

# 一种基于树环结构的应用层多播协议<sup>\*</sup>

刘洋志<sup>1</sup> 肖扬<sup>2</sup> 杨明<sup>2</sup>

(沈阳军区 65066 部队教育中心 沈阳 116100)<sup>1</sup> (解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)<sup>2</sup>

**摘要** 应用层多播是互联网研究的一个重要课题。现有的应用层多播协议主要解决可扩展性问题, 针对网络系统最为关键的可靠性问题的研究还很少。本文提出了一种改进应用层多播生存性和可扩展性的树型环结构及该结构的构建算法; 提出了一种新的树环结合的应用层多播协议, 该协议综合了树型结构和环型结构的优点, 具有可靠性高、扩展性好、数据传输效率高等优点。仿真结果表明, 该协议能较好地适用于大规模应用层多播环境。

**关键词** 应用层多播, 区域环, 环首树

## A Tree-ring-based Application-layer Multicast Protocol

LIU Yang-zhi<sup>1</sup> XIAO Yang<sup>2</sup> YANG Ming<sup>2</sup>

(Education Cneter, 65066 Troops, Shenyang Military Region, Shenyang 116100, China)<sup>1</sup>

(Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Application-layer multicast is an important research topic for the Internet. At present, the research for application-layer multicast is mainly on scalability, but scarcely on reliability. In this paper, we propose a full new tree-ring based structure and a series of approximation algorithms to improve scalability and reliability. A novel tree-ring based application-layer multicast protocol, which has better reliability, scalability and high data transfer rate is presented either. The emulation shows that the protocol fits large-scale application-layer multicast environment well.

**Keywords** Application-layer multicast, Area ring, Leader tree

## 1 引言

多播是一种高效的多点通信方式, 是基于组通信应用的关键技术, 广泛应用于视频点播、网络会议、多方游戏、交互仿真、流媒体传输等多个领域。多播技术有 IP 多播<sup>[1]</sup> 和应用层多播<sup>[2]</sup> 两种实现方式。IP 多播是网络层多播, 由网络负责路由由建立、数据复制及转发, 效率高, 但部署代价大, 至今没有得到广泛应用。应用层多播是由端主机实现多播功能, 结点间的通信通过覆盖网(Overlay Networks)来完成, 有效降低了部署的代价和难度, 是实现多播较为现实可行的方式。

应用层多播协议是应用层多播的核心内容, 它分为集中式协议和分布式协议两类。ALMI<sup>[3]</sup> 是集中式应用层多播协议的典型例子, 集中式控制维护简单, 最大的问题是容易造成单点故障和瓶颈问题。分布式协议则无需获得所有成员的全局信息, 可通过局部组成员信息以分布式的方式建立数据分发路径, 有效避免了集中式协议存在的问题。因此, 目前的分布式应用层多播协议成为研究的主流。根据形成覆盖网拓扑结构的不同, 分布式的应用层多播协议又分为网格状优先(mesh-first)协议<sup>[2,4]</sup>、树状优先(tree-first)协议<sup>[5,6]</sup>、隐式法(implicit approaches)协议<sup>[7-10]</sup>和环型协议<sup>[11-16]</sup>四类。

可靠性是分布式系统的基本需求, 是确保分布式系统应用可用性的重要保证, 许多分布式系统的建立、核心数据的收集、服务的连续性等都涉及大量的精力和代价, 特别是涉及金融和军事等部门, 对系统的可靠性要求更为苛刻。然而, 相对

于 IP 多播, 应用层多播提出的时间不长, 总体上还处于不成熟的阶段, 应用层多播在可靠性方面存在许多有待研究和解决的问题, 这些问题包括: 缺乏有效的可靠传输机制、端系统的稳定性和安全性较多播路由器差、单点失效影响大、基于树结构的多播数据备份和恢复困难等。

基于上述原因, 本文提出一种新的高可靠性应用层多播协议。本文随后几部分安排如下: 第 2 节概述我们提出的应用层多播协议中的系统结构; 第 3 节介绍协议中用到的重要算法及整个协议; 第 4 节是实验结果与分析; 最后为结束语。

