

基于骨干结点集的移动 IP 组播路由算法研究

周 灵^{1,2} 孙亚民¹

¹(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

²(佛山科学技术学院计算机系 广东佛山 528000)

(cszhouling@sohu.com)

Research on Multicast Routing Algorithm for Mobile IP Based on Bone Node Set

Zhou Ling^{1,2} and Sun Yamin¹

¹(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

²(Department of Computer Science, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000)

Abstract In order to optimize the cost of multicast tree, minimize the joined latency, and reduce the transmission delay in mobile and wireless environment, bone node set is introduced to group communication for mobile IP. Based on the idea of bone node set, a multicast routing algorithm called BNSBMR (bone node set-based multicast routing algorithm) is designed in this paper. Bone node set is a dynamic set of mobile IP AR (access router) which satisfies some special conditions. BNSBMR can efficiently construct a series of multicast trees for mobile IP and characters itself in three aspects. Firstly, it optimizes the cost of multicast tree and reduces the bandwidth consumption by using bone node set. Secondly, it reduces the joined latency for mobile node to join multicast session, which is helpful to achieve a fast handover. Thirdly, the transmission delay for multicast packet is lessened by sharing those bone nodes. Correctness of BNSBMR is proved and the time complexity is analyzed in theories. Simulation experiments are designed based on a 5×5 mesh topology. Those results show that BNSBMR has optimized cost of multicast tree, reduced the joined latency and minimized the transmission delay. QoS (quality of service) of multicast routing for mobile IP is improved by using bone node set in some degree.

Key words multicast routing; mobile IP; bone node set; cost optimization; fast handover

摘 要 为了优化移动 IP 组播生成树代价,减少移动结点切换加入时延和信息传输时延,引入了移动 IP“骨干结点集”思想,设计了移动 IP 组播路由算法 BNSBMR (bone node set-based multicast routing algorithm)。“骨干结点集”是移动 IP 环境下满足一定条件的 IP 子网接入路由器 AR(access router)的集合.该算法通过“骨干结点集”降低移动 IP 组播生成树的代价;减少移动结点切换的加入时延;并通过路径优化降低信息传输时延.从理论上证明了算法的正确性,并分析了其计算复杂度.仿真实验表明:BNSBMR 算法从树代价、加入时延、传输时延 3 个方面提高了移动 IP 环境下组播业务满足 QoS 约束的能力.

关键词 组播路由;移动 IP;骨干结点集;代价优化;快速切换

中图法分类号 TP393.02

组播(multicast)是由一个结点同时向多个目的结点发送信息的通信方式^[1].许多网络多媒体应用,如视频点播、分布式控制、互动游戏等均要求通信网络能够提供组播功能.组播通信通过构造一棵覆盖信息源和目的结点集的组播树,以树路由的形式进行信息传递.

在有固定网络拓扑结构的 Internet 多媒体通信得到广泛应用后,人们对基于移动无线互联网无处不在的自由通信需求也越来越强烈^[2].笔记本电脑等移动设备得到了迅速的普及,加上无线互连技术的进一步成熟,有越来越多的移动结点 MN(mobile node)通过无线设备连接到 Internet 上,希望能够随时随地对互联网进行访问;同时,移动子网技术也得到了迅速的发展,例如运动中的军队、航行中的轮船、行走中的火车或汽车等运动主体上的终端通过移动路由器形成移动 IP 子网,这个移动子网也要求与 Internet 保存随时随地的连线.因此,支持移动终端(或移动子网)是互联网发展的必然要求.

