

移动 Ad Hoc 网组播路由协议研究进展^{*})

任 智 郭 伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘 要 移动 Ad Hoc 网和组播都是既有美好前景又有实现难度的技术,在移动 Ad Hoc 网中进行组播更是一项带挑战性的工作。目前该领域的研究热点之一是路由协议。本文介绍了移动 Ad Hoc 网组播路由的主要难点及研究现状,分类描述和比较了已有的主要协议,并对泛洪协议以及单播与组播路由协议的关系进行了阐述,最后展望了未来的研究工作。

关键词 移动 Ad Hoc 网,组播,路由,协议

Research Advance on Ad Hoc Multicast Routing Protocols

REN Zhi GUO Wei

(National Key Laboratory of Communication, UESTC, Chengdu, Sichuan, 610054, China)

Abstract Mobile ad hoc networks and multicast are both promising and difficult to realize. Multicasting in mobile ad hoc networks is even a challenge. At preset, the research on routing protocols is one of the hot topics. This paper reviews its situation and main difficulties. A detailed description and comparison of ad hoc multicast routing protocols are provided. The flooding protocol and the relation between unicast protocols and multicast protocols are also presented. Finally the future research directions are introduced.

Keywords Mobile ad hoc network, Multicast, Routing, Protocol

1 引言

移动 Ad Hoc 网^[1](MANET; Mobile Ad Hoc Network)也被称为多跳无线网(Multi-hop, Mobile Wireless Network)和自组织(Self-Organized Network)网,是一种由既是主机又是路由器的移动终端通过无线链路连接而成的自治系统。移动终端能够自由移动并以任意方式自我组织起来,构成了一个任意拓扑图模式的通信网络,网络的无线拓扑会以不可预测的方式迅速变化。移动 Ad Hoc 网把移动通信和计算机网络结合在一起:一方面,用户终端是可以移动的便携式终端;另一方面,网络的信息交换采用了计算机网络中的分组交换机制。它可以单独存在,也可以作为一种末端网络和巨大的 Internet 连接起来。移动 Ad Hoc 网有别于那些为人们所熟知的、以安装好的基站作为接入点来满足无线通信需求的单跳蜂窝模式的网络。蜂窝网中两个移动节点间的通信完全依靠有线网主干和固定基站,而移动 Ad Hoc 网是一种无中心分布式控制网络,没有基站一类的固定通信设施,可以在不能利用或不便利用现有网络基础设施的情况下提供一种通信支撑环境,从而拓宽了移动网络的应用场合。

组播^[2](Multicast)有别于单播(Unicast)和广播(Broadcast),是一种一点对多点或者多点对多点的致力于面向群组计算的通信传播方式,它使用单一的目的地址把数据发给一组主机。组播是一种非常实用的技术,它最突出的优点是节省带宽,并且能显著减少分组传送开销,因此在移动 Ad Hoc 网这种带宽资源紧张、系统资源有限的网络环境中具有重要的应用价值。在移动 Ad Hoc 网中,利用无线介质的广播特性,

组播能够提高无线链路的传输效率,因而可以有效地支持以紧密协作为特点的多种应用,如移动视频会议、视频点播(VOD: Video On Demand)和无线群体游戏等。

2 移动 Ad Hoc 网组播路由的主要难点

实现组播离不开路由。移动 Ad Hoc 网是一种无线、易变的网络环境,不同于传统的有线网和无线局域网,它的无线链路、移动终端、多跳结构等特点给组播路由的实现带来了诸多困难,以致于在有线网上表现良好组播路由协议不能直接运用,也使得路由优化不再是最重要的要求,而路由迅速收敛、灵敏反应拓扑变化、节省带宽以及减少节点资源开销等则成为更重要的因素。在移动 Ad Hoc 网实现有效的组播路由,需要应对的主要难点有:

适应动态拓扑 动态变化的网络拓扑结构是移动 Ad Hoc 网最显著的特点。由于用户终端的随机移动、无线发信装置发送功率的变化、无线信道间的互相干扰以及地形等综合因素的影响,移动 Ad Hoc 网的拓扑结构可能随时发生变化,并且这种变化是任意的,方式和速度难以预测。当拓扑结构变化后,协议需要花费很长的时间和很大的代价才能到达收敛状态,有些情况下甚至无法收敛。有线网中已有一些精心设计的路由协议能够提供有效的组播路由,但在移动 Ad Hoc 网中,它们会由于跟不上节点运动和拓扑变化而失效,因而显得没有应用前途。

节省带宽资源 移动 Ad Hoc 网采用无线传输技术作为通信手段。无线信道的物理特性决定了它所能提供的网络带宽相对有线信道要低很多,即使在 IEEE802.11a 标准^[4]中,

^{*})本研究课题受国家“863”项目资助,项目编号:No. 2001AA120303。任 智 博士生,研究方向为移动 Ad Hoc 网路由协议及算法。郭 伟 教授,副院长,博士生导师。

最高速率也仅为 54M bps;再加上竞争共享无线信道所带来的碰撞、信号衰减、噪音干扰、信道间干扰等多种因素以及“隐藏终端”、“暴露终端”和“入侵终端”^[5~7]的存在,不仅使移动终端可得到的实际带宽远小于理论上的最大带宽,而且也导致了无线链路容量的不稳定。应用组播的主要目的和优点是节省带宽,但是组播路由过程本身会占用一定的带宽,而且在某些情况下,组播和单播两种路由协议同时运行,更需要减少信道开销。

维持组播结构 组播路由的实现,需要形成一定的拓扑结构(如构造组播分发树或形成组播网格等)和较为准确、相对稳定的组成员关系。但在移动 Ad Hoc 网中组播组的成员会移动,因而妨碍了固定组播拓扑的使用;作为节点移动的结果,在分布式结构(如树)的重构期间会形成短暂的路由环路,所以重构方案应当考虑动态的组成员身份和节点运动导致的传输路径连续更新等。由于移动的影响,在 Ad Hoc 环境中及时更新并动态地维持组播结构和组播组成员关系,具有相当难度。

减轻终端负担 移动 Ad Hoc 网中的移动终端(如笔记本电脑、手持终端等)具有灵巧、轻便、移动性好等优点,但这些优点是以体积和重量受到限制为代价的;它们的一些固有

特性,如采用电池一类可耗尽能源提供电源^[8]、存储容量(包括内存和硬盘)较小、CPU 性能较低等,给路由协议的设计带来一定限制。组播中的终端通常身兼数职:既要维持组播结构,又要复制路由分组,还要完成主机工作,甚至还有可能承担单播路由任务。因此,如何减少路由开销以延长终端工作时间并提高其工作效能,是一个无法回避的问题。

