

延迟主导的自适应移动 Ad hoc 网络路由协议*

谢飞^{1,2}, 张信明^{1,2+}, 郭嘉丰^{1,2}, 陈国良^{1,2}

¹(中国科学技术大学 计算机科学技术系,安徽 合肥 230027)

²(国家高性能计算中心(合肥),安徽 合肥 230027)

A Delay Oriented Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks

XIE Fei^{1,2}, ZHANG Xin-Ming^{1,2+}, GUO Jia-Feng^{1,2}, CHEN Guo-Liang^{1,2}

¹(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

²(National High Performance Computing Center at Hefei, Hefei 230027, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-551-3603145, Fax: +86-551-3601013, E-mail: xinming@ustc.edu.cn, <http://cs11.ustc.edu.cn>

Received 2004-05-26; Accepted 2004-10-09

Xie F, Zhang XM, Guo JF, Chen GL. A delay oriented adaptive routing protocol for mobile Ad hoc networks. *Journal of Software*, 2005,16(9):1661-1667. DOI: 10.1360/jos161661

Abstract: The characteristic that nodes can enlist into the network topology freely and independently without any fixed infrastructure makes mobile Ad hoc networks (MANET) widely used in various environments such as disaster rescue, battlefield and so on. Conventional mobile Ad hoc routing protocols usually concentrate on the constrained condition of 'shortest path' with minimum hops measurement. However, related researches show that the path with minimum hops can't provide the minimum end to end delay guarantee. Moreover, recently, Ad hoc network is required to support the delay-sensitive traffic. So the reduction of the end to end delay is a new challenge for Ad hoc networks. To this point, this paper mainly focuses on the node delay and a cross-layer method is used to predict the end-to-end delay. Finally, a new routing protocol Delay Oriented Adaptive Routing (DOAR) is presented, which is based on a 'minimum prediction of delay' mechanism. Simulation results show that the derived path length in the proposed DOAR protocol is slightly higher than that of Dynamic Source Routing (DSR) protocol, but it can significantly reduce the average end-to-end delay in both static and mobile scenarios.

Key words: delay; adaptive; routing protocol; QoS; mobile Ad hoc network

摘要: 节点可以自由、自主地进入网络拓扑并且无须基础网络设施的特性,使得移动 Ad hoc 网络广泛应用于诸如灾难救援、战场等多种环境中.传统的移动 Ad hoc 网络路由协议往往考虑以最少跳数为衡量依据的“最短路径”约束.相关研究表明,最小跳数的路径并不能保证最小的端到端延迟.随着对 Ad hoc 网络支持时延敏感

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2002AA104560 (国家高技术研究发展计划(863)); the Key Postdoctoral Foundation of the Ningbo City of China under Grant No.2003A61003 (宁波市重点博士科学基金); the Foundation of Science and Technology of Huawei of China under Grant No.YJCB2004036WL (华为科技基金)

作者简介: 谢飞(1981-),男,江西赣州人,硕士,主要研究领域为计算机网络;张信明(1964-),男,博士,副教授,主要研究领域为无线网络,IP网络QoS控制,网络性能分析;郭嘉丰(1980-),男,硕士生,主要研究领域为计算机网络;陈国良(1938-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,CCF高级会员,主要研究领域为并行算法及其应用,并行计算机体系结构。

业务流能力的要求,如何降低端到端延迟成为一个新的挑战.对此,着重分析了网络中的节点延迟,基于跨层设计考虑,引入预测延迟方法,提出了基于最小预测延迟的选路机制和延迟主导的自适应路由协议 DOAR (delay-oriented adaptive routing).模拟实验表明,虽然 DOAR 协议的平均跳数比 DSR(dynamic source routing)协议稍有增加,但是网络的平均端到端延迟有了很大的降低.

关键词: 延迟;自适应;路由协议;QoS;移动 Ad hoc 网络

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

移动 Ad hoc 网络是许多移动主机的组合.它是一种自组的、可快速展开且不需要固定基站的网络.应用范围可以覆盖军事、工业、商业、医疗、家庭、办公环境等各种场合.在移动 Ad hoc 网络中,每个移动节点兼备路由器和主机两种功能.远距离节点之间的网络互连是通过多跳技术实现的.互连拓扑动态变化的特性给该领域带来了许多难题.因此,路由问题是 Ad hoc 网络能够有效应用所必须解决的问题.

