

一种基于定向技术的 Ad hoc 路由协议

臧海娟¹ 梅素平²

摘要

基于 MAC 层的定向技术,提出了一种适合于 Ad hoc 无线网络的协议——APRP 协议,协议考虑了 MAC 层和网络层信息的共享和交互,改进了动态源路由协议 DSR 的路由发现和路由维护机制.采用 NS2 工具对协议性能进行了仿真研究,结果表明 APRP 协议不仅可以利用定向技术能量利用率的优点,而且还能较好地保持节点移动情况下的吞吐量,降低端到端数据包延时和路由开销.

关键词

自组织网络;动态源路由协议;天线波束;定向技术

中图分类号 TP309.2

文献标志码 A

0 引言

Introduction

与传统网络相比,Ad hoc 网络易受到能量、计算资源及移动性的限制,且网络拓扑结构频繁变化,其路由比传统网络路由更具挑战性.为满足 Ad hoc 网络路由,研究人员提出了很多满足拓扑动态变化的路由协议,典型的协议包括:DSR^[1](Dynamic Source Routing)、AODV^[2](Ad hoc On demand Distance Vector routing)等.

考虑到节点能量消耗以及延长网络寿命,Ad hoc 网络在路由时,需尽可能地节约通信能量^[3].对此,研究人员提出了很多行之有效的路由协议.文献[4-6]考虑总能耗最小化或延长“瓶颈”节点生存时间等情况,研究并设计了节能路由协议.文献[7]基于跨层设计的思想,研究了延长网络寿命的路由方法.文献[8-10]在介质接入控制(Media Access Control,MAC)层采用了天线波束定向技术,它允许节点通过集中发射能量给目的节点,提高发送范围并增加空间复用性,以获得更高的信噪比和能量利用率.

为充分利用 MAC 层定向技术的优点,更好地提高网络性能,本文在网络层结合 MAC 的定向技术,提出了一种新的路由协议,称为 APRP 协议(Antenna-beam and Position-aware based Routing Protocol,基于波束和位置感知的路由协议),其核心思想是通过增加 MAC 层和网络层间的信息共享和交互,以便在网络层充分利用 MAC 层的定向机制带来的优势.仿真结果表明:APRP 协议不但可以利用定向技术提高能量利用率,也能较好地保持节点移动情况下的吞吐量,并能降低端到端数据包延时和路由开销.

1 APRP 路由协议

APRP routing protocol

1.1 天线模型与定向技术

APRP 协议是建立在 MAC 层的定向技术之上的,为清晰地描述 MAC 层的定向技术,本文给出如图 1 所示的天线模型,模型可在全向和定向两种模式下工作.模型中,全向模式仅用于接收端,定向模式可用于发送端和接收端.

在图 1 中,假设某节点的覆盖范围为 M 个互不重叠的波束,波束为 1 到 M ,从右端水平方向逆时针计数.在给定时间内,节点仅采用一个

收稿日期 2010-09-13

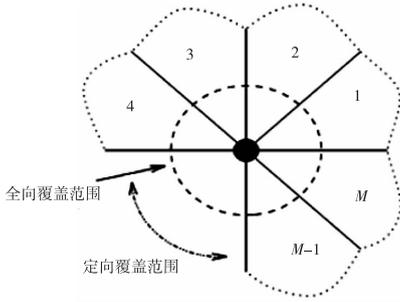
作者简介

臧海娟,女,硕士,讲师,主要研究方向为网络路由理论与物联网技术. zhj@jstu.edu.cn

1 江苏技术师范学院 计算机工程学院,常州,213001

2 同济大学 电子与信息工程学院,上海,200092

天线波束进行发送或接收.为实现广播,发送节点须使用与天线波束总数相同的定向发送端来覆盖整个范围.



在空闲模式时(既不发送也不接收),节点保持全向模式,节点以增益 G_o 接收各个方向的信号.当有信号到达时,节点通过检测最强方向的信号,并在这一方向上采用定向模式接收信号.

在定向模式中,节点可以以增益 G_d 向指定方向发射波束(通常, G_d 大于 G_o).增益与天线波束的数量成正比(与波束带宽成反比),当方向确定后可以以更高的能量发送,从而提高可达范围.

