

基于移动预测的快速分层移动组播体系结构

马学彬¹, 温涛¹, 郭权², 王刚¹

(1. 东北大学软件中心, 辽宁沈阳 110004; 2. 东软信息学院计算机科学技术系, 辽宁大连 116023)

摘要: 由于移动节点的位置是不断变化的, 移动 IPv6 协议给出了支持移动节点的远程加入和双向隧道两种组播方法, 但这两种方法都有各自的缺点. 本文提出基于移动预测的快速分层移动组播体系结构(mobility prediction based fast and hierarchical mobile multicast architecture, 简称 MP-FHMM), 通过移动预测, 在切换前为移动节点配置好切换信息, 并且在切换时使用基于 FMIPv6 改进的快速组播切换方法, 有效减少了切换延迟以及由此引发的组播数据分组丢失. 另外, 由于采用层次型结构的移动组播管理, 屏蔽了节点在子网内的移动, 减少了因节点移动而重构组播树的频率.

关键词: 移动 IP; 移动预测; 组播; 快速切换; 分层结构

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)01-0048-07

A Mobility Prediction Based Fast and Hierarchical Mobile Multicast Architecture

MA Xue bin¹, WEN Tao¹, GUO Quan², WANG Gang¹

(1. Software Center, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Neusoft Institute of Information, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: As mobile nodes dynamically change their locations, Mobile IPv6 offers two methods of multicast services for mobile nodes, which are called remote subscription and bi-directional tunnel, but they both have shortcomings. This paper proposed a mobility prediction based fast and hierarchical mobile multicast architecture (MP-FHMM), which could configure the handoff information by predicting the mobility of the nodes before multicast handoff, and uses the improved FMIPv6 handoff method when mobile nodes are playing handoff. This architecture reduces handoff latency and packet loss rate causing by handoff. In addition, it uses a hierarchical architecture to isolate the subnet movement from outside, which reduces the frequency of rebuilding multicast tree because of nodes' mobility.

Key words: mobile IP; mobility prediction; multicast; fast handoff; hierarchical architecture

1 引言

随着用户需求的不断增加, 各种多媒体业务(诸如流媒体、视频会议和 IP 电视等)正成为 Internet 上信息传输的主要组成部分. 由于多媒体业务对网络传输时延、延时抖动等特性比较敏感, 并且这些业务一般需要大量的带宽, 对现有的传输网络提出了挑战. IP 组播^[1]具有扩展性强、节约网络资源、效率高等优点, 使其在多媒体业务中得到广泛的应用, 而移动组播能让用户“随时随地连接到网络”, 因此成为当前研究的热点. 移动组播面临很多挑战^[2], 这是因为在移动环境中, 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. 现有的组播协议^[3-6]大都是基于固定环境设计的, 在建立组播转发树通常没

有考虑到组成员位置动态变化的情况. 为了解决这一问题, IETF 移动 IP 工作组在移动 IPv6 中提出两种基本移动组播解决方案——远程加入^[7](remote subscription, 简称 MIP-RS)算法和双向隧道^[8](bi-directional tunnel, 简称 MIP-BT)算法.

在 MIP-RS 协议中, 每当移动节点 MN(mobile node)发生切换, 就必须重新加入到组播组中, 并重新修改组成员状态和建立与之对应的组播树分支. 这种算法的优点是非常简单, 可把 MN 按照与静态节点相同的方式进行处理, 现有的组播协议都可应用到这种算法上, 缺点也是非常明显的, 节点的切换延迟较大, 切换丢包问题严重, 容易产生移动环境中特有的“同步丢失”问题.

在 MIP-BT 协议中, 家乡代理(home agent, HA)代替

MN 加入组播组, 移动节点和家乡代理之间建立双向隧道, 并且通过该隧道发送和接收组播包. 该算法的优点是将节点的移动性隐藏起来, 节点无论如何移动都不会影响组成员状态和组播转发树, 因此减少了计算和通信负担. 但是这种算法也存在比较严重的缺陷, 由于该算法使用的是三角路由, 链路开销大, 随着家乡代理所服务的节点数量的增加, 它所处理的任务和负载也会显著增加, 这样家乡代理容易成为“失效集中点”. 同时, 因为在这种算法中, 家乡代理以单播的形式通过隧道把组播包转发到每个移动节点上, 因此外地代理将从不同的隧道接收多个重复的组播包拷贝, 产生“隧道聚集问题”.

