

移动 Ad hoc 网络基于链路质量的地理位置路由协议

董 萍 兰少华 钱焕延

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

摘 要 基于地理位置的路由算法要周期性发送信标报文,以维护邻居节点的位置信息。但是频繁广播信标控制包会占用大量的网络带宽,于是近几年提出了基于竞争机制的无信标路由算法来减少控制开销。然而,大部分路由协议没有考虑到实际无线信道的不可靠性,使其在实际应用中表现不理想。提出了一种基于链路质量的地理位置跨层路由协议(LQBGR)。它利用跨层技术,在竞争机制中充分考虑链路质量因素,通过选择通信质量较好的链路来减少重传,提高整体网络性能。最终仿真结果表明,该协议能够达到较高的数据包投递率、较短的端到端延迟及较低的通信总量。

关键词 竞争转发,链路质量,跨层路由

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Link-quality Aware Beacon-less Geographic Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks

DONG Ping LAN Shao-hua QIAN Huan-yan

(School of Computer and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Geographic routing algorithms require nodes to periodically transmit HELLO messages to allow neighbors get their positions (beaconing mechanism). But periodically transmitting the messages will result in high bandwidth overhead. For this reason, beacon-less routing algorithms have been recently proposed to reduce the control overhead. However, existing beacon-less algorithms don't consider unreliability of realistic physical channels. In this paper, a novel beacon-less routing protocol called LQBGR was presented. Based on cross-layer routing technology, its design takes link quality into account to reduce the retransmission and enhance the performance. Simulation results show that LQBGR achieves higher packet delivery ratio, shorter end-to-end delay and lower traffic.

Keywords Contention forwarding, Link quality, Cross-layer

1 引言

移动自组织网络是一种特殊的无线移动网络。网络中所有节点的地位平等,无需设置任何中心控制节点。网络中的节点不仅具有普通移动终端所需的功能,而且具有报文转发能力。当节点要与其覆盖范围之外的节点进行通信时,需要中间节点的多跳转发。由于节点的移动性,网络的拓扑时常变换且不可预测。节点频繁加入和退出网络,会造成链路的新建和断开。如何在动态环境下寻找合适的路由,成为一项研究热点。

基于逻辑拓扑结构的路由协议(AODV, DSR, TORA, DSDV, OLSR)^[1]通过主动或者按需的方式探测路由线路并在每个节点保存相应的路由表信息。但是这种路由协议在大规模网络环境应用下会造成控制包广播风暴的问题。

基于地理位置的路由协议(GPSR, LAR, DREAM)^[1]根据位置信息向比自己更靠近目的节点的邻居转发消息。节点根据GPS等装置获取自己的地理位置信息,并通过互相发送

信标消息(beacon)获取邻居节点的位置。它们不需要维护和更新路由表信息,更适合在大规模环境下应用。为了准确获取邻居节点的位置信息,必须周期性地广播交换信标信号。在节点密度较高或者节点高速移动的情况下,频繁广播信标控制包,会占用大量的网络带宽,从而降低整个网络的性能。同时,控制包会干扰正常数据包的传输,增加冲突并引起大量重传。而且,不参与整个数据包转发过程的节点,由于维护位置信息,也会消耗许多不必要的能量。

基于上述原因,近年来很多学者提出了无信标基于竞争的路由机制^[2,3]。其基本思想是,转发节点广播发送数据,所有邻居节点都能收到,但是只有候选区域内的节点参与竞争转发数据。候选节点根据自身位置、上一跳节点和目的节点的位置计算发送时延,时延最短的节点赢得竞争,继续转发数据。

2 相关研究

Heissenbuttel等人提出了一种完全分布式的路由策略

到稿日期:2011-08-26 返修日期:2011-11-02 本文受国家自然科学基金项目(90820004),江苏省科技支撑计划—工业部分(BE2010199)资助。

