移动 Internet 中的 IP 组播研究综述*

吴 茜+, 吴建平, 徐 恪, 刘 莹

(清华大学 计算机科学与技术系,北京 100084)

A Survey of the Research on IP Multicast in Mobile Internet

WU Qian+, WU Jian-Ping, XU Ke, LIU Ying

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-10-62785822, Fax: 86-10-62788109, E-mail: wuqian00@mials.tsinghua.edu.cn

http://netlab.cs.tsinghua.edu.cn

Received 2003-01-05; Accepted 2003-03-05

Wu Q, Wu JP, Xu K, Liu Y. A survey of the research on IP multicast in mobile Internet. *Journal of Software*, 2003,14(7):1324~1337.

http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1324.htm

Abstract: With the rapid progress of multicast applications and more users participating in it, IP multicast has been an important subject in both research and development. In the meantime, due to the rapid promulgation of mobile devices and progress in wireless technology these years, it is imperative to determine the best way to provide services to mobile equipment. Because IP multicast naturally has the merit of high scalability and efficiency, which is more significant for mobile environment whose resource is much limited, more and more people pay attention to these two techniques, and many efforts are being made to bring them together. In this paper, a comprehensive survey on mobile multicast arithmetics and schemes is given, the advantages and application range of these arithmetics or schemes are discussed respectively, also the shortcomings and problems existed are anatomized in depth, and then a comprehensive comparison is given. In view of poor reliability in mobile environment, a detailed investigation of new problems when implementing reliable multicast to mobile hosts is given, and some related works are introduced. It was hoped that the illustration and discussion presented here would be helpful for developers in selecting an appropriate mobile multicast arithmetic or protocol for their specific needs. In the end, the future trend of combining multicast and mobile is discussed.

Key words: mobile; mobile IP; IP multicast; reliable multicast; routing

摘 要: 随着组播应用的不断增加以及参与者的增多,组播领域的研究一直受到人们的广泛关注.而另一方面,近年来,移动设备迅速得到了普及,并且无线网络技术也得到了飞速的发展,因此,如何为移动主机提供更好的支持引起了人们的普遍关注.由于组播应用所具有的可扩展性强、高效等特点在移动这种资源受限的环境中显得尤为突出和重要,因此,移动环境中的组播应用引起了人们越来越多的重视,在该领域展开了大量的研究.详细地

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.90104002, 69725003 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA121013 (国家高技术研究发展计划(863))

第一作者简介: 吴茜(1978－),女,湖北荆州人,博士生,主要研究领域为计算机网络体系结构,移动环境中的路由和组播.

介绍了现有的主要移动组播算法和协议,讨论了每种算法或协议的适应范围以及优点,比较深入地剖析了其中存在的缺陷和问题,并且对这些移动组播算法和协议进行了综合对比.同时,特别针对移动环境可靠性较差的特点,对移动环境中进行可靠组播所面临的新问题以及相关研究现状进行了讨论.希望通过这些说明和对比,能够帮助研究者为其特定的需求选择适当的移动组播算法或协议.最后,讨论了移动环境中 IP 组播未来的研究方向.

关键词: 移动;移动 IP;IP 组播;可靠组播;路由

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

近年来,随着无线技术的成熟,有越来越多的人通过无线设备连接到 Internet 上[1,2],希望能够随时随地地对网络进行访问.支持移动成为 Internet 发展的必然要求,已经有相当多的研究关注于网络如何为移动提供支持,其中 IETF(Internet engineering task force) Mobile IP 工作组[3]的移动 IP(mobile IP)[4,5]及其相关技术[6~9]是主要研究内容,占据着主导地位,并取得了显著的研究成果.

另一方面,IP 组播[10]由于具有网络利用率高、能节省发送者自身的资源、可扩展性较强的优点,在大量新型网络应用(例如,视频会议、远程教育、文件分发、实时信息发布等等)中发挥了很大的作用,因此,IP 组播一直是国际上互联网络科学研究领域中的热点研究课题.但是,由于 IP 组播一直没有在 Internet 上得到大规模的广泛应用[2],为此,研究人员提出了应用层组播[11]等解决方案,并展开了广泛的研究,期望能够实现广域网范围内的组播服务,同时还希望能够在各种新型网络(例如无线网络)中实现组播服务.

在移动环境中,由于移动节点常常使用无线链路,因此最明显的特征就是受限的链路带宽和较高的错误率.同时,移动节点的体积通常都比较小,因此它拥有的能量供应、处理器能力以及存储能力等都比较低,在这种情况下,IP 组播高效使用资源的优点对于移动节点来说尤为重要.移动和组播的结合将会进一步扩大移动和组播的应用范围,为两者的应用提供更广泛的发展空间[12].

移动和组播的结合给两者都带来了新的挑战.在移动环境中,组播不仅要管理动态组播组成员、建立和维护组播树,还需要解决成员位置动态变化的问题.但现在 Internet 中使用的组播协议,如 DVMRP[13],CBT[14],MOSPF[15],PIM[16~18]等,通常都假设其成员是静态的,而没有考虑成员位置动态变化的情况.如果每次节点移动后都当作一个新加入的成员,则会给组播组的管理和组播树的维护带来过多的开销,增加网络的负担.另一方面,移动 IP 协议主要对单播进行了研究,对于组播只提出了两种基本的解决方案,但都存在着比较严重的缺陷,而在此基础上的改进方案也都还存在着比较大的缺陷.例如,非最优路由、隧道聚集、切换时延、丢包等.因此,如何把 IP 组播和移动相结合,为移动节点提供组播应用,是一个值得深入研究的问题.

本文综合研究和分析了当前在移动环境中进行 IP 组播的各种方案,以移动特有的问题为背景,研究如何综合考虑在组播应用中支持移动节点,并分析了今后的研究方向.第 1 节介绍有关基本概念,包括 IP 组播的基本概念以及移动 IP 的基本概念.第 2 节介绍移动环境中进行 IP 组播的概况,包括移动环境中 IP 组播面临的新问题、移动组播算法的评价标准和移动组播算法的研究概况.第 3 节讨论现有的主要移动组播协议,并对这些协议的优点和缺点进行综合评价.第 4 节着重针对可靠性问题,介绍了移动环境中可靠组播面临的新问题、目前主要的解决方案以及研究现状.第 5 节讨论今后在移动环境中进行 IP 组播的研究方向.第 6 节对全文进行总结.

1 基本概念

1.1 IP组播

IP 组播模型最先由 Stephen Deering 提出来[10].Internet 中 IP 组播模型主要包括 3 个方面:

- 兼容 IP 服务.使用 UDP(user datagram protocol)协议[19]传送组播包,提供尽力发送(best-effort)服务.
- 开放的组.组播源节点无须知道组播组成员的信息,也不要求一定是组播组的成员.
- 动态的组.任意节点可以随时加入或离开组播组.

当主机希望加入或者退出某个组播组时,需要使用 Internet 组管理协议 IGMP(Internet group management protocol)[20].通过 IGMP 协议,本地组播路由器可以对组成员的状态进行管理.

为了将组播数据传送到所有的组成员,组播路由器之间需要建立和维护组播转发树[21].根据根节点的选择方式,组播转发树可以分为两大类:源树和共享树.源树以源(即发送者)为根在网络中建立生成树到达每个组成员,又叫做最短路径树(shortest path tree,简称 SPT).共享树方式则是在网络中选取某一点作为公共的根结点,然后建立转发树.对于所有的源节点,该组播组的数据均沿着这个转发树发送.

组播路由器使用组播路由协议建立和维护组播转发树.常见的域内组播路由协议有 DVMRP[13],MOSPF[15],PIM-SM[17],PIM-DM[18]以及 CBT[14],域间组播路由协议有 BGMP[22]等.