组播通信和移动无线互联网的结合给两者都带来了新的挑战^[3].为了解决移动 IP 组播中的一些关键问题,IETF(Internet engineering task force)在移动 IP 等协议中提出了双向隧道 BT(bi-direction tunneling)和远程签署 RS(remote subscription)方案来解决这些问题^[4-6],另外国内外研究人员针对这两个方案还提出了一些改进算法. Chikarmane 等人设计了一个 MoM 算法^[7],主要用于克服 BT 算法中的隧道聚焦和包复制等问题. Lin 等人提出了一个 RBMoM(range-based mobile multicast)算法^[8],在移动 IP 体系结构中引入一个组播家乡代理 MHA(multicast home agent),并使用服务范围的概念,在路由优化和组播树重构频率方面取得一个折中. Wu 等人提出了一个基于“移动支持代理”的算法,通过引入 MSA(mobility support agent)实体来降低移动 IP 组播的丢包率^[9]. Suh 等人提出了一个 MMA(multicast by multicast agent)的组播方式,主要是引入了 MF(multicast forwarder)实体进行信息转发,从而解决切换时的丢包问题^[10].对移动组播除了采用切换优化策略外,Tan 等人基于分层的思想提出了 MobiCast 组播路由策略^[11].国内中国科学院软件研究所孙利民教授等基于层次结构提出了 FMSR(first MSA second RS)算法^[12],减少了组播树的重构次数;清华大学计算机系吴茜博士等提出的 FHMM(fast multicast handoff based hierarchical mobile multicast architecture)算法^[13],

利用分层思想提高组播树的稳定性,利用快速切换来减少切换时延等.

国内外学者针对移动 IP 组播路由问题提出了不少的解决方案,主要通过改变移动 IP 的体系结构引入新的实体或者采用分层思想,来进行移动切换(handover)的优化;很少考虑如何结合具体 IP 组播特点来进行生成树代价优化,并减少切换加入时延.本文在移动无线环境下引入 IP 组播“骨干结点集”的思想,设计了一个移动 IP 组播路由算法 BNSBMR(bone node set-based multicast routing algorithm);主要是利用骨干结点集来优化组播树代价,减少组播切换加入时延和信息传输时延,从而也降低丢包率.

1 基本概念与移动组播模型

网络可用图 $G=(V, E)$ 来表示,其中 V 为网络结点集, E 为网络边集合,网络结点数为 $n=|V|$,对 $e \in E$,定义代价函数 $Cost(e):E \rightarrow \mathbb{R}^+$,时延函数 $Delay(e):E \rightarrow \mathbb{R}^+$.给定组播信息源 s ,目的结点集 $D, D \subset V$,目的结点数为 $m=|D|$.

定义 1. 路径. 在网络 $G=(V, E)$ 中,如果存在结点序列 $v, w_1, w_2, \dots, w_n, u$,使得边 $(v, w_1), (w_1, w_2), \dots, (w_n, u)$ 都在 E 中,则称 $(v, w_1, w_2, \dots, w_n, u)$ 为从结点 v 到结点 u 的一条路径,记为 $P(v, u)$.

定义 2. 最小代价路径. 从结点 u 到 v 边代价之和最小的一条路径称为从 u 到 v 的最小代价路径,记为 $P_{lc}(u, v)$;从结点 u 到树 T 中结点边代价之和最小的路径称为从 u 到 T 的最小代价路径,记为 $P_{lc}(u, T)$.

若代价权重为距离,则最小代价路径为最短路径.最短路径树就是以 s 为根,由所有 $v \in D$ 到 s 的最小代价路径 $P_{lc}(v, s)$ 构成的树.

定义 3. 最小代价树. 给定网络 $G(V, E)$ 和组播源 s 、目的结点集 D ,若一棵覆盖 $s \cup D$ 的生成树 T 的代价满足如下条件:

$$Cost(T) = \min\{Cost(T) = \sum_{v \in D} \sum_{e \in P(s, v)} Cost(e)\}, \quad (1)$$

$$\forall v \in D, P(s, v) \in T,$$

则称这颗树 T 为 $s \cup D$ 的最小代价树,简称 LCT(least cost tree).

