

## 基于快速组播切换的分层移动组播体系结构\*

吴茜<sup>+</sup>, 吴建平, 徐明伟, 崔勇

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

### A Fast Multicast Handoff Based Hierarchical Mobile Multicast Architecture

WU Qian<sup>+</sup>, WU Jian-Ping, XU Ming-Wei, CUI Yong

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

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62785822, Fax: +86-10-62788109, E-mail: wuqian@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

Wu Q, Wu JP, Xu MW, Cui Y. A fast multicast handoff based hierarchical mobile multicast architecture. *Journal of Software*, 2006,17(1):86-95. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/86.htm>

**Abstract:** Mobile communication is playing an increasing role in our lives. Mobile users expect similar kinds of applications to static ones. Multicast not only brings attractive applications, but also has the benefit of saving scarce bandwidth in wireless environment. It would be fruitful to combine these two technologies. This paper proposes a framework to provide multicast in mobile environment called Fast Multicast Handoff Based Hierarchical Mobile Multicast Architecture (FHMM). It uses a hierarchical mobile multicast architecture to isolate the local movement from outside, and improve the stability of the main multicast delivery tree. It introduces a fast multicast handoff mechanism which can reduce handoff latency and packet loss rate for inter-domain handoff and intra-domain handoff. Furthermore, FHMM is a universal solution because it can still work even if the access network does not support multicast. Simulation results show that FHMM is effective with low packet loss rate, high multicast packet delivery efficiency and little multicast maintenance overhead.

**Key words:** mobile; multicast; fast handoff; hierarchical architecture; mobile IP

**摘要:** 移动通信在人们的日常生活中发挥着越来越重要的作用,受到了越来越多的重视.人们希望能够在移动的时候获得与静态联网者相同的网络服务,这里最主要的就是要解决移动切换和无线网络带宽受限的问题.由于组播技术不仅能够提供很多新型的网络应用,而且能够高效地实现多点传送,并有效节省网络带宽,因此移动和组播的相互融合对两者的应用和发展都会带来较大的促进.提出了在移动环境中部署 IP 组播的框架体系,即基于快速组播切换的分层移动组播体系结构(fast multicast handoff based hierarchical mobile multicast architecture,简称 FHMM).FHMM 通过分层移动组播管理将节点在域内的移动对外屏蔽,提高了域间组播转发树主干的稳定性.FHMM 还提出了快速组播切换机制,从而减少了切换延迟以及由此引发的分组丢失.另外,当节点移动到不支持组播的子网时,FHMM 仍然可以为节点提供组播服务.模拟结果显示,FHMM 具有分组丢失率低、组播分组传送效率高以及组播维护开销少等优点,是一种高效的移动组播解决方案.

**关键词:** 移动;组播;快速切换;分层结构;移动 IP

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.90104002, 60373010 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2003CB314801 (国家重点基础研究发展规划(973))

Received 2005-04-13; Accepted 2005-07-11

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

IP 组播由于具有节省网络带宽、效率高、能节省发送者自身资源等优点,以及为很多新型网络应用(如视频会议、文件分发、实时信息发布等等)提供了很好的支持,因此一直是互联网中的热点研究课题.但由于部署相对困难,一直未能得到大规模的广泛应用.另外,“随时随地连接到网络”已经成为人们日常生活和工作中必不可少的一项需求,移动技术得到了极大的关注.但由于常常使用无线网络,因此带宽受限成为最主要的制约因素之一,所以移动环境中更需要使用组播技术:组播能有效地节省无线网络带宽以及移动设备能力受限等问题,并为移动用户引入更多、更好的应用;与此同时,组播也得到了更多的部署和发展空间.

然而,在移动环境中进行组播<sup>[1-6]</sup>面临很多新的挑战<sup>[7-9]</sup>.现有组播协议都只考虑了静态的情况,并没有考虑应用于移动环境中的问题.如果移动节点 MN(mobile node)仍然按照和静态节点相同的方式进行组播,那么,当其位置发生变化后,由于使用新的转交地址,需要重新加入组播组,因此,其组成员状态和组播树分支都需要进行相应的修改,否则,节点将无法继续正常地接收组播分组.由于组播组成员状态和组播树分支的调整往往需要花费较长的时间,因此,节点的切换延迟较大,切换丢包问题也较为严重.同时,组播组和组播树的维护都将引入较大的网络负载开销和设备计算开销.因此,现有的组播协议不能很好地适应移动环境的要求.以上方式也是移动 IP<sup>[10,11]</sup>协议中提出的两种基本移动组播方案之一——远程加入(remote subscription,简称 MIP-RS)算法.

移动 IP 协议中提出的另一种基本移动组播方案称为双向隧道(bi-directional tunnel,简称 MIP-BT)算法.该算法中,MN 加入/退出组播组以及接收组播数据,都是通过家乡代理来完成的.这样,节点不论如何移动都不会影响组成员状态和组播转发树,因此也不会引入组播协议开销.但在这种方式中,MN 接收组播分组使用的路径远非最优,因此路由效率较低,存在较严重的带宽浪费问题.同时,由于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,因此成为“失效集中点”.当同一个家乡代理有多个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,导致“隧道聚集问题”<sup>[2]</sup>.这时,组播在某种程度上已经演变成了单播.