MobiCast^[9]适用于小型无线蜂窝网络环境, 它把物理上相邻的多个无线蜂窝网组成一个区域, 在每个区域中设置一个区域外地代理 (domain foreign agent, 简称 DFA), 它负责移动节点组播包的发送和接收. 该协议的特点是引入了分层的移动管理, 把节点的移动性与主要的组播分发树相分离. 当一个移动节点移动到一个新的外地服务区域以后, 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, 它把需要注册的组播组请求信息通过本地的基站发送到 DFA, DFA 代表移动节点加入到组播组中并且把请求加入的组播组使用另一种称作“翻译组播地址”的组播地址发送到移动节点. 翻译组播地址在该区域内是唯一的并且对所请求的组播组做出响应. 基站接收发送给已注册组播组的组播分组, 并把接收到的组播分组发送给移动节点. 只要移动节点停留在外地代理的区域内, 对别的组播组来说移动节点的移动性就被隐藏了, 并且不需要重构组播树. 但是这种方案也有弊端, 在域间切换时只是简单地沿用了远程加入算法, 使得远程加入算法的缺点在 MobiCast 的域间切换过程中依然存在, 另外, 由于域内的所有基站需要加入到所有的翻译组播组, 增加了处理开销和带宽浪费, 增重了基站的负担.

FHMM^[10]是基于远程加入算法提出的解决方案, 其目的是减小域间切换的延迟, 减小组播维护的开销和解决组播树抖动问题. FHMM 方案中使用快速组播切换算法, 它是对移动 IPv6 快速切换 (fast MIPv6, FMIPv6) 的扩展. 这种算法在移动节点实际切换到新的网络之前, 对组播进行了预处理实现了快速组播切换, 解决了切换延迟问题. 在组播管理方面, 同样使用了分层的移动组播管理, 缓解了组播开销和组播抖动问题, 屏蔽节点的移动性, 实现了域内切换时不影响域外的组播转发树主干. 在实现分层组播管理的同时采用了与 MobiCast 类似的“翻译组播地址”机制. FHMM 主要解决了 MobiCast 要求所有基站都加入到该移动节点所在的组播组的弊端, 减少了冗余数据, 减轻了基站的负担. 另外它通过使用

快速切换的远程加入方式, 减少了切换延迟问题. 但由于这种方案并没有对多个相邻基站覆盖区域范围内移动节点的切换问题进行处理, 只是在不同网络间使用快速组播切换算法, 势必要使相邻的所有基站都做好切换准备, 这样增加了网络的开销, 加重了基站的负担.

HMoM^[11]协议是一种分层的组播路由协议, 利用了在处理单播路由中分层移动管理的优势, 动态选择移动代理来减少移动节点在域间进行切换的次数. 当一个移动节点接收到 RA (router Advertisement) 消息时, 移动节点检查它是否还在相同的移动锚点 (mobility anchor point, MAP) 域内, 如果在相同的域内, 移动节点只是执行域内切换. 否则, 需要执行切换 MAP 的域间切换. 另外, 每当一个移动节点进入一个新的 MAP 域时, 都需要计算一下将要驻留的时间, 如果驻留时间较短, 则选择高层次的路由器作为自己的 MAP, 这样可以减少域间切换的次数. 相反, 如果移动节点的驻留时间较长, 就选择低层次的路由器作为自己的 MAP. 这种方法可以比较有效地在组播开销和组播树的重构方面取得平衡. 但是这种方法也有个比较突出的问题, 它没有给出如何计算移动节点驻留时间的方法, 无法从移动节点的移动特性中定量计算出它应该选择哪个层次的路由器作为自己的 MAP 才是最有效的.

许多学者也提出了其他一些移动组播方案, 如 FM-SR^[12] (first MSA second remote subscription), RBMoM^[13] (range-based mobile multicast), DRBMoM^[14] (dynamic range-based mobile multicast), FMIPv6M^[15] (fast MIPv6 for multicast remote subscriptions) 等, 但这些方案都存在一些缺陷, 如果要在移动环境中进行部署, 还需要进一步改进.

在现实的移动网络中, 大多数用户的运动路线是有规律的, 比如在高速公路上行驶的汽车, 它只会沿着公路延伸的方向行驶, 而且一般会在移动较长一段时间或距离后才改变运动状态, 这与实验环境中所使用的随机移动模型并不相同. 在实验环境中通常假定移动节点的运动是无规律的, 方向可以随时改变, 移动速度也是随机的, 对于这种无目的的运动显然在现实生活中并不常见. 于是, 根据移动节点当前的运动状态预测某段时间后的运动方向和运动速度成为可能. 本文提出了一种新的基于移动预测的分层移动组播体系结构 (MP-FHMM), 它利用了高斯-马尔可夫移动预测模型来预测移动节点的运动路线以及移动节点将会进入某个相邻基站的覆盖范围之内, 使其提前做好切换准备, 利用这种方法, 克服了 FHMM 方案中快速组播切换过程需要通知所有相邻的基站做好准备的弊端, 减少了网络开销, 减轻了基站的负担. 当然, 这种方法也有一定的开销, 首先移动终端中运行移动预测算法会产生一定的处理开销, 并且在传输位置信息时也会产生一定的网络开销,

但是通过第 3 部分实验可以看出, 相对比其它的组播方案, 本文所提出方案的开销是可以接受的.