## 2 新的高可靠性应用层多播结构

现有的应用层多播的数据拓扑主要分为树结构和环结构两类。树型结构的优点是具有较好的可扩展性、传输时延小, 但可靠性方面存在许多问题<sup>[11,12]</sup>, 主要有: (1) 采用的传统可靠机制——ACK 反馈机制会产生 ACK 风暴, 严重加剧系统负担; (2) 构建冗余备份路径非常困难; (3) 组规模大, 遇到意外事故导致系统瘫痪时的恢复和重建会很困难。

环型结构在可靠性方面具有突出的优势<sup>[14,15,17,18]</sup>; 无需 ACK 机制, 易于处理单点失效的问题。但也存在扩展性较差、传输时延较大的问题。

为解决上述问题, 我们提出一种新的应用层多播分发结构——树型环结构(如图 1 所示)。该结构将整个多播范围划分成多个区域, 每个区域中的成员构成一个环型结构——区域环。所有的多播组成员都分布在各个区域环中, 每个区域

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(90304015); 江苏省自然科学基金(BK2006003)。刘洋志 硕士研究生, 主要研究方向为多播安全、密码学; 肖扬 硕士研究生, 主要研究方向为多播水印技术、多播密钥管理、密码学; 杨明 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为多媒体技术、多播通信、信息安全。

环中包括一个环首、一个副环首和若干个普通成员。在距离较远的各区域中,采用时延和度数均较小的二叉树——环首树,来进行连接。为了进一步提高结构的可生存性,我们在区域环和环首树中分别构建了备份传输路径,以在提高数据传输速度的同时解决单点失效和链路失效的问题。在区域环中,我们采用 VRing<sup>[14,15]</sup> 中的方法在各个成员之间建立一条备份路径;在环首树中,在各个区域环的副环首之间构建一棵备份二叉树。

在传输数据时,发送源发送的每个数据包都用一个唯一的序号进行标识,数据包在环首树和区域环中同时进行传输:在环首树中,发送源将数据在环首树和备份树同时进行转发;在区域环中,结点收到数据后,检查数据的来源:如果来自初始环,则将数据向初始环中的下一跳结点和冗余环中的下一跳结点同时进行转发;如果来自冗余环,则将数据只向冗余环中的下一跳结点进行转发。另外,还通过适当的抑制机制来处理重复的数据包。

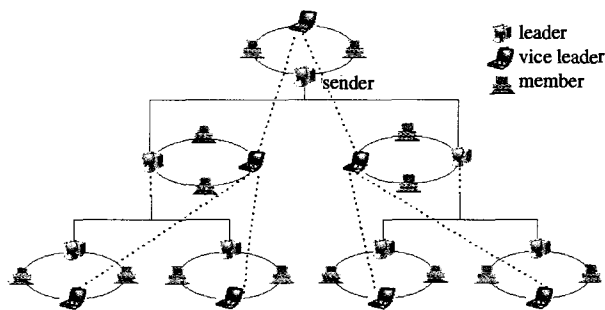


图1 树型环结构

该结构结合了树型结构和环型结构的优点,比传统的结构具有更为理想的性能,主要表现在以下两个方面:(1)由于单环结构扩展性较差,采用多环结构来提高扩展性,使之能够

应用于大规模的多播通信。(2)在多个单环之间的主干部分采用树型结构进行连接,提高了数据转发效率。

### 3 算法及协议描述

#### 3.1 树环结构的构建算法

构建算法包括区域环的构建算法、环首的选举算法、环首树的构建算法及成员的插入位置算法。

##### • 区域环的构建算法

该算法主要用于结构的初始化阶段和环的优化阶段。区域环的构建算法主要分为两步:

(1)构建初始环,将每个区域中的所有多播组成员按照某种顺序连接成一个时延总和最小的环。该问题相当于旅行售货员问题(TSP),是一个 NP 完全问题,采用 TSP 的近似算法<sup>[19]</sup> 来为该问题寻求近似解。由于成员之间的时延满足三角不等式性质,因此能将算法的性能比为 2。算法伪代码见图 2 中的 a 图。

(2)在初始环的基础上,采用 VRing 中提出的算法来构建一个冗余环,用于增强在环中传输数据的可靠性,并降低环中数据传输的时延。由于冗余环的采用,可以将环中完成一次数据传输的跳数减少为  $2(\sqrt{N}-1)$  跳(其中  $N$  为环中的结点数目)。