移动 Ad hoc 网络的路由算法主要分为两类^[1]:表驱动路由(table-driven)和按需路由(on-demand).表驱动路由协议需要维护从每个节点到所有其他节点的最新的、一致的路径信息,这些协议要求每个节点保存一张或多张存储路径信息的表.按需路由协议仅在源节点需要时才创建路径;当源节点需要到某个目标的一条路径时,就在网络中发起路径搜索过程,一旦找到某条路径,或者每一条可能的路径都被检测过后,搜索结束;在路径建立之后,再由路径维护过程来维护找到的路径,直到从源节点出发的每一条路径都不能到达目标或源节点不再需要该条路径为止.

移动 Ad hoc 网络中最重要的问题是,如何使一个节点(源节点)和另一个在其直接发送范围之外的节点(目的节点)进行通信.直观上,源节点发出的分组(packet)将通过一些中间节点的转发而达到目的节点.一个明显的问题是,希望我们经过的节点能够达到“最小跳数”,或称为“最短路径”的要求.为了解决这个问题,出现了一些基于“最短路径”约束的路由协议^[1].

基于“最短路径”考虑的协议,如动态源路由协议(dynamic source routing,简称 DSR)^[2],常常以跳数作为衡量最短路径的标准,从而选择当前路由缓存中跳数最小的路径作为路由.虽然基于跳数的衡量标准较容易通过计算 go 实现,但是它没有考虑端到端延迟的问题.也就是说,根据“最小跳数”路由机制选择的路由并不能保证分组以最小的甚至是较小的端到端延迟到达目的节点.因为在运行以“最短路径”为约束的路由协议的网络中,大量分组将集中在几条“最短”的路径上,导致这些路径上的中间节点在处理转发的过程中产生拥塞,增大了分组在节点上的延迟时间.这种情况在带宽受限的无线网络中表现得尤为严重.

近年来,对移动 Ad hoc 网络中时延敏感业务的研究越来越受到人们的重视.如何为 Ad hoc 网络提供 QoS (quality-of-service)保证,以满足实时业务的传输要求,成为一个新的挑战^[3].移动 Ad hoc 网络具有一些特殊的特征,如不可预知的链路属性、节点移动性、动态拓扑、有限电池寿命等.而在如此动态环境中提供 QoS 保证是非常困难的.因此,软 QoS 和自适应 QoS 是在移动 Ad hoc 网络中提供 QoS 保证的两个妥协准则^[3].基于 QoS 路由协议的基本目标是确定满足 QoS 需求的一条自源节点至目的节点的路径;路径约束条件包括带宽、最小化搜索次数、距离、流量条件等.目前,移动 Ad hoc 网络中考虑 QoS 的路由协议比较少.CEDAR(core extraction distributed Ad hoc routing)^[4]适用于中小规模的移动 Ad hoc 网络.CEDAR 动态地建立网络核心(core),然后将稳定的高带宽链路状态传播到核心节点;路由计算是按需式的且由核心节点基于局部状态计算的.Chen 与 Nahrstedt^[5]提出了一种基于票(ticket)的、非精确状态模型的探索算法.该算法将基于洪泛(flooding)的路径发现与 QoS(带宽、延迟)结合起来,即在发现满足 QoS 需求的路径时,通过发出一定数量的逻辑票来限制洪泛消息的数量.AQOR(Ad hoc QoS on-demand routing)^[6]是一种基于资源预置的路由、信令算法.