定义 4. 骨干结点集. 在移动 IP 环境下,骨干结点集是一个动态变化的子网接入路由器 AR 的集合,用 N_b 表示.集合中的元素包括静态的组播结点

所在子网的接入路由器 AR 和满足条件式(2)的移动结点所在子网的接入路由器 AR,

$$\forall i \in D, T_i > \Delta, \quad (2)$$

其中 T_i 指目的结点 i 连续停留在某子网的时间, Δ 为一个时间下限. 用 $Router(i)$ 表示 i 所在子网的 AR, 则骨干结点集可表示为

$$N_b = \{Router(i) \mid i \text{ 为静态目的结点}\} \cup \{Router(i) \mid i \text{ 为移动目的结点, 且 } T_i > \Delta\}. \quad (3)$$

在移动 IPv6 协议^[5-6]中, 主要是引入了两个实体: 移动结点 MN 和家乡代理 HA (home agent). 图 1 是基于移动 IP 的组播路由模型图. Source 为组播源 s ; Subnet1 为移动结点 MN1 的家乡子网, HA 为其家乡代理; Subnet2 为移动结点 MN1 的当前子网, F 为其接入路由器 AR. 当 MN1 在子网 Subnet2 和 Subnet3 之间移动时将发生切换, MN1 移到子网 Subnet3 后在其接入路由器 G 处获取转交地址 CoA (care of address), 并重新加入组播树或者从其家乡代理处接受组播信息. 从该模型可以看出, 移动 IP 组播路由问题主要包括两个方面: 其一是如何在无线移动环境下构建优化的 IP 组播树; 其二是如何处理移动结点的“切换”问题. 本文基于骨干结点集的移动 IP 组播路由算法主要是解决第 1 个问题, 同时也兼顾考虑第 2 个问题.

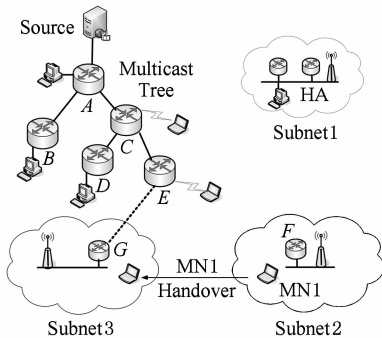


Fig. 1 Multicast model for mobile IP.

图 1 移动 IP 组播模型图

2 BNSBMR 算法

2.1 基本思想

算法基本思想主要包括:

当源 s 发起会话时对当前所有目的结点 AR 生成一棵组播树 T 和骨干结点集 N_b ; T 实现组播路由, N_b 是 MN 切换时组播树重构和路由优化的基础.

如果某移动结点 i 发生切换, 则其通过搜索 N_b , 找到 $j \in N_b$ 使得 i 和 j 的距离是 i 到 N_b 中所有结点的最小值. 根据定义 4, 移动结点 i 通过 N_b 可以找到一条相对代价较小的路径加入组播树, 从而优化生成树代价, 并减少加入时延. 骨干结点集不是固定的共享树, 当 $\forall i \in D, T_i > \Delta$ 时, 骨干结点集元素会进行调整, 从而保存其正确性和优越性. 同时, 骨干结点是组播树中相对稳定的那些 AR, 所以组播树的重构具有较大的稳定性.

下面进一步分析算法, 相应过程用伪代码进行描述.