##### • 环首的选举算法

该算法主要用在区域环中选举出性能最优的结点作为环首。利用 Franklin 提出的选举算法<sup>[20]</sup> 来设计环首的选举算法。环中结点的状态分为两种:活动状态和非活动状态。初始时均为活动状态。在每轮操作中,每个结点收到其他结点的性能后,按照图 2 中的 b 图进行操作,直到经过某轮操作后,只剩下一个活动结点,即为环首。该算法同样用于副环首的选举。

|   |   |
|---|---|
| <pre>//寻找图 g 的近似最优环 procedure ApproxRing(g)   select a node r from g;   //利用 Prim 算法找出以 r 为树根的最小生成树   T = Prim(r);   //前序遍历 T 得到顶点列表 L   L = preorder(T);   //将 r 加到 L 的末尾形成回路 H   H = add r to L; end;</pre> <p>(a) 初始环构建算法</p>  | <pre>procedure Recv(P) //P 为结点收到的性能值 //查看自己的状态 if status == inactive //非活动   send P to next node; else   //比较收到性能值和自己的性能值   if P &lt; self_P     Status = inactive;   end; end;</pre> <p>(b) 环首选举算法</p>   |
| <pre>//layer_num 为树的层数 procedure Form_Tree(layer_num)   i = 1;   while i &lt; layer_num do     //第 i 层的结点数     Node num = 2<sup>i-1</sup>;     for j = 1 to node_num       //为 j 寻找两个时延最小的儿子       find two sons for node j;     end;     i = i + 1;   end; end;</pre> <p>(c) 环首树构建算法</p> | <pre>procedure Find_Pos(r) //为新结点 r 寻找插入位置 //c(i,j)表示 i 和 j 之间的时延 //min 为最小时延, pos 为插入位置 min = c(r,1)+c(r,n)-c(1,n); pos = 1; for i = 2 to n   temp = c(r,i-1)+c(r,i)-c(i-1,i);   if temp &lt; min     min = temp;     pos = i;   end; end;</pre> <p>(d) 成员插入位置算法</p> |

图2 算法的伪代码

##### • 环首树的构建算法

该算法主要用在各区域环选举出环首后,以发送源为树根,在各区域的环首之间构建一棵时延较小的多播二叉树。

各区域的副环首之间的备份路径也按照该算法来构建。我们采用一种近似平衡二叉树的算法,首先根据结点数  $n$  计算出要构建的二叉树的层数  $layer\_num = \lceil \log_2 n \rceil$ ,然后从根结

点开始,按照图 2 中的 c 图进行操作,直到将所有结点都添加到二叉树中为止。

#### • 成员的插入位置算法

该算法主要用于成员的加入阶段,为新成员找到一个合适的插入位置,使其插入后,环的总时延增加量最小。我们采用集中式的方法由环首来为新成员寻找插入位置。具体过程如下:(1)环首  $s$  沿着环中链路发送一条轮询信息,轮询信息中包括该信息的发送时间,环中结点根据该信息计算出它与相邻结点之间的时延。当轮询信息重新回到环首处,环首就得到了环中所有相邻结点之间的时延。(2)新结点  $r$  计算与环中所有结点之间的时延,并将这些时延发送给环首。(3)环首得到上述信息后,按照图 2 中的 d 图为新成员计算出插入位置。

该算法比较了将新结点插入到环中任意两个结点之间后环中相应链路的时延的增加量。算法的终止条件是遍历整个环一遍,找到了增加量最小的位置,因此算法能够保证为新结点找到的位置是最优的,即环的总时延增加量最小。

### 3.2 协议的设计

协议主要包括结构的构建、结构的维护、成员管理及故障的检测与处理等几个组成部分。

#### • 结构的构建

整个构建过程主要分为:区域环的构建、环首的选举和环首树的构建三个部分,具体方法分别按照前面算法中介绍的方法来实现。

#### • 结构的维护

在结构构建完成后,为了保证协议的正常运行,多播组中的成员需要得到一些相关的信息,用于维护整个结构。维护过程中主要涉及到三类信息。

(1)QUERY 信息:环首的轮询信息,主要用于环首得到所在环中的成员的数目、成员的列表及相邻成员之间的时延。

(2)BACKUP 信息:环首和副环首之间的交互信息,主要用于环首和副环首,将各自保存的信息发送给对方,进行备份。

(3)HELLO 信息:环中相邻结点之间的交互信息,主要用于环中结点,得到它在环中下两跳结点的信息。

#### • 成员管理

成员管理主要包括成员的加入和离开,以及当成员变动较大时结构的优化工作。

(1)成员的加入:新成员首先向 RP 发送申请信息,RP 将新成员所属区域环的环首信息返回给新成员,然后新成员向环首发送加入信息,环首按照前面讲过的算法为新成员找到