网络中的延迟是由各种因素综合产生的,对 Ad hoc 网络端到端延迟的研究也各有侧重.文献[7]主要考虑了节点介质访问延迟并且特别针对基于 IEEE 802.11 CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision detection)协议的 Ad hoc 网络提出了新的路由协议.文献[8]分析链路延迟,并且提出基于 QoS 保障的路由协议.文献[9]则综合文献[7,8],提出了考虑节点非均匀性的 QoS 路由协议.国内在这方面的成果主要有文献[10].文献[10]在路由回复分组的基础上添加了路径中排队的分组数,使源节点可以根据路径中的排队分组数动态地调整

业务流量的分配,即按一定的比例将数据流分配到若干条路径上,从而减小网络的平均延迟.虽然已有的工作取得了一些成果,但是我们发现,关于移动 Ad hoc 网络的延迟还没有精确而有效的描述和解决方法.

本文结合跨层设计的思想,通过提取介质访问控制(media access control,简称 MAC)层的一些参数,给出了预测分组在节点上延迟的新方法和基于最小预测延迟的选路机制,并且提出了延迟主导的自适应路由协议(delay-oriented adaptive routing protocol,简称 DOAR).

本文第 1 节详细描述我们提出的路由协议,分析它的优点和特性.第 2 节利用模拟实验比较 DOAR 协议和 DSR 协议的性能.第 3 节总结全文.

1 DOAR 协议

DOAR 协议是一种典型的基于需求(on-demand)型的路由协议.源节点通过路由回复(route reply)中自带的预测延迟动态地选择当前预测延迟最小的路由发送数据包.

考虑网络中的一条路径 $r_i = n_0, n_1, n_2, \dots, n_m (m \geq 2)$, 分析数据包 p 从 n_0 经由路径 r_i 成功发送到 n_m 的延迟.对于节点 n_i , 考虑它的 3 个参数:分组接收速率 μ_i 、分组发送速率 η_i 和分组队列长度 l_i . 分组被节点 n_i 接收以后,将进入分组队列等待被处理,直到被节点发送,这段时间的延迟记为分组在节点 n_i 处的延迟 d_i . 分组从 n_i 处发送后到达 n_j 之前的传输延迟为 p_i^j .

在实际的网络环境中, μ_i , η_i 和 l_i 这 3 个参数是时间的函数,它们在任意时刻的精确值是很难得到的.假设我们能够给出上述 3 个参数的预测值,即分组在给定路径上传递的时间内,路径上每个节点的分组接收速率、分组发送速率和分组队列长度都有固定的预测值,则根据上段中对于分组在节点延迟的定义,我们可以通过下式预测分组在节点 i 的延迟:

$$d_i = \begin{cases} \frac{l_i + d_0^{i-1} \times (\eta_i - \mu_i)}{\eta_i}, & i = 1, 2, \dots, m \\ \frac{l_i}{\eta_i} & i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$d_0^{i-1} = \sum_{j=0}^{i-1} (d_j + p_j^{j+1}) \quad (2)$$

式(2)表示包从 n_0 发出到 n_i 接收经过的预测延迟,则路径 r_i 的预测延迟即端到端延迟 $d_r = d_0^m$. 我们注意到,在式(1)中可能有 $l_i + d_0^{i-1} \times (\eta_i - \mu_i) < 0$, 这时我们认为包在接收后立即转发,不考虑处理时间,设 $d_i = 0$. 在本文中,我们考虑网络中的节点具有均匀性,拥有相同的带宽、发送接收功率、能量等性质,并且由于实际情况中 p_i^j 很小且不易于计算,我们在式(2)中将其忽略,得到:

$$d_0^{i-1} = \sum_{j=0}^{i-1} d_j \quad (3)$$

通过式(1)和式(3),我们可以近似地预测分组通过路由 r_i 成功到达目的节点的延迟.

我们通过著名的指数加权移动平均法计算 μ_i , η_i 和 l_i 这 3 个参数的预测值如下:

$$\mu_i = \alpha \times \mu_{old} + (1 - \alpha) \times \mu_{sample} \quad (4)$$

$$\eta_i = \alpha \times \eta_{old} + (1 - \alpha) \times \eta_{sample} \quad (5)$$

$$l_i = \alpha \times l_{old} + (1 - \alpha) \times l_{sample} \quad (6)$$

为了更好地反映节点近期的状态,我们令 $\alpha = 0.3$, 以给 μ_{sample} , η_{sample} , l_{sample} 这 3 个采样值更高的优先权. 节点每隔 T 采样时间,通过上面 3 个公式计算 μ_i , η_i 和 l_i .