3 移动 Ad Hoc 网组播路由协议

组播路由协议是实现组播的基础,其功能主要是形成一定的机制(如构造组播分发树或形成组播网格等)来完成组播路由任务。迄今为止,人们已经提出了多种以移动 Ad Hoc 网为应用环境的组播路由协议,它们在寻路机制和路由结构上各有不同,可以根据通往组成员的路由产生方法的不同把它们分为五类(如图 1):

- 基于树的组播路由协议;
- 基于网格的组播路由协议;
- 混合型组播路由协议;
- 无状态组播路由协议;
- 地理组播路由协议。

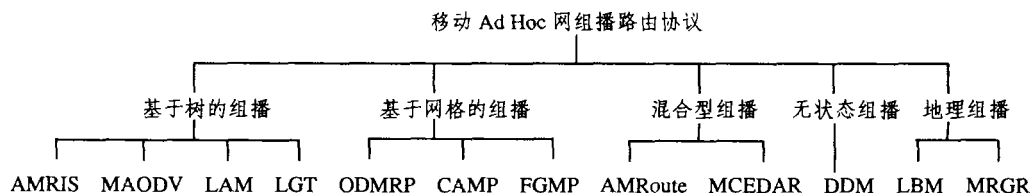


图 1 主要的移动 Ad Hoc 网组播路由协议及其分类

以下部分将按上述分类详细介绍十二种主要的移动 Ad Hoc 网组播路由协议,比较它们的特点和性能,并对泛洪协议以及移动 Ad Hoc 网组播路由协议与单播路由协议的关系进行阐述。

3.1 基于树的组播路由协议

基于树的组播在有线网中是一个经过了精心设计的概念。有线网中的大多数组播路由方案都是基于源树或共享树的。研究人员已经致力于把基于树的方法扩展到移动 Ad Hoc 网中以提供组播。本节内容是一些基于树的组播路由协议的介绍。

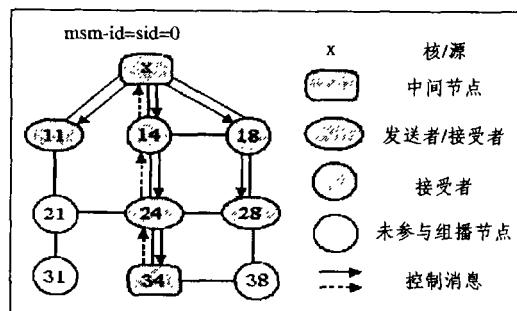


图 2 AMRIS 的分组转发过程

AMRIS (Ad Hoc Multicast Routing Protocol Utilizing Increasing ID Numbers)^[9] 是一种在组播会话中建立一棵共享组播分发树(如图 2)来支持多个发送者和接收者的按需路由协议。在每个组播会话中,AMRIS 为每个节点动态指定

一个 ID 号,并根据 ID 号、以具有最小 ID 号的特定节点 Sid (Smallest-ID)为根创建组播分发树。随着树从 Sid 向外延伸, ID 号逐渐增大。

AMRIS 协议运行的第一步是选择 Sid。Sid 通常是组中唯一的发送者。在多个发送者的情况下,Sid 在给定的发送者集合中选择。一旦某个新的 Sid 被指明,它便发送一个新会话消息 NEW-SESSION 给它的邻居,消息的内容包括 Sid 的组播会话成员 ID 值 (msm-id) 和路由度量标准。收到 NEW-SESSION 消息的节点生成它们自己的 msm-id,该值大于发送者的 msm-id。如果一个节点从不同的节点收到多个 NEW-SESSION 消息,它会保留具有最佳路由度量值的消息并计算它的 msm-id。如果某个节点想加入一个已有会话,它便检查 NEW-SESSION 消息,确定一个具有最小 msm-id 的节点作为父节点,并向该节点单播一个加入请求分组 JOIN-REQ。如果该父节点已位于组播分发树中,它便回复一个加入确认分组 JOIN-ACK;否则,该父节点就向它自己的父节点发送一个 JOIN-REQ。当某节点不能发现任何可能的父节点时,它便执行一个分支重建过程 BR (Branch Reconstruction) 来重新加入组播树。BR 由两个子过程 BR1 和 BR2 组成。BR1 在节点可能有一个用于加入某个组播组的父节点时执行;若没发现任何可能的父节点,BR2 便被执行,向 R 跳范围内的节点广播 JOIN-REQ,R 被包含在 JOIN-REQ 的范围字段中。在链路中断的情况下,msm-id 更大的节点通过执行任何一个 BR 子过程来尽力重回组播树。值得注意的是:AMRIS 用烽火信号机制来检测链路中断,因而在树重新建立之前,分组可能会

丢失。

MAODV (Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector)^[10] 路由协议直接来源于单播 AODV 协议,它按需寻找路由,在路由发现过程的广播机制中同样使用路由请求消息 RREQ(Route Request) 和路由回答消息 RREP (Route Reply)。当节点想加入一个组播组,或者要向一个尚无路由连接的组发送数据时,它就产生一个 RREQ。其它节点收到 RREQ 时,首先更新路由表的记录序列号和去往源节点的下一跳信息,这个反向路径的表项以后会用于中继返回源节点的回答消息;如果该节点不是目的组播组的成员,或者没有去往该组的路由,它就向它的邻居重新广播那个 RREQ;如果该节点是目的组播组的成员,便把请求节点的下一跳信息放入自己的路由表和组播路由表中,然后向源节点单播一个 RREP 进行答复。当源节点与答复节点之间路径上的节点收到 RREP 时,它们会在其路由表和组播路由表为发来 RREP 的节点增加一个相应的表项,从而形成了转发路径(如图 3)。