因此,不论是现有的组播协议或者是移动 IP 协议,都不能很好地解决移动环境中部署组播的问题,如何把 IP 组播和移动相结合,使组播能够在移动环境中得到更好的应用,是需要深入研究的问题.

本文将移动环境中部署组播面临的问题归结为 3 个方面,即组播开销问题、路由效率问题以及切换延迟和丢失率问题,并在此基础上,提出了在移动环境中部署 IP 组播的框架体系,即基于快速组播切换的分层移动组播体系结构(fast multicast handoff based hierarchical mobile multicast architecture,简称 FHMM).

鉴于远程加入算法更多地保留了组播的特征,能够更好地发挥组播的优势,因此,FHMM 以该算法为基础,特别针对其中的两大主要问题——由于频繁切换导致的组播开销问题以及切换延迟和丢包问题提出了解决方案.针对频繁切换问题,FHMM 将组播进行分层管理,对外屏蔽了域内成员位置的变化,保证了组播转发树主干的稳定性,减少了组播协议的开销;针对切换延迟和丢包问题,FHMM 则提出了在移动节点和接入路由器 AR(access router)\*之间进行快速组播切换的方案,从而将移动引发的组播切换延迟减少到最低,同时也减少了切换引发的组播分组丢失.另外,当节点移动到不支持组播的子网时,FHMM 仍然可以为节点提供组播服务.

本文首先介绍在移动组播方面的研究现状,并对移动环境中进行组播面临的问题进行了总结和分类.第 2 节详细介绍本文提出的 FHMM 移动组播体系结构.第 3 节对 FHMM 以及其他几种主要的移动组播算法进行模拟和分析比较.第 4 节对全文进行总结,指出了进一步的研究工作.

\* FHMM 能够支持移动 IPv4 和移动 IPv6,为统一叙述,本文没有使用外地代理 FA(foreign agent)的说法,而是直接使用了移动 IPv6 中接入路由器 AR 的概念.对于移动 IPv4,外地链路的 FA 可以是该链路的 AR,也可以是独立实体,两者在操作上略有差别,本文不再详述.

## 1 背景介绍和问题总结

### 1.1 移动切换和快速切换

网络层移动切换过程(针对单播应用)包括移动检测、IP地址配置以及绑定更新3个阶段,其切换延迟往往较大.例如,对于移动检测,移动节点的链路层通过探测等方式能够很快检测到切换,而网络层则需要通过检查接收路由器通告的情况来判断节点的切换,因此相对于链路层来说,其切换延迟较大.这种较大的切换延迟将会对那些实时性要求较高的应用带来较大的影响.

对于移动组播,若使用双向隧道算法,由于仅仅依赖于单播隧道,因此不存在专门的组播切换问题,组播的切换过程与单播相同.对于以远程加入算法为基础的方案,若节点连接的新外地网络接口已经加入到组播树,则节点不再需要等待以上3步切换过程,可以即刻通过链路层组播接收组播分组;但是,若新网络接口没有加入到组播组,则节点不仅需要等待网络层切换完成,还需要在新外地网络中重新请求加入到组播组,因此切换延迟将会更大.现有的一些方案,如MMROP(mobile multicast with routing optimization)<sup>[4]</sup>等,通过在远程加入算法中增加隧道等方式,解决了切换丢包问题,但由于没有减少切换延迟,因此,仍然无法适用于实时性要求较高的应用.

IETF提出了快速切换FMIPv6(fast handovers for mobile IPv6)<sup>[12]</sup>,它通过利用链路层触发,使得网络层能够快速检测到移动切换,并在节点仍然与原网络相连的情况下,提前配置新外地网络的转交地址,并建立临时隧道以减少切换丢包,从而实现了快速的网络层切换.但是,这种快速切换仅仅适用于单播应用.

### 1.2 移动组播现有解决方案

在移动组播算法中,最基本的就是移动IP协议中提出的远程加入算法和双向隧道算法,但是,这两种算法都存在较大的缺陷.目前,对移动组播的研究主要集中于对这两种算法中存在的问题进行改进,或者对这两者加以综合,提高整体性能上.例如,MoM(mobile multicast)<sup>[2]</sup>算法以双向隧道算法为基础,主要针对隧道聚集问题提出了改进.它引入了“代表组播服务提供商(designated multicast service provider,简称DMSP)”,目的在于避免不同的家乡代理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.因此,相对于双向隧道算法,MoM的可扩展性有了较大的提高.但MoM中仍然存在路由效率低、DMSP的选择计算开销大、DMSP切换将引起更多的分组丢失等问题.