董 萍(1986—),女,博士生,主要研究方向为移动自组织网络、通信安全等,E-mail: dongping327@gmail.com; 兰少华(1958—),男,教授,主要研究方向为计算机网络与应用、网络安全等; 钱焕延(1950—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络应用、IPv6技术等。

BLR^[4]。当前转发节点广播数据包,其距离目的节点最近的邻居节点延迟最短,最先转发数据包。其余节点收到该数据包,放弃竞争。为了减少包副本的数量,BLR 作者提出了 3 种不同的候选区域,并对其性能做了对比,结果表明鲁洛三角形(Reuleaux triangle)效果最好。但是,最近该作者在实际无线网络环境中实现 BLR 协议时发现,由于无线信道的不对称性,仍然无法避免大量包副本的产生^[5]。

CBF^[6]为了减少包副本的数量,采用主动式选择机制,即由转发节点中心控制选择下一跳节点。但是该协议为此引入 RTF/CTF 控制报文,增加了控制开销,并没有充分结合使用 MAC 层协议帧。

上述协议在设计时都假设理想信道,没有考虑到实际无线信道多径、邻带干扰等现象造成的丢包及大量重传现象。BOSS^[7,8]协议根据实验发现,长数据包比短控制包在传输过程中更容易丢失,于是提出了一种新的算法,即 DATA/RESPONSE/SELECTION/ACK 4 次握手机制,它通过先发送长数据包来选择信道质量较好的节点,减少了信道质量太差而引起的过多重传。但是,BOSS 协议同样引入了额外的控制报文,并没有充分结合 MAC 层。

本文结合 802.11 DCF MAC 层 RTS/CTS 机制,在不额外增加控制报文的基础上,充分考虑无线链路质量,提出了一种新的无信标基于竞争机制的跨层协议 LQBGR。该协议为了避免产生大量包副本,采用中心控制机制。在空洞区域采用相应的恢复机制,保证了节点稀疏情况下的数据包投递率。通过大量实验仿真表明,LQBGR 在数据包投递率、端到端延迟、包副本数量等指标上都得到良好的性能。

3 路由协议算法描述

LQBGR 使用一种 4 次握手机制来选择并转发数据包。首先,发送节点(包括源节点和中间转发节点)广播 IEEE802.11 DCF 协议中 RTS 帧,并等待邻居节点的回复。收到 RTS 的节点根据自身以及目的节点的地理位置计算自己是否处于候选区域内。若是,则根据竞争规则竞争回复 CTS 帧,否则不参与竞争。具有最小发送时延的节点最先回复 CTS 帧,赢得竞争。其余候选节点收到其他包发来的 CTS,就取消自身计时器,放弃竞争。发送节点确定最先收到 CTS 帧的节点为下一跳,开始向其转发 DATA 数据包,自身依然携带数据包不丢弃。当下一跳节点成功收到数据包后,要发送 ACK 报文给上游节点。发送节点收到 ACK 后,确认数据包已成功转发,此时丢弃数据包,否则认为数据包丢失,重新发送 DATA 包(最大限度为 3 次)。若重发次数超过最大限度,则重新发起竞争。此转发过程不断重复,直至数据包到达目的节点。

3.1 转发区域

我们定义了两个区域:候选区域 PPA(Positive Progress Area)和非候选区域 NPA(Negative Progress Area)。当 $dist(n_i, D) < dist(S, D)$ 时, $n_i \in PPA$; 当 $dist(n_i, D) \geq dist(S, D)$ 时, $n_i \in NPA$ 。其中, $dist(n_i, n_j)$ 代表节点 n_i 与 n_j 之间的距离。如图 1 所示, S 表示发送节点, D 表示目的节点。阴影区域内的节点 n_1, n_2, n_3 都是候选节点, n_4 则为非候选节点。 n_1 和 n_3 互相不在对方的通信范围内。