2 基于移动预测的快速分层移动组播体系结构 (MP-FHMM)

2.1 层次结构网络模型

在 MP-FHMM 中使用与 HMIPv6^[16] 相似的分层网络模型, 如图 1 所示, 并引入两个基本实体, 区域组播代理 (region multicast agent, RMA) 和子网组播代理 (subnet multicast agent, SMA), RMA 是参与互联网组播路由的组播路由器, 是移动主机到组播骨干网的访问接入点, 负责管理整个区域中移动节点的组播应用. 每个子网都有一个 SMA, 它管理若干个 AR (access router), 负责子网内的组播服务, 代表子网内的节点加入或退出组播组. AR 为移动节点提供无线接入服务, 它可以是组播路由器或不是, 这比较符合实际的网络情况, 因此, MP-FHMM 的适用范围更广. 当移动节点进入一个新的子网时, 移动节点获得 AR、SMA 和 RMA 的地址信息, 并且获得当前 AR 及相邻 AR 的位置信息, 然后向家乡代理注册, 并发送 MLD 组成员报告消息. 当移动节点在子网内运动时, 只需把位置信息通知 SMA, 同时加入和修改子网内组播分

组的分支, 这样就屏蔽了由于位置变换对上层组播树骨干网带来的影响. 当移动节点进入一个新的子网服务范围之后, 除了执行上面的操作之外, 还需要把位置信息通知给 RMA.

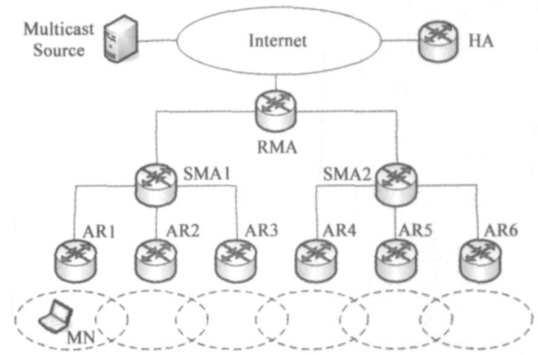


图1 网络模型

2.2 加入和离开组播组

在 MP-FHMM 中每个路由器都维护一个“组播转发表”, 如表 1 所示, 它包括本身及邻近 AR 所属的 SMA 和 RMA 标识, 是否支持组播, Group_ID 表示为 MN 提供组播服务的组播组编号, MN_List 表示每个组播组中的移动节点列表.

表 1 组播转发表数据结构

AR_ID	SMA_ID	RMA_ID	Multicast?	Group_ID	MN_List
AR1	SMA1	RMA1	Y	G1, G2, ...	G1 (MN 1, ...), G2 (...), ...
AR2	SMA1	RMA1	N	Gi, Gj, ...	Gi (MN 3, ...), Gj (...), ...
...

2.2.1 加入组播组

当移动节点需要加入到组播组时, 首先查询当前 AR 的组播切转发表, 根据该表中 AR 是否支持组播应用的信息, MN 可以分成两种操作方式加入组播组. 如果 AR 支持组播, MN 定时向 AR 发送 MLD (multicast listener discovery) 消息, 请求加入到组播组中, MLD 消息如

图 2 所示. AR 根据收到的 MLD 信息做如下处理: 首先查询组播转发表, 如果找到对应的组播组, 则在 MN_List 当中对应的组播组编号中加入 MN 的链路转交地址 LCoA (Our link care of address), 然后返回注册应答消息, 加入过程结束, 不再向其所在的 RMA 发送 MLD 消息; 如果找不到对应的组播组, 则首先在 Group_ID 中新建一个组播组, 并在 MN_List 中对应的新建组播组中加入 MN 的 LCoA, 同时 AR 向所属的 SMA 发送请求信息, 要求加入对应的组播组, 执行过程跟 AR 加入组播组过程类似. 在完成加入操作之后, SMA 再向 RMA 发送请求加入组播组消息, RMA 查询本地的组播转发表, 如果找到相应的组播组, 则在组播组中加入该 AR 和其所属的地址, 并开始向 SMA 和 AR 转发该组播组的组播数据分组, 如在 RMA 中没有找到相关的组播组信息, 在本地建立相关的组播信息, 并把此组播组的对应信息向子网中的所有 SMA 和 AR 广播, SMA 和 AR 收到该消息后, 更新 SMA 和 AR 组播转发表, 最后返回注册应答消息.

如果 AR 不支持组播, AR 需要实现 MLD 代理功能, 通过接收服务范围内的所有 MN 发送 MLD 消息来记录

0	7 8	15 16	31
类型	码	校验和	
最大响应时间		保留	
多播地址			
SMA地址			
RMA地址			
组播地址记录[1]			
组播地址记录[2]			
...			
组播地址记录[M]			

图2 MLD报文格式

所有的组播组编号和每个组播组中的 MN 列表, 当 AR 收到组播分组数据包时, 逐个转发给本地的所有需要组播服务的 MN.

