

# 无线 Mesh 网络中的组播机会路由研究

樊秀梅<sup>1</sup>, 李晓辉<sup>2</sup>, 何 骞<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学计算机科学技术学院, 北京 100081;

2. 河南省图书馆数字资源部, 河南郑州 450052; 3. 北京理工大学软件学院, 北京 100081)

**摘 要:** 针对无线 Mesh 网络组播中包丢失严重的问题, 提出了保持包的 IP 层不变, 而改变包的 MAC 域, 进而 MAC 层以单播形式向组成员发送包的 M2U (Multicast to Unicast) 优化解决方案. 为了满足组成员增加时不影响用户的性能, 提出在 M2U 中引入了机会路由的 M2UO (Multicast to Unicast Opportunistic Routing) 算法, 对候选节点采用单播形式发送包, 对其它节点采用组播形式发送包. 在实际网络环境中的大量实验表明, 优化组播减小了数据包的丢失率, 提高了网络的吞吐量, 具有较好的组播视频流效果.

**关键词:** 无线通信; 机会路由; 无线 Mesh 网; 优化组播

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0032-05

## Multicast Opportunistic Routing in Wireless Mesh Network

FAN Xiu-mei<sup>1</sup>, LI Xiao-hui<sup>2</sup>, HE Qian<sup>3</sup>

(1. School of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. HeNan Library Digital Resource Department, Zhengzhou Henan 450052, China;

3. School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** With regard to the problem of great data loss rate in the multicast application in wireless mesh network, it is specially valuable to use the way of M2U (Multicast to Unicast) in which packet's MAC destination domain is modified in order that packet can be delivered to certain members of multicast group by unicast. With the increase of multicast group member, data loss rate is rising. In order to ensure the network performance not to be affected, M2UO (Multicast to Unicast Opportunistic Routing) scheme can be put forward, in which packet can be delivered to candidate nodes by unicast and to other nodes by multicast. A great many experiments in the real network indicate that the new scheme can decrease the packet lost ratio, can increase throughput and has a better video effect.

**Key words:** wireless communication; opportunistic routing; wireless mesh network; optimize multicast

### 1 引言

随着网络规模的增大, 路由策略的选择变得日益重要. 沈强和方旭明提出了基于综合准则的动态源路由 (Dynamic Source Routing: DSR) 扩展路由方法<sup>[1]</sup>, 该方法综合考虑了投递率、剩余带宽以及节点负载等因素, 达到了负载均衡的设计目标. LIANG Zhengping、WANG Zhiqiang 等基于 H-hop 参考模型提出了 QoS 路由策略<sup>[2]</sup>, 该策略利用启发式算法计算链路的最大带宽以减少数据碰撞的发生概率. 麻省理工大学的研究者基于存储转发机制提出了机会路由策略 (Opportunistic Routing)<sup>[3]</sup>, 它利用多个候选节点逐步发送数据包, 有效地避免了数据重传, 充分利用了各个中间节点的便利性, 很大程度上提高了网络的吞吐量.

本文把机会路由策略应用到无线 Mesh 网络组播<sup>[4]</sup>中, 以便解决无线 Mesh 网络最后一跳, 即 AP (接入点) 到主机之间, 组播包丢失严重的问题. 在无线 Mesh 网络中, 由于无线信号不稳定且易受外界的干扰, 组播包容易丢失, 特别是最后一跳即 AP 到主机之间, 包丢失现象尤为严重, 因为组播没有 ACK 机制, 当数据包丢失后, 不能够重新发送. 为此, 我们提出了优化组播策略——M2U (Multicast to Unicast), 使得 IP 层保持不变, MAC 层以单播形式向组成员发送包. 实验表明 M2U 使得组播效果得到明显改善, 各节点利用 VLC Media Player 接收组播视频流, 发现画面明显清晰, 包丢失现象得到缓解. 但当组成员个数增加到一定程度时, 画面变得不清晰, 视频流延迟严重. 为了解决这个问题, 我们在 M2U 中引入了机会路由 (Opportunistic Routing) 协议——M2UO