2.2 骨干结点集和组播树的预计算过程

组播会话开始时, 源 s 扫描目的结点所在子网 AR 来预生成 N_b 和 T . 伪代码如下:

```

Input:  $G, D, s$ ; /* 目的结点所在 AR 集合为  $D$  */
Output:  $T, N_b$ .
Pre_Cal_Tree( $G, D, s$ )
①  $N_b \leftarrow s, T \leftarrow s$ ;
②  $Q \leftarrow D$ ; /*  $Q$  为队列, 用于保存  $D$  */
③ While ( $Q$  is not Null) do
④   Select the  $Router(i)$  and a node  $j \in N_b$  so
that  $P_{lc}(Router(i), j)$  is minimum among  $P_{lc}(Router(i), \forall j \in N_b)$  /*  $i$  为目的结点,  $Router(i)$  表示其 AR,  $Router(i) \in D$  */
⑤   If  $i$  is a static node then
⑥     Marked  $Router(i)$  as a bone node;
⑦      $N_b \leftarrow N_b \cup Router(i)$ ;
⑧      $T \leftarrow T \cup P_{lc}(Router(i), j)$ ;
⑨      $Q \leftarrow Q - \{Router(i)\}$ ;
⑩   End if
⑪   If  $i$  is a mobile node then
⑫      $T \leftarrow T \cup P_{lc}(Router(i), j)$ ;
⑬      $Q \leftarrow Q - \{Router(i)\}$ ;
⑭   End if
⑮ End while
⑯ Return  $T, N_b$ .

```

2.3 骨干结点集维护过程

若结点 i 在某个子网停留的时间大于一个时间下限 Δ , 根据定义 4, 可以将其 AR 作为 N_b 的一个元素. 移动结点设有一个定时器, 切换后启动定时器开始计时, 当 $T_i > \Delta$ 触发下面的 $Add()$ 过程, 将该结点所在 AR 标记为骨干结点.

Add()

- ① If $T_i > \Delta$ then
- ② marked $Router(i)$ as a bone node;
- ③ $N_b \leftarrow N_b \cup Router(i)$;
- ④ End if

结点 i 发生切换时,当前 AR 检查该子网组播目的结点数,若有目的结点,则不进行任何操作;若无目的结点,则找到距离自己有最短距离的骨干结点作为自己下游结点的嫁接结点,并启动下面的 Delete() 过程标记自己为非骨干结点;若存在环路,启动消环过程。

Delete()

- ① If there does not exist multicast node connecting to $Router(i)$ then
- ② Select a parent node for its son nodes;
- ③ Marked $Router(i)$ as a non-bone node;
- ④ $N_b \leftarrow N_b - Router(i)$;
- ⑤ End if
- ⑥ If there exists a loop then
- ⑦ Removing the loop by changing the node's parent;
- ⑧ End if

2.4 移动结点路由过程

结点 i 切换到新的子网时,先询问该子网是否有组播成员,若有则直接从 AR 处接受组播信息,不执行路由选择;若无则启动下面的 Cal_Tree() 过程,进行路由选择. 伪代码描述如下:

Input: $T, N_b, Router(i)$;

Output: T .

Cal_Tree($T, N_b, Router(i)$)

- ① For each node in N_b do
- ② Find node $j \in N_b$ which has a shortest path to $Router(i)$;
- ③ $T \leftarrow T \cup P_{ic}(Router(i), j)$;
- ④ If there exists a loop then
- ⑤ Removing the loop by changing the parent node;
- ⑥ End if
- ⑦ Return T .