1.2 移动IP

IETF 的移动 IP[4,5]协议是 Internet 支持主机移动的网络层解决方案.它对下层传输媒体不作任何要求,向上层则屏蔽了主机移动的细节,因此现有 Internet 中的上层协议和应用都无须改动.移动 IP 提供了一种 IP 路由机制,使移动节点能够以一个永久的 IP 地址连接到任何链路上.它通过在合适的节点上设立路由表,最终将 IP 包送到那些不在家乡链路上的移动节点.

移动 IP 协议中定义了一些新的名词,包括家乡链路、家乡代理(home Agent,简称 HA)、外地链路、外地代理(foreign Agent,简称 FA)、通信对端等等.其中,通信对端是指与移动节点相通信的节点.

移动节点拥有两个 IP 地址.一个是家乡地址,当节点切换链路时,家乡地址并不改变.该地址主要用于标识高层连接,例如 TCP 连接.另一个地址称为转交地址,它是当移动节点在外地链路上时,由外地代理分配的临时 IP 地址,它标识了移动节点当前的物理连接位置,反映了网络当前的拓扑.

当移动节点在家乡链路时,它与固定节点一样工作,不需要使用移动 IP 的功能;在外地链路时,移动节点发送和接收数据都需要使用移动 IP 的功能,并且发送和接收采用两种不同的方式:移动节点接收数据需要通过家乡代理以隧道的方式转发数据,而发送数据则只需通过外地链路上的缺省路由器直接发送.这种方式存在着三角路由问题.移动节点可以通过向通信对端发送地址绑定信息(〈家乡 IP 地址,转交地址〉对)的方式避免三角路,进行路由优化[7].这样,通信对端可以直接通过隧道将报文发送给移动节点的转交地址.但是这种路由优化方式存在着较大的缺陷,除了需要对通信对端进行修改以外,安全问题成为该方式的主要障碍.

除了三角路由问题[7,23]以外,移动 IP 中还存在着无缝切换问题[7,8,23]、安全问题[9,23]等等有待解决的内容.

以上主要介绍的是移动 IPv4[4],而移动 IPv6[5]除了没有外地代理的概念以及发送的同时采用隧道和源路由技术这些区别以外,其基本的框架机制与移动 IPv4 都是相同的,因此,本文在后面的讨论中将不专门对移动 IPv4 和移动 IPv6 加以区别,而是默认为对二者皆适用,或者是仅需进行少量的修改即可.

2 移动环境中 IP 组播的概况

2.1 移动环境中IP组播面临的新问题

在移动环境中,组播不仅要管理动态的组成员、建立和维护组播转发树,还需要解决组成员位置动态变化的问题,这给组播组管理协议和组播路由协议都带来了影响,需要根据移动这种特殊的环境对协议进行相应的修改.因此,移动环境中的 IP 组播面临着一系列新的挑战.

(1) 现在 Internet 中使用的组播路由协议,如 DVMRP,MOSPF,CBT,PIM 等,它们在建立组播转发树时通常都假设其组成员是静态的,而没有考虑组成员位置动态变化的情况.每当成员节点移动时就重新计算和建立组播转发树将会引入过多的处理开销和协议开销,引发组播路由协议的收敛性问题,并且会影响组播转发的稳定性;如果保持组播转发树不变,则又会带来路径非最优、路由冗余等问题,甚至导致错误转发.

(2) 当移动节点作为组播的源节点时,特别是对于源树方式,源节点的改变将会引起整个组播转发树的重建,不仅开销非常大,而且在新的组播转发树建立之前,源节点向组播组成员发送的组播数据流会发生中断.

(3) 组播组成员的切换时延相对较大.这里,时延不仅包括网络链路间切换的固有时延,有时还会包括重新加入组播组以及建立组播转发树的时延,导致切换时延大大增加,由此带来严重的丢包问题,影响了组播的应用.特别是当节点移动速率较快、频繁发生切换时,组播应用的性能将会受到严重的影响.

(4) 在移动环境中,IP 组播存在着较严重的丢包问题.其原因包括:移动节点常常使用链路质量相对较差的

无线链路,移动节点的切换时延导致组播包的丢失,以及切换过程中引入带来的“同步丢失”[24]等问题.

(5) 由于无线链路的链路质量相对较差,因此,移动还给组播带来了比较严重的异构性问题.如果不能很好地加以解决,那些质量差的无线链路将会成为整个组播应用的性能瓶颈.

(6) 移动环境中的 IP 组播还可能遇到外地链路没有支持组播的路由器、发生“隧道聚集”[25](将在本文第 4 节中详细加以介绍)、区域内组播地址重复等其他多种问题.

以上这些问题和困难都是静态环境中的组播所不曾遇到的,因此需要对现有的组播方式以及协议进行分析和研究,适当地加以修改,使其能够适应移动环境的特性.

2.2 移动组播算法的评价标准

定义 1(移动组播(mobile multicast)). 为简单起见,我们把组播和移动相结合、在移动环境中进行 IP 组播的机制称为移动组播.

相应地,我们可以定义移动组播算法、移动组播协议等相关内容.

移动组播算法和协议的评价标准[25]主要包括以下内容:

- **可扩展性**:当组播组成员中移动节点的数量增多时,不会使组播的性能发生严重下降.
- **高效**:不会由于支持移动而给 IP 组播的应用引入过多的开销.这些开销主要包括组播组管理的开销、组播转发树维护的开销以及防止切换时丢包的开销.
- **鲁棒性**:组播应用不会由于节点的移动而受到影响(例如发生中断),或者影响很小.
- **与具体路由算法无关**:应尽量做到与具体的组播路由算法无关.
- **简单**:应尽可能地简单,从而能够通过引入尽可能少的修改实现与现有 Internet 协议和机制的互操作.
- **可靠性**:移动节点发生切换时,特别是快速切换时,不会引入组播包的丢失.

2.3 移动组播算法的研究概况

移动 IP 协议在为单播路由提供支持的同时,它为组播提出的双向隧道(MIP-BT)和远程加入(MIP-RS)这两种基本方式也成为移动组播算法的基础.不过这两种算法都还存在着较大的缺陷,无法较好地解决移动环境中组播所面临的新问题,因此,以移动 IP 的解决方案为基础,IETF 和 IRTF 都投入了大量的精力研究移动环境中的 IP 组播问题[24~34].目前的研究主要集中于对这两种算法中存在的缺陷进行改进,或者对这两种算法加以综合,提高整体性能.例如,MoM[28]协议主要解决隧道聚集问题,MobiCast[29]协议通过引入分层的思想来解决快速切换问题,而 MMROP[24]则主要针对切换时丢包问题提出了解决方案.但是,这些方案或协议都只是部分地解决了移动环境中 IP 组播所面临的新问题,迄今为止,仍然没有一个全面而高效的解决方案.

3 移动组播协议研究现状

本节首先介绍移动 IP 中的“双向隧道”和“远程加入”两种移动组播算法,并详细说明了它们所存在的缺陷和不足,然后介绍现有的以这两种算法为基础的主要移动组播协议,并分析了每种协议的优缺点.最后,对这些算法和协议进行了综合比较.

3.1 移动IP中的移动组播算法

3.1.1 双向隧道(bi-directional tunnel,简称 MIP-BT)

在该算法中,移动节点及其家乡代理之间需要建立双向隧道,移动节点通过双向隧道加入/退出组播组,并且通过该隧道发送和接收组播包,因此,这里要求移动节点的家乡代理同时也是一个组播路由器.