为便于模拟天线的旁瓣,假设旁瓣的能量统一分布于圆形区域中,假设旁瓣增益固定并设为一较小的值,并假设所有节点使用相同的定向天线模式.

1.2 APRP 协议的 MAC 层

MDA 协议^[8](MAC protocol for Directional Antenna)在 MAC 层采用 DOD(Diametrically Opposite Directions)这种优化的广播机制来降低定向环境中哑节点和隐藏节点对网络性能的影响.比对 DOD 机制,APRP 协议采用了相应的机制来定向广播 RTS(请求发送)和 CTS 数据包(允许发送),该机制核心包括两个对策:1)发送的 RTS 和 CTS 数据包将保证能覆盖最大的范围;2)这些数据包仅在邻居节点中使用天线波束发送.

MAC 层的核心思想及工作步骤如下.

1) 假设所有节点的天线波束数量为 M ,节点已通过路由发现机制将自身的邻居节点信息存于 DNT 表(定向邻居表)中.节点 S 需要向邻居节点 R 发送数据包,通过查找 DNT 表后得知应使用波束 A_{SR} .如果此时 A_{SR} 波束不空闲,则采用 IEEE802.11 中的退避机制;否则,转到第 2 步.

2) 在向节点 R 发送 RTS 数据包前,节点 S 将计

算节点 R 使用哪个波束与自己通信.当 M 为偶数时,采用式(1)计算通信时所采用的波束.

$$A_{YX}(A_{XY}, M) = \begin{cases} A_{XY} + \frac{M}{2}, & A_{XY} \leq \frac{M}{2}; \\ A_{XY} - \frac{M}{2}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

其中, X 表示发送节点, Y 表示接收节点, A_{XY} 表示节点 X 与 Y 通信时使用的波束, A_{YX} 表示节点 Y 与 X 通信时使用的波束.

当 M 为奇数时,采用式(2)计算波束到达方向.

$$A_{YX}(A_{XY}) = A_{XY} + 180^\circ. \quad (2)$$

3) 节点除计算波束 A_{SR} 向接收节点 R 发送 RTS 数据包外,还需知道使用哪些额外的波束来发送 DOD RTS 数据包,该数量记为 D .

MAC 层的工作示意图 2.

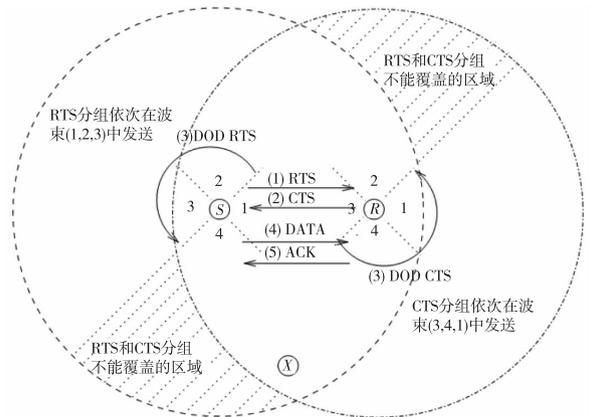


图2 MAC层的工作示意
Fig.2 Schematic diagram of MAC layer

由图 2 可知,设波束数量 M 为偶数,节点 S 通过式(1)计算得出 $A_{RS} = 3$,则节点 S 就将 $DOD-RTS_{End}$ 设为 3, $DOD-RTS_{Start}$ 设为 2 ($DOD-RTS_{Start}$ 为 $DOD-RTS_{End}$ 的前一个值).类似地,节点 R 将 $DOD-CTS_{End}$ 设为 1, $DOD-CTS_{Start}$ 设为 4.图 2 还表示了 RTS 和 CTS 数据包不能覆盖的区域,虽然这些区域可能引起隐藏节点问题,但与其它协议相比,该范围有明显地缩小.

需要注意的是,节点间首先发送 RTS 和 CTS 数据包,仅当 RTS/CTS 握手机制成功后,节点才发送 DOD RTS 和 DOD CTS 数据包.当执行完第 1 步和第 2 步后,发送节点和接收节点才会同时发送 DOD RTS 和 DOD CTS 数据包以通知邻居节点.同时发送这两个数据包不仅可以减少延时,还可以降低隐藏节点问题和哑节点问题.