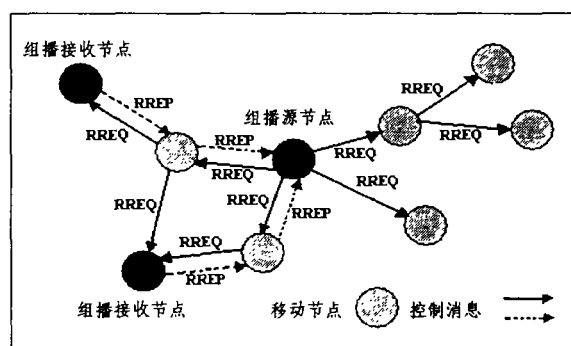


图 3 MAODV 的路由发现过程

当一个源节点为某个组播组广播一个 RREQ 时,它收到的答复通常不止一个。它会在指定的时间范围内保留具有最大序列号且到组播树上最近节点跳数最少的路由,而忽略其余。当指定的时限快到时,源节点会激活从它的路由表中出的下一跳节点表项,并单播一个激活消息 MACT (Activation Message) 给该节点。下一跳节点收到 MACT 后就激活自己组播路由表中的 RREP 源节点表项,如果它是组播树的成员,便不再传播 MACT;否则,如果收到一个或多个从邻居来的 RREP,它会保留最佳的到组播组的下一跳节点信息,并激活组播路由表中的相关表项,向该节点单播 MACT。这个过程会继续进行下去,直至到达被选 RREP 的始发节点。激活的消息确保了组播树到任何树节点只有单一路径。

组播组的第一个成员会成为该组的领导者,并负责维护和组内广播组的序列号。这个工作中的更新过程是由组 Hello 消息来完成的。由于 MAODV 在路由表中保存“硬状态”信息,它不得不努力跟踪和响应树的变化。如果有成员离开组播组,组播树便需要修剪。链路中断是需要监视和检测的内容,如果发生,则断点下游离组领导者更远的节点负责修复受损链路。当树断开的两部分无法重新连接时,断点下游的节点会按一定的方式选出新的领导者。

LAM (Lightweight Adaptive Multicast)^[11] 协议利用了基于核心的树算法 CBT (Core-Based Tree) 和临时序列路由算法 TORA (Temporal Ordering Routing Algorithm) 以提供组播服务。与 CBT 类似, LAM 为每个组播组建立了一个以核心节点 (CORE) 为中心的共享组播路由树,树节点的判定过程如图 4 所示。LAM 中的节点需要维持两个变量:

POTENTIAL-PARENT 和 PARENT, 还需维持两个列表: POTENTIAL-CHILD-LIST 和 CHILD-LIST。PARENT 用于记录组播树中的父节点, CHILD-LIST 用于存储组播树中距离为一跳的子节点。以上数据结构会在节点处于等待“加入”或“重新加入”的状态时使用。

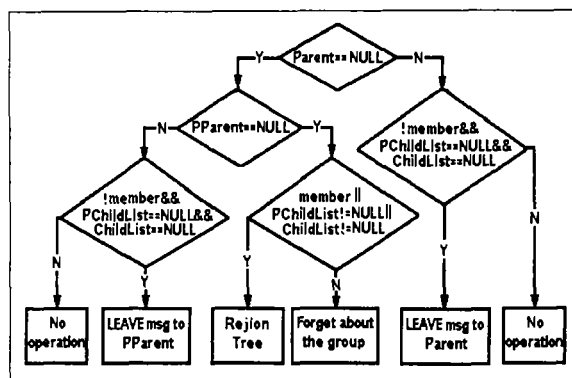


图 4 LAM 的共享组播路由树节点的判定操作

由于 LAM 用 CBT 的方法创建组播分发树,每组有一个核心节点,因此不是很健壮,尤其在移动 Ad Hoc 网环境中。为了解决单个集中核心节点的问题,核间 LAM 协议 (IC-LAM; Intercore-LAM) 被提出。IC-LAM 是一个基于隧道技术的连接多个核心节点的协议。它允许多个核心节点存在,避免了单个核心失效带来的全组崩溃问题。

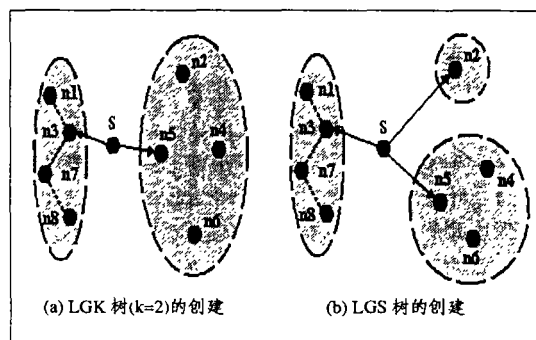


图 5 LGT 中树的创建

LGT (Location Guided Tree Construction Algorithm for Small Group)^[12] 是一种基于分组封装技术的小型组组播方案。它在底层单播路由协议的顶端用覆盖的方式建立了一个组播分组分发树。组播分组分装在单播分组中,只在组节点间传送。LGT 建立了两种树(见图 5): 位置引导 K 列树 (LGK: Location-Guided K-array) 和位置引导 Steiner 树 (LGS: Location-Guided Steiner)。目的节点的几何位置信息被用于建立分组分发树而无需知道全网拓扑信息。可以推断: 源节点到目的节点的几何距离越远,网络级的跳数就越多。因此, LGT 努力创建几何边缘更短的树。它也支持一种基于路由缓冲的优化机制,这种机制允许节点缓存已得路由并在目的节点集相同时再次使用。在 LGK 树方式中,发送者首先选择距离最近的 k 个目的节点作为子节点,然后按照“归入几何距离近的子节点”的原则将其余节点分组。一旦组节点与相应的子节点建立对应关系,发送者会向它的 K 个子节点传递一个封装分组的拷贝,这个分组以子节点相对应的子树(组成员的子目的地列表)为目的。当某节点收到的分组中的目的地字段为空时,此过程便停止。LGS 树方式则以几何距离作为

测量远近的标准,将组播组成员作为树节点来建立一棵 Steiner 树。

LGT 混合使用“便利”和“周期”两种方式更新位置和成员关系。在便利式更新中,节点发送的任何数据分组都含有几何位置信息。如果节点在一段时间内没有数据分组发送,它会周期地发送含有当前几何位置信息的空数据分组。

3.2 基于网格的组播路由协议

与基于树的方式比较,基于网格的方式在任何源和目的节点之间都会有多条路径。已有研究表明,当网络拓扑频繁变化时,基于树的方式未必是在移动 Ad Hoc 网中进行组播的最佳选择。在 Ad Hoc 环境中,基于网格的方式似乎优于基于树的方式,原因在于基于网格的方式能得到替代路由,即使某条链路中断时也能将组播数据报传送到接收者。

ODMRP(On-Demand Multicast Routing Protocol)^[13]