当移动节点作为组播接收者的时候,它通过隧道向家乡代理发送 IGMP 报文,请求加入,当家乡代理接收到 IGMP 报文以后,将该移动节点加入到组播组中,然后组播路由协议建立到家乡网络的组播转发树.在真正转发组播包时,组播包首先被转发到家乡网络,由家乡代理再将组播包通过隧道以单播的方式发送给移动节点.

当移动节点作为组播发送者的时候,移动节点首先通过隧道将组播包发送给家乡代理,然后由家乡代理负责通过组播转发树以组播的形式发送该组播包.

该算法的优点是将节点的移动性隐藏了起来,移动对于组播协议来说是透明的,不会给组播带来额外的负担.特别是对于源树方式的组播路由协议(如 DVMRP,PIM-DM,MOSPF),在组播发送者移动的情况下,不需要重新计算组播树,减少了计算和通信负担.

但是,双向隧道算法同时也存在着比较严重的缺陷:

(1) 该算法使用的是三角路由,远非最优路由,因此链路开销较大.特别是当移动节点远离家乡网络且加入到外地链路的本地组播组时,该算法引入的额外开销将非常显著,并且对于像视频会议这种对链路带宽要求较高的组播应用,可能会由于外地网络与本地网络之间的链路质量问题而无法应用于移动节点.

(2) 在该算法中,家乡代理以单播的形式通过隧道为每个移动节点转发组播包.这样,当家乡代理有多个对应的移动节点在同一个外地链路时,每个移动节点都会通过家乡代理得到组播包的一个拷贝.这样,外地代理将从不同的隧道接收多个重复的拷贝,因而导致"隧道聚集问题"[25].如图 1(a)所示,外地代理 FA 通过多个隧道接收同一个组播包的多个拷贝,并且在外地链路中以单播的形式递交给每个移动节点.显然,这种方式的效率很低,链路带宽的浪费也很严重.

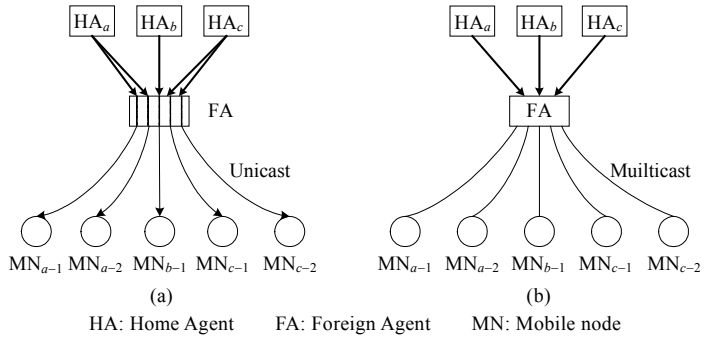


Fig.1 The tunneling convergence problem

图 1 隧道聚集问题

(3) 可以对双向隧道算法加以改进,家乡代理根据外地代理建立组播隧道,并且外地代理以链路级组播的方式转发组播包.这样就解决了同一个家乡代理向外地代理建立多个隧道转发相同组播包的问题,同时也提高了链路的利用率.但是即使改进后,当外地链路中有多个移动节点属于相同的组播组,并且这些移动节点来自不同家乡网络的时候,还是会出现多个家乡代理分别通过隧道向外地代理传送相同组播包的情况以及外地代理向移动节点组播重复数据的问题,如图 1(b)所示.

(4) 家乡代理成为"失效集中点"(central point of failure)[34].家乡代理的处理任务以及负载会随着它所服务的移动节点数量的增多而显著增加,导致组播转发效率降低,并且增加了错误发生的概率.特别是当家乡链路中同时有多个组播源,并且组播转发树采用源树方式时,由于这些组播树都是以家乡代理为根节点,因此家乡代理的出错将导致多个组播应用的中断,家乡代理因此成为失效集中点.

(5) 在这种算法中,组播在某种程度上已经演变成了单播的形式.

3.1.2 远程加入(remote subscription,简称 MIP-RS)

在该算法中,移动节点改变所在网络以后,每次都是重新加入到组播组中,并重新计算与之对应的组播树.移动节点即使是在外地链路,其组播应用的工作方式也都与固定的节点相同.

该算法最大的优点在于它非常简单,可以直接使用现有的组播协议,无须建立任何隧道,组播数据也无须进行任何封装和解封装,因此不会有隧道聚集问题.它的另一个显著的优点在于,组播包能够沿着最优路径进行转发,不存在三角路由问题.

但是,该算法同样存在着很多不足之处:

(1) 当移动节点作为组播源时,该算法只适合于共享树.因为对于源树,由于需要重新计算和建立整个组播转发树,因此会引入过多的协议开销,同时还会引发组播路由协议的收敛性问题以及组播转发的稳定性问题.

(2) 当移动节点作为组播接收者并发生切换时,由于存在组播组的重新加入过程以及组播转发树的更新过程,因此切换时延相对较大,从而会导致较多的组播包丢失,影响了组播应用的可靠性.特别是在节点快速移动、频繁切换的情况下,组播组的管理以及组播转发树的维护都将有过多的开销和负担.

(3) 即使切换可以做到非常迅速,切换时延几乎为 0,但是由于网络的动态性,各个子网接收组播包的时延不同,因此仍然产生移动环境中特有的"同步丢失"(out-of-synch problem)[24]问题,所以会导致包丢失问题的产

生.如图 2 所示,在同一时刻,子网 1 和子网 2 中接收到的组播包序号分别为 3 和 6,这时,当一个移动节点从子网 1 移动到子网 2 之后,即使切换时延可以忽略不计,该移动节点仍然会丢失序号为 4 和 5 的组播包.

(4) 当移动节点同时是多个组播组的成员时,移动切换过程中需要对它所加入的每个组播组进行剪枝、重新加入,这将极大地消耗移动节点的能量(如电池),限制了移动节点的组播应用.

因此,远程加入算法适合于节点移动的速率相对较低、能够保持较长静止状态的情况.

3.2 其他改进方案

3.2.1 MoM (mobile multicast protocol)

MoM[28]算法以双向隧道算法为基础,主要是针对隧道聚集问题提出了改进.算法引入了“代表组播服务提供者”(designated multicast service provider,简称 DMSP)的概念,目的在于避免通过隧道向同一个外地代理转发重复的组播包.外地代理为每个组播组从一组家乡代理中选择一个作为 DMSP,只有 DMSP 与外地代理之间建立隧道并转发组播包.这样,对于每个组播包,外地代理只会接收到它的一个拷贝.

相对于双向隧道算法,MoM 提高了移动组播应用的可扩展性,并且随着移动组播成员的增多,其性能有明显的提高.

但是,由于 DMSP 是移动节点家乡代理的代表,因此 MoM 也存在着三角路由问题.另外,当因节点移动而改变外地代理以后,新、旧外地代理都需要重新计算 DMSP,以确定是否需要重新进行选择,这给网络增加了处理开销.而且一旦需要重新选择 DMSP,就又会带来 DMSP 切换问题[30].DMSP 切换主要发生在两种情况:一种情况是新的移动节点加入到外地链路中,并且它的家乡代理更加适合作为 DMSP;另一种情况是 DMSP 作为家乡代理所对应的所有移动节点都离开了该外地链路.当移动节点发生切换时,它的家乡代理一般都能很快地知道新的外地代理,从而得到新的 DMSP 的信息,然而原外地代理却要等到超时发生之后才知道移动节点发生了切换,然后再重新选举 DMSP.在选举得到新的 DMSP 之前,没有家乡代理该向它转发组播包.这样,在切换过程中,外地链路中属于该组播组的所有移动节点都将丢失组播包.因此,MoM 在双向隧道算法的基础上又引入了切换丢包问题.而且,DMSP 的切换不仅影响了它自己对应的移动节点,原外地链路中那些由它服务但属于其他家乡代理的移动节点也都会出现组播包丢失的问题.特别是在组播组成员比较少的情况下,DMSP 切换发生的频率会更高.