加入位置,并通知新成员。

(2)成员的离开:要离开的成员在离开前通知其在环中的前任结点,前任结点由于知道其在环中的下两跳结点信息,就可以直接与下两跳结点建立连接。若要离开的结点为环首结点,则除了要进行上述工作外,还要向副环首发送离开信息。副环首收到后,发起一次环首的选举,并将所保存的信息全部发送给新环首。这样,新环首就可以直接与环首树中的父结点和子结点建立连接。

(3)结构的优化:当多播组中的成员变动较大时,最初的结构将会被破坏,因此,每隔一段时间要进行一次结构的优化工作,主要包括区域环的重建和环首树的重建,具体方法按照前面算法部分中介绍的方法来实现。

#### • 故障的检测与处理

在协议运行的过程中,可能会出现故障,必须建立一些机制来进行检测和处理,使其能够恢复正常运行。

(1)普通结点的故障与检测:若结点连续向后继结点发送三次 HELLO 信息均没有得到回复,就表示后继结点已经失效,然后该结点直接同下两跳结点建立连接。

(2)环首的故障与检测:环首的故障可以通过定期向副环首发送 BACKUP 信息,向环首树中父结点发送 REFRESH\_FATHER 信息以及向 RP 发送 REFRESH\_RP 信息来检测。当检测到故障后,需要完成以下两项工作:所在环的副环首发起一次环首的选举,并将自己保存的全部信息发送给新环首;新环首将环首更替信息通知环首树中父结点和子结点。

## 4 实验结果与分析

本部分通过实验对协议中结构的性能进行分析和比较。为了增强实验结果的可信性,消除偶然因素,我们分别在两种时延条件和网络规模下比较结构的性能。首先,在结点之间采用两种时延:一种是小范围的动态时延,变化范围在 10ms~100ms 之间;另一种是较大范围的动态时延,变化范围在 10ms~1s 之间。其次,我们采用三种网络规模,分别为 100、300 和 500 个结点。

### 4.1 区域环性能分析

区域环包括初始环和冗余环,主要是为了提高可靠性的同时尽量减小数据传输的时延。对于区域环的构建算法,我们主要设计了三种方案:(1)初始环采用 TSP 的近似算法,冗余环采用双向环;(2)初始环中结点的连接顺序随机生成,冗余环采用 VRing 的方法;(3)初始环的构建采用 TSP 的近似算法,冗余环采用 VRing 的方法。

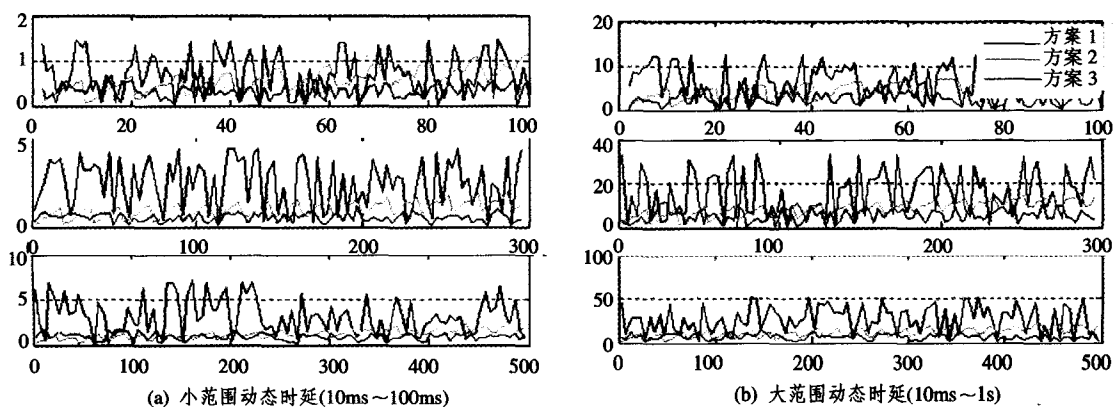


图 3 区域环构建方案比较

(1)三种构建方案在两种时延条件和三种网络规模中结点的时延情况如图3所示,横坐标表示结点的ID,纵坐标表示结点的时延。可以看出,在两种时延条件下,方案1都是最差的,大部分结点的时延都比其它两种方案的大,而且结点之间的时延分布不均匀;方案2处于中间;方案3是三者之中时延性能最好的,结点的时延小且分布均匀。