MobiCast<sup>[1]</sup>方案将移动组播进行分层管理,网络分为macro和micro两层,macro层直接采用移动IP中的一算法.每个micro层有一个区域外地代理(domain foreign agent,简称DFA),它在域间代表移动节点加入到组播组,节点只有在macro层间移动时,才会修改组播转发树主干,micro层的移动则通过DFA对组播转发树主干进行了屏蔽.MobiCast在micro层采用了“翻译组播组”的机制:对于MN所在的组播组,DFA相应地生成一个以自己为源节点的翻译组播组,从而在域内形成一个以DFA为根节点的翻译组播树,这样,MN在micro层移动时只需要通知DFA.为实现micro层的快速切换,MobiCast将物理上相邻的网络组成DVM(dynamic virtual macro-cells)域.每次切换后,MN所属的基站(base station,简称BS)都需要通知其DVM域中的所有其他基站加入到翻译组播组中,并且缓存组播分组,从而解决了micro层的切换延迟以及切换分组丢失问题.不过,同时也带来了带宽浪费严重、基站负担大的问题,特别是当多个移动节点加入到多个组播组时,将严重增加基站的负担.而且,由于MN每次micro层的切换都将引起DVM域的改变,从而引发多个基站的加入/退出翻译组播组的操作,因此会导致严重的组播维护开销.另外,MobiCast并没有提出域间移动组播方案,如果简单地套用移动IP中的移动组播算法,那么,这些算法固有的缺陷将仍然存在.最后,MobiCast只适用于所有基站都支持组播的情况.

Hierarchical SSM<sup>[5]</sup>专门针对单源组播(source-specific multicast,简称SSM)提出了在移动环境中的解决方案.同样地,它将网络分为macro和micro两层,通过边界路由器(border gateway router,简称BGR)进行分离.BGR代表它所管辖的micro层内所有移动节点加入到所需组播组,节点在域内的移动只需要通知BGR,因此实现了域内移动对域外透明.BGR收到MN的加入组播组请求后,代替MN通过单播的方式向组播源发送加入组播组请求消息,组播源接收到请求消息后,建立一条到BGR的隧道,通过该隧道向BGR发送封装了的组播分组.BGR

解封装后,再将分组以组播的形式在域内发送.如果域内有多个节点加入到同一个组播组,BGR 也只需要建立一条到组播源的隧道.该方案通过使用分层减少了节点移动对组播的影响,但由于域内的组播转发树需要以 BGR 为根节点,因此该方案只适用于只有一个出口路由器的边缘网络.另外,该方案也没有考虑切换延迟和丢包等问题.

研究者还提出了其他一些移动组播方案,例如 RBMoM(range-based mobile multicast)<sup>[6]</sup>,MMA(multicast by multicast Agent)<sup>[3]</sup>等,但这些方案都仅仅是针对移动组播中存在的某一个或多个问题提出了解决方法,且都存在较大的缺陷,仍然无法为移动环境中部署组播提出整体的解决框架.

### 1.3 问题的总结

文献[7]详细列出了在移动环境中进行组播存在的问题.通过对已有协议和方案的进一步深入研究,以及对组播中节点位置发生动态变化这一根本原因进行分析,本文将移动环境中部署组播所面临的问题归结为 3 个方面,即组播开销问题、路由效率问题以及切换延迟和丢失率问题:

- 组播开销问题:组播开销包括组播组成员维护的协议开销,以及组播树的计算和维护开销.  
当组播组成员由于移动而频繁发生退出/加入组播组时,这种组播开销将会比较严重,给网络和网络设备都带来较大的负担.
- 路由效率问题:使用隧道等机制引入的组播转发路径非优化、路由效率低、分组传送延迟大等问题.  
特别是当节点远离家乡网络而使用外地链路的组播应用时,其路由效率和传送延迟问题将会严重影响组播应用.
- 切换延迟和丢失率问题:移动组播的组成员状态维护和组播树更新将会在切换固有延迟的基础上引入更多的切换延迟,并带来更严重的分组丢失率问题.其中,切换延迟主要会影响那些实时性要求高的组播应用;分组丢失则会对那些可靠性要求高的组播应用带来影响.

## 2 基于快速组播切换的分层移动组播体系结构(FHMM)

### 2.1 FHMM总体情况介绍

FHMM 以远程加入算法为基础,主要针对其中存在的两大主要问题——切换延迟问题以及组播维护和组播树抖动问题提出了解决方案.FHMM 通过提出快速组播切换解决了切换延迟问题.它以现有的移动 IP 快速切换为基础,通过适当的扩展,使得节点在实际切换到新的网络之前,该网络已经对组播进行了相应的处理,从而实现了快速组播切换.并且,该快速组播切换机制既可以用于域内切换,也可以用于域间切换.

FHMM 通过使用分层的移动组播管理,缓解了组播开销和组播树抖动问题.通过分层,能够对外屏蔽节点的移动性,实现移动节点在域内的切换不影响域外的组播转发树主干,因此能够缓解节点移动所引发的组播树抖动以及组播协议开销过多的问题.为了实现分层组播,FHMM 在域内采用了和 MobiCast 类似的“翻译组播组”机制.这是由于分层的组播要求在区域内的组播树是以组播管理者为根节点的,这样才能保证区域组播管理者对整个区域内组播的管理,但由于组播需要进行反向路径检查,因此,如果不使用“翻译组播组”机制,则分层组播只能适用于有且只有一个出口路由器的边缘网络(例如,Hierarchical SSM 方案).通过使用“翻译组播组”,使得 FHMM 对区域的划分没有限制,管理员还可以针对不同的网络基础架构(如 Cellular 或 WLAN 网络)、网络的管理属性以及网络的实际运行状况对组播域进行灵活的划分,方便管理.