2.2.2 离开组播组

不论 AR 是否支持组播, 当 MN 请求离开组播组时, 将 MN 从所有的 MN_List 列表中删除, 并检查所有的组成员信息. 如果这个组已经没有其他成员, 则删除该组播组的信息, 并向上层组播路由器 SMA 和 RMA 发送离开请求消息, 这时 SMA 和 RMA 对组播转发表的处理过程与 AR 相同.

2.3 移动预测算法

高斯-马尔可夫移动预测模型^[17]最早是用来在无线蜂窝网中进行移动节点的快速定位. 后来在文献[18]把它用于移动网的运动仿真实验中. 但若把它用于二维空间的移动预测, 还需要进一步改进.

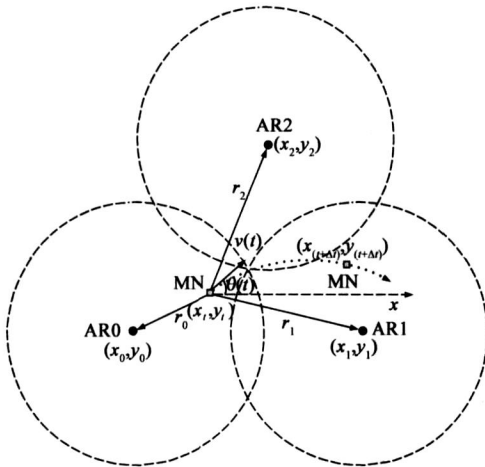


图3 移动预测模型

图3是移动预测模型, 其中 AR0、AR1 和 AR2 的位置分别是 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 虚线圆代表每个 AR 的无线传输范围, 半径均为 R , MN 当前的位置为 (x_t, y_t) , 运动速度 $v(t)$, 运动的方向与标准参照方向之间的夹角 $\theta(t)$ (这些条件可以利用 GPS(global positioning system) 等技术手段获得), 并且这些参数每隔 k 个时钟周期进行一次更新, 每个时钟周期为 m 秒. MN 与 AR0、AR1 和 AR2 的距离分别是 r_0 , r_1 , r_2 , 点曲线代表 MN 的运动轨迹, 经过一段时间 Δt 后, MN 的位置为 $(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t))$.

在高斯-马尔可夫模型中, 假设 MN 的移动速度和方向是随时间变化的, 在连续的时间里, 高斯-马尔可夫过程可以用如下自相关函数描述:

$$\begin{cases} R_v(\tau) = E[v(t)v(t + \tau)] = \sigma^2 e^{-\beta|\tau|} \\ R_\theta(\tau) = E[\theta(t)\theta(t + \tau)] = \lambda^2 e^{-\delta|\tau|} \end{cases} \quad (1)$$

其中, σ^2 和 λ^2 是均方差, τ 是一段时, $\beta \geq 0$ 和 $\delta \geq 0$ 决定运动模式所影响的时间长短, 在有些简单的运动

模型中, β 和 δ 是相近或相等的, 可以用一个参数表示, 但是如果是复杂的运动模型, 它们需要被独立表示, 因为运动速度的改变经常是与运动方向的改变是无关的. 在本文中选择后者, 即 β 和 δ 是相互独立的.

接下来定义移动速度和运动方向的离散值:

$$\begin{cases} v_n = v(n \Delta t) \\ \theta_n = \theta(n \Delta t) \end{cases} \quad (2)$$

并且

$$\begin{cases} \alpha = e^{-\beta \Delta t} \\ \alpha' = e^{-\delta \Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

在高斯-马尔可夫模型中, 设 v_n 和 θ_n 是移动节点在第 n 个周期内的移动速度和方向, 则式(1)的离散表达式可表示如下:

$$v_n = \alpha v_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{v} + \sqrt{(1 - \alpha^2)} \phi_{n-1} \quad (4)$$

$$\theta_n = \alpha' \theta_{n-1} + (1 - \alpha')\bar{\theta} + \sqrt{(1 - \alpha'^2)} \phi'_{n-1} \quad (5)$$

其中 α 和 α' 是改变随机等级的调节函数, 且 $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \alpha' \leq 1$, \bar{v} 和 $\bar{\theta}$ 分别是当 n 趋向无穷大时的平均速度和平均运动角度, ϕ_{n-1} 和 ϕ'_{n-1} 表示一个独立的静态高斯过程, 数学期望为 0.