是一种使用转发组(转发组播分组节点的一个子集)的基于网格的协议。ODMRP 采用一种软状态方法维持组播组成员关系,节点离开组播组不需要明确的控制消息。在 ODMRP 中,源节点按需建立和更新组成员关系及组播路由。当一个组播源想发送分组而又没有到组播组的路由时,它便向全网广播一个加入查询控制分组 Join-Query,这个分组被周期性地广播以提醒组成员关系并更新路由。当中间节点收到 Join-Query 时,它将源 ID 号和序列号存入消息缓冲区以检测潜在的消息重复,并用所收消息中一个合适的节点 ID 更新路由表。当一个组播接收者收到 Join-Query 时,它会生成并广播一个加入答复分组 Join-Reply 给它的邻居。收到 Join-Reply 的节点会检查该分组所包含的下一跳节点 ID 中是否有一个会和自己的 ID 一致。如果是,它便设置转发组标志(FG-FLAG),然后用相应表项建立并广播它自己的 Join-Reply,此分组的下一跳节点 ID 字段包含有从该节点路由表中摘录的信息。每个转发组成员都广播 Join-Reply 直至从选出(最短)的路径到达源节点。上述整个过程创建(或更新)了从源节点到接收节点的路由并建立了一个节点网格(如图 6)。网格建立后,源节点周期性地发送 Join-Query 以提醒转发组和路由的存在。当收到的组播数分组不是重复分组并且为组播组而设的 FG_FLAG 没有过期,节点就将该分组转发。这个过程使流量开销降至最低且防止了通过陈旧的路由发送分组。

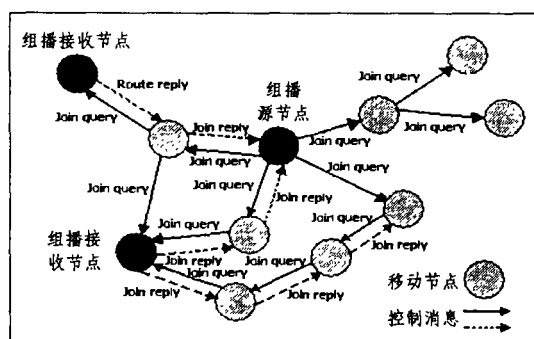


图 6 ODMRP 的网格创建过程

在 ODMRP 中,节点加入或离开组无需发送明确的控制分组。如果一个组播源节点想离开组时,因为不再有任何发送给该组的数据,它只需简单地停止发送 Join-Query 即可。如果一个接收节点不再希望从某个组播组接收信息,它便不再为那个组发送 Join-Reply。如果逾期未被提醒(未收到 Join-Reply),转发组中的节点会降级为非转发组节点。

CAMP(Core-Assisted Mesh Protocol)^[14] 通过创建一个共享网络来支持组播,CAMP 借鉴了 CBT 的思想,但不像 CBT 那样让所有的通信量都经过核心节点。它的核心节点用于限制接收者加入组播组时所需的控制流量。CAMP 的基本操作包括为组播组建立和维护组播网格。它采用了一种映射服务的方式,向路由器提供用组名标识的组地址。每个路由器维护一张利用单播路由协议建立的路由表(RT),当增加或删除组播组时,CAMP 会修改这张表。以 RT 为基础建立的组播路由表(MRT)含有路由器所知的组的集合。拓扑发生变化或从邻居节点收到消息时,路由器会更新它的 MRT。

CAMP 把网格中的节点分为三类:单工节点(simplex)、双工节点(duplex)和非成员节点(nonmember)。如果一个路由器只想向某组的其它成员发送从特定节点或邻居来的消息而不想转发组中的分组,它便以单工节点方式加入该组。双工节点会为组播组转发任何分组,而非成员节点却不一定位于组播转发网格中。CAMP 用一种接收者触发的方式使路由器加入组播组。当一个路由器不再需要完成组成员的路由任务,也不再是其邻居的连接支撑节点,就可以离开该组。核心节点也可以离开组播组,只要它不再是路由器的连接支撑节点。

CAMP 确保了网格包含源节点与接收节点之间的最短反向路径。它的分组转发过程如图 7 所示。接收节点周期性地复查其分组缓冲区以确定是否收到了从最短反向路径上的邻居节点发来的数据分组。如果没收到,它会向该路径上的下一跳节点发送一个“HEARTBEAT”消息,此消息会触发一个“PUSH JOIN”消息(PJ)。如果下一级节点不是网格成员,PJ 会迫使该节点和路径上的所有路由器加入网格。CAMP 的优点是不使用泛洪法,并且请求消息也只传向网格成员。但另一方面,CAMP 需要依靠底层的单播路由协议来限制源和目的之间距离,以保证分组能够在限定的时间内到达所有目的节点。

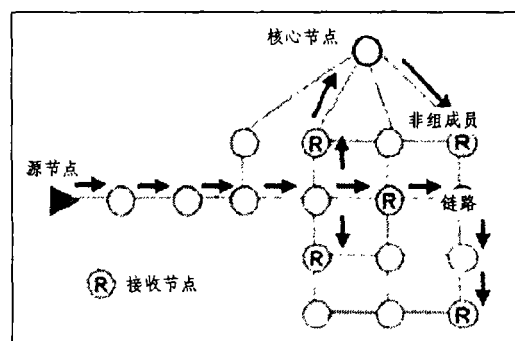


图 7 CAMP 的分组转发过程

FGMP(Forwarding Group Multicast Protocol)^[15] 可被看作有限范围的泛洪法,它把泛洪的区域限制在选定的转发组(FG)节点中。FGMP 创建了一个网格用于组播(如图 8)。在转发组播分组时,FGMP 对有关标志和定时器的使用方法进行了革新。当转发标志被置位时,FG 的每个节点都会转发属于组播组的数据分组,直到定时器溢出,而且只有转发标志处于激活状态的节点才能接收转发的分组。使用定时器的软状态方式在动态变化的环境中表现良好。

FGMP 使用两种方法选举和维护转发组:接收者公告方式(FGMP-RA)和发送者公告方式(FGMP-SA)。在 FGMP-RA 中,组播接收者用泛洪法周期性地宣告它们的组成员关系,发送者维持一张包含组中所有接收者的表。在 FGMP-SA

中,发送者用泛洪法周期性地宣告它的存在,中继此消息的节点将去往发送者的下一跳节点的信息加以存储,组播接收者通过向发送者回送答复消息来加入该组。FGMP 可被视为 ODMRP 的孪生方法,它们的主要区别在于建立组播组网络的方式不同。但是,FGMP 和 ODMRP 都存在泛洪控制分组带来的可扩展性问题。

