信息.

获取二阶邻节点信息 利用路由应答报文(RREP, route reply)使节点获知其二阶邻居节点信息(即当前流经该节点的数据流所历经的所有上游节点的信息). 扩展 RREP 报文,使其记录节点的地理位置信息. 当 RREP 报文到达某节点时,该节点从 RREP 报文中读取所需信息,并记录在自己的二阶邻居节点信息表中.

获取三阶邻节点信息 三阶邻居节点信息的获取同样需要依靠节点周期性 HELLO 报文交互. 当某个节点获知其自身的二阶邻居节点信息时,其周期性发送的 HELLO 报文将包含这些二阶邻居节点信息. 当该节点的一跳邻居接收到 HELLO 报文后,可据此更新自身的三阶邻居节点信息表. 为减小 HELLO 报文大小以降低 HELLO 交互开销,每个新生成的 HELLO 报文仅包含当前最新获得的信息.

多阶邻节点信息表的维护和使用 节点多阶邻节点信息表中记录下自身获得的所有多阶邻居节点的信息,并随时根据接收到的最新信息对表项进行更新. 当节点需要建立路由时,将查询自身的多阶邻居信息表,从邻居信息表中获得最优邻居节点及到达该节点的路径,并按此路径将 RREQ 报文发送给该多阶邻居节点.

多阶邻节点信息过期 维护多阶邻居信息的目的在于记录具有潜在编码机会的路径. 故而,当某条已建立路由失效时,节点将在自身的路由表中删去相应表项,同时利用 HELLO 报文告知自己直接邻居节点,使邻居节点能够相应地更新自身的多阶邻居表和路由表.

2.2 路由建立过程

当源节点 S 需要建立与目的节点 $D(S \neq D)$

之间的路由时,节点 S 将发起路由建立过程. 具体而言:节点 S 生成一个 RREQ 报文,如果节点有可用多阶邻居信息时,从这些邻居节点中选择能够带来正位移且性价比最大的邻居节点,并将 RREQ 报文沿着已知的到达该邻居节点的路径投递给该邻居节点;若节点无可用多阶邻居或无邻居符合要求,节点将广播 RREQ 报文.

RREQ 报文记录迄今为止离开信源后所经历的所有节点. 若信源在时间 T 内未收到 RREP,将重新生成一个 RREQ 以重新尝试建立路由, N 次失败后,将通知上层应用路由建立失败.

当某中间节点 $x(x \neq S, D)$ 收到一个 RREQ 报文并需要继续转发时,节点 x 迭代地重复源节点的选择方法:即从自身记录的多阶邻居节点中,挑选性价比最优者作为 RREQ 转发节点. 当节点 x 有到达目的节点的路径,则直接发送给目的节点.

当目的节点 D 接收到 RREQ 报文后,将沿着 RREQ 中记录的节点序列回送 RREP 报文给源节点. 当源节点收到该 RREP 报文后,路由建立完成.

本文协议 LFCR 采用基于单路径的按需路径建立方式,避免了常规按需路由算法(如 AODV^[11])中的路由请求报文泛洪要求,降低了通信开销;寻径过程中,每个中间节点在接收到一个路由请求报文时的计算复杂度为 $O(1)$. 同时,LFCR 仅要求网络中的节点存储与之相关的邻节点信息(包括节点 ID 及其位置),这部分开销与网络中活跃流的数量有关,相关存储开销复杂度为 $O(|V|)$,其中 $|V|$ 为网络中节点数量.

3 仿真实验

本文采用网络仿真工作 NS-2^[12] 对 LFCR 的性能进行评估.

本文所有仿真实验均基于随机生成网络拓扑和数据流. 在每个随机生成的网络中,100 个节点随机分布于 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 的区域内. 网络中共有 20 个 CBR 数据流,每个数据流的源与目的节点均为随机选取,每个数据包大小为 512 字节. 节点的传输半径设为 250 m. 仿真过程中,MAC 层协议采用 IEEE 802.11 协议. 其他仿真参数设置如下: $\alpha=0.5$,即具有编码机会的节点的使用代价为 0.5; $T=5$,即源节点对路由应答报文的最大等

待时间为 5 s,超过 5 s 则重发 RREQ 报文; $N=3$,即源节点建立路由最大尝试次数为 3. 仿真将 LFCR 与网络编码路由机制 COPE 进行比较. 在本文中,COPE 的具体实现为:采用按需源路由方式进行路由的建立(本文中采用 AODV^[11]),路由建立后,COPE 将感知每个节点上的编码机会,并尽可能地对数据包进行编码传输.