3 算法分析

3.1 算法正确性

引理 1. 结点发生移动切换,若其接入路由器

AR 退出骨干结点集, BNSBMR 算法仍能生成一棵无环、连通的组播树。

证明. 在图 2 中,实心圆圈表示该 AR 为骨干结点,空心圆圈表示该 AR 为非骨干结点。

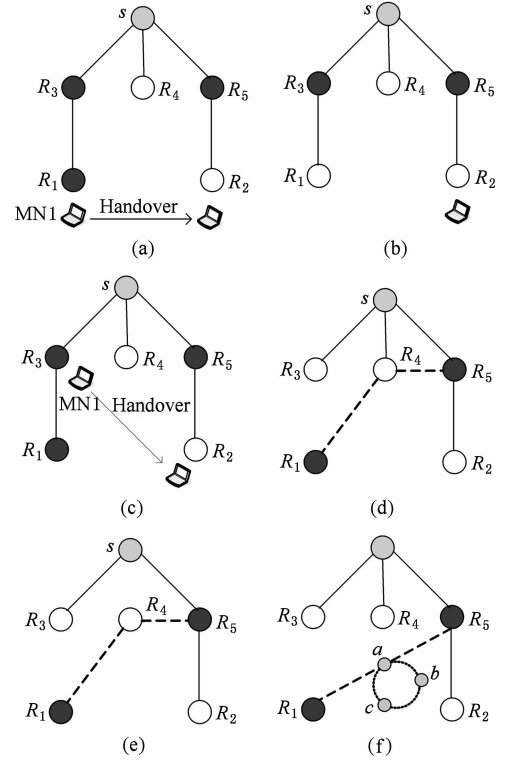


Fig. 2 Multicast tree for handover. (a) Bone node being a leaf; (b) Multicast tree after handover; (c) Bone node not being a leaf; (d) A loop in the multicast tree; (e) Multicast tree with removing the loop; and (f) A loop in the joining road.

图 2 结点切换时生成组播树. (a) 骨干结点为树叶子的组播树; (b) 切换后的组播树; (c) 骨干结点为非树叶子的组播树; (d) 树上形成环路; (e) 改变父结点消除环; (f) 加入链路上形成环。

先证明当 MN1 发生切换时其所在 AR 是组播树叶结点时的情况. 不失一般性,假设 MN1 发生切换前组播树如图 2(a)所示,考虑 MN1 从 R_1 切换到 R_2 的情况,若 R_1 所在子网仍有组播成员,则不进行任何操作;若无其他组播结点,则 R_1 标记自己为非骨干结点,如图 2(b)所示,仍为连通、无环的组播树。

再证明当 MN1 发生切换时其所在 AR 不是组播树叶结点时的情况. 假设 MN1 发生切换前组播树如图 2(c)所示,当 MN1 从 R_3 切换到 R_2 时,若 R_3 所在子网仍有组播成员,则不进行任何操作. 若无其他组播结点,则 R_3 标记自己为非骨干结点,退出骨干结点集,并为其下游结点例如 R_1 选择一个

新的骨干结点作为其父结点. 这时组播树有两种情况可能出现环路: 第 1 种情况是下游结点通过两个在树结点形成环路, 例如, R_1 通过 R_4 连接到 R_5 , 如图 2(d) 所示形成环 (s, R_4, R_5, s) . 第 2 种情况是在树外形成环路, 例如 R_1 连接到 R_5 时如图 2(f) 所示形成回路 (R_1, a, b, c, a, R_5) . 对于第 1 种情况, 根据骨干结点集维护算法 *Delete()* 过程启用消环过程, 通过改变 R_4 的父结点为 R_5 来消除环路, 如图 2(e) 所示. 对于第 2 种情况, 也可以用反证法证明最小代价路径不会存在这样的环路, 参见文献[14].

因此, 结点发生切换时, 若其 AR 退出骨干结点集, BNSBMR 算法能生成一棵连通、无环的组播树. 证毕.

引理 2. 结点发生移动切换, 在新的子网中选择距离自己最近的骨干结点加入组播会话, BNSBMR 算法能生成一棵无环、连通的树.

证明. 参见文献[14].

定理 1. 移动无线环境下, BNSBMR 算法能生成无环、连通的组播树.

证明. 显然, 预计算过程生成的组播树是连通、无环的. 由引理 1 可知: 结点发生移动切换, 若 AR 退出骨干结点集, 能生成一棵连通、无环的组播树. 由引理 2 可知: 结点发生切换, 在新的子网中选择距离自己最近的骨干结点加入组播会话, 能够生成一棵无环、连通的树. 所以, BNSBMR 算法能生成无环、连通的组播树. 证毕.

3.2 算法复杂度

定理 2. 预计算过程 *Pre_Cal_Tree()* 计算复杂度为 $O(mn)$, 其中 m 是目的结点数, n 是网络规模.

证明. 设网络规模为 n , 目的结点数为 m , 组播源为 s . 预计算算法 *Pre_Cal_Tree* 时间复杂度主要在于 While 循环, 循环次数为目的结点数 m ; 当每个目的结点选择具有最小代价的在树结点时, 最坏情况下在树结点数目为网络的规模数 n , 因此, 预计算算法的复杂度最坏情况下为 $O(mn)$. 证毕.