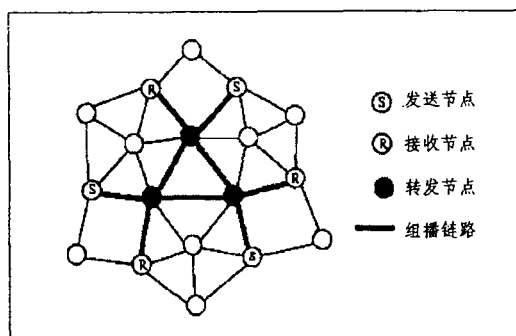


图 8 FGMP 创建的网格

3.3 混合型组播路由协议

以上讨论的 MANET 组播路由协议虽然考虑了效率或健壮性,但是没有同时考虑二者。基于树的协议以低健壮性为代价提供了高的数据转发率;而基于网络的协议虽有更好的健壮性(链路失败不会触发重建过程),却增加了转发开销和网络负载。因此,取树和网格二者之长以获得更好性能的混合式组播解决方案便成为可能。

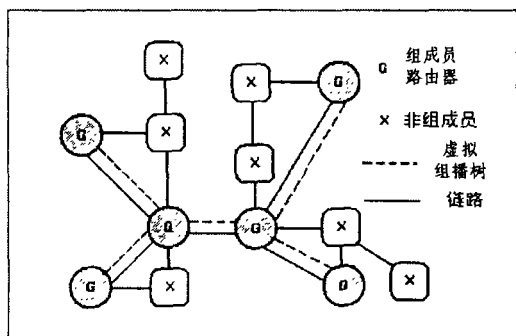


图 9 AMRoute 的虚拟组播树

AMRoute (Ad Hoc Multicast Routing Protocol)^[16] 创建了一棵双向共享树用于数据分发(如图 9)。它有两个主要过程:网格建立和树创建。网格建立过程确定某些节点为逻辑核心,它们负责启动信号发送过程并维护到其它成员的组播树。非核心节点作为一种被动的代理节点,只须对来自核心节点的消息做出反应。在 AMRoute 中,逻辑核心是动态选择的且可以转移到其它任何成员节点。AMRoute 不考虑网格的动态变化并假定由底层的单播路由协议去处理它。为了建立一个网格,每个成员开始时都把自己当作一个核心并在渐增的生存时间(TTL: Time To Live)内广播 JOIN-REQ 分组以发现其它的组成员。当某个核心节点收到来自同组但不同网格的核心节点的 JOIN-REQ 分组,它使用一个 JOIN-ACK 分组作答,它们之间会形成一个新的双向隧道并且在网格合并后它们中的一个会被选为新的核心节点。一旦网格得以建立,核心节点便启动树创建过程。它会沿着网格涉及到的所有链路周期性地发出 TREE-CREATE 消息。通过单播隧道, TREE-CREATE 只会被发给组成员。收到未重复的 TREE-

CREATE 的组成员将该消息转发给除来路以外的所有链路,并把进路和出路标记为树的链路。如果某条链路不再是树的一部分,它会丢弃 TREE-CREATE 并向输入链路发回 TREE-CREATE-NAK 消息。一个成员节点想离开组播组,向他的邻居节点发送一个 JOIN-NAK 消息即可。

AMRoute 事实上利用了网格来创建组播树,这有助于拓扑变化时组播分发树的稳定。它的主要缺点是会出现短暂的路由环路,主机的移动有可能会造成创建的树不是最优结果。

MCEDAR (Multicast Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing)^[17] 是 CEDAR 架构的一个组播扩展。MCEDAR 的主要意图是同时具有基于树的协议的转发效率和基于网络的协议的健壮性。在实际的数据转发中它没有同时利用两种协议的控制基础结构,而是用网格作为底层基础结构,因此它能容忍一些链路中断而无需重构基础。MCEDAR 在网格上建立了一个隐含的基于路由的转发树,这种转发机制提高了效率,并且确保分组传送时在树上经过的距离最短。MCEDAR 把控制基础结构和数据转发基础结构分离开来(如图 10),从而有可能在保持数据转发效率的同时极大地减少协议的控制开销。

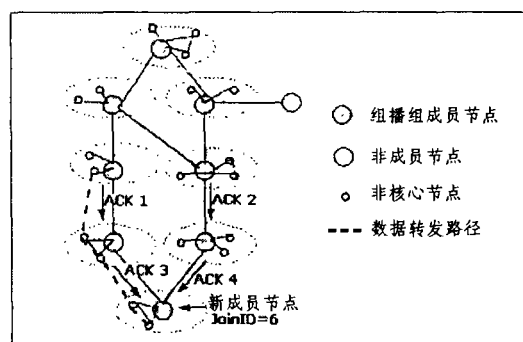


图 10 MCEDAR 中控制分组与数据分组的不同路径

3.4 无状态组播路由协议

基于树和网络的组播方式在创建和维护分发树和网格时都有时间上的开销,而在 MANET 环境中,移动节点的频繁移动又使得维护分发树和网络的开销显著增加。为了使这个问题的影响减至最小,源节点在分组头部明确列出目的地址的无状态组播方式被提出。这种方式主要针对小型组的组播,并假定由底层的路由协议根据分组头部包含的地址来负责把分组转发到各个目的节点。

DDM 协议(Differential Destination Multicast)^[18] 可用于任意规模动态网络中的小型组播组的运作。与其它的 MANET 组播协议不同,DDM 让源节点控制组播组的成员关系。源节点用一个特殊的 DDM 数据头把组播接收节点的地址封装在组播数据分组中。这个可变长的目的地址名单放在分组头部,分组便按照它确定的路由,用底层的路由协议向目的节点传输。DDM 无需在中间节点维持每个组播会话的转发状态,因此在会话数量上易于扩展。

DDM 支持两种操作模式:无状态和软状态。在无状态模式中,转发路径上的节点无需维持组播组转发状态,收到 DDM 分组的中间节点通过查看头部来决定如何转发分组。在软状态模式中,基于已知的路由信息,转发路径上的每个节点都保存最近一次所转发的分组的地址和下一跳节点信息。通过在每个节点缓存路由信息,后面的分组便不必在头部列出所有目的地址。如果底层的单播路由有变化,上游节点只

需把最近一次发送分组后转发目的地的变化通知下游节点即可。“差示目的地组播”便因此而得名。

在 DDM 中,每个节点都有一个转发集合(FS:Forwarding Set)用于记录为每个组播会话所转发分组的目的地。节点也维护一个直接集合(DS:Direction Set)以记录所转发组播数据的下一跳节点。源节点的 FS 含有与组播成员名单(ML:Multicast Member List)相同的节点集合。中间节点的 FS 是以来自上游邻居节点的数据流为基础的几个子集的结晶体。节点会根据去往不同目的地的下一跳节点不同来把它的 FS 划分成多个子集(如图 11)。