FHMM 针对 MobiCast 存在的问题进行了改进,主要区别体现在:

- 1) MobiCast 为实现域内的迅速切换,要求节点所属基站,其 DVM 域中的所有基站,都加入到该移动节点所在的组播组,并缓存分组.因此,在域内引入了过多的冗余组播分组,也增加了基站的负担.而 FHMM 只需要移动节点所连接网络的接入路由器加入到组播组即可,它通过在域内使用快速组播切换机制,保证了节点的快速切换,同时也消除了 MobiCast 的冗余数据和基站负担问题.
- 2) MobiCast 在域间仅简单采用移动 IP 中的任一移动组播算法,那么,这些算法固有的缺陷将仍然存

在.FHMM 在域间提出了基于快速切换的远程加入方式,它不仅能够避免家乡代理和移动节点之间长距离的隧道,减少隧道聚集等问题,还缓解了远程加入算法中的切换延迟问题.

- 3) MobiCast 要求所有基站都必须支持组播,但目前组播并没有得到大规模的使用,因此适用范围有限.FHMM 则无此限制,因此适用范围更广.

### 2.2 FHMM的层次化结构

FHMM 中引入了两个基本实体,组播代理 MA(multicast Agent)和区域组播代理 DMA(domain multicast Agent).MA 负责为移动节点提供组播服务,它可以是子网中接入路由器 AR,也可以是某个处理移动事务的专用实体,下面我们统一用 AR 来叙述;DMA 负责管理整个区域中移动节点的组播应用,FHMM 并不要求所有子网必须支持组播,但要求 DMA 必须是支持组播的路由器.通过 DMA,FHMM 实现了分层的移动组播管理.DMA 代表区域中的节点加入/退出组播组,然后在域内以组播的方式将组播数据发送到相应的节点.因此,节点在域内移动时,只需将位置变化通知 DMA,同时修改域内组播树分支即可.该位置变化信息通过 DMA 进行了屏蔽,不会对域外节点造成影响,因此不需要修改域间的组播转发树主干.FHMM 对区域的构成没有限制,网络管理员可以灵活地对网络进行划分,并灵活地选择 DMA.

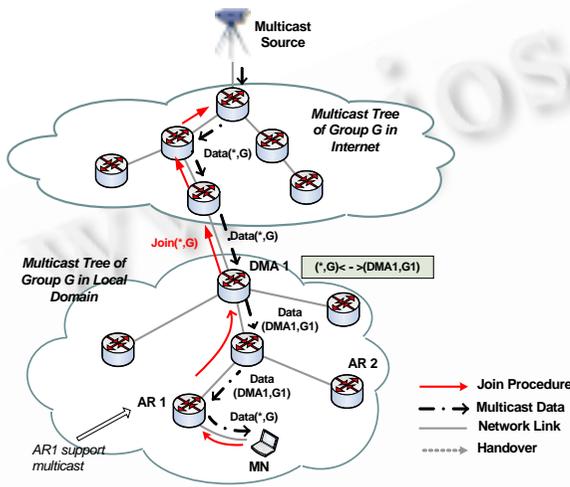


Fig.1 Hierarchical mobile multicast architecture of FHMM

图 1 FHMM 的分层移动组播结构

译组播组(DMA1,G1).区域中所有组播组的对应信息组成了“区域组播组对应表”,又称 DTMG 表(domain translate multicast group table).通过查询该表,AR 可以知道 DMA 是否已经加入到某个组播组,以及该组播组在域内所对应的翻译组播组的情况.

### 2.3 MN加入组播组

FHMM 中,每个 AR 都需要维护自己的“组播切换信息”,它包括 AR 所属 DMA 的标识以及 AR 是否支持组播等内容.同时,AR 之间通过信息交互(可以通过扩展 CARD(candidate access router discovery)<sup>[13]</sup>协议等方式实现)获得相邻 AR 的组播切换信息,从而构成了“组播切换表”.图 1 中 AR 1 的“组播切换表”见表 1.

Table 1 Multicast handoff table of AR1

表 1 AR1 的组播切换表

AR_ID	DMA_ID	Support multicast ?
AR1	DMA1	Y
AR2	DMA1	Y
...	...	...

不论 MN 在家乡网络或是外地网络,当它需要加入到组播组时,它首先向当前 AR 请求“组播切换信息”,根

.. FHMM 能够同时支持(\*,G)和(S,G)两种方式的组播组,为方便叙述,以下统一用(\*,G)形式的组播组进行说明.

据该信息,MN 可以知道当前 AR 是否支持组播.接下来的加入过程如图 2 所示.