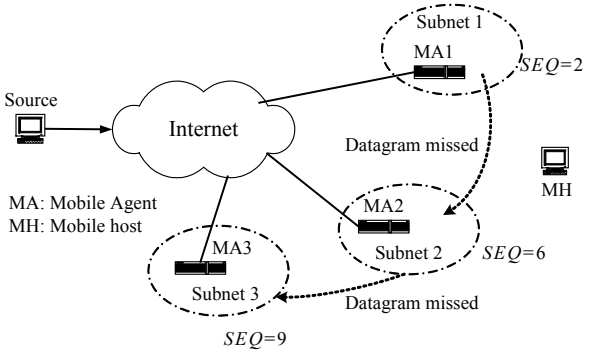


Fig.2 The out-of-synch problem
图 2 同步丢失问题

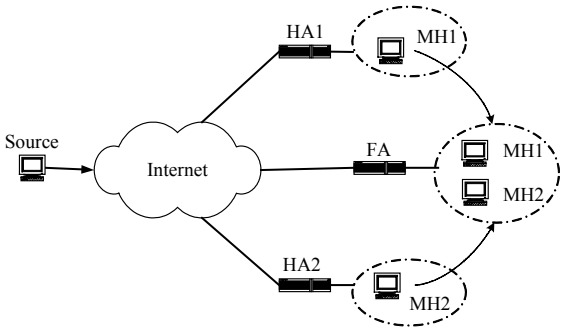


Fig.3 The DMSP handoff problem in sparse mode
图 3 稀疏模式的 DMSP 切换问题

如图 3 所示,移动节点 MH1 和 MH2 都远离家乡网络,因此,无论家乡代理 HA1 和 HA2 中的哪一个作为 DMSP,都需要建立很长的隧道.而且由于每个移动节点的家乡代理都不同(稀疏模式),因此,任何一个移动节点的切换都会引发 DMSP 切换的发生.

3.2.2 RBMoM (range-based MoM)

该方案[30]在 MoM 的基础上进行了改进,其中心思想在于寻求最短转发路径和频繁重建组播树之间的折衷,使得组播包总是能够以“接近”最优的路径进行转发,并且无须为维护组播树花费过多的开销.RBMoM 为每个移动节点选择一个组播家乡代理(multicast home Agent,简称 MHA),由它负责通过隧道把组播包转发给移动

节点的外地代理.每个移动节点只能有一个 MHA.RBMoM 将“服务范围”引入到 MHA 中,MHA 只能为那些在其服务范围内的外地链路中的移动节点服务,一旦移动节点离开了这个服务范围就需要重新选择 MHA,即进行 MHA 切换.因此,MHA 会随着移动节点位置的变化而动态地变化.最初的时候,MHA 就是家乡代理.

MHA 切换的具体方式如下:移动节点的家乡代理记录了该节点当前 MHA 的信息,当节点移动到一个新的外地链路时,新的外地代理从家乡代理处获得 MHA 的信息,然后依此计算出它与 MHA 之间的距离.如果距离大于 MHA 的服务范围,则需要重新选举 MHA.比较简单的方式是直接指定新的外地代理作为新的 MHA.新的 MHA 需要加入到组播组中,相应地更新组播转发树,同时通知移动节点的家乡代理更新 MHA 的信息.如果移动节点仍然在 MHA 的服务范围之内则不需要作任何改动,新的外地代理只需与 MHA 建立联系即可.

如图 4 所示,假设 MHA 的服务范围为 1.节点发生移动后,如果它离开了原 MHA 的服务范围,就需要重新选择 MHA,例如 MHA′.

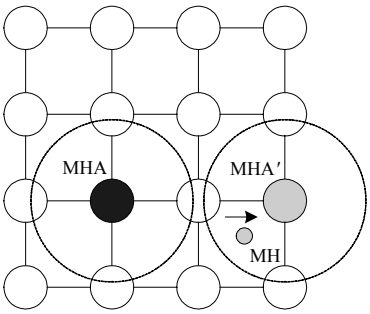


Fig.4 Select the new MHA
图 4 选择新的 MHA

MoM 和远程加入算法实际上是 RBMoM 方式的两种极端情况:当服务范围无穷大时,RBMoM 实际上是 MoM,此时 MHA 就是移动节点的家乡代理,并保持不变;而当服务范围为 0 时,RBMoM 演变为远程加入算法,此时 MHA 就是移动节点的外地代理,移动节点改变外地链路后,其 MHA 也需要相应地改变.

由于是一种折衷算法,RBMoM 相对于远程加入算法,减少了组播转发树更新的频率,从而降低了组播树的维护开销;同时,它的组播转发路径是接近最优的,与双向隧道算法相比有了较大改进.因此具有较好的协议性能,而且在 RBMoM 方式中,MHA 的服务范围可以根据移动节点的数量和移动特性(如移动速率)进行相应的控制,增强了对网络的适应性.

但是,RBMoM 中仍然存在 MHA 的切换问题以及切换丢包问题.另一方面,为 MHA 引入服务范围虽然带来了灵活性,但是并没有提出如何根据网络情况选择服务范围,从而使移动组播应用的性能达到最优的方案.如果服务范围选择不当,RBMoM 可能退化为 MoM 或远程加入算法.最后为了动态地选择服务范围,MHA 和外地代理还需要记录节点移动的有关特性.

3.2.3 MobiCast

该方案[29]适用于小型无线蜂窝网络.由于规模比较小,因此具有节省移动设备收发器的能源、数据吞吐率较高、能够获得移动节点更准确的位置信息以及更加有效地使用无线频率等优点.每个无线蜂窝网络有一个基站(base station,简称 BS),它作为移动节点的网关为移动节点提供连接 Internet 的服务.

MobiCast 中最明显的特点就是引入了分层的移动管理,把节点的移动性与主要的组播转发树相分离.这一点和 Micro-Mobility[35,36]的思想类似,即把网络对移动的支持方式分为 macro 和 micro 两级,在 macro 中采用移动 IP 机制,而在 micro 层则采用 Micro-Mobility 的有关机制.

MobiCast 把物理上相邻的多个无线蜂窝网组成一个区域,并提出了区域外地代理(domain foreign Agent,简称 DFA)的概念.每个区域对应于一个 DFA,由它负责移动节点组播包的发送和接收.例如,如图 5 所示的校园网络.该网络中可以只有一个 DFA,它为校园网中所有的移动节点提供组播服务.当移动到一个新的外地区域以后,移动节点首先向该区域中的 DFA 注册,并把 DFA 的 IP 地址作为自己的转交地址通知给家乡代理.当移动节点作为组播成员接收组播包时,由 DFA 代表移动节点加入到组播组,同时,DFA 在域内通过使用另一个组播地址——翻译组播地址,向区域中所有加入到组播组的移动节点以组播的方式转发组播包.为了实现快速切换并避免切换时带来的组播包丢失问题,不仅为移动节点服务的基站需要加入到该翻译组播组,DFA 中所有其他的基站也都要加入到这个翻译组播组中,不过,只有移动节点当前的服务基站向移动节点转发组播包,其他基站只是缓存最近接收到的组播包,以便在移动节点发生切换时能够快速地将组播包传送给移动节点.

例如在图 5 中,粗线表示了翻译组播组的数据从 DFA 转发到各个基站的路径.基站 BS1～BS4 都加入到该翻译组播组中,因此不论移动节点向左或者向右移动,它都能快速地从 BS1 或 BS3 处补充切换时丢失的组播包.