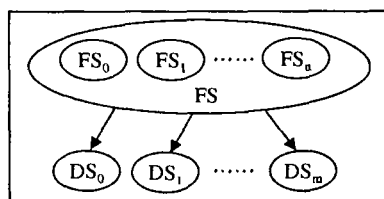


图 11 DDM 的转发计算数据结构

DDM 支持两种类型的分组:控制分组和数据分组。数据分组也可能包含控制信息。控制分组有五种类型:JOIN, ACK, LEAVE, RSYNC 和 CTRL-DATA。为了加入一个会话,一个接收节点需要向会话源节点单播一个 JOIN 消息。源节点修改它的 ML 并答复一个 ACK。组成员可以通过发送一个明确的 LEAVE 消息来离开组播会话。CTRL-DATA 用于封装组播数据以便通过单播把它发送到一个特定的目的地。RSYNC 消息的作用是使一组邻居节点的组播目的地地址在拓扑改变时保持同步变化。由于 DDM 和 LGT 都主要用于为小型组提供组播,因而有必要对它们的区别进行讨论。在 DDM 中,上面的传输和应用层无法控制分组分发树,而在 LGT 中,分组分发树在建造中明显地容易加入上层的操作。此外,DDM 最终需要网络中的每个节点都参与分组分发,而 LGT 只需要组播会话参与节点的协作。

3.5 地理组播路由协议

地理组播路由协议(Geographical Multicast Routing Protocols)指使用网络节点地理位置信息的组播路由协议。节点获取地理位置信息最常用的工具 GPS 系统。GPS 系统发展到今天,既能够提供精确到几米范围内的定位信息,也能提供统一的定时机制。在移动 Ad Hoc 网组播中,定位信息可用于定向路由,统一的时钟可以实现全局同步。相关研究已表明:地理位置信息能够提高路由性能。在地理组播路由协议中,节点的地理位置的邻近程度替代了原来的网络地址;泛洪法得以使用,但它受到源节点位置和组播区域的限制。

LBM(Location-Based Multicast)^[19] 是一个基于区域的空间边界的、面向数据传输的组播路由协议。它使用了物理或空间上的区域的概念,即转发区域和组播区域。转发区域指包含分组分发节点的地理区域,而组播区域则指包含所有组播目的节点在内的地理区域。LBM 的主要思路是在维持数据转发精确度的同时,通过缩小控制分组的转发区域来降低协议的开销。它类似于移动 Ad Hoc 网单播路由协议 Location-Aided Routing (LAR),并在其基础上进行了扩展。LAR 的请求区域(request zone)和期望区域(expected zone)分别变成了 LBM 的转发区域(forwarding zone)和组播区域(multicast region)。LBM 采用了两种不同的分组分发方案(如图 12):

(1)具有显式的矩形或锥形转发区域,由该区域内的节点负责

转发分组;(2)没有显式的转发区域,由一些距离组播区域中心更近的节点负责转发分组。与泛洪法相比,LBM 不仅保持了转发精确度,而且降低了控制开销,但它在运行中需要获得每个节点的位置信息。

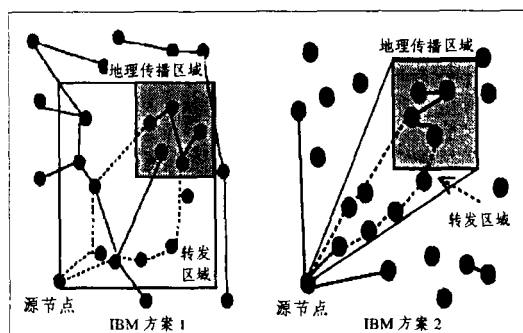


图 12 LBM 的两个分组分发方案

MRGR (Mesh-Based Geocast Routing)^[20] 协议将网格用于 Ad Hoc 环境下的组播路由中,以提供源和组成员节点之间的冗余路径。由于地理组播中的组成员一般都在位置比较靠近的区域内,因此提供从源到组播区域的冗余路径所需代价,小于提供从源到组成员节点(地理位置可能不相邻)的冗余路径所付出的代价。MRGR 没有采用泛洪地理组播分组的方法,而是通过发送控制分组来产生冗余路由。首先,它在一个转发区域内泛洪 JOIN-DEMAND 分组,这个分组在网络中会被转发直至到达组播区域内的一个节点,该节点通过单播沿 JOIN-DEMAND 分组的来路向源节点回送一个 JOIN-TABLE 分组,如此过程之后,这个处在组播区域边缘的节点就成为了网格的一部分。一旦源节点收到第一个 JOIN-TABLE 分组,它就可以向组播区域内的节点发送数据分组了。转发区域的大小、形状不同,所产生的网格也不同。大的转发区域会产生大的网格。MRGR 通过缩小转发区域减少了协议控制开销、网络的数据负载和端到端的时延,不过网络的可靠性也受到了影响。

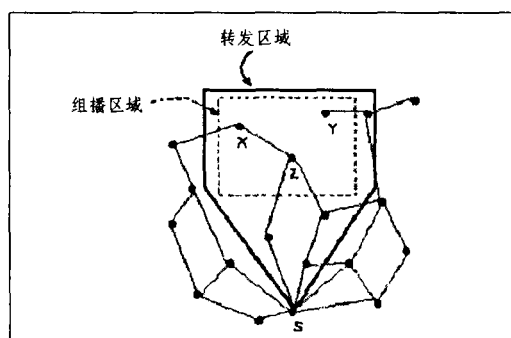


图 13 MRGR 形成的网格

3.6 关于泛洪协议

泛洪是一个古老而简单的协议,既能实现组播功能,也能完成单播任务,但它不是单纯的组播协议,因而在本文中没把它列入分类表。泛洪协议具有最大的可靠性保证,所有路由均可被利用,而且节点只需保存它们自己的状态,能够节约一些手持设备的资源。在一些可靠性要求非常高的场合(如军用环境),可以考虑使用。基于泛洪也可以产生很多变种。最基本的情况,主机保存最近接收包的历史记录,如果是非重复包就进行重传。一些泛洪的变种对即使以前见过的包也重传。泛洪协

议是在移动 Ad Hoc 网中提供组播路由的一个直接方法^[2],在这种方法中,一个数据分组会传遍整个网络,每个收到该数据分组的节点会把它传播给直接相邻的节点,这种广播有且仅有一次。在高度动态的移动 Ad Hoc 网的全网范围内运用泛洪协议也许是一种可行的可靠组播替代方案。然而,由于会发送许多复制分组,这种方法的开销相当大,而且在多接入的共享信道中会发生分组碰撞。