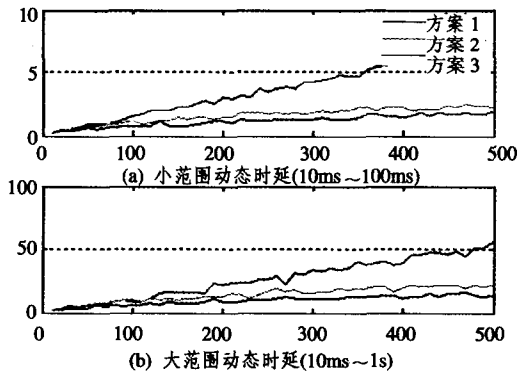
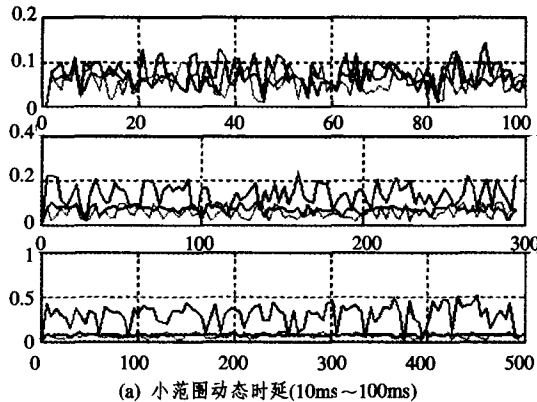


图4 三种方案的扩展性能比较

(2)在两种时延条件下,三种方案的扩展性能如图4所示。扩展性主要用每种方案在网络规模不断增大时环中完成一次数据传输的时延情况来评价。图中横坐标表示网络的规模,纵坐标表示时延。可以看出,随着网络规模的增大,无论



在何种时延条件下,方案1的时延都急剧增大,是三者之中最差的;方案2处于中间;方案3是三者之中扩展性能最好的,随着网络规模的增大,它的时延最小,且增加最为缓慢。

综合上述分析,在三种区域环结构中,方案3,即初始环采用TSP的近似算法、冗余环采用VRing中的方法,单个结点的时延较小,且分布均匀,同时它是三者之中扩展性能最好的,因此在我们的协议中采用了此种区域环结构。

#### 4.2 环首树性能分析

环首树是在各区域的环首之间形成的,在构建时我们主要考虑尽量减小传输时延和结点的度。对于环首树的构建,我们设计了三种方案。(1)星型结构:将所有结点都作为发送源的儿子连接起来;(2)Prim算法:构造最小生成树的算法;(3)近似平衡二叉树:前面介绍的环首树构建算法。

(1)三种构建方案在两种时延条件和三种网络规模中结点的时延情况如图5所示,横坐标表示结点的ID,纵坐标表示结点的时延。可以看出,星型结构在小范围动态时延条件下是三种结构中最好的,但是在大范围动态时延条件下它是三者中最差的;Prim算法在小范围动态时延条件下是三者之中最差的,在大范围动态时延条件下它明显优于星型结构;二叉树结构在小范围动态时延条件下略差于星型结构,但明显优于Prim算法,在大范围动态时延条件下,随着网络规模的增大,它逐渐变为三种方案中最优的。

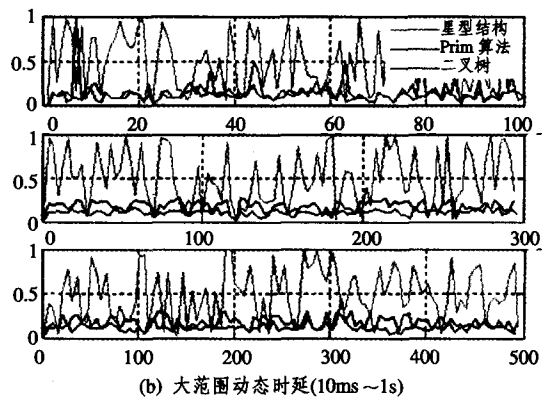


图5 环首树构建方案比较

(2)三种结构在两种时延条件和三种网络规模中平均时延和最大时延如表1所示。可以看出,在小范围动态时延条件下,星型结构的平均时延和最大时延都是最好的,二叉树结构的性能稍差于星型结构,但优于Prim算法;在大范围动态时延条件下,二叉树结构的平均时延和最大时延随着网络规模的增大呈逐渐下降的趋势,因此具有较好的扩展性。