式(4)和式(5)就是高斯-马尔可夫运动模型, 还需进一步讨论得出其预测模型. 根据式(4)和式(5), 可得出在下次更新前移动节点的位置:

$$x_{(t+(k-1)m)} = \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} v_i m \cos \theta_i \quad (6)$$

$$y_{(t+(k-1)m)} = \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} v_i m \sin \theta_i \quad (7)$$

式(6)和式(7)虽然可以计算出移动节点在未来某时刻的位置, 但是计算方法比较复杂, 需要多次计算移动方向的正弦值和余弦值, 增加了系统的负担. 为解决这个问题, 可以先求出移动速度和移动方向的平均值, 然后再计算出移动节点的位置, 这样就可以加快计算速度, 减轻系统的负担. 假设 $n=0$ 时是初始状态, 此时移动节点的速度为 v_0 , 移动方向为 θ_0 , 于是:

$$\begin{aligned} v_k &= \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} (\alpha v_{i-1} + (1 - \alpha)\bar{v} + \sqrt{(1 - \alpha^2)} \phi_{i-1}) \\ &= \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} \left[\alpha^i v_0 + (1 - \alpha)\bar{v} + \sqrt{(1 - \alpha^2)} \sum_{j=0}^{i-1} \alpha^{i-j-1} \phi_j \right] \\ &= \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} \alpha^i v_0 + \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} (1 - \alpha)\bar{v} \\ &\quad + \sqrt{(1 - \alpha^2)} \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} \sum_{j=0}^{i-1} \alpha^{i-j-1} \phi_j \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \theta_k &= \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} (\alpha' \theta_{i-1} + (1 - \alpha')\bar{\theta} + \sqrt{(1 - \alpha'^2)} \phi'_{i-1}) \\ &= \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} \left[(\alpha')^i \theta_0 + (1 - \alpha')\bar{\theta} + \sqrt{(1 - \alpha'^2)} \sum_{j=0}^{i-1} \alpha'^{i-j-1} \phi'_j \right] \\ &= \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} (\alpha')^i \theta_0 + \sum_{i=t}^{t+(k-1)m} (1 - \alpha')\bar{\theta} \end{aligned}$$

$$+ \sqrt{(1 - (\alpha')^2)^{k-1}} \sum_{i=t}^{(k-1)m} \sum_{j=0}^{i-1} (\alpha')^{i-j-1} \phi_j \quad (9)$$

在这里, v_k 和 θ_k 表示在未来 $(k-1)m$ 这段时间内移动节点的平均运动速度和运动方向. 由于 ϕ_{n-1} 和 ϕ_{n-1} 服从数学期望为 0 的高斯分布, 因此 v_k 和 θ_k 也是一个高斯随机过程, 它们的数学期望值是式(8)和式(9)的前两项之和. 可根据式(8)和(9)求出移动节点的位置:

$$x_{(t+(k-1)m)} = v_k (k-1)m \cos \theta_k \quad (10)$$

$$y_{(t+(k-1)m)} = v_k (k-1)m \sin \theta_k \quad (11)$$

为了减少移动终端频繁检测带来的网络开销, 需要设置一个阈值 R_h , 当 MN 与当前网络的 AR_i 之间的距离 r_i 超过 R_h 时则启动移动检测算法. 根据图 3 得出移动预测算法启动条件:

$$r_i = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} > R_h \quad (12)$$

当 MN 检测到它与当前网络 AR 的距离超过 R_h 时, 通过式(10)和式(11)对移动节点位置 $(x_{t+(k-1)m}, y_{t+(k-1)m})$ 的测算就可判断出移动节点有可能进入的相邻 AR, 为下一节所描述的快速组播切换过程做准备.

2.4 快速组播切换过程

MP-FHMM 的快速组播切换以现有的快速切换协议 FMIPv6^[19] 为基础, 通过引入新的组播选项, 把原有的 RtSolPr 消息、PrRtAdv 消息、FBU 消息和 HI 消息扩展为支持组播的 MRtSolPr 消息、MPrRtAdv 消息、MFBU 消息和 MHI 消息, 其它消息不变. 由于使用了移动预测算法, 即使 NAR (new access router) 中没有为 MN 提供服务的组播组, NAR 也能够根据 2.2.1 节的内容加入到指定的组播组, 使得 MN 在切换到新网络时能够迅速接收到组播数据分组.

MP-FHMM 的切换过程如图 4 所示, 当 MN 预测到将要切换到一个新的接入路由器 (NAR) 后, 它将启动快速组播切换过程. 具体步骤如下:

MN 向当前所在网络的 PAR (previous access router) 发送 MRtSolPr 消息并接收 MPrRtAdv 消息. MPrRtAdv 在