为了能够精确地描述节点的接收速率、发送速率和队列长度,我们在 MAC 层统计和计算上述参数.在我们的工作中,采样时间 T 设为 6s. 我们统计 6s 内 MAC 层中接收和发送的分组数目、队列长度的平均值,以计算 μ_{sample} , η_{sample} , l_{sample} 这 3 个采样值,而上一次计算得到的 η_i , η_i 和 l_i 则被节点保存下来,以作为 μ_{old} , η_{old} 和 l_{old} . 最后,通过(4)~(6)这 3 个公式计算新的预测值.

我们采用的具体算法如下:

① 源节点向目的节点发送路由请求(route request)包.路由请求包中带有路径预测延迟的值(初始值由源节点计算),中间节点在收到路由请求包后,利用式(1)计算节点预测延迟,累加出新的路径预测延迟,加入包中并转发.

② 目的节点根据接收到的路由请求包返回带有该条路由预测延迟的路由回复(route reply)包.

③ 源节点在接收到若干个路由回复后,选择预测延迟最小的路由作为发送数据包的路由.如果最小值路由不止一条,则在其中选择跳数最小的.

另外,我们设路由生存周期为 10s,一条路从建立开始,10s 后失效.这样,源节点在路由失效后将被迫寻找新的路由,从而得到更新的节点预测延迟信息,达到自适应的效果.

以上我们通过对网络模型的合理简化并且引入预测、跨层设计等思想,给出了基于最小预测延迟的路由协议 DOAR.DOAR 协议不同于考虑“最小跳数”的协议,而是以延迟作为主要的考虑因素,通过预测路径延迟的方法,有效地降低了移动 Ad hoc 网络的端到端延迟.

2 模拟实验

在这一节,我们把以传统的最小路径为约束的 DSR 路由协议作为比较对象,通过模拟实验来验证 DOAR 协议的性能,使用的模拟实验环境是 ns-2^[11]模拟器.

2.1 静态网络

我们每次模拟的时间是 300s,每次生成 12 条 CBR 的数据流,数据包的大小是 512 字节,每个节点的传输范围固定为 250m,每个节点初始化能量为 100.我们使用的静态网络拓扑结构如图 1 所示.

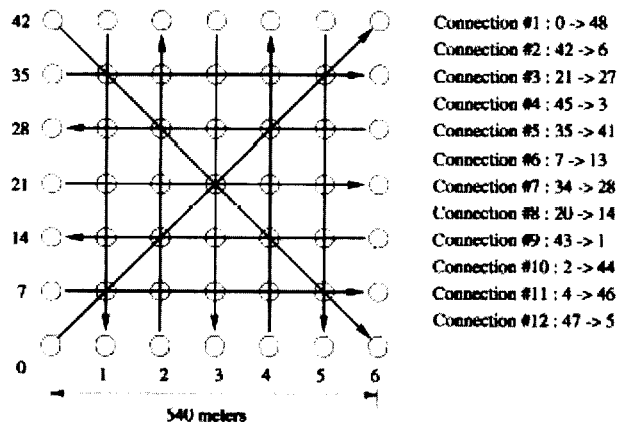


Fig.1 Network topology

图 1 网络拓扑结构

我们不断改变 12 条数据流的发送速率,从每秒 10 个数据包一直增长到每秒 100 个数据包,从而模拟不同的负载情况.在性能方面,我们主要着眼于数据流的平均端到端延迟、路径平均跳数和网络寿命.其中网络寿命根据文献[12],采用网络中第 1 个节点的死亡时间作为网络寿命.

图 2 显示了在不同的网络负载下,数据包的平均端到端延迟性能.图 3 则显示了不同网络负载下数据包所走路径的平均跳数.