(Multicast to Unicast Opportunistic routing)算法,对候选节点采用单播形式发送包,对其它节点采用组播形式发送包,这样就很好解决了 M2U 中存在的问题。

## 2 机会路由协议

麻省理工大学的研究者就提出了机会路由策略,它是一种用于无线多跳网络的路由协议,充分利用无线网络的广播特性进行数据传输,并且改变了 IP 包结构,增加了多个目的地址,这些目的地址组叫做候选列表(Forward List)<sup>[5]</sup>。

机会路由协议的基本思想如下:源节点向目的节点发送一个数据包,首先发送给一个候选节点组 A,根据某一度量,再从该节点组 A 中选出最优节点 a,a 把数据包广播给另外一组候选节点 B,而 A 组中除 a 以外的其它节点并不广播此数据包.然后再从 B 组中选取最优节点 b,b 把该数据包广播给下一组节点 C,如此重复直到目的节点接收到数据包。

机会路由协议从源节点到目的节点发送的数据包并不是按一条固定的最佳路径传输,也就是说每次转发的数据包并不是单播给某一个节点,而是充分利用无线网络的广播传输特性,每次数据包都转发给一组节点,这些节点根据它们到目的节点的度量(Metric)来确定它们优先级,选择优先级最高的那个节点再次转发数据包给另外一组节点,如此重复直到目的节点。

## 3 基于机会路由协议的组播研究

IP 组播技术<sup>[6]</sup>实现了 IP 网络中点到多点的高效数据传送.许多组播协议在有线网络环境中工作比较稳定,但是在无线 Mesh 网络中,由于无线信号不稳定且易受外界的干扰,组播包容易丢失,特别是最后一跳即 AP(接入点)到 Station(工作站)之间,包丢失现象尤为严重.通过实验发现,AP 与 Station 之间,组播包丢失率达到 3% 以上.利用 VLC Media Player 接收组播视频流,发现画面不清晰,包丢失现象严重.这主要是因为组播没有 ACK 机制<sup>[7]</sup>,当包丢失时,发送端不能够进行数据重传,这样就造成了组播效果不理想。

为了解决组播包丢失问题,我们提出了 M2U(Multicast to Unicast)解决方案.具体思路如下:包的 IP 层保持不变,即 IP 包的地址仍是组播地址,通过改变包的目的 MAC 域,MAC 层以单播形式向组播组的各个成员发送包.用 M2U 方案优化后,组播效果得到明显改善,各节点利用 VLC Media Player 接收组播视频流,发现画面明显清晰,包丢失现象得到缓解.组播服务器利用 MCastTest20 组播测试工具发送一个 32567K 文件,发现服务器到各无线节点间的平均吞吐量明显提高。

但是 M2U 方案存在一个问题,随着组成员个数的增

加,画面逐渐模糊,当组成员个数超过一定数目时,画面变得不清晰,视频流延迟严重.为了解决这个问题,我们在 M2U 中引入了机会路由(Opportunistic Routing)协议——M2UO,对候选节点采用单播形式发送包,对其它节点采用组播形式发送包.路由器转发一个包时,遍历每个与之相连的组成员,如果组成员在候选节点列表中,则对其单播发送数据包,否则查看下一个组成员,最后,对全组成员组播发送该数据包.因为采用组播形式发送数据包时,全组成员都能接收到,因而无法只对部分组成员进行组播.所以流程图的最后不是“向其它成员组播数据包”,而是“向全组组播该数据包”。