表1 三种结构的平均时延和最大时延

| 时延类型 | 网络规模 | 小范围动态时延(10ms~100ms) |        |        | 大范围动态时延(10ms~1s) |        |        |
|------|------|---------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
|      |      | Prim算法              | 星型结构   | 二叉树    | Prim算法           | 星型结构   | 二叉树    |
| 平均时延 | 100  | 0.0759              | 0.0556 | 0.0570 | 0.1073           | 0.4920 | 0.1552 |
|      | 300  | 0.1356              | 0.0549 | 0.0681 | 0.1741           | 0.5117 | 0.1042 |
|      | 500  | 0.3062              | 0.0543 | 0.0731 | 0.1682           | 0.4946 | 0.1034 |
| 最大时延 | 100  | 0.1404              | 0.0997 | 0.1247 | 0.2175           | 0.9862 | 0.9865 |
|      | 300  | 0.2366              | 0.0998 | 0.1449 | 0.3109           | 0.9956 | 0.6304 |
|      | 500  | 0.5473              | 0.0999 | 0.1393 | 0.3245           | 0.9989 | 0.4596 |

综合上述分析,在三种结构中,近似平衡二叉树结构时延性能较好,我们的协议中采用了此种环首树结构。

结束语 本文提出了一种新的应用层多播协议,该协议具有较好的扩展性能,能够适合于规模较大的多播应用。而且,协议采用多种机制来提高协议的可靠性,能够有效避免和处理结点失效及链路失效的问题。仿真结果表明,该协议具有较高的可靠性及数据传输效率。如何对协议的安全性进行进一步的加强,设计出相应的简单有效的密钥管理机制,对各种攻击进行有效的检测、预防和控制,提高协议的抗攻击能力,是值得进一步研究的问题。

#### 参考文献

[1] Deering S. Host Extensions for IP Multicasting [S]. RFC 1112, IETF, 1989  
 [2] Chu Y H, Rao S G, Seshan S, et al. A case for end system multicast [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2000, 28(1):1-12

(下转第102页)

1)共同参数:Max $\{n\}=1024$ , 突发丢包平均长度  $\beta=4$ , 8, 平均丢包率  $\pi_0=0.6$ ;

2)EMSS:签名报文携带 Hash(39), 数据报文携带 Hash(6), 最优组合 5-11-17-24-26-39;

3)HTC:签名报文携带 Hash(30), 数据报文携带 Hash(4), 最优组合 1-2-7-11-16-20-25-30。

随着  $n$  的增加, EMSS 在  $\beta=4$  时, 认证概率还可以接受, 与文献[5]仿真结果相同, 在  $\beta=8$  时, 认证概率急剧下降而无法忍受。HTC 在  $\beta=4, 8$  时认证概率几乎相同, 且远高于 EMSS, 并且下降并不明显, 说明对报文突发性丢失的抵抗能力远高于 EMSS。此时 HTC 通讯开销远小于 EMSS: 每数据报文携带 Hash 数——6(EMSS); 4(HTC); 签名报文携带 Hash 数——39(EMSS); 30(HTC)。