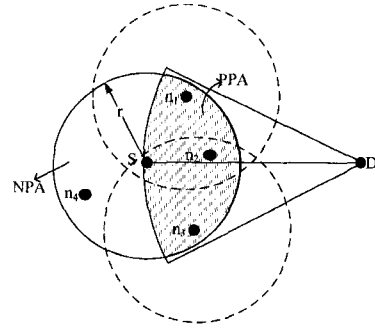


图 1 转发域

3.2 转发过程

图 2 显示了 LQBGR 的握手过程。我们要对 802.11 DCF 的 MAC 协议做些小的改动。在 S 发送数据包之前,首先本地缓存数据包,并监听信道状态。若信道空闲时间达到 DIFS,则将自身和目的节点的位置信息放入 RTS 帧首部,在此我们称之为 ORTS(Open Request To Send),并广播发送。S 通信范围内的所有节点都能接收到 ORTS,但是只有候选区域内的节点(图 1 示例中的 n_1, n_2, n_3)参与竞争,根据转发延迟规则计算 $T_{CTS_Response}$ 并设置计时器 Timer。 $T_{CTS_Response}$ 越短,越容易赢得竞争。这个延迟时间取决于到目的节点的距离以及与发送节点之间无线链路的质量,具体计算公式会在 3.3 节给出。NPA 域内的节点(图 1 示例中的 n_4)则设置自身 NAV 计时器。候选区域内的节点若在 $T_{CTS_Response}$ 时间内检测到信道空闲,则广播发送 CTS 帧,表明自己赢得竞争;若在 $T_{CTS_Response}$ 时间内侦听到其他节点的 CTS,表明自己竞争失败,取消自身定时器,并更新 NAV。

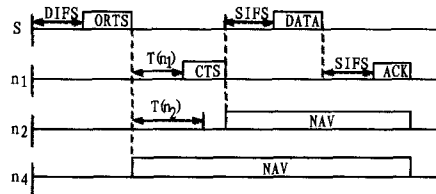


图 2 握手过程

发送节点 S 可能会收到很多 CTS,例如图 1 中的 n_1 和 n_3 ,互相侦听不到对方的 CTS,所以都会向 S 发送自己的 CTS。但是 S 只将 DATA 数据包发送至 CTS 最先到达的节点,其余节点若收到不是发给自己的数据包,则认为竞争失败,也将取消定时器,放弃转发。

当竞争成功的节点收到数据包之后,要向发送节点发送 ACK 帧,表明正确接收数据。发送节点收到 ACK 确认包之后,才认为数据包成功转发,本地删除数据包,否则认为数据包丢失,要重新发送 DATA 包(最大限度为 3 次)。也就是说,节点要求本地缓存数据的延迟时间至少是数据包发送过程的 3 倍。在这里需要说明的是,由于无线信道的不可靠性,丢包是很正常的。引入 ACK 包是为了确保数据包正确到达,但是会增加 33% 控制报文的数量。因此,我们将下一跳转发节点的 ORTS 作为上一过程中的 ACK 报文,称之为 PACK(Passive Acknowledgement)。当然,当数据到达目的节点时,不需要继续转发,这时就发送 ACK 报文来进行确认。为了表述方便,我们把 PACK 和 ACK 统一称为 ACK。

3.3 空洞恢复机制

若候选区域内没有节点,就从竞争转发模式转为空洞恢复模式。传统的恢复模式需要所有节点通过交换控制包来获取邻居节点的信息,以便构造平面子图。最近 Kalosha 等人在文献[9]中提出的无信标构造平面子图 BFP(Beaconless Forwarder Planarization)的方法能够更有效地找到子图边界。该方法无需邻居节点的信息,而是通过选择和修正两个步骤来实现。选择部分构造一个临时子图,修正部分从临时子图中除去错误选择的节点,最终得到一个子图结构。本文重点是竞争转发模式,故空洞恢复机制不做详述,详情见文献[9]。