## 4 M2U 与 M2UO 的实现细节与实验验证

### 4.1 组播组成员的维护

如图 1 所示,Source 是不断发送组播包的服务器,Router1 和 Router2 是两个无线路由器,Station1、Station2 和 Station3 是连接在 Router2 的三个组成员,它们可以接收 Source 发来的组播包.组播服务器不断发送数据包,Source 不断地把组播包发送给 Router1,当组播包到达 Router1 时,发现与 Router2 相连的 Interface(接口)有该组播的请求,于是该组播包通过与 Router2 相连的 Interface 发送出去,这样,Router2 就可以接收到此组播包.同理,当组播包到达 Router2 时,发现与 Station1、Station2 和 Station3 相连的 Interface 有此组播的请求,于是该组播包就通过与 Station1、Station2 和 Station3 相连的 Interface 发送出去,这样,Station1、Station2 和 Station3 就可以接收 Source 发来的组播包了.通过对组播原理的分析,我们可以看出组播服务器和路由器并不知道组成员 Station1、Station2 和 Station3 的存在,那么如何得到组成员的 MAC 地址进而实现 M2U(Multicast to Unicast)呢?

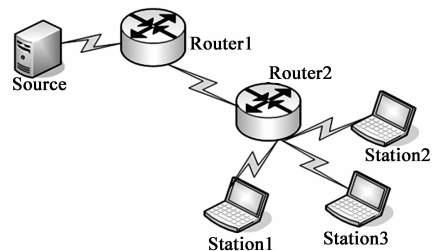


图1 组播例子

通过分析 IGMP<sup>[8]</sup>协议,我们得知 IGMP 通过报文来通知路由器各组成员的变化情况.当一个进程加入一个组时,主机发送一个 IGMP\_REPORT 报文;当进程离开一个组时,主机发送一个 IGMP\_LEAVE 报文.我们可以在主机发送 IGMP\_REPORT 报文时,把此主机的 IP 地址发送给路由器的 Kernel(内核),并且保存在 group\_list 中,group\_list 是在路由器 Kernel 中定义的一个数据结构,用以保存各个组的组成员信息;在主机发送

IGMP\_LEAVE 报文时,把此主机的 IP 地址发送给路由器的 Kernel,并把此 IP 地址从 group\_list 中删除.

#### 4.2 选择候选节点

候选节点的选取是我们工作的重点,在各节点链路状况差别较大的情况下,根据节点的数据接收率来选取候选节点,具体流程如下:在路由器内核中设置一个全局时钟变量,当时钟到来时,触发函数 ieee80211\_send\_hello,这个函数分别向 group\_list 各个组成员发送 n 个 hello 包.主机接收到 hello 包后就会发回 ACK 信息,我们可以利用 ieee80211\_receive\_ack 函数来接收到各个组成员返回的 ACK 信息,根据 ACK 信息来统计各个组成员接收到 hello 包的个数.然后,根据公式:接收个数/发送个数(n)计算出 group\_list 中各个成员的数据接收率.最后我们选取接收率最小的若干个节点为候选节点,并将其保存在候选节点列表 candidate\_list 中.路由器利用组播形式传输数据包时,对候选节点用单播形式传输包,对其它节点用组播形式传输包.在链路状况基本相同的情况下,在路由器上层设置若干 VIP 用户,对 VIP 用户用单播形式传输包,对其它节点用组播形式传输包.

#### 4.3 修改包格式并发送包

路由器利用组播形式进行数据包传输时,候选节点利用单播形式进行传输包,其它节点利用组播形式进行传输包.这个方案的实现,如何修改包格式和如何转发包是一个重要步骤.路由器利用 ieee80211\_rx 函数接收数据包,并把接收的数据包保存在 struct sk\_buff 数据结构中,struct sk\_buff 是 linux 网络代码中重要的数据结构,它表示接收或发送数据包的包头信息,并且包中含有成员变量以供网络代码中的各子系统使用.路由器将接收来的数据包即一个 sk\_buff 结构变量以参数形式传入函数 ieee80211\_subif\_start\_xmit0 中,ieee80211\_subif\_start\_xmit0 是我们自己定义的函数,在这个函数中对数据包进行修改,最后利用 ieee80211\_subif\_start\_xmit 函数把修改后的数据包发送出去.ieee80211\_subif\_start\_xmit 函数,它是一个转发包函数,它接收一个 sk\_buff 数据结构参数变量 skb,根据数据包目的 MAC 域信息把此包发送出去,不必考虑是单播还是组播.路由器内核转发一个组播包时,先取出组播包中保存的组信息,再从 group\_list 中找到相应的组,然后遍历该组中每个组成员,如果组成员是候选节点,则利用单播形式转发数据包,即改变 skb 的目的 MAC 域为候选节点 MAC 地址,如果不是候选节点,则利用组播形式转发数据包,保持 skb 的目的 MAC 域不变.