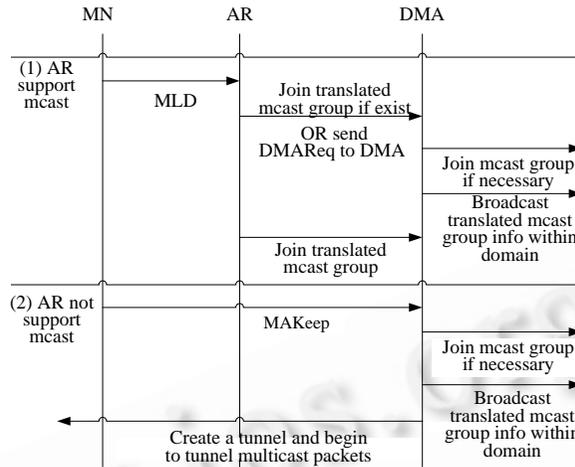


Fig.2 MN Join multicast group procedure  
图 2 MN 加入组播组过程

如果 AR 支持组播,则 MN 将当前 AR 作为自己的 MA、当前 AR 的 DMA 作为自己的 DMA.MN 向 AR 发送 MLD(multicast listener discovery)<sup>[14]</sup>消息,请求加入到组播组(\*,G).AR 首先查询 DTMG 表,如果找到有关(\*,G)的表项,则直接加入到相应的翻译组播组,加入过程结束;如果在 DTMG 表中没有查到相关表项,则 AR 通过一种新的消息,即 DMAReq,将该请求转发给 DMA.收到 DMAReq 消息后,DMA 加入到组播组(\*,G),在域内建立一个对应的翻译组播组,并将此组播组的对应信息向区域中的 AR 进行广播.AR 接收到该对应信息后,更新 DTMG 表,并通过正常的方式加入到翻译组播组.

若当前 AR 不支持组播,则 MN 将自己的 MA 和 DMA 都设为 AR 所属的 DMA,并通过隧道向 DMA 发送 MAKeep 消息,该消息中包含了组播组(\*,G)的信息.DMA 接收到 MAKeep 消息后,除了进行与收到 DMAReq 消息后相同的操作以外,还需要建立一个到 MN 的隧道,并通过该隧道向 MN 转发组播分组.

#### 2.4 组播分组的传送过程

以图 1 为例.组播组(\*,G)的分组首先通过域间组播转发树发送到 DMA1,DMA1 查询 DTMG 表获得对应翻译组播组(DMA1,G1),然后将原组播分组的源地址和组播组地址分别修改为 DMA1 和 G1,从而将组播分组转换为(DMA1,G1)翻译组播分组.DMA1 通过区域内的翻译组播转发树传送该翻译分组.翻译组播树上的 AR(包括 DMA 本身)如果发现自己所负责的子网有节点是该组的成员,或者是需要通过隧道向某些节点转发组播分组,则 AR 通过查询 DTMG 表将翻译组播分组还原为(\*,G)形式,然后发送给相应的成员节点.

对于移动节点来说,它仍然是按照正常的方式接收组播分组.这也是 FHMM 的优点之一.

#### 2.5 MN的切换过程

当 MN 通过链路层探测等方式检测到它同时与一个新的 AR(expected AR,简称 EAR)相连时,MN 启动 FHMM 的快速组播切换过程.FHMM 的快速组播切换以现有的快速切换协议 FMIP6 为基础,通过引入一个新的选项,即组播组选项(mcast group option),使得 EAR 能够提前加入到指定的组播组,从而使得 MN 在切换到新网络时能够快速接收组播分组.

FHMM 的切换过程如图 3 所示,其中主要显示了 EAR 支持组播时的情况.图中的黑体消息均是 FMIP6 中的基本报文,括弧内的文字则是 FHMM 对它的扩展.在 FMIP6 的第 1 阶段,即 RtSolPr 和 PrRtAdv 报文交互阶段,FHMM 对 PrRtAdv 报文进行了扩展,使得 MN 不仅能够获得 EAR 的网络地址前缀等基本信息,还能够获得

它的“组播切换信息”.通过该信息,MN 可以知道 EAR 是否支持组播,并且通过对比 EAR 的 DMA 标识和自己所属 DMA 的标识,MN 可以判断此次切换将发生在域内还是域间.