1.3 APRP 协议的网络层

APRP 协议在网络层需建立定向路由表(DRT)和定向邻居表(DNT)两张表,如图3所示。

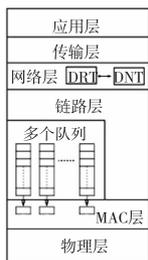


图3 APRP 协议栈

Fig.3 APRP architecture

DRT 表是用来维护到不同目的地的路由信息的, DRT 表中包括波束的 ID(即 1 到 M 中某个值), 源节点可使用存储在 DRT 表中的波束 ID 来估计向目的节点发射的角度。

DNT 表用于选择和维护发送数据包可到达邻居节点的某个天线波束,它是网络层与 MAC 层共享的。网络层通过它获知 MAC 层中各个天线波束,并实现与 MAC 层的信息交互。

链路层则为不同的波束维护不同的队列。网络层根据 DNT 表中的信息决定 MAC 层使用哪个波束发送数据包,并将数据包放在链路层的相应队列中,广播数据包也将保存于不同的队列中。

为说明 ARPA 协议的工作机制,假设 Ad hoc 网络如图4所示,每个节点可采用4个波束收发信息,节点A向节点E发送数据包。在启动路由发现机制后,建立了如下路由: $\{B(3), D(3), E(2)\}$, 即节点A与E的通信需经过中间节点B、D,且上行链路中使用的波束分别为3,3,将这些信息存储于源节点A的DRT表中,节点A的DRT表和DNT表内容如图5所示, DNT表中的内容将用于定向广播 RTS/CTS(即“请求发送/允许发送”)数据包。

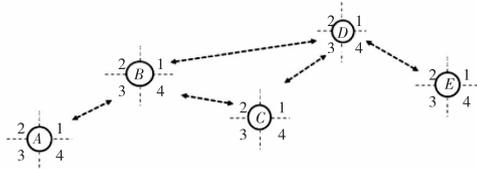


图4 APRP 协议基本原理示意

Fig.4 Principle of APRP

1.4 APRP 协议的路由发现

考虑到定向技术, APRP 协议改进了 DSR 协议

Dest	Route
E	{B(3),D(3),E(2)}
⋮	⋮

(a) DRT

Beam	DoleID
1	B
2	
3	
4	

(b) DNT

图5 节点A维护的路由表

Fig.5 Node A's routing table

的路由发现机制。其核心思想是:给定源节点 X 和目的节点 Y ,若节点 Y 不在 X 的 DNT 表中,则节点 X 洪泛“路由请求”(RREQ)数据包,当节点收到 RREQ 数据包时,启动定时器。若在定时器结束前收到了相同的 RREQ 数据包,则节点首先获得该 RREQ 数据包到达的波束方向,并在定时结束后将 RREQ 数据包定向广播到除了到达方向外的所有波束中。若某个波束忙,则不会等待该波束变为空闲,而是选择其余波束进行发送。中间节点收到 RREQ 后,对数据包进行检查,若是重复路由请求,则丢弃这个数据包;若目标节点是自己或缓存中有相应路由,则向源节点发送“路由响应”(RREP)数据包;否则继续转发该路由请求,直至源节点收到目的节点的路由应答数据包。

在路由发现过程中数据包经过的节点将分别记录到数据包中的数据结构中,其中不仅保存了节点目录,还保存了节点接收数据包的波束 ID,如发送 RREQ 消息的中间节点不仅在其中加入自身的节点 ID,而且还将写入接收数据包的波束 ID。

1.5 APRP 协议的路由维护

建立路由后,源节点将进行数据传送,在此过程中需要对已建立的路由进行维护。维护到目的节点的路由时,需将中间节点的链路失效或路由错误及时地通知源节点。在 APRP 协议中,在定向环境中需区分下一跳节点移动后仍处于节点覆盖范围(可通过另一个天线波束与下一跳节点通信)和下一跳节点移出通信范围这两种情况,前一种情况节点不需要发送路由出错数据包 RERR 给源节点。