3.4 转发延迟

为了进一步减少冲突的可能性,我们参考文献[7]中的方法,将通信半径 r 内的区域划分成 NSA(Number of Sub Areas)个子区域 $0, 1, 2, \dots, NSA-1$,如图 3 所示。0 号区域离目的节点最近,NSA-1 号区域距离目的节点最远。CSA(Common Sub Area)代表当前节点 n_i 所在的子区域编号,其计算公式见式(1)。

$$CSA = \lfloor NSA \times \frac{r - (dist(S, D) - dist(n_i, D))}{2r} \rfloor \quad (1)$$

得到 CSA 以后,节点按照式(2)和式(3)计算自己的延迟时间 $T_{CTS_Response}$ 。

$$F = \omega_d \times \left(\frac{CSA}{NSA-1} \right) + \omega_r \times \frac{rand(NSA)}{NSA} + \omega_l \times \left(\frac{LQ_{max} - LQ}{LQ_{max}} \right) \quad (2)$$

$$T_{CTS_Response} = SIFS + T_{max} \times F \quad (3)$$

式中, $rand(x)$ 是一个随机函数,产生 0 到 x 之间的随机数。LQ(Link Quality)是链路质量评价参数,在此我们选用 SNR。SNR 值越大,代表其链路质量越高。 $\omega_d, \omega_r, \omega_l$ 分别是距离、随机数和链路质量参数的权重。SIFS(Short Inter Frame Space)是短优先级帧间隔(详见 802.11 协议)。 T_{max} 是一个常数,代表节点最长等待时间,且 $T_{max} + SIFS < DIFS$ 。

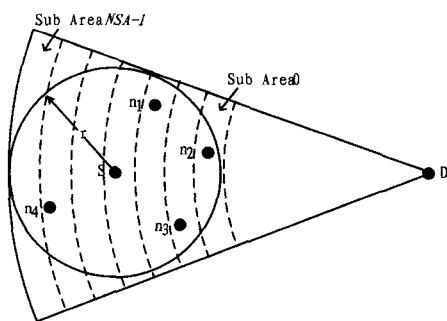


图 3 划分子区域的转发域

在此条件下,不同 CSA 内的节点计算的延迟时间不同,有效地减少了同时回复 CTS 所产生的冲突和碰撞。而同一 CSA 内的节点,由于随机项的引入,也在一定程度上避免了同时回复产生的碰撞。

3.5 链路质量参数的选择

大多数情况下,与距离越近的节点通信,其通信质量越好。但是由于无线传输受到信号干扰、阻挡物及周围环境的影响,有时距离较远的节点具有更强的连接质量。Juan^[8]通过实验证实了节点距离与数据包成功接收率没有直接的线性

关系。所以,为了减少由链路质量太差引起的大量重传,在路由选择时必须充分考虑链路质量。

链路质量参数的选择考虑两个指标:第一,能及时且较为精确地反映当时的链路质量;第二,参数要易于获取。包接收率(PSR)能直观反映当前链路状况。通过大量样本的采集来统计包接收率,其优点是链路质量高度相关,但缺点是实时性不够。并且在网络中维持一定数量的控制包也会增加通信开销,消耗不必要的能量与时间。使用硬件指标能够更加灵敏、高效地评价链路通信质量。如果硬件支持的话,使用信噪比(SNR)可以快速估计链路质量^[10]。

文献[10]中通过大量实验证明,在不同数据率和包长度的情况下,包成功接收率与 SNR 都有着极大的相关性。图 4 为文献[10]中的实验结果。我们对此进行进一步的拟合,得出 SNR 与包接收率的映射关系,如图 5 所示,以此来设置仿真参数,模拟真实环境中的无线链路。候选节点从收到的 ORTS 帧中获取 SNR,并将其值代入 $T_{CTS_Response}$ 的计算公式。