2.5.1 EAR 支持组播时的切换过程

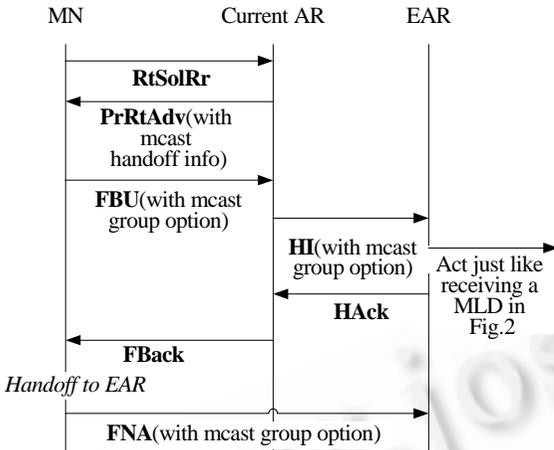


Fig.3 Handoff procedure when EAR supports multicast 图3 当 EAR 支持组播时的切换过程

如图3所示,FHMM 向 FMIP6 引入了组播组选项,该选项中包含了需要加入的组播组列表.MN 将该选项通过 FBU 报文发送给当前 AR,当前 AR 再通过 HI 报文将该选项转发给 EAR.EAR 将组播组选项中的每条组播组信息都分别当作一个 MLD 加入请求来处理(处理过程如图2所示).当 MN 切换到新外地网络后,FMIP6 通过使用 FNA 报文使得 MN 能够快速地将此连接信息通知 EAR.为了提高鲁棒性,FHMM 在 FNA 报文中也加入了组播组选项.这样,当 MN 由于移动速度过快而无法及时发送 FBU 报文时,MN 也能在切换新网络后,尽快通知 EAR 加入到相关组播组.切换完成后,MN 的 MA 修改为 EAR, DMA 修改为 EAR 的 DMA.快速组播切换过程结束.

2.5.2 EAR 不支持组播时的切换过程

若 MN 通过 PrRtAdv 报文中的“组播切换信息”得知 EAR 不支持组播,则余下的 FMIP6 过程保持不变,即不再加入组播组选项.通过 FMIP6 完成提前配置 EAR 网络的转交地址后,MN 根据切换将发生在域内还是域间进行不同的操作.

对于域内切换,MN 向 MA 发送 MAKeep 消息,该消息包含了 MN 在 EAR 网络中新配置的转交地址.MA 接收 MAKeep 消息后,建立一个到该转交地址的隧道,并通过该隧道转发组播分组.组播切换过程结束,MN 的 MA 和 DMA 保持不变.

对于域间切换,MN 向 EAR 所属的 DMA(简称 EDMA)发送 MAKeep 消息,该消息包含了 MN 在 EAR 网络中新配置的转交地址.接收 MAKeep 消息后,EDMA 的操作与图2所示的操作完全相同.即加入到相应组播组、生成翻译组播组、广播组播组对应关系,以及建立一个到 MN 新转交地址的隧道,并通过该隧道转发组播分组.当 MN 实际切换到 EAR 网络后,其 MA 和 DMA 均修改为 EDMA.

由于以上组播组加入和组播树更新过程是在 MN 实际切换到新的外地网络之前进行的,因此减小了组播切换延迟以及由此引发的分组丢失.另外,为了正确维护组播组状态,AR/DMA 对组成员的定期查询还需要包括对组播转发隧道的定期查询,如果在一定时间内没有收到任何回复消息,则 AR/DMA 将删除该组播转发隧道.

3 模拟实现分析

我们将 FHMM 移动组播方案与 MobiCast,MIP-RS 以及 MIP-BT 进行了对比,比较的内容包括:在组播组成员数量变化以及移动节点速度变化情况下的组播分组丢失率、组播分组传送效率和组播维护开销.

模拟中主要使用的参数见表2.模拟环境的拓扑是一个 10x10 的 mesh 网络,网络中的每个点代表了一个子网的接入路由器 AR.为方便比较,这里我们假设网络中的所有子网都支持组播,并且 AR 就是子网的组播路由器.对于分层的方案,我们在拓扑中加入了4个路由器作为 DMA,每个 DMA 负责管理 25(5x5)个 AR.

我们模拟的是只有一个组播组、该组播组只有一个组播源的情况.组播源每隔 20ms 发送一个长度为 300 字节的组播分组,用来模拟资源占用较多的组播视频会议.开始时移动节点随机分布在 mesh 网络中,然后每次移动时,MN 在 MINSpeed 和 MAXSpeed 之间随机选择移动速度.另外,我们假设链路是可靠的,组播分组丢失仅仅是由于切换导致的.

**Table 2** Main simulation parameters  
**表 2** 模拟中主要使用的参数

Parameters	Description	Value
$d$	Every simulation duration	500s
$t$	Topology size (number of LANS)	100 (10×10)
$d$	Distance between two nearby access routers	100m
$p$	Power range	71m
$i$	Multicast packet generating interval	20ms
$l$	Multicast packet length	300 bytes
$N$	Number of MN (variable parameter)	5...80
minV	Minimal speed (MINSpeed)	0
maxV	Maximal speed (MAXSpeed, variable parameter)	5...30 m/s

图 4 是对组播分组丢失率的比较,可以看出,FHMM 由于在域内和域间切换时都使用了快速组播切换的机制,因此其分组丢失率最低;MobiCast 的分组丢失率也很低,但由于它只在域内使用快速组播切换,域间仍然采用一般的组播方案(我们选用的是 MIP-RS),因此,整体的分组丢失率要高于 FHMM;MIP-BT 的分组丢失最严重,因为每次切换后,MN 需要等待配置新转交地址,并将该地址向 HA 绑定更新后,才能从 HA 接收转发过来的组播分组;MIP-RS 由于不需要等待向 HA 的绑定更新,因此,分组丢失的情况优于 MIP-BT,特别是当新外地网络已经加入到组播组时,MIP-RS 还无须等待配置新的转交地址,可以直接通过链路层组播接收分组,因此,其分组丢失率随着组播组成员的增多而明显降低。