协议采用两个独立的步骤对路由进行维护:1)本地节点采用位置跟踪和双跳定向本地恢复链路中断;2)源节点的路由恢复则采用路由恢复。

APRP 协议使用位置跟踪机制来处理节点移动的情况。假设节点 X 需要发送数据包给节点 Y ,若节点 X 的 RTS 数据包在连续 3 次发向节点 Y 的源波束 i 时都失效,则节点 X 在接下来的尝试中将使用相邻

波束来定位节点 Y 的位置,即第 4、5、6、7 个 RTS 数据包将发送到 n 个相邻的天线波束中(包括 i),波束数量 n 取决于波束宽度.若相邻波束不能定位节点的话,则表明该节点不可能与目标节点通信,节点向上层报告链路中断,并结束位置跟踪.

1.5.1 双跳定向本地恢复

图 6 中,假设源节点 S 向目的节点 D 发送数据,并当中间节点 X 发现与节点 Y 的链路中断后,通过查找数据包头部中的信息找到第 2 跳节点(此处为节点 Z ,也因此称为双跳),并定向发送 RREQ 数据包以找到双跳范围内到达节点 Z 的路由.

当节点 X 发送了双跳定向 RREQ 数据包后就启动定时器 T ,若在定时器结束前收到了 RREP 数据包,即为节点 X 找到了下一个有效跳节点 C (Y 的替代节点)后,则节点停止计时器,并通知源节点 S 路由信息的变化.节点将采用 RERR 数据包来发送路由更新信息,其中包含 LOC_RERY 标志符,以标识该数据包是否为双跳定向路由恢复数据包.

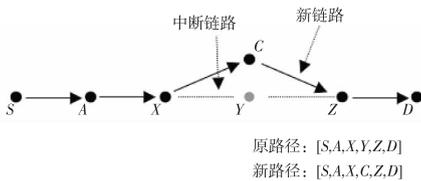


图 6 双跳定向本地恢复过程

Fig. 6 Two-hop directional local recovery process

若 LOC_RERY 标志符设为 true,则 RERR 数据包中将包含路由更新信息,源节点 S 在收到标志符为 true 的 RERR 数据包后将更新路由表信息.若节点 X 在定时器 T 内没有收到 RREP 数据包,则 LOC_RERY 标志符就设为 false,并发送“路由错误”RERR 数据包给源节点.图 6 显示了在路由中断和使用双跳定向路由恢复机制后的路由信息.

1.5.2 路由恢复

建立路由后,源节点将进行数据传送,在该过程中需要对已建立的路由进行维护.若数据包传送路径上的某个中间节点发现链路失效(即当 RERR 数据包中 LOC_RERY 标志符为 false 时),源节点收到该报文后,首先定位目的节点,通过估计目的节点相对自身的方位来确定发送 RREQ 数据包的区域.

如图 4 中,假设节点 A 需要重新寻找到节点 E 的路由,节点 A 路由表中原来的路由信息为 $\{B(3), D(3), E(2)\}$.假设所有节点使用 4 个天线波束,节

点 A 首先估计节点 B 的位置.

由于节点 B 使用波束 3 接收节点 A 的数据包,相应地节点 B 在节点 A 波束 1 的方向上.若节点间的平均距离为 R (假定为节点发射距离的一半),且认为节点 B 位于节点 A 波束 1 的角平分线上且距离为 R ,则 B 相对于 A 的坐标系为 $(R\cos x, R\sin x)$.然后分别确定节点 B 与节点 D 、节点 D 与节点 E 的坐标关系,最后计算节点 E 与节点 A 的相对角度.节点 A 在这一角度 $\pm 45^\circ$ 的范围内发送 RREQ 数据包,即节点 A 将在波束 1 和 4 上发送 RREQ 数据包.在节点 A 波束 1 和 4 上作定向广播后,所有收到 RREQ 数据包的节点也作相应处理.

若使用该协议在确定目的节点的方位上失效了,则源节点将重新启动路由发现机制,此时节点将在所有波束上洪泛 RREQ 数据包.

2 APRP 协议性能分析

Performance analysis of APRP

为验证 APRP 协议的性能,本文从路由发现延时、位置跟踪机制以及本地路由恢复这 3 方面的性能入手,选用相关的性能指标进行分析比较.仿真对比实验是在 NS2 工具环境下进行.