MobiCast 的优点在于,通过引入域的概念以及使用 DFA 把组播进行分层管理,对域外屏蔽了节点的移动性,因此节点在域内切换时无须更新组播转发树,实现了域内节点的移动对域外透明.同时,MobiCast 在域内通过使用翻译组播组在域内实现了快速切换,并且使切换丢包达到最低.另一方面,由于在域内 DFA 使用翻译组播地址对数据以组播的方式进行转发,这样 DFA 就无须维护和跟踪域内每个移动节点的具体物理位置,减小了控制开销.最后,MobiCast 中移动节点的组播包转发路径是接近最优的,有着较好的网络带宽利用率.

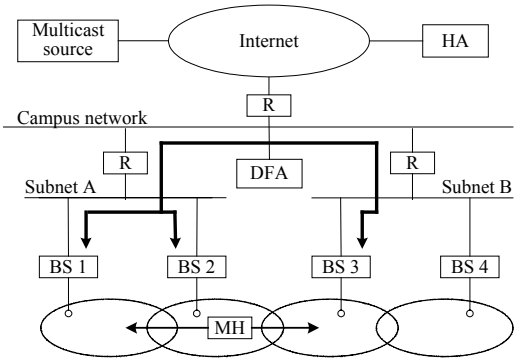


Fig.5 The handoff inside DFA
图 5 DFA 内的切换

但是 MobiCast 并没有提出移动节点在域间切换时的处理方案,只是简单地沿用远程加入算法,因此,远程加入算法的缺点在MobiCast的域间切换过程中同样存在.另外,由于域内所有基站需要加入到所有的翻译组播组,因此会有过多的处理开销和带宽浪费,也严重增加了基站的负担.

3.2.4 MMROP (mobile multicast with routing optimization)

MMROP[24]以远程加入算法为基础,并针对其中存在的丢包情况严重的问题提出了改进方案,目的在于使改进后的方案既能保持远程加入算法中使用最优路由的优点,又把切换时的组播包丢失问题减小到最低.

MMROP 的基本思想是,在远程加入算法中引入隧道机制,当移动节点发生切换时,由旧的代理补充切换时丢失的组播包到新的代理中,从而使组播包丢失问题得到解决.MMROP需要在移动代理(家乡代理和外地代理)的移动管理表格中增加与组播有关的表项.如图 6 所示,移动代理维护的表格中除了包括管理单播应用的表项,如 MH_A～MH_C 以外,还包括管理组播应用的表项,如 G_A～G_C.每个组播管理表项包括 4 部分内容,即 Group ID(组播组标识)、Cache(缓存组播包)、Serving List(记录链路中加入到该组播组的移动节点)以及 Tunneling List(记录那些曾经在该链路进行过注册,但现在已经离开,并请求该移动代理对丢失的组播包进行恢复的移动节点.同时,链表中还需记录需要恢复的组播包的序列号).

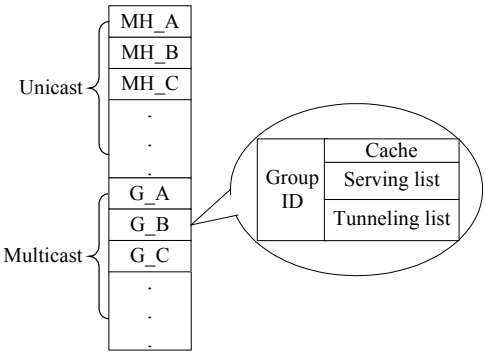


Fig.6 The mobility management table in the mobility Agent
图 6 移动代理的移动管理表格

当移动节点作为组播组的接收者时,在移动到新的链路以后,需要向新的外地代理发送IGMP消息请求加入组播组(设为 G),然后外地代理代表移动节点加入到组播组 G.上述过程与远程加入算法相同,所不同的是,新的外地代理需要为组播组 G 建立或修改相应的管理表项,把移动节点加入到 Serving List 中,并且暂存新接收的组播包到 Cache 中.与此同时,移动节点需要检查新老链路中组播包的序号差.如果 Seq_old≥Seq_new,则移动节点向原移动代理发送离开消息,同时指明序号偏移量为 0;否则,移动节点在向原移动代理发送离开消息的同时指明组播包偏移量为[Seq_old, Seq_new],原移动代理则通过隧道的形式向新移动代理补充这部分组播包.

MMROP 的优点是能够使移动节点组播包的转发路径维持最优,同时,MMROP 还解决了切换丢包问题,鲁棒性较高.另外,MMROP还具有简单性和灵活性的优点,它只需要扩充移动IP协议中移动代理的功能,而无须修改现有的组播路由协议.

MMROP 的缺点是,它以远程加入算法为基础,却并没有解决该算法中组播组管理开销大、组播转发树更新频繁的问题,这在组播是稀疏模式时显得尤为严重.另外,当新老链路中组播包序号差别较大时(例如,节点从低速网络移动到高速网络),移动代理和移动节点都需要开辟较大的空间缓存组播包,这对资源相对受限的移动节点来说是不合适的.再者,当多个移动节点同时发生移动时,在新老移动代理之间还是会出现隧道聚集问题.最

后,MMROP 没有对移动节点作为组播源的情况提出解决方案,而只是简单地沿用了双向隧道算法.

3.2.5 其他方式

还有其他一些移动组播算法或协议.例如,MMA(multicast by multicast Agent)[31]方案引入了两个新的功能实体:组播代理 MA(multicast Agent)和组播转发者 MF(multicast forwarder).MA 为移动节点提供组播服务,MF 则负责向其他网络的 MA 转发组播包,MA 收到组播包之后,在其自身的网络中以一般的组播方式再发送出去.每个 MA(设为 MA1)对应于一个 MF,它是离 MA1 最近,并且属于组播转发树的 MA.当 MA 所在网络属于组播转发树时,MA 就是其自身的 MF,移动节点直接从这个外地网络中接收组播数据;否则,MA 选择一个最优的 MF 通过隧道向其转发组播数据,然后再将数据发送给移动节点.

C. Jelger[32]等人则提出了 MLD-proxy-capable-HA 的方案.该方案主要是从组播组管理协议,特别是 IPv6 中 MLD 协议的角度出发,针对移动环境对 MLD 进行了修改.该方案定义了一种新的 MLD 消息类型——组播组保持类型,用于移动节点和家乡代理之间.当节点移动到新的外地链路以后,如果链路没有加入到组播转发树中,移动节点则通过 MLD 协议通知外地代理加入到组播组,同时向家乡代理发送 MLD 消息,请求它通过隧道转发组播包.当外地代理加入到组播组之后,移动节点就直接从外地链路接收组播包,同时向家乡代理发送“组播组保持”类型的 MLD 消息,这时,家乡代理停止向移动节点转发组播包,但是仍然保持组成员的状态,以便于移动节点再次切换时能够向其转发组播包.因此,家乡代理也需要成为组播组的成员.

Hrishikesh Gossain[33]则主要针对移动节点作为组播源的情况提出了解决方案.在该方案中,移动节点发送组播包是通过它与家乡代理之间的单向隧道完成的,由家乡代理真正以组播的方式再将组播包进行转发;而移动节点对组播包的接收则直接采用远程加入算法.该方案实际上是移动 IP 中双向隧道和远程加入算法的结合,通过单向隧道避免了源节点移动对组播转发树的影响,同时,通过远程加入算法保证组播包接收采用的是最优路径.为了解决切换丢包,该方案还提出,在移动节点发生切换且外地链路加入到组播转发树之前,移动节点和家乡代理之间建立起短暂的双向隧道,由家乡代理通过隧道补充切换时丢失的组播包.