从实验结果中我们可以发现,使用 DOAR 协议的 Ad hoc 网络在不同的负载情况下,数据包的平均端到端延迟都比 DSR 的小,大约平均减少了 14.8%.可见,DOAR 作为一种优先考虑延迟的协议,很好地实现了设计的首要目的,体现了很好的平均端到端延迟性能.在静态的拓扑中,DSR 的路径选定后不变而 DOAR 会自适应地寻找路由,所以我们看到图 3 中两者路径平均跳数相差不大而且互有高低,整体上衡量 DOAR 平均跳数减少了 1.6%,可见此时 DOAR 对跳数影响不大.

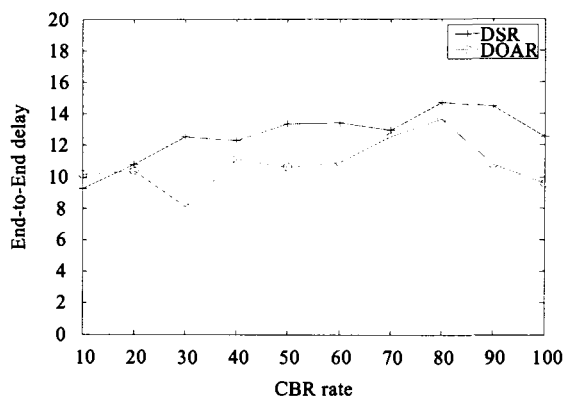


Fig.2 Average end-to-end delays under various loads

图 2 不同负载下的平均端到端延迟

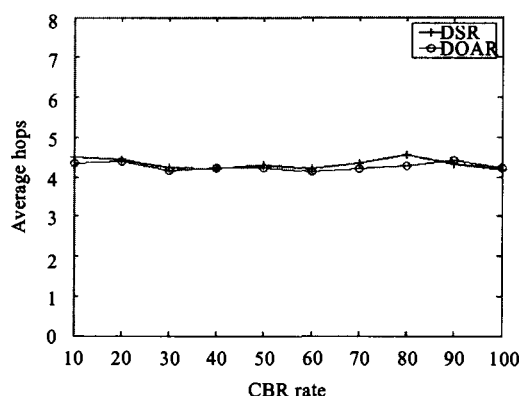


Fig.3 Average path hops under various loads

图 3 不同负载下的路径平均跳数

接着我们比较两种协议下网络的寿命,图 4 显示了在不同负载下的模拟结果.

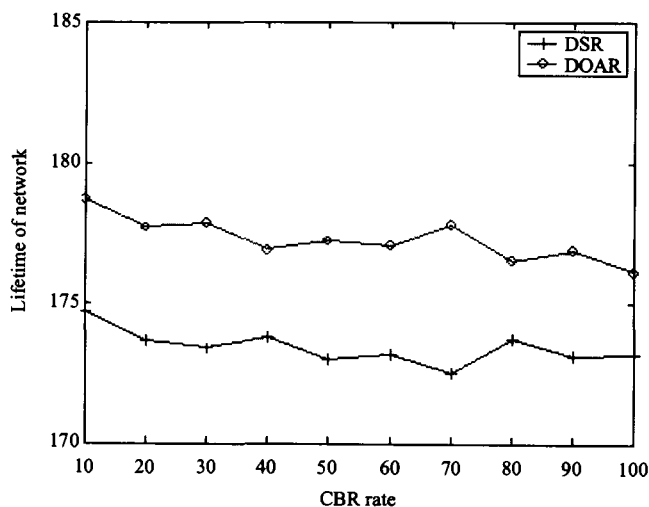


Fig.4 Network lifetime under various loads

图 4 不同负载下的网络寿命

模拟实验的结果表明,使用 DOAR 协议的 Ad hoc 网络寿命始终保持在 176s~179s 之间,而 DSR 协议下的网络寿命均在 175s 以下.使用 DOAR 协议的网络寿命比使用 DSR 协议的网络寿命平均增长了 2.22%,这说明 DOAR 协议的选路机制有利于平衡网络中的负载,节约了节点的能量,延长了网络的寿命.