在 NS2 中实现完整的定向天线系统模型,并模拟了定向天线系统的多个方面,如不同的天线波束数量和相应的链路增益.全向天线及波束数量为 4、8、12 的节点传播范围分别为 250、370、550 和 710 m.假设使用固定码率流量,信道容量为 2 Mbps.

仿真实验将 APRP 协议分别与全向天线的 DSR 协议(称为 OMNI 或 DSR)和定向天线的 DSR 协议(称为 DDSR)进行比较,其中 DDSR 的 MAC 层同样使用 MDA 协议,以抵消不同的 MAC 协议对路由协议的影响. M 个天线波束的 APRP 协议和 DDSR 协议,分别用 APRP_M 和 DDSR_M 表示.

2.1 路由发现延时性能

路由发现延时是指从源节点找到到达目的节点的有效路由所花费的时间,也就是路由建立所需要的时间长度.路由发现延时的长短直接决定了数据包是否能快速准确地发送和接收,这是一个很重要的性能指标.

为了衡量 APRP 协议在路由发现延时的性能,设置仿真环境为具有 64 个节点、节点间距离为 250 m 的方格网络.在 DDSR 协议和 OMNI 协议中均实现了延时路由回复机制,目的节点只选择最优的

路由回复源节点, APRP 协议和 DDSR 协议采用 8 天线波束模型.

图 7 给出了路由发现延时和源节点至目的节点距离的关系. 从图 7 中可以看出, 使用优化广播机制的 APRP 协议性能好于 DSR 和 DDSR 协议, 随着源节点与目的节点距离增加时性能差距也越大. 此外, APRP 协议和 DDSR 协议性能好于 DSR 协议, 因为 8 天线波束模型的节点发射范围大于全向天线的发射范围.

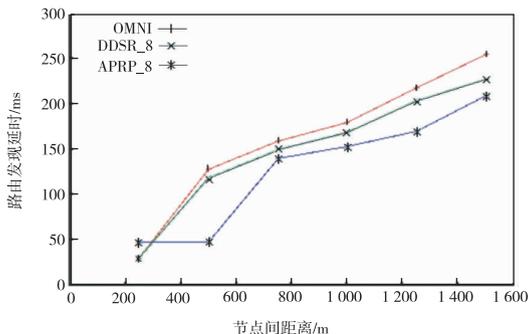


图 7 路由发现延时和源/目的节点距离的关系

Fig. 7 The relationship between route discovery latency and inter-node separation

2.2 位置跟踪机制性能

位置跟踪机制性能主要用节点移动情况下的吞吐量来衡量. 为此, 构建了由 6 个节点组成的线性拓扑结构, 节点间距离为 500 m, 每个节点有 8 个天线波束. 需要注意的是, 8 天线波束模型的波束切换概率大于 4 天线波束模型. 源节点 1 和目的节点 6 使用固定比特率流量 (CBR traffic), 数据率为 100 Kbps.

中间节点变速地在初始位置附近随机移动, 如图 8 所示, 这将导致节点天线波束的切换. 仿真结果如图 9 所示, 随着节点移动速度的增大, APRP 协议的吞吐量基本保持不变, 而 DDSR 协议的吞吐量的下降明显. 这主要是由于 APRP 协议采用了定向技术 (即天线波束切换机制), 在高移动性的情况下, 路由很少失效; 而 DDSR 协议则由于频繁的路由失效, 不断重建新的路由而造成吞吐量下降, 速度越快路由失效越多, 吞吐量也随着明显地下降.