3.3 各种协议的比较(见表1)

Table 1 Comparison of mobile multicast protocols

表 1 移动组播协议比较

Mobile multicast protocol	Optimal routing	Reliability	Join and graft delays	Protocol overhead	Tunneling convergence problem
MIP-BT	No	No	Minimal	Minimal	Serious
MIP-RS	Yes	No	Big	Big	No
MoM	No	No	Minimal	Little	Minimal
RBMoM	Nearly optimal	No	Little	Little	Minimal
MobiCast	Yes	Handoff is reliable within area, not reliable between area	Big when handoff between area, minimal when within area	Great	Minimal
MMROP	Yes	Yes	Big	Big	Minimal

4 移动环境中的可靠组播

可靠组播协议[37,38]有很强的针对性,大多数都是为解决某些特定的问题而提出来的.这是因为在不同的应用中,可靠性的含义相差较大.一般来说,可靠组播可以定义为保证每个接收者都能正确地接收到所有的组播包.在更广的意义上,可靠组播还要求组播包按序到达、进行拥塞控制等.本节,我们主要讨论在移动环境中如何保证成员正确地接收到所有组播包,而对于组播拥塞控制等问题,则在其他文章中作进一步的阐述.

当移动节点作为组播组的接收者时,由于它常常使用无线链路,其最明显的特征就是受限的链路带宽和较高的错误率.J.Kuri[39]等人的研究显示,在假设有线链路完全可靠的情况下,组播包重传的平均次数随着无线节点的增多而迅速增加.另外,移动环境中还存在“同步丢失”等问题,因此,在移动环境中更加需要使用可靠组播对组播应用提供正确性保证.

4.1 移动给可靠组播带来了新的问题

移动给可靠组播算法带来了一些新的问题,除了已经提到的切换丢包问题之外,移动还会对可靠组播的基本工作方式带来比较严重的影响[40,41].

在可靠组播中常常使用自动重发请求(automatic repeat request,简称 ARQ)和前向纠错(forward error correction,简称 FEC)两种机制[42].ARQ 是一种“按需重传”的方式,包括错误检测、错误反馈和错误恢复这 3 个过程.由于错误恢复需要交互一定的控制信息,因此时延较大,同时也增加了网络负担.FEC 则是通过在数据中增加冗余信息来实现对错误的检测和恢复,无须交互控制信息,也不需要对数据进行重传,错误恢复的时延比较小.但是 FEC 需要计算冗余信息,从而增加了处理器的计算开销,同时,冗余信息也增加了网络的流量.FEC 最大的问题还在于不能保证完全可靠.

在可靠组播的实现中一般都采用 FEC 和 ARQ 相结合的方式,而且对于 ARQ 机制,由于基于层次化(一般为树状结构)方式在可扩展性和效率上都有明显的优势[37],因此它是现在可靠组播研究的主要方向.

但是,可靠组播的这些基本机制几乎都没有考虑为移动节点提供组播应用的情况,移动环境将给这些机制带来一系列的新问题[40,41].下面以层次化方式为例加以说明.

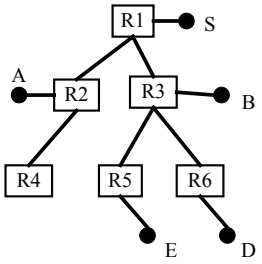
基于层次化的方式一般采用树状结构(称为 ACK 树,发送者作为根节点),除了根节点以外,ACK 树中还有其他节点也承担了可靠性保证的工作.组播组接收者被分成多个本地组,每个本地组有一个组长,负责处理组内的错误反馈消息和组播包的重传,从而确保组内的接收者能够正确地接收到所有组播包.这样,从发送者(根节点)到接收者在 ACK 树上形成了多级形式,每个组长只对它所在本地组的内部成员负责,同时,它也作为组成员由上一级的组长对其进行管理.在 ACK 树中,组长可以是指定的某些特定节点,也可以在本地组内动态选择.

层次化方式的难点在于 ACK 树的建立和维护.ACK 树是逻辑上的树,它与组播转发树之间的一致性直接影响了可靠组播的性能.另外,如何安排和指定负责错误恢复的路由器或主机(称为 replier,应答者,如本地组的组长)也是这种层次化方式的难点.

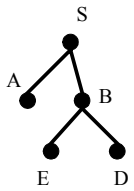
(1) ACK 树的建立和维护

在层次化的方式中,接收者的频繁移动将会给 ACK 树的建立和维护带来困难.如图 7 所示是一个分层可靠组播的拓扑图,图 7(a)图中的方框节点表示组播路由器(为了方便起见,它同时也作为移动节点的家乡/外地代理),圆节点表示主机,S 代表组播的发送者,A,B,D,E 是组播组的接收者,并且 D 和 E 是移动节点.图 7(b)表示了层次化方式中建立的逻辑 ACK 树.下面我们仅考虑远程加入方式中节点移动性对可靠组播的影响.

当移动节点 D 移动到 R4 网络以后,它通过 R1−R2−R4 的链路接收组播包.但是由于在逻辑 ACK 树上 D 的父节点是 B,那么当向 D 的传送出现错误时,它需要向 B 请求重传.这时,因为 S 到 D 和 S 到 B 的传输路径完全不同,因此 D 节点发生的错误和 B 节点的链路状况没有任何联系.考虑到错误发生的相关性,A 更适合做 D 的逻辑父节点.因此应该动态地调整逻辑 ACK 树,让该树中的父子关系更加适合当前的网络拓扑状况.



(a) Multicast session on a sample network
(a) 一个示例网络中的组播部分



(b) Corresponding logical tree
(b) 相应的逻辑树

Fig.7 Topology of a layered reliable multicast
图 7 一个分层可靠组播的拓扑图

但是,现有的可靠组播方案并没有提供通知逻辑 ACK 树进行重建的机制.而且对于某些可靠组播协议,如 RMTP-II[43],它的 ACK 树是手工配置的,因此更不能适应组播组成员和网络拓扑的快速变化,也就不能直接应用到移动环境中.

(2) Replier 的设置

在层次结构的 ARQ 中,replier 一般从接收者中选取,或者由专门的服务器充当.当接收者移动到另一个网络以后,它需要重新选择 replier.在 replier 从接收者中选取的情况下,组播成员的移动将会使得它前后所在的网络

都需要重新选取 replier,这不仅加重了组播的处理开销,而且也增加了网络的附加流量.

如果由专门的服务器担任 replier,由于节点能够任意移动,怎样对 replier 进行合理布局,从而使得所需的服务器数量最少,并且不会让 ACK 树的性能明显下降,成为一个难点问题.一种解决方法是让组播路由器同时作为 replier,这样,逻辑 ACK 树与实际的组播转发树相同,从而可以得到最好的路由性能,而且也不需要额外增加服务器.但是,这种方法只适合于边缘路由器,不适合主干路由器.因为主干路由器需要为很多组播组服务,所以,如果同时还负责每个组播组的错误恢复,则大量的错误反馈、重传等处理工作将占用较大比例的计算资源和带宽资源,削弱了主干路由器的快速转发这一主要功能.另外,暂存组播包将过多地占用主干路由器的内存空间.

(3) 本地恢复

在某些树状层次结构的 ARQ 中,本地恢复通常由那些与检测到错误的主机相临近的接收者来完成,这要求组播的接收者都保存组播数据,并且在必要的情况下对某些数据进行重传.这种方式不适合移动的环境,因为移动节点体积较小,不能要求它保存所有的组播包,而且处理反馈信息和进行重传会消耗移动节点非常有限的链路带宽.