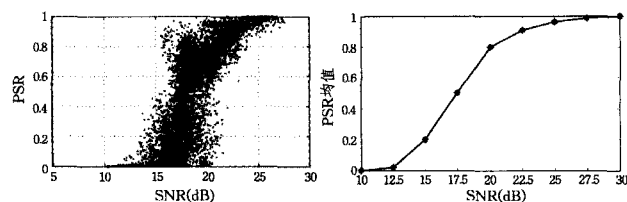


图 4 包接收率与信噪比的对应关系 图 5 包接收率均值与信噪比的映射关系

4 仿真结果

本文在 OMNET++ 平台上对 BLR, CBF, LQBGR 3 种协议进行了仿真对比。仿真区域采用 $500 \times 500 (m^2)$, 节点随机分布,源节点与目的节点分别位于 $(0, 0)$ 和 $(500, 500)$ 。邻居节点个数为 10 到 50 不等。通信半径为 50m。移动模型采用 Random Way Point,最大移动速度为 20m/s。MAC 层采用 802.11 DCF 标准,信源采用固定比特率 2Mbps。数据包大小为 512byte。 $\omega_d, \omega_r, \omega_l$ 参数分别设置为 0.5, 0.1, 0.4。每次仿真结果由 10 次独立实验取平均值得出。

4.1 性能评价指标

本文选择数据包投递率、端到端的时延、总传输量、包副本率作为路由性能评价的指标,其具体定义如下:

数据包投递率 PDR(Packet Delivery Ratio):目的节点接收到的数据包与源节点发出的数据包个数之比。该指标体现协议的有效性。

端到端时延:数据包从源节点成功到达目的节点所需的时间,包括所有路由选择时由于数据包缓存、队列排队和 MAC 层重传所产生的延迟。

总通信量:从源节点到目的节点整个路由过程中所有包的数量,包括没有正确接收到的包和由于出错产生的重传包。

包副本率:在目的节点收到的由源节点发送的同一个包所产生的副本数量。

4.2 仿真结果分析

Blum^[11]通过实验证明,无信标基于竞争的路由算法在其

数据包的传递过程中,每一跳都是竞争转发的结果,不存在由于节点移动造成的地理位置信息不准确而无法选择最优路径的问题。所以节点移动对其各项性能影响不大,故本文实验着重考虑在不同节点密度下各个路由算法的性能比较。

图6显示了在不同节点密度下3种算法包的总通信量。CBF和LQBGR随着节点密度增大,产生的包有所下降。这是因为密度大于25时,基本处于竞争转发模式,没有空洞恢复模式里所需的控制包。BLR却在节点密度增大时产生了更多的消息,这是因为密度越大,各邻居节点参与竞争的回复报文越容易引起冲突,大大增加了重传包数量。LQBGR比CBF包数量更少,因为充分利用RTS/CTS减少了控制包的数量。

图7显示了所有收到的包中副本的比率。可以看出,BLR随节点密度增大产生了大量的包副本,这是由于竞争冲突的可能性增加和信道的不对称性,参与竞争的节点还没来得及收到其他邻居节点的回复,就直接向下转发报文,产生了过多的包副本。而CBF和LQBGR是中心控制算法,由上游节点决定下一跳,基本不存在包副本的问题。LQBGR比CBF性能更好,可能是因为CBF没有考虑信道质量。采用信道质量较差的链路可能会造成ACK的丢失,这样转发节点就会重新选择下一跳,尽管原来的节点已经成功转发。

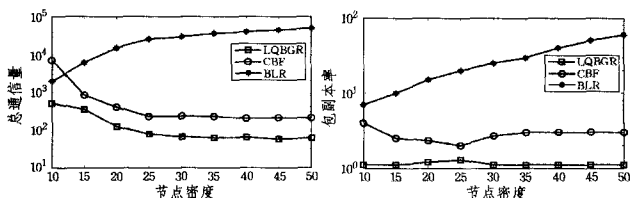


图6 不同节点密度下的总通信量

图8为数据包投递率对比图。可以看出,3种协议在节点密度大于25之后都能达到很高的投递率。BLR性能最好,其代价是产生了大量的包副本。LQBGR选择质量可靠的链路,也达到了不错的效果。