3.7 移动 Ad Hoc 网组播路由协议特点比较

研究设计移动 Ad Hoc 网组播路由协议的基本思路是形成一条连接组播组成员节点的具有最小冗余的路径^[2]。前面介绍的多种算法使用了不同的机制以达此目的。主机的移动性影响了路由的选择,形成路由环路的可能性和路径在变化中不再是最优等都是需要考虑的重要问题;同样重要的问题还包括确定路径是否按需创建,或者优化路径是否一次性确定以及它是否需要周期更新等。另一个重要问题是控制分组是通过泛洪法传遍整个网络还是仅限于组播分发树的节点。考虑到上述问题,表 1 从几个方面比较了上述移动 Ad Hoc 网组播路由协议的特点。

3.8 关于组播路由协议性能的比较

以上分别介绍了树型、网格型、混合型、无状态和地理五类移动 Ad Hoc 网组播路由协议。由于路由机理和实现方式等不同,它们在性能上表现各异,可从多个方面进行研究^[21]。

表 1 移动 Ad Hoc 网组播路由协议特点比较

协议	Flooding	AMRIS	MAODV	LAM	LGT	ODMRP	CAMP	FGMP	DDM	AMRoute	MCEDAR	LBM	MRGR
组播拓扑	网格	树	树	树	树	网格	网格	网格	无状态树	树和网格	树和网格	树	网格
无环路由	是	是	是	是	是	是	是	是	是	否	是	是	是
提供安全机制	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
依靠单播协议	否	否	是	是	否	否	是	是	否	是	是	否	是
提供节能措施	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
周期发送信息	否	是	是	否	是	是	是	是	是	是	是	否	否
泛洪控制分组	否	是	是	否	否	是	否	是	否	是	是	是	是

4 未来研究展望

移动 Ad Hoc 网组播路由协议领域的研究远未穷尽。迄今为止的研究工作多集中于设计路由协议来支持组播组成员节点之间可行的、高效率的通信,仍有许多课题值得在未来进行仔细研究,这些课题主要有:

- 效率与健壮性^[24] 移动 Ad Hoc 网两种最基本的组播路由结构是树和网格。树型结构具有较高的转发效率,但重构问题影响了它的健壮性;网格结构用多条路径增强了健壮性,不过转发效率受到了影响。增强树型结构协议的健壮性和提高网格结构协议的效率抑或在协议中取二者之长,一直是移动 Ad Hoc 网组播路由协议研究和设计中的重要问题。

- 可扩展性 可扩展性^[25]可以从两个层面来理解:一方面,它是衡量路由协议性能的一个重要因素;另一方面,它也关系到移动 Ad Hoc 网本身的规模能扩展到多大的程度。网络规模的扩大会对组播路由协议的应用产生严重影响,如何提高协议的可扩展性以适应网络规模的扩大,是一个必须考虑的问题。设计出一种可以兼顾组成员数目、节点移动性以及 Ad Hoc 环境中出现的其它问题的可扩展的组播路由协议,可能是许多人的愿望和努力方向。

- 地址配置 组播使用单一的目地址把数据发给一组目的节点,因而组播地址的配置与组播路由的实现和性能有

有些文献对组播路由协议的性能进行了评估和比较^[22,23]。已有研究表明:基于树的按需路由协议未必是所有应用的最佳选择;基于网格的路由协议似乎更适用于网络拓扑变化很快的严酷环境,因为它们可以提供替代路径;混合型路由协议取树和网格二者之长,适合中等移动程度的 Ad Hoc 环境;无状态组播方式对于支持多个小型组播组显得较有前途;地理组播路由协议通过引入节点地理位置信息提高了协议性能。但是,没有一种在任何情况下各方面都表现最优的路由协议,不同协议的用处大小和性能好坏取决于应用环境。

3.9 关于移动 Ad Hoc 网组播路由协议与单播路由协议的关系

组播的形式是一对多或多对多,单播则是一对一。单播可以看作组播在极限条件下的特例,即源节点和接收节点都从多个减少为仅有一个。移动 Ad Hoc 网组播路由协议与单播路由协议相对独立,既有紧密联系又有明显区别。Ad Hoc 环境下的组播路由并非一定要建立在单播路由的基础结构之上,有的组播路由协议能脱离单播路由协议独立地正常运行,如 LGT、AMRIS 等;而有的组播路由协议在运行中需要单播路由协议作为底层支持,如 LAM、CAMP 等。单播路由协议不能完成组播路由功能,而有的组播路由协议(如 ODMRP)却能够实现单播路由。对于单播路由协议的研究进展,作者已在另外的文章中进行了详细介绍,因而在此不再赘述。

很大关系。Internet 采用 D 类 IP 地址来支持组播,每个 D 类地址代表一组主机^[26];而移动 Ad Hoc 网的无基础设施特性需要一种与传统方法不同的地址配置方法,它不一定用 IP 地址,并且需要防止组播地址重复现象的发生;节点移动和组成员的改变也使得保持组播地址同步变化的任务较难完成。

- QoS(Quality of Service) 路由是 QoS 体系结构中重要一环^[27,28],它是指在具体的路由协议中增加 QoS 参数对路由的约束,根据网络的可用资源来决定传送路径,从而提供更好的数据传送性能。QoS 路由不仅涉及点到点(point-to-point)的传送质量,更需满足端到端(end-to-end)的 QoS 要求。即使在目前的 Internet 上,QoS 路由问题仍然具有挑战性。组播中的 QoS 路由需要解决的是一端到多端的带宽和时延限制等服务质量问题。由于拓扑动态变化、网络资源有限、竞争共享信道等因素,移动 Ad Hoc 网本身并不是一个能有力支持 QoS 的框架结构,要完成组播 QoS 路由任务可能会很困难。

- 路由安全 无论是在有线网还是在无线网中,组播路由的安全^[29]都是必须考虑的问题。无线介质的广播特性使移动 Ad Hoc 网组播路由安全的实现变得尤其困难。从表 1 中可以看出,已有的组播路由协议中提供安全机制的很少。为了探索如何从路由的角度出发,阻止入侵者加入一个进行中的组播会话或者防止一个节点接收其它会话的分组,保护移动