另外,在 ACK 树中,replier 接收到所有本地组成员的应答之后,就会释放相应的组播包,并且向它的父节点发送聚合 ACK 消息,表示该路分支已经正确地接收到了组播包.这样,通过一级级地沿着 ACK 树向上发送聚合 ACK 消息,最终发送者能够根据聚合 ACK 消息释放相应的组播包.但是,当节点从 ACK 树的一个本地组移动到另一个时,由于网络的动态性,各个组接收组播包的时延不同,移动节点可能会向 replier 请求重传它已经释放了的组播包.在这种情况下,replier 需要向其父节点请求数据,而在此之前,replier 已经向其父节点发送了聚合 ACK 消息,这种前后矛盾将导致错误的产生.

(4) 移动节点作为发送者

当移动组播采用远程加入算法并且移动节点作为组播源的时候,组播包的源 IP 地址是移动节点的转交地址.当该组播源移动到新的外地链路以后,转交地址改变,如果此时重建逻辑 ACK 树,那么接收者在它移动之前所发送的组播应答消息都会丢失,或者错误地传送到获得了原转交地址的其他节点.同时,由于频繁重建逻辑 ACK 树,给网络以及组播成员带来较多的负担.但是如果不重建逻辑 ACK 树,则会导致路由性能下降,使某些链路(如组播源及其家乡代理之间的隧道)成为系统性能的瓶颈.

正是由于移动引入了这些新问题,因而如何为移动环境中组播应用提供可靠性保障,成为近来重要的研究方向.

4.2 已有的方案和不足

4.2.1 HVMP 和 RelM

HVMP(host view membership protocol)[26]方案中使用移动支持站 MSS(mobile support station)为移动节点提供可靠组播.MSS 保留所有的组播数据,这样,即使是 MSS 当前的所有本地节点都已经正确接收到组播包,刚刚移动到该网络链路的节点也能很快地从 MSS 处接收到所需的组播数据.

RelM(reliable multicast for mobile networks)[44]则使用了分层(3 层)方式,在 MSS 之上增加了监督主机 SH(supervisor hosts).SH 负责收集 ACK 信息,并把这些信息告知发送者.发送者根据接收到的 ACK 信息显式地向 SH 或 MSS 发送“删除”消息,通知这些节点可以安全地释放某些组播包.但是,该方案要求组播源以及网络中的固定部分为支持移动而处理专门的协议数据,因此要求将固定接收者和移动接收者分别对待.这样,节点的移动性相对于可靠组播来说不再透明,因此可扩展性较差.

HVMP 和 RelM 都只是考虑了移动代理从固定网络中接收到组播数据然后传送给移动节点这一方面,集中于研究移动节点在切换时和移动代理的交互,以及移动代理相互之间的交互.但是它们都没有考虑移动节点与原有的可靠组播相结合以后,系统整体性能的情况.

4.2.2 逻辑环方式

在这种方式[45]中,基站加入到组播组,并且组成一个逻辑环,同时有一个令牌在这个环上流动.通过令牌,每个基站都能得到一个最大的序列号,它表明在此之前所有的组播包已经被所有基站对应的所有移动接收者正

确接收.这样,基站就能安全地释放组播包,并且不会出现移动节点错过组播包接收机会的情况.

这种逻辑环方式的优点在于,它把对移动的处理集中于移动节点的基站,对于网络中的其他节点来说是透明的.但是,这种方式太复杂,而且由于令牌需要在环中轮转,以保证为移动节点提供全局可靠性,因此存在诸如时延较大、需要较多的暂存空间以及吞吐率低等缺点.

4.2.3 RMDP (reliable multicast data distribution protocol)

RMDP[46]主要使用 FEC 和 ARQ 相结合的方式为移动节点提供可靠组播.RMDP 中主要使用 FEC,当接收到的信息不足以恢复原始数据时,RMDP 则使用 ARQ 进行错误恢复,这样,较大幅度地减少了重传发生的次数.

RMDP 对于固定和移动的环境都同样适用,且扩展性较好.但是,由于它使用软件进行编码和解码,因此处理器负担较重,导致性能下降,并且这种方式只是根据移动节点有较高的错误率这一个特点增加了 FEC 机制,并没有解决上面提到的移动对可靠组播的影响.

4.2.4 其他方式

还有其他一些支持移动的可靠组播方式[47~50],它们主要是在前面介绍的移动组播方案(如 MoM,RBMoM 和 MMP)的基础上增加了 ARQ 机制,以保证组播包的可靠传送.这里就不再一一描述.

这些移动组播方案的缺点在增加了 ARQ 机制之后仍然存在,而且这些方式也只是简单地在原有协议中增加 ARQ 机制,并没有解决上面提到的移动情况中可靠组播所面临的问题.

5 未来的研究方向

移动环境中的 IP 组播应用是一个崭新的研究领域,目前对移动组播算法和协议的研究还处于起步阶段.从本文对主要移动组播算法和协议的介绍以及最后对这些方案的对比可以看出,目前的移动组播算法或协议都还存在着较大的缺陷,需要进一步进行研究和改进.

另外,由于不同的组播应用对组播数据的传送要求存在很大的区别,如可靠性、实时性、按序到达等等,因此组播协议具有很强的针对性,需要针对不同的应用来设计不同的协议.特别是在移动环境中,由于移动节点在移动速率、能量、处理器能力、存储能力等多方面存在较大的差异,并且移动网络在带宽、可靠性等方面差别也较大,因此,移动环境中的组播应用差异就更大,相应地,很难有一种移动组播算法或协议能够适应所有的移动组播应用.同时,由于移动组播应用还需要将固定网络与移动环境结合起来综合进行考虑,因此很难确定能够适应具体应用场合的移动组播算法或协议,所以,对移动组播算法和协议还需要进行更加深入的研究.

从表 1 可以看出,在移动组播算法和协议中引入分层的机制将会带来较好的协议性能,同时也便于进行层次化的管理,因此,分层机制将是移动组播算法或协议的一个比较重要的发展方向.另外,外地代理之间的协作可以提高移动组播应用的可靠性,因此,外地代理之间以何种方式协作、在提高可靠性的同时保证协议开销尽可能地小,都将是移动组播算法或协议研究中的重点内容.

移动组播领域未来的研究还需要考虑服务质量(QoS)、安全性等方面的问题.另外,由于移动环境常常使用无线链路,因此还需要深入研究移动组播应用的可靠性问题以及移动环境与可靠组播的结合问题.

6 结 论

本文对 IP 组播在移动环境中面临的新问题进行了比较深入的分析和说明,并对现有的移动组播算法和协议进行了综述.本文在对每种移动组播算法或协议进行概述的同时,讨论了其适应范围与优越性,比较深入地剖析了这些算法或协议存在的缺陷和问题,并对现有的主要移动组播算法和协议进行了综合对比.本文还针对移动环境常常使用无线链路从而可靠性较低这一特点,着重介绍了移动环境中进行可靠组播时存在的问题以及相关的研究现状.最后,本文对移动环境中的组播及其应用进行了总结,并讨论了未来的研究方向.

References:

[1] Aarnio A, Enkenberg A, Heikkil J, Hirvola S. Adoption and use of mobile services, empirical evidence from a Finnish survey. In: Sprague R, Nunamaker JF, eds. Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on Systems Sciences. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002. 89~96.

[2] Diot C, Levine BN, Lyles B, Kassem H, Balensiefen D. Deployment issues for the IP multicast service and architecture. IEEE Network, 2000,14(1):78~88.

[3] IETF Mobile IP Working Group. http://www.ietf.org/html.charters/mobileip-charter.html.

[4] Perkins C. IP mobility support for IPv4. RFC 3344, Internet Engineering Task Force, 2002.