定理 3. 切换发生后, *Cal_Tree()* 的计算复杂度最坏情况下为 $O(n)$, 即结点切换时算法复杂度为 $O(n)$, 其中 n 是网络规模.

证明. 设 n, m, s 意义同上. 根据路由过程 *Cal_Tree()* 可知某结点 i 切换发生时, 算法主要步骤为: 结点 i 搜索骨干结点集 N_b , 找到与自己距离最近的结点 $j \in N_b$, 将 $P_{lc}(i, j)$ 加入组播树, 最坏情况下骨干结点数为 n ; 因此, 结点切换时计算复杂度最坏情况下为 $O(n)$. 证毕.

4 仿真实验

仿真实验拓扑采用 5×5 的 Mesh 结构. 25 个子结点代表 25 个无线子网; 每个子网至少包括一个基站和一个路由器, 根据需要路由器可以作为家乡代理 HA 或者子网的接入路由器 AR. 假设组播目的结点随机分布在 25 个子网中, 相邻子网间代价与时延测度 (metric) 均为 1. 同时, 为了模拟结点的移动特性, 定义一个二元组 (A, B) , 其中 A 表示结点移动的方向, B 表示结点在子网中停留的连续时间并服从指数分布, 均值为 10 min. 结点移动时可以随机移动到与其相邻的任意子网. 仿真拓扑采用计算机高级语言实现, 参见文献[15]. 仿真参数如表 1 所示:

Table 1 Simulation Parameters

表 1 仿真参数表

Parameter	Description	Value
N	Number of LANs	5×5
n	Number of group members	$5 \sim 30$
s	Sources per multicast group	1
A	The direction to move	Random
B/min	The mean sojourn time	10
Δ/min	The time boundary to becoming a bone node	20

为了和同类算法进行比较, 选择 RS, BT, RBMoM 作为仿真测试对比算法, RS 与 BT 是两个基本的移动 IP 组播算法, RBMoM 是同类改进算法中较优秀的一个算法. 仿真时组播成员数由 5 增加到 30, 每次增加 5 个, 假设所有目的结点均为 MN. 每个数据测试点运行 1000 次仿真, 取其均值作为实验值. 测试性能包括组播树代价、切换时平均加入时延和平均信息传输时延 3 个指标, 分别定义如下:

组播树代价

$$Cost = \sum_{e \in T} Cost(e), \tag{4}$$

平均加入时延

$$Join_delay_average = \left(\sum_{i \in D} \sum_{e \in p_{lc}(i, s)} Delay(e) \right) \times \frac{1}{m}, \tag{5}$$

平均传输时延

$$Trans_delay_average = \left(\sum_{i \in D} \sum_{e \in P(i, s)} Delay(e) \right) \times \frac{1}{m}, \tag{6}$$

其中, m 为组播目的结点数, $P(i, s)$ 是树 T 中从 i

到 s 的路径。

1) 组播树代价. 实验结果如图 3 所示. BNSBMR 算法具有最好的生成树代价性能; RS 算法生成树也具有较好的代价性能; BT 算法在 4 个算法中生成的组播树代价最大; RBMoM 代价性能也介于 RS 和 BT 两者之间. 这主要是由于 BT 方式依赖于家乡代理 HA 利用较长的隧道传输, 也没有进行任何的路由优化. RS 是从外部子网直接加入组播树, 没有长的隧道, 代价性能也较好. BNSBMR 利用骨干结点集, 在 RS 算法的基础上进一步优化了代价性能, 具有最好的代价性能. RBMoM 算法是 RS 和 BT 的折中, 性能介于两者之间.