Ad Hoc 网组播不受恶意和变节主机的攻击,进一步的研究工作尚需开展。

• 能源控制 组播中的终端通常身兼数职:既要维持组播结构,又要复制路由分组,还要完成主机工作,甚至还有可能承担单播路由任务,因此能源消耗较大。在体积和重量受到限制的情况下提高电池的容量是一件困难的事情^[8]。为了增加电池的最长供电时间,控制终端的能源消耗便显得很有必要。如表 1 所示,已提出的组播路由协议中较少考虑节能措施。基于源和核心的方法都会在单个节点上有相对集中的通信流量(例如无状态组播的组成员关系由源节点控制),这会缩短该节点的电池供电时间。在移动 Ad Hoc 网中如何将通信流量从一个中心节点分摊到其它成员节点等问题值得研究。

• 集成组播 未来的主机,有可能漫游于 Ad Hoc 网、无线局域网和有线网之间,不同网络环境下的组播实现方案会有很大差别(一个明显的例子是传输速率的差异)。为了提供无缝、集成的组播服务,有必要开发新的组播路由机制和协议来解决异构网络之间组播的互操作问题^[24]。

结束语 移动 Ad Hoc 网组播路由协议是许多人正在努力研究的课题,它也吸引了越来越多关注的目光。本文全面介绍了当前该领域的研究状况,详细描述十二种主要协议的原理之后在多个方面比较了它们的特点,阐述了它们在性能上的差异,并提出了今后的一些研究课题。在 Ad Hoc 环境下的组播问题获得充分和一致的解决之前,有许多工作亟需开展。像跨层设计^[30](如跨网络层和 MAC 子层)的思想和方案、可靠性、与能源和位置有关的组播路由等问题,都有待更深入细致的研究。

参考文献

- 1 IETF. Mobile ad hoc networks charter [EB/OL]. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>, 2002-09-16
- 2 De Moraes Cordeiro C, Gossain H, Agrawal D P. Multicast over wireless mobile ad hoc networks: present and future directions. *IEEE Network*, 2003, 17(1): 52~59
- 3 Gossain H, Cordeiro C M, Agrawal D P. Multicast: Wired to Wireless. *IEEE Commun. Mag.*, 2002, 40(6): 116~123
- 4 IEEE802.11a-1999 Supplement to IEEE Standard for Information Technology and Telecommunications and Information Exchange between Systems-part 11: LAN MAC and PHY Specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz Band, Sep. 1999
- 5 Karn P. MACA-a new channel access method for packet radio [A]. *ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf[C]*. London, Ontario, Canada, 1990. 134~140
- 6 Bharghavan V, Demers A, Shenker S, et al. MACAW: a media access protocol for wireless LAN's [A]. *ACM SIGCOMM'94 [C]*. London, UK, 1994. 212~225
- 7 Fuller C, Garcia-Luna-Aceves J. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks [A]. *ACM SIGCOMM'95 [C]*. Cambridge, Massachusetts, 1995. 262~273
- 8 Powers R. Batteries for low power electronics [J]. *Proc IEEE*, 1995, 83(4): 687~693
- 9 Wu C W, Tay Y C, Toh C-K. Ad Hoc Multicast Routing Protocol Utilizing Increasing id-numberS [AMRIS] Functional Specification. Internet draft, Nov. 1998
- 10 Royer E M, Perkins C E. Multicast Operation of the Ad Hoc On-

- Demand Distance Vector Routing Protocol. *ACM MOBICOM*, Aug. 1999. 207~218
- 11 Ji L, Corson M S. A lightweight adaptive multicast algorithm. *GLOBECOM*, 1998. 1036~1042
- 12 Chen K, Nahrstedt K. Effective Location-Guided Tree Construction Algorithms for Small Group Multicast in MANET. In: *Proc INFOCOM*, 2002. 1180~1189
- 13 Gerla M, Lee S-J, Su W. On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) for Ad Hoc Networks. Internet draft, draft-ietf-manet-odmrp-02.txt, 2000
- 14 Garcia-Luna-Aceves J J, Madruga E L. The Core-Assisted Mesh Protocol. *IEEE JSAC*, Aug. 1999. 1380~1394
- 15 Chiang C-C, Gerla M, Zhang L. Forwarding Group Multicast Protocol (FGMP) for Multihop, Mobile Wireless Networks. *AJ. Cluster Comp, Special Issue on Mobile Computing*, 1998, 1(2): 187~196
- 16 Bommaiah E, et al. AMRoute: Adhoc Multicast Routing Protocol. Internet draft, Aug. 1998
- 17 Sinha P, Sivakumar R, Bharghavan V. MCEDAR: Multicast Core-Extraction Distribution Ad Hoc Routing. *IEEE Wireless Commun. and Net. Conf.*, Sept. 1999. 1313~1317
- 18 Ji L, Corson M S. Differential Destination Multicast-A MANET Multicast Routing Protocol for Small Groups. In: *Proc. INFOCOM*, 2001. 1192~1202
- 19 Ko Y, Vaidya. Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-Based Multicast Algorithms. In: *Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, 1999
- 20 Boleng J, Camp T, Tolety V. Mesh-based geocast routing protocols in an ad hoc network. In: *Proc. of the Intl. Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing (IPDPS 2001)*, April 2001. 184~193
- 21 Corson S, Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. *RFC 2501*, Jan. 1999
- 22 Lee S-J, et al. A Performance Comparison Study of Ad Hoc Wireless Multicast Protocols. In: *Proc. INFOCOM 2000*, Mar. 2000. 565~574
- 23 Toh C-K, Bunchua S. Performance evaluation of flooding-based and associativity-based ad hoc mobile multicast routing protocols. In: *Wireless Communications and Networking Conf. 2000. WCNC. 2000 IEEE*, Volume: 3, 1274~1279
- 24 Obraczka K, Tsodik G. Multicast Routing Issues in Ad Hoc Networks. *IEEE International Conference on Universal Personal Communication (ICUPC'98)*, Oct. 1998
- 25 Hong X-Y, Xu K-X, Gerla M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. *IEEE Network*, 2002, 16(4)
- 26 Tanenbaum A S. *Computer Networks*, Third Edition, 330
- 27 Chakrabarti S, Mishra A. QoS Issues in Ad Hoc Wireless Networks. *IEEE Commun.*, Feb. 2001. 142~148
- 28 Xiao X, Ni L M. Internet QoS: a big picture. *IEEE Network*, 1999, 13(2): 8~18
- 29 Deng H-M, Li W, Grawal D P. Routing Security in Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Commun.*, Oct. 2002. 142~148
- 30 Chen K, Shah S H, Nahrstedt K. Cross-Layer Design for Data Accessibility in Mobile Ad hoc Networks. in *Journal of Wireless Personal Communications, Special Issue on Multimedia Network Protocols and Enabling Radio Technologies*, Kluwer Academic Publishers, 2002, 21: 49~75