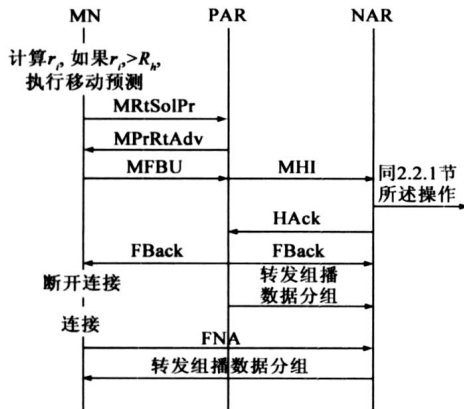


图4 组播切换过程

PrRtAdv 的基础上添加了 NAR 是否支持组播的选项, 这样 MN 就可以获得 NAR 的网络地址前缀信息及其是否支持的组播, 并且通过获得的 SMA 信息可以知道此次切换发生在子网内还是在子网间. MN 向 PAR 发送 MFBU 消息, 该消息中加入了 MN 所在的组播组列表信息, PAR 再通过 MHI 消息把此列表信息转发给 NAR. NAR 需要检查 MN 提供的新 LCoA 地址是否是有效和唯一的, 如果不是有效的或唯一的地址, 那么将在 NAR 的回复消息中包含一个正确的地址, 这时 NAR 还有另一项工作是配置它的 IPv6 邻居缓存, 为 MN 连接到它的无线接口时做好准备. 接下来 NAR 的处理过程同 2.2.1 节所述并返回 HAck 消息, 通知 PAR 是否已为 MN 准备好组播接入工作. 然后 PAR 向 MN 和 NAR 发送快速绑定确认 (FBack) 消息, PAR 开始通过隧道向 NAR 转发组播数据分组. 当 NAR 收到 MN 的 FNA 消息后, 确认 MN 已经到达服务范围内, 于是开始为 MN 提供已准备好的组播服务.

以上加入组播组和组播组更新都是在 MN 实际切换到 NAR 前完成的, 减少了由组播切换延迟引发的组播数据分组的丢失. 另外, 如果预测结果与实际进入的网络范围不一致, 则采用 MIP-RS 方法完成切换工作, 防止移动节点断开网络连接. 为了正确维护组播组的状态及节省网络资源, AR/SMA 定期对组成员及组播转发隧道进行查询, 如果在一定的时间内没有收到相应的回复信息, 则 AR/SMA 删除该组成员或组播转发隧道.

3 仿真比较和结果

为了检测 MP-FHMM 移动组播方案的效果, 在 ns-2^[20] 下将它与 MIP-RS, MIP-BT 以及 MobiCast 进行了对比. 仿真环境是一个正方形, 仿真平面左右、上下分别接续, 使得移动节点总在平面内运动, 其中均匀分布 100 个接入路由器 AR, 为了方便比较, 假设网络中的所有路由器都支持组播, 在拓扑中每个 SMA 负责管理 25 个 AR, SMA 管理 4 个 SMA. 所有的移动节点都是只有一个组播源的组播组的成员, 组播源每隔 10ms 发送一个大小为 300 字节的组播数据分组, 开始时组播成员随机分布在正方形中. 为配合高斯-马尔可夫移动预测模型, 在正式仿真前进行了 20s 的预仿真, 其余所需参数如表 2 所示. 设链路是可靠的, 组播数据分组丢失仅仅是由于切换引起的.

(1) 组播数据分组丢失率: 由于 MP-FHMM 使用了移动预测机制, 可以在切换前使相邻节点配置好组播信息, 并且在子网内切换及子网间的切换都使用了基于 FMIPv6 的快速组播切换机制, 减少了切换延迟, 所以可从图 5 中看到其组播数据分组丢失率低; MobiCast 的组播数据分组丢失率也比较低, 但由于它只在子网内

表 2 参数的值

参数	描述	值
l	仿真区域边长	5000m
N_{AR}	AR 的数量	100
R	AR 无线传输半径	360m
R_h	移动节点切换阈值	280m
N_{SMA}	SMA 的数量	4
N_{RMA}	RMA 的数量	1
N_m	组播组数量	1
N_{mn}	移动节点的数量	25-200
\bar{v}	移动节点的平均速度	5-30m/s
v	移动节点移动速度	0-40m/s
θ	移动节点运动方向改变值	0-60°
$\bar{\theta}$	移动节点运动方向改变平均值	30°
k	每次检测相隔的时钟周期数	15
m	时钟周期	5s
σ	速度的均方差	0.5
λ	角度的均方差	0.8
β	影响运动速度的因子	$10^{-0.5}$
δ	影响运动角度的因子	$10^{-0.3}$

实现了快速切换组播机制, 而没有实现移动节点在子网间切换时的处理方案, 只是简单的引用远程加入算法, 因此整体的组播数据分组丢失率要高于 MP-FHMM; MIP-BT 的组播数据分组丢失率最高, 这是因为当移动节点作为组播接收者发生切换时, 存在配置新的转交地址和 HA 绑定更新过程, 产生较大的切换延时, 导致较多组播数据分组的丢失; MIP-RS 不需要向 HA 发送绑定更新消息, 移动对于该组播协议来说是透明的, 因此 MIP-RS 的组播数据分组丢失率要低于 MIP-BT.