图9为端到端延迟对比。可以看出,节点密度极大地影响了延迟时间,因为在节点稀疏的情况下要启动空洞恢复模式,会消耗很多时间。需要指出的是,BLR会生成大量副本,我们按照第一个到达目的节点的报文所需的时间来计算端到端延迟。由于数据包的转发由节点分布式控制,不需要等待握手过程,因此BLR比另外两种算法延迟更小。

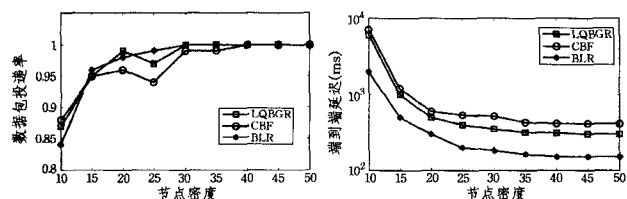


图8 不同节点密度下的数据包投递率

图9 不同节点密度下的端到端延迟

综上所述,BLR在数据包投递率和端到端延迟方面都达

到了良好的性能,但是其代价是产生了大量的包副本,极大地消耗了网络资源。LQBGR在各项性能指标上都能达到不错的效果,原因是在竞争时充分考虑了链路质量的因素。选择链路质量较好的节点可以有效减少重传,以减少整个网络中数据包的传输,提高整体性能。

结束语 本文提出一种新的无信标基于竞争机制的跨层路由协议。该协议利用物理层得到的SNR值来判断节点间的通信链路质量,结合MAC层的RTS/CTS机制来竞争转发。在不增加额外控制开销的情况下,考虑选用链路质量较好的节点,以减少重传次数,提高数据包投递率,节约网络资源。仿真实验证明,本协议在各项性能指标上都得到了很好的提升。

然而,直接通过测量得到的SNR值并不能十分可靠地反映信道质量。未来的工作考虑通过一些基于统计辅助的修正方法或者基于历史信息的估计算法来校准SNR,以提高SNR的精度。

参考文献

- [1] 张鹏,崔勇. 移动自组织网络路由选择算法研究进展[J]. 计算机科学,2010,37(1):10-22
- [2] 施璇,刘凯. 移动Ad hoc网络中基于竞争的跨层路由协议[J]. 系统仿真学报,2009,21(24):7851-7857
- [3] 王国栋,王刚. MANET中一种具有能量意识的无信标地理路由算法[J]. 电子学报,2010,38(7):1547-1551
- [4] Heissenbüttel M, Braun T, Bernoulli T, et al. BLR: Beacon-less Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks [J]. Computer Communications, 2004, 27(11): 1076-1086
- [5] Braun T, Heissenbüttel M, Roth T. Performance of the beacon-less routing protocol in realistic scenarios[J]. Ad hoc Networks, 2010, 8(1): 96-107
- [6] Fuß H, Widmer J, Kasemann M, et al. Contention-based Forwarding for Mobile Ad hoc Networks [J]. Ad hoc Networks, 2003, 1(4): 351-369
- [7] Sanchez J A, Marin-Perez R, Ruiz P M. Beacon-less Geographic Routing in Real Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2008, 23(3): 438-450
- [8] Sanchez J A, Ruiz P M, Marin-Perez R. Beacon-less Geographic Routing Made Practical: Challenges, Design Guidelines, and Protocols [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(8): 85-91
- [9] Kalosha H, Nayak A, Ruhup S, et al. Select-and-protest-based beaconless georouting with guaranteed delivery in wireless sensor networks [C] // IEEE the 27th Conference on Computer Communications. 2008: 346-350
- [10] Wapf A, Souryal M R. Measuring Indoor Mobile Wireless Link Quality [C] // Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC '09). 2009: 1-6
- [11] Blum B, He T, Son S, et al. IGF: a state-free robust communication protocol for wireless sensor networks [R]. USA: Department of Computer Science, University of Virginia, 2003