本文以网络吞吐量、数据包投递率和编码效率 3 个指标评价协议性能. 网络吞吐量为所有数据流的平均网络吞吐量,单位为 kbps,即单位时间内所有目的节点收到的数据包的总比特数;端到端投递率为网络所有目的节点接收的数据包数与所有源节点发送的数据包数的比值;编码效率以网络中平均每秒编码次数衡量.

我们比较 2 种协议在不同网络负载下的性能差别. 在仿真实验中,通过改变 CBR 流速率以改变网络负载,比较 2 种协议在以下 5 种流速率:4、5、6、7、8 包/s 下的协议性能(见图 1).

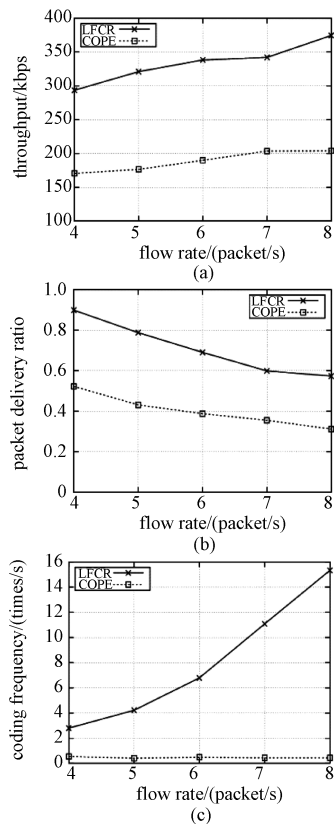


图 1 不同协议性能随流速率变化曲线图
Fig. 1 Performance of different protocols versus flow rate

图 1(a) 比较在不同流速率条件下 2 种协议的网络吞吐量情况. 由图 1(a) 可见, LFCR 的网

络吞吐量明显高于 COPE. 这是由于 LFCR 在创造路由时, 兼顾了编码效率和路径长度, 避免了因为编码而带来的路由绕远. 由图 1(b) 可以看出, 随着流速率增大, LFCR 和 COPE 的数据包投递率均会下降. 这是因为网络负载变大导致的数据包碰撞增多. 但 LFCR 的投递率仍明显高于 COPE, 展现了良好的投递性能. 图 1(c) 比较 2 种协议的编码效率. 由图中可见, LFCR 的编码效率明显高于 COPE, 即 LFCR 拥有更多编码机会, 且随着网络中数据负载增加而愈发突出.

整个仿真结果表明, LFCR 在网络吞吐量、数据包投递率和编码效率 3 个方面均较 COPE 有更优异的表现.

4 结束语

本文提出一种适用于无线多跳网络的基于地理位置的多阶邻节点辅助编码感知路由协议 (LFCR). LFCR 在建立路由时, 综合考虑了编码机会和传输能够带来的数据包正位移, 在创造具有编码机会路径的同时, 避免了路由过度迂回. 仿真结果表明, LFCR 在网络吞吐量、投递率和编码效率 3 个方面, 均优于经典编码感知路由协议 COPE.

参考文献

[1] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1 204-1 216.

[2] Katti S, Rahul H, Hu W J, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM 2006. Pisa: ACM, 2006: 243-254.

[3] Sengupta S, Rayanchu S, Banerjee S. An analysis of wireless network coding for unicast sessions: the case for coding-aware routing [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM 2007. Anchorage: IEEE, 2007: 1 028-1 036.

[4] Ni B, Santhapuri N, Zhong Z F, et al. Routing with opportunistically coded exchanges in wireless mesh networks [C] // Proceedings of IEEE WiMesh 2006. Reston: IEEE, 2006: 157-159.

[5] Le J L, 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.

[6] Wu Y N, Das S M, Chandra R. Routing with a Markovian metric to promote local mixing [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM 2007. Anchorage: IEEE, 2007: 2 381-2 385.

[7] Hou R H, Qu S K, Lui K S, et al. Coding-and interference-aware routing protocol in wireless networks [J]. Computer Communications, 2013, 36(17): 1 745-1 753.

[8] Chi Y, Agrawal D P. HyCare: hybrid coding-aware routing with ETOX metric in multi-hop wireless networks [C] // Proceedings of IEEE MASS 2013. Hangzhou: IEEE MASS, 2013: 136-144.

[9] Shao X, Wang R C, Lin Q M, et al. Mobile agent based coding aware multipath routing for wireless sensor network [J]. Advances in Wireless Sensor Networks, 2013, 3(34): 371-380.

[10] Blazevic L, Giordano S, Boudec J Y L. Anchored path discovery in terminode routing [C] // Proceedings of NETWORKING 2002. Pisa: Networking, 2002: 141-153.

[11] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing[S]. 2003 [2014-03-12]. <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>.html.

[12] UCLA. The network simulator (NS-2) [EB/OL]. Los Angeles, UCLA, (2007- 03-10) [2012-05-30]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.