2.2 动态网络

我们引入节点的移动来考虑在动态环境下 DOAR 协议和 DSR 协议的性能.每次实验生成 49 个节点,12 条 CBR 的数据流,为了防止节点过于集中,我们设定节点分布的范围为 1000m×1000m.对于节点的移动性,我们采用普遍使用的 RWP(random waypoint model)模型,节点的初始位置是随机生成的,节点的最大运动速度为 20m/s,我们通过使用停顿时间为 0s 来体现网络拓扑结构的不停变化.实验主要分析了在不同的数据发送速率下,网络的平均端到端延迟、路径平均跳数和网络寿命.

图 5 显示了在动态环境下两种协议的平均端到端延迟性能.实验结果显示,DOAR 协议的平均端到端延迟比 DSR 协议平均减少了 29.2%.而且可以发现,当源节点的数据发送速率增大到 1Mbps 时,DOAR 协议和 DSR 协议相比平均端到端延迟有一个非常明显的减少量,体现了 DOAR 在延迟性能上的优越性.从图 6 可以看出,动

态情况下 DOAR 协议的路径平均跳数相比 DSR 协议平均约增加 27.2%,但注意到增加平均跳数的平均值之间相差只有 0.4 跳,远小于一跳,所以这样的增加是很小的.

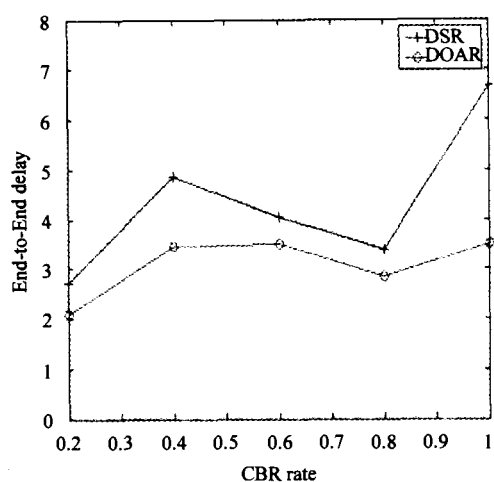


Fig.5 Average end-to-end delays under various loads in dynamic environment

图 5 动态网络中不同负载下的平均网络端到端延迟

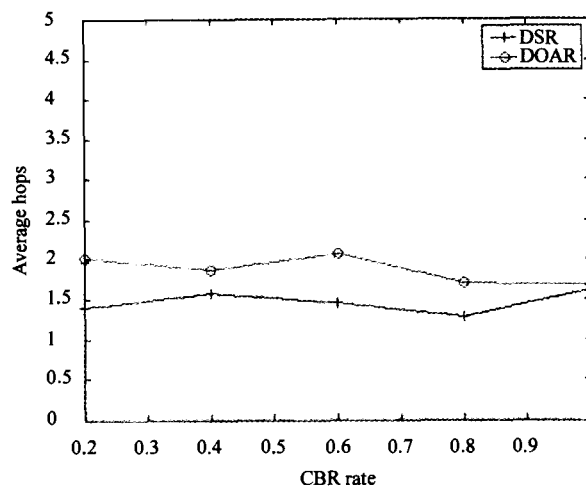


Fig.6 Average path hops under various loads in dynamic environment

图 6 动态网络中不同负载下的路径平均跳数

图 7 是在不同的 CBR 数据率下,网络寿命的变化情况.图 7 显示 DOAR 在动态环境中同样能够较好地延长网络的寿命,平均寿命比 DSR 协议提高了 2.4%,这和静态网络中性能的提高差不多.