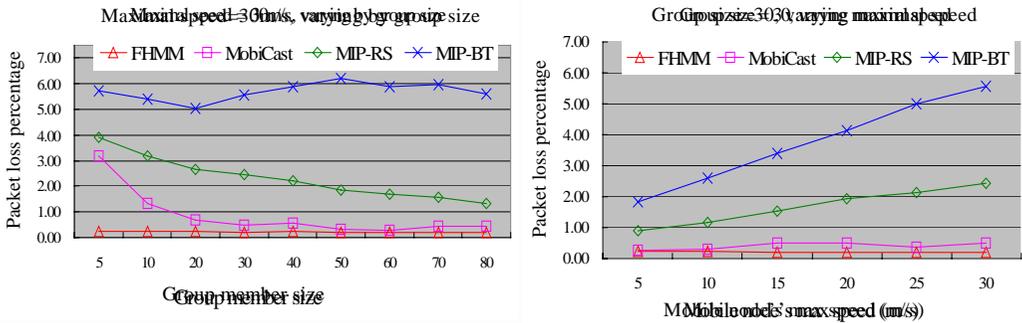


Fig.4 Comparison of multicast packet loss percentage

图 4 组播分组丢失率比较

图 5 比较了组播分组的传送效率,在 MIP-BT 中,由于组播分组需要通过 HA 中转,从而导致组播转发路径远非最优,并且,这种隧道方式使得组播从一定程度上演变成了单播,因此组播传送效率最低;MIP-RS 由于总是使用最优的组播树进行转发,因此转发效率最高;FHMM 由于需要提前通知一个或多个 EAR 提前加入到组播组并缓存分组,因此引入了冗余数据传输,组播传送效率要低于 MIP-RS.不过,由于 FHMM 不需要像 MobiCast 那样通知 DVM 域中的所有 AR 都加入组播组并缓存分组,因此转发效率要高于 MobiCast.

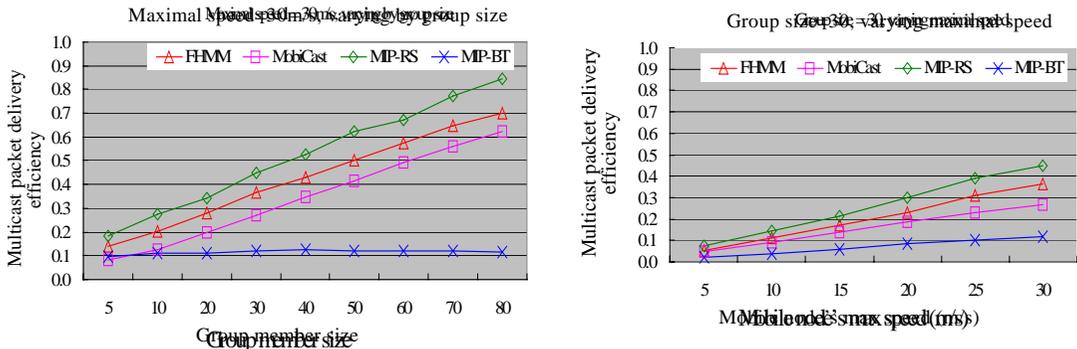


Fig.5 Comparison of multicast packet delivery efficiency

图 5 组播分组传送效率比较

图 6 是组播维护开销的比较.这里,组播维护开销包括所有为维护组播组成员状态以及组播转发树而交互的分组,但不包括其他类型分组捎带的组播信息,例如 FMIP6 中的组播组选项信息以及基本的移动 IPv6 分组等等.通过图 6 可以看出,MIP-BT 的组播维护开销最小,因为它只要求 HA 跟踪 MN 的当前位置,而这通过基本的移动 IPv6 分组就可以完成,不需要交互额外的组播分组.FHMM 的开销介于 MIP-BT 和 MIP-RS 之间.MobiCast 由于引入了大量复杂的信息交互(如每次切换后引发的 DVM 域内 AR 之间大量的信息交互),因此,组播维护开销问题最严重.