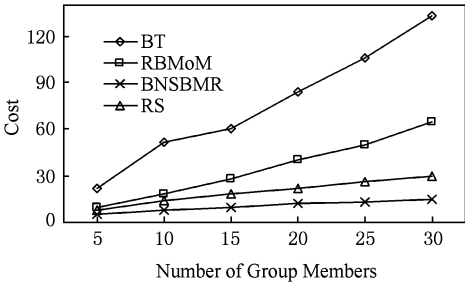


Fig. 3 Relation of cost versus member number.

图 3 代价与结点数关系

2) 平均加入时延. 加入时延通常指从 MN 到达新的子网开始, 一直到通过该子网接收到组播数据的时间间隔, 主要包括获得 CoA 的时延和组播路径加入时延, 由于前者与具体的组播算法无关, 因此测试性能时主要考虑后者. 按式 (5) 定义的平均加入时延来进行测试. 实验结果如图 4 所示, 分析过程同上.

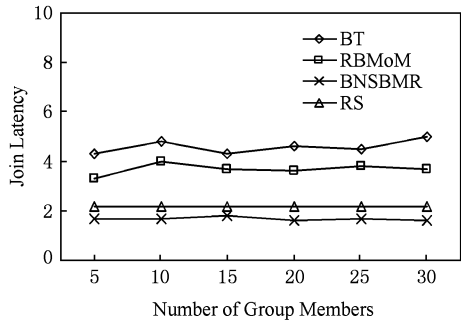


Fig. 4 Relation of join latency versus member number.

图 4 加入时延与结点数关系

3) 平均传输时延. 平均传输时延是算法提供 QoS 能力的一个重要方面, 主要与目的结点到信息源的路径时延有关. 实验结果如图 5 所示. RS 具有最优的传输时延, 这是因为 RS 由于通过外部子网

直接加入组播树, 与信息源具有最小的路径时延, 因而具有最优的平均传输时延特性; BNSBMR 算法和 RBMoM 算法性能适中; BT 算法性能较差.

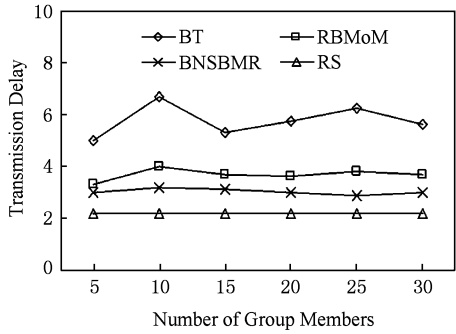


Fig. 5 Relation of transmission delay versus member number.

图 5 传输时延与结点数关系

5 结论及进一步的工作

本文提出了基于骨干结点集的移动 IP 组播路由算法 BNSBMR, 具有如下优点: 1) 该算法没有扩展或改变移动 IP 体系结构, 没有引入任何新的实体和协议, 只依赖于 MN, AR 两个实体和移动 IP 协议, 算法运行不需要卷入其他与组播无关的结点; 2) 基于骨干结点集合思想优化了组播树代价, 减少了移动结点切换加入时延和信息传输时延; 3) 骨干结点集思想是开放的, 可与其他移动 IP 技术进行整合, 计算复杂度仅为 $O(n)$, 具有良好的可扩展性.

以后的工作可以考虑结合“分层”的思想^[11, 16]来减少切换次数, 从而在较完整的意义上达到快速切换; 同时, 使用文献[10]的缓冲等技术来降低丢包率, 从而实现平滑切换; 这些讨论构成一个完整的移动 IP 组播路由解决方案.

致谢 在此, 我们要感谢 Texas A&M University 的陈建二教授, 感谢他在“龙星计划”高等算法分析课程班上关于网络优化算法的启迪和研讨!