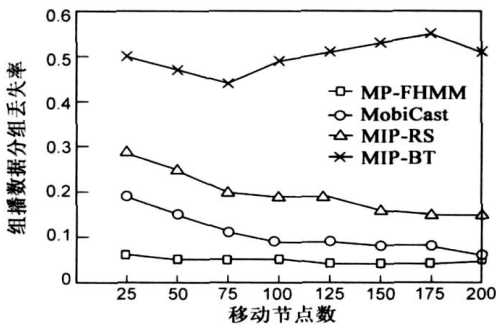


图 5 组播数据分组传输效率($\bar{v}=20m/s$)

(2) 组播数据分组传输效率: 如图 6 所示, 在 MIP-BT 中, 由于移动节点首先通过隧道将组播分组发送给 HA, 然后由 HA 负责通过组播转发树以组播的形式转发给 MN, 可见该算法使用的是三角路由, 链路的开销非常大, 并且这种隧道方式已经在某种程度上变成单播形式, 使组播数据分组的传输效率非常低; MIP-RS 的传输效率最高, 因为它总是使用最优组播树进行转发; MobiCast 需要子网内的所有 AR 都加入到所有的组播

组, 因此效率也比较低; MP-FHMM 只需要通知子网内有服务需要的 AR 加入到组播组, 传输效率要高于 MobiCast, 但是由于它需要提前通知相邻的 AR 加入到组播组, 引入了冗余数据, 因此传输效率要低于 MIP-RS.

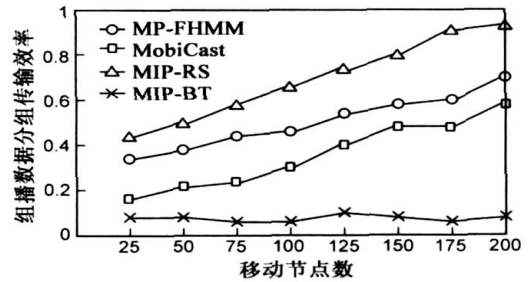


图 6 组播数据分组传输效率($\bar{v}=20m/s$)

(3) 组播传输开销: 组播传输开销是为了使组播数据分组传输到所有组成员而需额外增加的维护组播转发树及组成员状态的数据分组。从图 7 中可以看出, MIP-BT 的组播传输开销最小, 这是因为它只要求 HA 知道 MN 现在的位置就可以通过最基本的 IPv6 分组完成, 不需要额外的数据分组; MIP-RS 因为需要维护最优组播树, 所以需要一定的传输开销; MP-FHMM 介于 MIP-BT 和 MIP-RS 之间, 它不需要维护最优组播树, 但是需要根据移动预测的结果查询和返回组播切换信息; MobiCast 的传输开销最大, 因为它需要域间及 AR 间的大量信息交互, 这些信息包括要求所有 AR 都加入翻译组播组的消息, 所以导致传输开销较大.

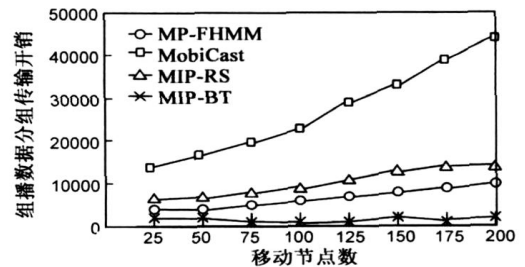


图 7 组播传输开销($\bar{v}=20m/s$)

(4) 传输延迟: 传输延迟是指组播数据分组从组播源到每个组成员的传输延迟, 通常这个延迟包括组播树传输延迟和隧道传输延迟两部分。图 8 和图 9 分别表示组播数据分组的平均延迟和最大延迟, 从图中可以

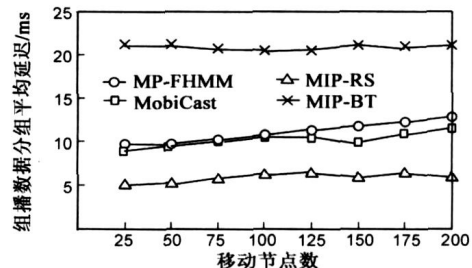


图 8 平均传输延迟($\bar{v}=20m/s$)

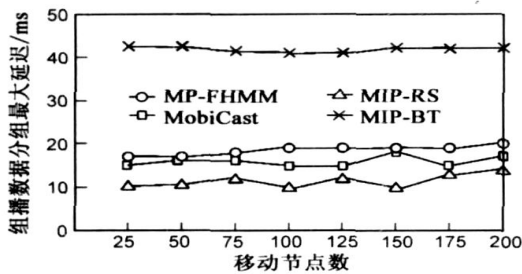


图9 最大传输延迟($\bar{v}=20\text{m/s}$)

看出, MIP-RS 的传输延迟最小, 这是因为它是通过最优树转发分组; MIP-BT 的传输延迟最大, 因为它的传输路径是三角路由, 不是最优路由; MP-FHMM 传输延迟比