[5] Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility support in IPv6. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-ipv6-21.txt, Internet Engineering Task Force, 2003.

[6] Perkins C, Johnson DB. Route optimisation in mobile IP. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-optim-11.txt, Internet Engineering Task Force, 2001.

[7] Malki KE, Calhoun PR, Hiller T, Kempf J, McCann PJ, Singh A, Soliman H, Thalanany S. Low latency handoffs in mobile IPv4. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-lowlatency-handoffs-v4-04.txt, Internet Engineering Task Force, 2002.

[8] Koodli R. Fast handovers for mobile IPv6. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-fast-mipv6-06.txt, Internet Engineering Task Force, 2003.

[9] Perkins CE, Calhoun PR. AAA registration keys for mobile IP. Internet Draft, draft-ietf-mobileip-aaa-key-11.txt, Internet Engineering Task Force, 2003.

[10] Deering S, Cheriton D. Multicast routing in datagram internetworks and extended LANs. ACM Transactions on Computer Systems, 1990,8(2):85~111.

[11] Chu YH, Rao SG, Zhang H. A case for end system multicast. In: Proceedings of ACM SIGMETRICS. Santa Clara, 2000. 1~12.

[12] Varshney U. Multicast support in mobile commerce applications. IEEE Computer, 2002,35(2):115~117.

[13] Waitzman D, Partridge C, Deering S. Distance vector multicast routing protocol (DVMRP). RFC 1075, Internet Engineering Task Force, 1988.

[14] Ballardie A. Core based trees (CBT) multicast routing architecture. RFC 2201, Internet Engineering Task Force, 1997.

[15] Moy J. Multicast extensions to OSPF. RFC 1584, Internet Engineering Task Force, 1994.

[16] Deering S, Estrin D, Farinacci D, Jacobson V, Liu CG, Wei LM. The PIM architecture for wide-area multicast routing. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1996,4(2):153~162.

[17] Estrin D, Farinacci D, Helmy A, Thaler D, Deering S, Handley M, Jacobson V, Liu CG, Sharma P, Wei LM. Protocol independent multicast-sparse mode (PIM-SM): Protocol specification. RFC2362, 1998.

[18] Adams A, Nicholas J, Siadak W. Protocol independent multicast—dense mode (PIM-DM): Protocol specification. Internet Draft, draft-ietf-pim-dm-new-v2-03.txt, Internet Engineering Task Force, 2003.

[19] Postel J. User datagram protocol. RFC 768, Internet Engineering Task Force, 1980.

[20] Fenner W. Internet group management protocol, Version 2. RFC 2236, Internet Engineering Task Force, 1997.

[21] Sahasrabuddhe LH, Mukherjee B. Multicast routing algorithms and protocols: A tutorial. IEEE Network, 2000,14(1):90~102.

[22] Bates T, Rekhter Y, Chandra R, Katz D. Multiprotocol extensions for BGP-4. IETF RFC 2858, 2000.

[23] Perkins CE. Mobile networking in the Internet. Mobile Networks and Applications, ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 1998,3(4):319~334.

[24] Lai J, Liao W. Mobile multicast with routing optimization for recipient mobility. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2001,47(1):199~206.

[25] Chikarmane V, Williamson C, Bunt R, Mackrell W. Multicast support for mobile hosts using mobile IP: Design issues and proposed architecture. Mobile Networks and Applications, ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 1998,3(4):365~379.

[26] Acharya A, Badrinath BR. A framework for delivering multicast messages in networks with mobile hosts. Mobile Networks and Applications, ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 1996,1(2):199~219.

[27] Gossain H, Cordeiro CDM, Agrawal DP. Multicast: Wired to wireless. IEEE Communications Magazine, 2002,40(6):116~123.

[28] Harrison TG, Williamson CL, Mackrell WL, Bunt RB. Mobile multicast (MoM) protocol: Multicast support for mobile hosts. In: Proceedings of the 3rd Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MOBICOM). Budapest, 1997. 151~160.

[29] Cheng LT, Pink S. MobiCast: A multicast scheme for wireless networks. Mobile Networks and Applications, ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 2000,5(4):259~271.

[30] Lin Chunhung Richard, Wang KM. Mobile multicast support in IP networks. In: IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv, 2000. 1664~1672.

[31] Suh Y-J, Shin H-S, Kwon D-H. An efficient multicast routing protocol in wireless mobile networks. ACM Wireless Networks, 2001,7(5):443~453.

[32] Jelger C, Noel T. Multicast for mobile hosts in IP networks: Progress and challenges. IEEE Wireless Communications, 2002,9(5): 58~64.

[33] Gossain H, Kamat S, Agrawal DP. A framework for handling multicast source movement over mobile IP. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2002 (ICC 2002). 2002.

[34] Jelger C, Noel T. Supporting mobile SSM sources for IPv6 (MSSMSv6). Internet Draft, draft-jelger-mssmsv6-00.txt, Internet Engineering Task Force, 2002.

[35] Campbell AT, Gomez J. IP micro-mobility Protocols. ACM SIGMOBILE Mobile Computer and Communication Review (MC2R), 2001,4(4):45~54.

[36] Campbell AT, Gomez J, Kim S, Wan C-Y, Turanyi ZR, Valko AG. Comparison of IP micromobility protocols. IEEE Wireless Communications, 2002,9(1):72~82.

[37] Levine N, Garcia-Luna-Aceves JJ. A comparison of reliable multicast protocols. ACM Multimedia Systems Journal, 1998,6(5): 334~348.

[38] Towsley D, Kurose J, Pingali S. A comparison of sender-initiated and receiver-initiated reliable multicast protocols. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997,15(3):398~406.

[39] Kuri J, Kasera S. Reliable multicast in multi-access wireless LANs. Wireless Networks, 2001,7(4):359~369.

[40] Kim YK, Bahk S. Mobility and its impact on the performance of hierarchical multicast retransmission. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2002 (ICC 2002). 2002.

[41] Lai JR, Liao W. Analytical study of reliable multicast for host mobility in IP networks. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference 2001 (GLOBECOM 2001). 2001. 1683~1687.

[42] Li VOK, Zhang ZC. Internet multicast routing and transport control protocols. Proceedings of the IEEE, 2002,90(3):360~391.

[43] Whetten B, Taskale G. An overview of reliable multicast transport protocol II. IEEE Network, 2000,14(1):37~47.

[44] Brown K, Singh S. RelM: Reliable multicast for mobile networks. Journal of Computer Communications, 1998,21(16):1379~1400.

[45] Nikolaidis I, Harms JJ. A logical ring reliable multicast protocol for mobile nodes. In: IEEE 7th Annual International Conference on Network Protocols (ICNP'99). 1999. 106~113.

[46] Rizzo L, Vicisano L. RMDP: An FEC-based reliable multicast protocol for wireless environments. ACM Mobile Computing and Communications Review, 1998,2(2):23~31.

[47] Ke CA, Liao WJ. Reliable mobile multicast protocol (RMMP): A reliable multicast protocol for mobile IP networks. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2000). 2000. 1488~1491.

[48] Liao W, Ke CA, Lai WJ. Reliable multicast with host mobility. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference 2000 (GLOBECOM 2000). 2000. 1692~1696.

[49] On BW, Shin H, Choi M, Park MS. A hierarchical ACK-based protocol for reliable multicast in mobile networks. In: Tham CK, Zhang L, eds. Proceedings of the IEEE International Conference on Networks (ICON 2000). Singapore: IEEE Computer Society Press, 2000. 359~362.

[50] Chumchu P, Seneviratne A. Multi-Level reliable mobile multicast supporting SRM (scalable reliable multicast). In: IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 2002, Vol 3. 2002. 1410~1414.