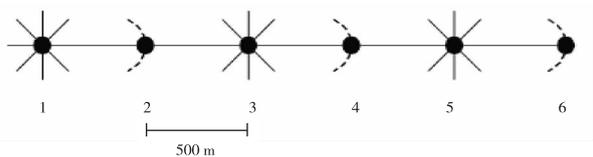


图 8 中间节点的移动情况

Fig. 8 Mobile node

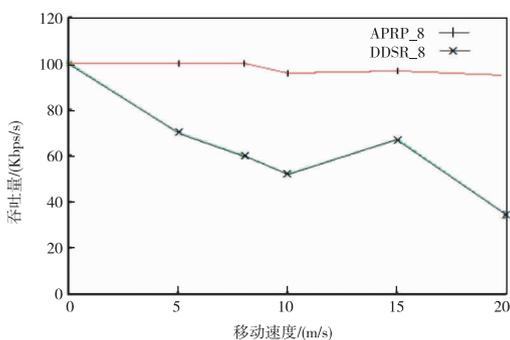


图 9 节点移动情况下的吞吐量

Fig. 9 Throughput in case of node mobility

2.3 本地路由恢复性能

对 APRP 协议的双跳本地恢复机制的性能进行仿真分析. 仿真采用如图 10 所示的具有 64 个节点的网格拓扑结构网络, 源节点和目的节点分别选为 24 和 28, 节点具有 4 个天线波束. 仿真程序运行前首先在源节点 24 的定向路由表中存储到达目的节点 28 的路由路径: (24, 25, 26, 27, 28), 目的是抵消 APRP 协议在路由发现机制上优于 DDSR 协议的性能.

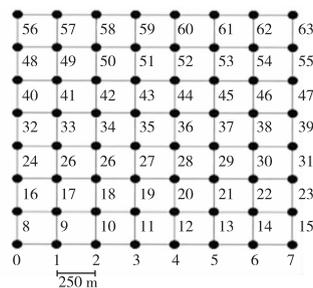


图 10 网格拓扑结构网络

Fig. 10 Mesh network topology

在网络层将设置一个间隔 20 s 触发一次的定时器, 目的是模拟链路失效. 当定时器被触发时, 就使当前路由中一个随机的中间节点失效, 仿真实验将持续 200 s, 10 个节点将失效. APRP 协议中的天线波束切换模块暂时不使用, 以确保每次路由中断后都能使用本地路由恢复模块. 数据包产生率则从每秒 10 ~ 80 个包中随机地选择.

本文采用以下 3 个参数指标衡量本地恢复机制性能.

1) 数据包传输率. 目的节点正确收到的数据包占源节点总共产生的数据包的比例.

2) 路由开销率. 每个数据包要发送到目的节点都需要一定数量的控制包, 总的控制包数量占总的

数据包数量的比例称为路由开销率,即每接收一个数据包的路由开销。

3) 端到端平均延时. 数据包从源节点产生后,到被目的节点接收,这段时间值称为端到端的延时,取所有数据包的平均值就是平均延时。

图 11 给出了数据包传输率与节点数据包产生率的关系. 当每秒产生 50 个数据包时,APRP 协议和 DDSR 协议的数据包传输率基本相同,但当大于这个值时,DDSR 协议的数据包传输率下降明显快于 APRP 协议。

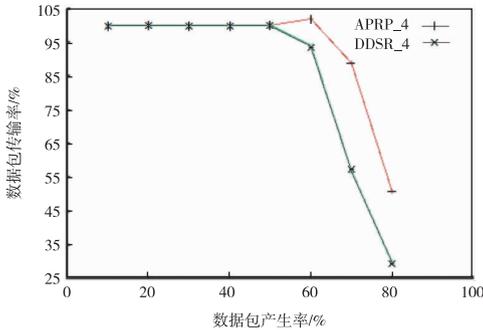


图 11 数据包传输率与数据包产生率的关系

Fig. 11 Relationship between packet delivery ratio and packet generated per second

图 12 给出了每接收一个数据包的路由开销. 在所有数据包产生率中,DDSR 协议的路由开销均大于 APRP 协议,这是由于在路由失效时,APRP 使用本地恢复路由. 需要注意的是,尽管当数据包产生率较高时(每秒大于 50 个),DDSR 协议的数据包传输率很低,但其路由开销仍然大于 APRP 协议,这表明本地恢复机制是有效的。