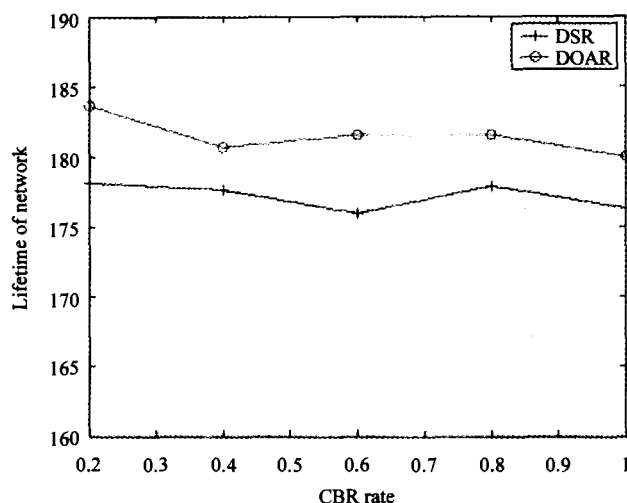


Fig.7 Network lifetime under various loads in dynamic environment

图 7 动态网络中不同负载下的网络寿命

通过静态和动态的模拟实验我们可以发现,DOAR 协议以延迟为选择路由的主导因素,通过其自适应的路由选择机制,极大地降低了数据包的平均端到端延迟,同时对路径平均跳数的影响很小.最后,DOAR 协议对网络的寿命还有一定的增长作用.实验进一步证明了 DOAR 协议的有效性.

DOAR 协议优势在于:① 全面考虑了节点延迟(协议处理时间及排队延迟);② 给出了简单、有效的节点、路径延迟预测公式.而文献[7]主要考虑了节点介质访问延迟,文献[8]的预测方法较为复杂,文献[9]基于 AODV(Ad hoc on-demand distance vector)^[1],且未采用延迟预测方法,文献[10]仅考虑了节点排队延迟.

3 总结与展望

本文针对传统的移动 Ad hoc 网络路由协议只考虑路径的跳数最小而忽略了路径延迟的问题,提出了一种基于需求自适应的以最小预测延迟为选路机制的路由协议 DOAR.我们合理地简化了网络模型,并综合预测和跨层设计的思想,同时通过对 MAC 层的相关参数进行统计,创造性地给出了节点与路径延迟的预测公式.模拟实验表明,与 DSR 相比,DOAR 协议在静态和动态网络模型下均可极大地降低网络的端到端延迟,对网络提供了有效的 QoS 保证.在下一阶段的工作中,我们希望能进一步研究移动性和网络的拓扑结构对延迟的影响,使得 DOAR 协议能够更加全面地提高网络的性能.

References:

- [1] Abolhasan M, Wysocki T, Dutkiewicz E, Abolhasan M. A review of routing protocols for mobile Ad hoc networks. *Ad hoc Networks*, 2004,2:1-22.
- [2] Johnson DB, Maltz DA, Hu YC. The dynamic source routing protocol for mobile Ad hoc networks (DSR). IETF draft-ietf-manet-dsr-10.txt, 2004.
- [3] Mohapatra P, Li J, Gui C. QoS in mobile Ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2003,10(3):44-52.
- [4] Sivakumar R, Sinha P, Bharghavan V. CEDAR: A core-extraction distributed Ad hoc routing algorithm. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 1999,17(8):1454-1465.
- [5] Chen S, Nahrstedt K. Distributed quality-of-service routing in Ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 1999,17(8):1488-1505.
- [6] Xue Q, Ganz A. Ad hoc QoS on-demand routing (AQOR) in mobile Ad hoc networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2003,63:154-165.
- [7] Sheu S, Chen J. A novel delay-oriented shortest path routing protocol for mobile Ad hoc networks, In: Estola K, ed. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC) 2001*. 2001.
- [8] Sun HX, Hughes HD. Adaptive QoS routing based on prediction of local performance in Ad hoc networks. In: Tachikawa K, ed. *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC) 2003*. 2003.
- [9] Du XJ, Pomalaza-Ráez C. Delay sensitive QoS routing for mobile Ad hoc networks. In: *Proc. of the MILCOM 2004 Conf Monterrey*, 2004. <http://enr.ipfw.edu/~du>
- [10] Sheng M, Li JD, Shi Y. DSARP: Delay sensitive adaptive route protocol for Ad hoc network. *High Technology Letters*, 2003,6:1-4 (in Chinese with English abstract).
- [11] <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [12] Chang JH, Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless Ad-hoc networks. In: Hajek B, Sreevivas RS, eds. *Proc. of the 37th Annual Allerton Conf. on Communication, Control and Computing*. 1999.

附中文参考文献:

- [10] 盛敏,李建东,史琰.应用于 Ad hoc 网络的时延敏感自适应路由协议. *高技术通信*, 2003,6:1-4.