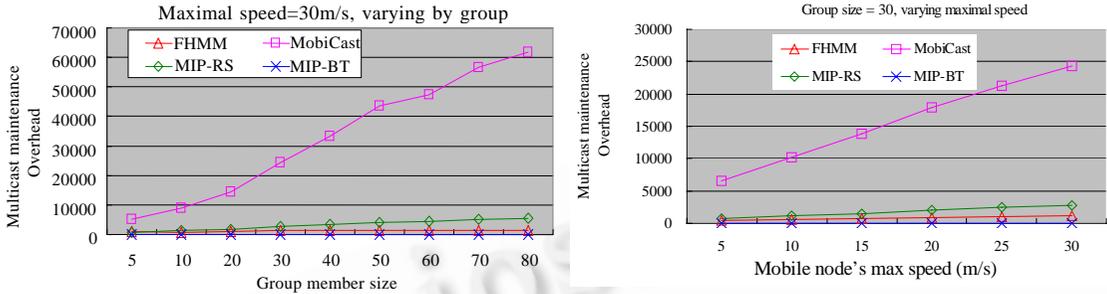


Fig.6 Comparison of multicast maintenance overhead  
图 6 组播维护开销比较

#### 4 结论和进一步的工作

本文提出了基于快速组播切换的分层移动组播体系结构 FHMM,其优点主要包括:

- (1) FHMM 通过分层的移动组播管理,屏蔽了节点在域内的移动,缓解了节点移动所引起的组播协议开销和组播树抖动问题,特别是保证了域间组播转发树主干的稳定性;
- (2) FHMM 在域间使用基于快速组播切换的远程加入方式,避免了跨区域长距离隧道的出现,保证了域间的组播转发路径是最优的,从而保证整个组播转发路径的近似最优性;
- (3) FHMM 通过对现有基本快速切换的适当扩展,实现了快速的域间、域内组播切换,由此也减少了切换丢包问题.而且,该快速组播切换机制并没有像 MobiCast 那样,在域内引入过多的冗余组播分组和过多的基站负担;
- (4) 在域内,FHMM 通过使用翻译组播组,实现了 DMA 对整个区域组播应用的管理.因此,FHMM 可以对区域进行灵活的划分,而不仅仅限于边缘网络;
- (5) 实际使用性较强.当节点移动到不支持组播的子网时,FHMM 仍然可以为节点提供组播服务.

因此,FHMM 是一个综合的移动组播解决框架,它对移动组播中的 3 个方面问题即组播开销问题、路由效率问题以及切换延迟和丢失率问题都给予了较好的解决.模拟结果显示,FHMM 具有分组丢失率低、组播分组传送效率高以及组播维护开销少等优点,是一种高效的移动组播解决方案.

FHMM 还有可以改进的地方.例如,FHMM 主要针对移动节点作为组播接收者提出了解决方案,对于移动节点作为组播源节点的情况,还需仔细地深入分析,并在此体系结构基础上进行适当修改.

#### References:

- [1] Tan CL, Pink S. MobiCast: A multicast scheme for wireless networks. ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, 2000,5(4):259-271.
- [2] Harrison TG, Williamson CL, Mackrell WL, Bunt RB. Mobile multicast (MoM) protocol: Multicast support for mobile hosts. In: Proc. of the 3rd Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (ACM MOBICOM). Budapest, 1997. 151-160. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=262143&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=60612936&CFTOKEN=10283182>
- [3] Suh YJ, Shin HS, Kwon DH. An efficient multicast routing protocol in wireless mobile networks. ACM Wireless Networks, 2001,7(5):443-453.

- [4] Lai JR, Liao WJ. Mobile multicast with routing optimization for recipient mobility. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2001,47(1):199–206.
- [5] Kim KI, Ha JL, Hyun EH, Kim SH. New approach for mobile multicast based on SSM. In: Proc. of the 9th IEEE Int'l. Conf. Net. (ICON 2001). 2001. 405–408. <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?history=yes&queryText=%28%28new+approach+for+mobile+multicast+based+on+ssm%29%3Cin%3Emetadata%29>
- [6] Lin CR, Wang KM. Mobile multicast support in IP networks. In: IEEE INFOCOM 2000. Tel Aviv, 2000. 1664–1672.
- [7] Romdhani I, Kellil M, Lach HY, Bouabdallah A, Bettahar H. IP mobile multicast: Challenges and solutions. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004,6(1):18–41.
- [8] Gossain H, Cordeiro CM, Agrawal DP. Multicast: Wired to wireless. IEEE Communications Magazine, 2002,40(6):116–123.
- [9] 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 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1324.htm>
- [10] Perkins C. IP mobility support for IPv4. RFC 3344, 2002.
- [11] Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility support in IPv6. RFC 3775, 2004.
- [12] Koodli R. Fast handovers for mobile IPv6. Internet Draft, draft-ietf-mipshop-fast-mipv6-03.txt, 2004.
- [13] Liebsch M, Singh A, Chaskar H, Funato D, Shim E. Candidate access router discovery (CARD). RFC 4066, 2005.
- [14] Vida R, Costa L. Multicast listener discovery version 2 (MLDv2) for IPv6. RFC 3810, 2004.

#### 附中文参考文献:

- [9] 吴茜,吴建平,徐恪,刘莹.移动 Internet 中的 IP 组播研究综述.软件学报,2003,14(7):1324–1337. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1324.htm>



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.



吴建平(1953 - ),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络体系结构,计算机网络协议测试,形式化技术.



徐明伟(1971 - ),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络体系结构,形式化方法,协议一致性测试.



崔勇(1976 - ),男,博士,助理研究员,主要研究领域为计算机网络体系结构,协议的仿真和测试,多目标优化的路由算法及性能评价.