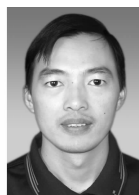
参 考 文 献

[1] Laxman H, Mukherjee S B. Multicast routing algorithms and protocols: A tutorial [J]. IEEE Network, 2000, 14(1): 92-102

[2] Gossain H, et al. Multicast: Wired to wireless [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6): 116-123

[3] Romdhani I, et al. IP mobile multicast: Challenges and solutions [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004, 6(1): 18-41

- [4] Perkins C. IP mobility support [S/OL]. RFC2002, 1996. [2007-02-01]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2002.txt>
- [5] Perkins C. IP mobility support for IPv4 [S/OL]. RFC3344, 2002. [2007-02-01]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3344.txt>
- [6] Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility support in IP [S/OL]. RFC3775, 2004. [2007-02-01]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt>
- [7] Chikarmane V, *et al.* Multicast support for mobile hosts using mobile IP: Design issues and proposed architecture [J]. ACM Mobile Networks and Applications, 1998, 3(4): 365-379
- [8] Lin C R, Wang K M. Scalable multicast protocol in IP-based mobile networks [J]. ACM Wireless Networks, 2002, 8(1): 27-36
- [9] Wu J, *et al.* Agent-based seamless IP multicast receiver handover [C] //IFIP Proc of PWC 2000. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2000: 213-226
- [10] Suh Y, Shin H, Kwon D. An efficient multicast routing protocol in wireless mobile networks [J]. ACM Wireless Networks, 2001, 7(5): 443-453
- [11] Tan C L, Pink S. Mobicast: A multicast scheme for wireless networks [J]. ACM Mobile Networks and Applications, 2000, 5(4): 259-272
- [12] Sun Limin, Liao Yong, Zheng Jianping, *et al.* A mobile multicast algorithm based on hierarchical architecture [J]. Journal of Software, 2003, 14(9): 1608-1614 (in Chinese)
(孙利民, 廖勇, 郑健平, 等. 一种基于层次结构的移动组播算法[J]. 软件学报, 2003, 14(9): 608-1614)
- [13] Wu Qian, Wu Jianping, Xu Mingwei, *et al.* A fast multicast handoff based hierarchical mobile multicast architecture [J]. Journal of Software, 2006, 17(1): 86-95 (in Chinese)
(吴茜, 吴建平, 徐明伟, 等. 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)
- [14] Zhou Ling. Research on high-performance multicast routing algorithm based on IP networks [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007 (in Chinese)
(周灵. 高性能IP组播路由算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007)
- [15] Zhou Ling, Sun Yamin. An analysis of multicast support for mobile hosts using mobile IPv6 [C] //IEEE Proc of Wicom06. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006
- [16] Zhang Hanwen, *et al.* Hierarchical access authentication method in mobile IPv6 networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(1): 51-57 (in Chinese)
(张瀚文, 等. 移动IPv6网络层次化接入认证方法[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(1): 51-57)



Zhou Ling, born in 1972. Received his Ph. D. degree in computer science and technology from Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China in 2007. Lecturer in Foshan University. His main research interests include routing

algorithm and protocol, and mobile IP.

周 灵, 1972年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为路由算法与协议、移动IP.



Sun Yamin, born in 1946. Professor and Ph. D. supervisor. His main research interests include computer communication, and algorithm theory and application.

孙亚民, 1946年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机通信、算法理论与设计.

Research Background

Group communication over mobile IP is becoming a challenging task in the next generation networks. More and more people begin to focus on multicast routing algorithms for mobile IP. Some open problems could include handover, lost packet, cost optimization, QoS constraint, etc. Different algorithms have been proposed to address them. Some optimize the handover by introducing new entities to extend the architecture of mobile IP, such as RBMoM, MSA, and MMA. Some use a "hierarchical area" idea to reduce the rebuilding numbers of multicast tree so that the communication can keep steady relatively, such as Mobicast, FMSR, and FHMM. So far few people study how to optimize the tree cost and how to reduce the joined latency. In this paper, we concentrate on how to optimize the tree cost. "Bone node set" is presented and multicast routing algorithm BNSBMR (bone node set-based multicast routing algorithm) is designed. Our work is supported by the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China under grant No. 20050288015.