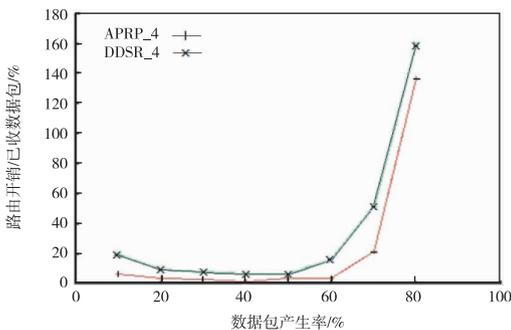


图 12 每接收一个数据包的路由开销

Fig. 12 Routing overhead per received packet

图 13 给出了每个数据包的端到端平均延时. 数据包产生率越大时,DDSR 协议中的端到端平均延

时也越大,这是由于每次路由失效时,节点必须等待从目的节点发回的路由回复信息。

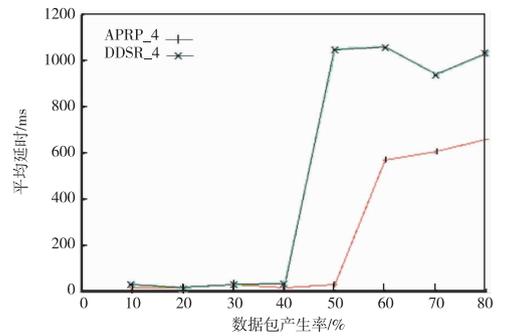


图 13 端到端平均延时

Fig. 13 The average end to end latency

3 结论

Conclusion

目前有很多针对 MAC 层使用天线定向技术的研究,但在路由协议中采用联合网络层和 MAC 层设计的研究报道不多. 本文基于 MAC 层定向技术的能量利用率优势,提出了一种新的 APRP 协议. 仿真实验研究表明:APRP 协议可较好地改善 Ad Hoc 网络的性能,包括路由发现时的良好延时性能、位置跟踪机制中节点移动情况下稳定的吞吐量、本地路由恢复机制中较小的端到端延时和路由开销以及较高的数据包传输率等。

参考文献

References

- [1] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in Ad hoc wireless networks [M] // Imielinski T, Korth H. Mobile Computing. Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1996: 152-181
- [2] Perkins C E, Royer E M. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing [C] // WMCSA99. New Orleans; IEEE Press, 1999: 90-100
- [3] Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy constrained Ad hoc wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8-27
- [4] 罗玉宏, 王建新, 陈松乔. 移动自组网中能量优化的路由算法研究综述 [J]. 计算机科学, 2006, 33(3): 7-10
LUO Yuhong, WANG Jianxin, CHEN Songqiao. Optimal routing algorithms based on energy-efficient in mobile Ad Hoc network [J]. Computer Science, 2006, 33(3): 7-10
- [5] Agarwal K, Awasthi L K. Enhanced AODV routing protocol for Ad hoc networks [C] // Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Networks, 2008: 1-5
- [6] Joshi R D, Rege P P. Distributed energy efficient routing in Ad hoc networks [C] // Proceedings of the Fourth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, 2008: 16-21
- [7] Srivastava V, Motani M. Cross-layer design: A survey and the road ahead [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(12):

- 112-119
- [8] Choudhury R R, Yang X, Ramanathan R, et al. Using directional antennas for medium access control in Ad hoc networks [C] // Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, USA: ACM Press, 2002: 59-70
- [9] Korakis T, Jakllari G, Tassiulas L. A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in Ad-hoc wireless networks [C] // Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing, USA: ACM Press, 2003: 98-107
- [10] Gossain H, Cordeiro C M, Agrawal D P. MDA: An efficient directional MAC scheme for wireless Ad hoc networks [C] // IEEE Global Telecommunications Conference, 2005: 3633-3637

An Ad hoc routing protocol based on directional technology

ZANG Haijuan¹ MEI Suping²

1 School of Computer Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001

2 School of Electronic & Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092

Abstract Incorporating directional technology of MAC layer into Ad hoc wireless network, a network routing protocol suitable for Ad hoc network and named APRP was proposed, which enhances information sharing and interacting between MAC and network layers, and improves the route discovery and maintenance mechanism of protocols DSR (Dynamic Source Routing). Simulation results based on the NS2 demonstrated that APRP protocol benefits with better energy utilization from the adopted directional technology, notably retains the throughputs in case of node mobility, and reduces end-to-end packets delay and routing overheads.

Key words Ad hoc network; dynamic source routing protocol; antenna beam; directional technology