**结束语** 本文讨论了安全组播源认证问题。大量的模拟测试证明, 在突发丢包网络环境下, HTC 是一种有效的源认证方案。比较 EMSS 多链认证方案, HTC 的认证效率有了显著的提高。

### 参 考 文 献

- [1] Rohatgi R. A compact and fast hybrid signature scheme for multicast packet authentication // Proceedings of the 6<sup>th</sup> ACM Conference on Computer and Communications Security. Singapore, November 1999:93-100
- [2] Wong C K, Lam S S. Digital signatures for flows and multicasts. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7: 502-513
- [3] Paxson V. End-to-End Internet Packet Dynamics. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7: 277-292
- [4] Pannetrat A, Molva R. Efficient multicast packet authentication // Proceeding of 10th Annual Network and Distributed System Security Symposium. February 2003-Symposium, 2003
- [5] Perrig R C A, Song D, Tygar D. Efficient and secure source authentication for multicast // Proceedings Network and Distributed System Security Symposium (NDSS '01). San Diego, CA, Feb. 2001
- [6] Golle P, Modadugu N. Authenticating Streamed Data in the Presence of Random Packet Loss // NDSS'01: The Network and Distributed System Security Symposium. 2001
- [7] Miner S, Staddon J. Graph-based authentication of digital streams // IEEE Symposium on Security and Privacy. May 2001: 232-246
- [8] Min J P, Chong E K P, Siegel H J. Efficient multicast packet authentication using signature amortization // Proceedings of the IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. 2002:227-240
- [9] Lysyanskaya A, Tamassia R, Triandopoulos N. Multicast authentication in fully adversarial networks // IEEE Symposium on Security and Privacy. 2004
- (上接第 98 页)
- [3] Pendakaris D, Shi S. ALMI: an application level multicast infrastructure [A] // Anderson T, ed. The 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems [C]. San Francisco, CA, USA; USENIX Association, 2001:49-60
- [4] Chawathe Y. Scattercast: an architecture for internet broadcast distribution as an infrastructure service [D]. USA; University of California, Berkeley, 2000
- [5] Francis P. Yoid: extending the multicast internet architecture [EB/OL]. <http://www.aciri.org/yoid>, 1999
- [6] Zhang Bei-chuan, Jamin S, Zhang Li-xia. Host multicast: a framework for delivering multicast to end users [A]. Kermani P, ed. IEEE INFOCOM 2002 [C]. New York, NY, USA; IEEE Press, 2002: 1366-1375
- [7] Banerjee S, Bhattacharjee B, Kommareddy C. Scalable application layer multicast [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(4):205-217
- [8] Zhuang S Q, Zhao B Y, Joseph A D. Bayeux: an architecture for scalable and fault-tolerant wide-area data dissemination [A] // Nieh J, Schulzrinne H, eds. The Eleventh International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video [C]. New York, USA; ACM Press, 2001: 11-20
- [9] Castro M, Druschel P, Kermarrec A M, et al. SCRIBE: A large-scale and decentralized application-level multicast infrastructure [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1489-1499
- [10] Ratnasamy S, Handley M, Karp R, et al. Application-level multicast using content-addressable networks [A] // Crowcroft J, Hofmann M, eds. Networked Group Communication, Third International COST264 Workshop, NGC 2001 [C]. London, UK; Springer, 2001: 14-29
- [11] Wang J, Yurcik W. A survey and comparison of multi-ring techniques for scalable battlespace group communications [C] // Proceedings of SPIE, 2005-ncassr.org, Page 1
- [12] Wang J, Yurcik W. Multiring techniques for scalable battlespace group communications [J]. Communications Magazine, IEEE, 2005, 43(11):124-133
- [13] Junginger M, Lee Y. The multi-ring topology-high-performance group communication in peer-to-peer networks [C] // 2nd International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P '02). Washington, DC, USA, 2002:49-56
- [14] Sobeih A, Yurcik W, Hou J C. VRing: a ring-based application-layer multicast protocol [R]. Technical Report. UIUCDCS-R-2004-2468. University of Illinois at UrbanaChampaign, 2004
- [15] Sobeih A, Yurcik W, Hou J C. VRing: a case for building application-layer multicast rings [C] // Proceedings of the IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS'04). Washington, DC, USA, 2004: 437-446
- [16] Wang J, Yurcik W. A multi-ring framework for survivable and secure group communications [C] // Command and Control Research and Technology Symposium (CCRTS). San Diego, CA, 2004
- [17] Sobeih A, Wang Jun, Yurcik W. Performance evaluation and comparison of tree and ring Application-layer multicast overlay networks [C] // Proc. of ICENCO'04. 2004
- [18] Sobeih A, Yurcik W. A survey of ring-building network protocols suitable for command and control group communications [C] // Proceedings of the SPIE. 2005:873-884
- [19] 王晓东. 算法设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 329-331
- [20] Franklin R. On an improved algorithm for decentralized extrema finding in circular configurations of processors [J]. Communications of the ACM, 1982, 25(5): 336-337