MobiCast 稍大的原因是在子网间切换时 RMA 和 SMA 通过隧道传送组播数据分组。在图 10 中给出了移动速度对组播数据分组平均延迟的影响, MN 的平均移动速度越快, MP-FHMM 的

优势就越明显, 由于移动节点每一次运动速度和方向的变化是有一定规律的, 所以在绝大多数情况下 MP-FHMM 都可以正确判断出将要切换的网络, 使将要切换到的新 AR 提前做好准备, 加快了切换过程。

4 总结和展望

本文提出基于移动预测的快速分层组播体系结构 MP-FHMM, 通过对组播进行分层管理, 屏蔽了移动节点在子网内的移动性, 因此节点在子网内切换时无需更新组播转发树, 减少了移动节点的组播协议开销, 优化了组播数据传输路径。在组播切换时使用基于高斯-马尔可夫移动预测的快速组播切换, 通过对移动节点组播切换的预测, 提前为组播切换配置相应的切换信息, 减少组播切换时间, 因此也减少了切换时丢失的组播数据分组。仿真结果显示 MP-FHMM 要优于现有的常规移动 IP 组播协议, 并且尤其适合在移动节点运动较快, 运动路线有规律的环境中应用, 比如高速公路, 高速铁路等。MP-FHMM 还有可以改进的地方, 下一步的工作将是研究对于移动节点为组播源节点的情况, 并在此体系结构的基础上进行适当的修改。

参考文献:

- [1] Deering S. et al. Multicast routing in datagram internetworks and extended LANs[J]. ACM Transactions on computer Systems, 1990, 8(2): 85-111.
- [2] Romdhani I, Kellil M, Lach H. IP mobile multicast: challenges and solutions[J]. IEEE Communications Surveys, 2004, 6(1):

18-40.

- [3] Estrin D. et al. Protocol independent multicast sparse mode protocol specification(PIM-SM) [S]. IETF RFC 2362, 1999.
- [4] Ballardie A. Core based trees multicast routing[S]. IETF RFC 2189, 1997.
- [5] Waitzman D et al. Distance vector multicast routing protocol (DVMRP)[S]. IETF RFC 1075, 1988.
- [6] Moy J. Multicast extensions to OSPF[S]. IETF RFC 1584, 1994.
- [7] PerKins C. IP mobility support[S]. IETF RFC 2002, 1996.
- [8] Johnson D, Perkins C. Mobility support in IPv6[S]. IETF RFC 3775, 2004.
- [9] Cheng Lin Tan. MobiCast: a multicast scheme for wireless networks[J]. ACM/ Baltzer Mobile Networks and Applications, 2000, 5(4): 259-271.
- [10] 吴茜, 吴建平, 徐明伟, 崔勇. 基于快速组播切换的分层移动组播体系结构[J]. 软件学报, 2006, 17(1): 86-95.
- [11] Ping Wang, Yunze Cai, Jinjie Huang, Xiaoming Xu. A hierarchical multicast protocol in mobile IPv6 networks[J]. Computer Communications, 2006, 30(1): 144-152.
- [12] 孙利民, 廖勇, 郑键平, 吴志美. 一种基于层次结构的移动组播算法[J]. 软件学报, 2003, 14(9): 1608-1614.
- [13] Lin CR, Wang KM. Mobile multicast support in IP networks [A]. In Proceedings of the InfoCom 2000[C]. IEEE Computer Society Press, 2000. 1664-1672.
- [14] 王胜灵, 侯义斌, 黄建辉, 黄樟钦. 基于动态范围的移动组播协议[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 2096-2102.
- [15] Georgios A. Leolis, Iakovos S. Venieris. Fast MIPv6 extensions supporting seamless multicast handovers[J]. Computer Networks, 2007, 51(9): 2379-2396.
- [16] Hesham Soliman, Claude Castelluccia, et al. Hierarchical Mobile IPv6 mobility management (HMIPv6) [S]. draft-ietf-mobileip-hmipv6-07.txt(work in progress), IETF, 2002.
- [17] Liang B, Haas Z J. Predictive Distance based Mobility Management for PCS Networks[A]. In Proceedings of IEEE INFOCOM 99[C]. New York City, NY, 1999. 1377-1384.
- [18] Hu Y C, Johnson D B. Caching Strategies in On-demand Routing Protocols for Wireless Networks[A]. In Proceedings of ACM/IEEE MobiCom[C]. 2000. 231-242.
- [19] Koodli R. Fast handovers for mobile IPv6[S]. IETF RFC 3775, 2004.
- [20] The ucb/lbnl/vint network simulator ns (version 2) [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

作者简介:

马学彬 男, 1981 年生于内蒙赤峰, 东北大学博士研究生. 研究方向为移动 IP. E-mail: ma_xuebin@126.com

温涛 男, 1962 年生于陕西宝鸡, 东北大学教授, 博士生导师. 研究方向为计算机网络, 知识组织与管理. E-mail: wentao@neusoft.edu.cn