#### 4.4 实验结果

我们组建由 1 个组播服务器、1 个交换机、3 个无线

Mesh 路由器和 20 个无线节点组成的实验床.20 个无线节点分布在一层办公楼的办公室、阳台和楼道中,它们分为三组,分别连接到邻近的路由器上,这 20 个节点除了启动 VLC Media Player 或 MCastTest20 应用程序外,其它应用程序都关闭.组播服务器作为组播源不断发送组播视频流或组播包,无线节点作为组成员来接收组播包.我们可以通过组播测试软件来观察无线节点对组播包的接收率、网络吞吐量和网络延迟等性能参数的变化情况.具体拓扑图如图 2 所示:

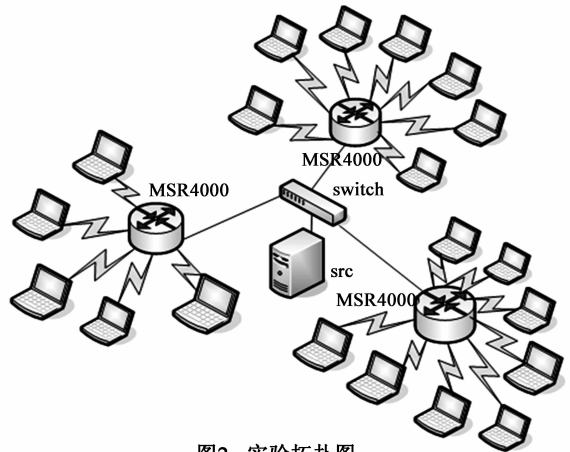


图2 实验拓扑图

src 是一台带有以太网网卡的台式 PC 机,装有组播软件 VLC Media Player 和组播测试软件 MCastTest20,它作为一个组播服务器,不断发送组播视频流和组播包.MSR4000<sup>[9]</sup>是无线 Mesh 路由器,通过交换机 switch 连接到组播服务器 src 上.每个 MSR4000 无线 Mesh 路由器都连接一些带有 IEEE802.11<sup>[10]</sup>无线网卡的笔记本电脑.实验过程如下:通过 SSH 工具连接到每个无线路由器,设置参数,使它们分别工作在传统组播和优化组播(M2U 和 机会路由)两种模式下,在组播服务器用 MCastTest20 组播软件发送组播包来测试各个无线节点的性能,设置该软件的组播地址为 236.6.6.6,组播端口号为 5100,每个包的大小为 1024B,然后采用组播形式发送一个 35267K 大小文件.无线节点利用组播测试软件来接收组播包,可以动态观察无线节点对组播包的接收率、网络吞吐量和网络延迟等性能参数的变化情况.

传统组播是指无线路由器对接收的组播包没有进行修改而直接发送给组成员的传输形式,一个组播包在传统组播中只有一个传输;优化组播是指无线路由器利用 M2U(Multicast to Unicast)和机会路由——M2UO 对组播包进行优化的传输形式,修改组播包的目的 MAC 域使其单播给候选节点,而对其它节点以传统组播形式进行转发,一个组播包在优化组播中有多个传输.无线路由器分别工作在传统组播和优化组播两种

模式下,观察无线节点的丢包率、网络吞吐量和视频流效果。

### (1) 无线节点的丢包率和网络吞吐量

在组播服务器用 MCastTest20 组播软件发送组播包来测试各个无线节点的丢包率,设置该软件的组播地址为 236.6.6.6,组播端口号为 5100,每个包的大小为 1024B,然后采用组播形式发送一个 35267K 大小文件。设置路由器,使其分别工作在传统组播和优化组播两种模式下。传统组播时选择一个无线节点,优化组播时选择两个无线节点,一个是候选节点,另外一个是非候选节点,观察它们的组播包接收情况,得到的实验结果如下:

从图 3 可以看出,传统组播模式下各节点的丢包率集中在 3% 到 4% 之间,最高 3.78%,最低 3.10%;优化组播模式下非候选节点的丢包率集中在 3% 到 3.5 之间,最高 3.50%,最低 3.18%,候选节点的丢包率集中在 1.5% 到 2.8% 之间,最高 2.8%,最低 1.48%。

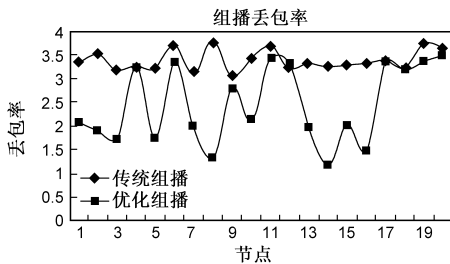


图3 20个节点丢包率对照图

从图 4 可以看出,传统组播模式下服务器到某一节点的吞吐量集中 300KB/s 到 400KB/s 之间;优化组播模式下组播服务器到某一候选节点的吞吐量在 500KB/s 左右,到某一非候选节点的吞吐量集中在 300KB/s 到 400KB/s 之间。

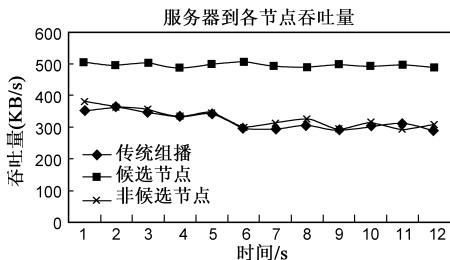


图4 服务器到各节点的吞吐量

从图 5 可以看出,传统组播模式中各节点的平均吞吐量集中在 290KB/s 到 350KB/s 之间,优先组播模式中 12 个候选节点的平均吞吐量集中在 440KB/s 到 500KB/s 之间,而 8 个非候选节点的平均吞吐量集中在 300KB/s 到 350KB/s 之间。

我们可以得出结论:传统组播模式与优化组播相比,传统组播模式下各节点平均吞吐量要明显低于优

化组播模式下候选节点的平均吞吐量,而非候选节点的平均吞吐量相当,整体上来说,略高于非候选节点的平均吞吐量。

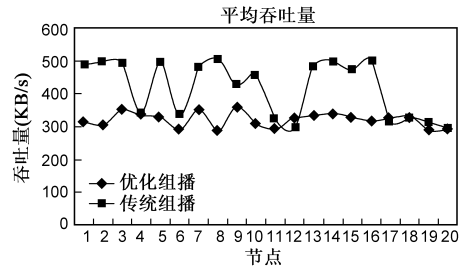


图5 平均吞吐量

### (2) 视频流效果

在组播服务器上利用 VLC Media Player 不断播放视频流,设置组播地址为 236.6.6.6,端口号为 1234.20 个无线节点也用 VLC Media Player 加入组播组 236.6.6.6 进行接收视频流。设置路由器,使其分别工作在传统组播和优化组播两种工作模式,来观察各节点视频流变化情况。通过观察发现,传统组播模式中 20 个节点的视频接收效果都不好,画面模糊不清,马赛克现象严重;优化组播模式中 12 个候选节点的视频效果较好,画面清晰,8 个非候选节点的视频效果与传统组播情况相似。

出现以上实验现象的原因是传统组播没有 ACK 机制,在 AP 与无线节点之间组播包丢失严重,当数据包丢失后不能够重传,这就造成了传统组播丢失率较高,组播视频接收效果不理想,而优化组播模式中路由器对候选节点采用单播方式发送数据包,当数据包丢失后可以重发,这就可以减少组播包的丢失,提高了网络的吞吐量,改善了组播视频效果。但是因为单播耗费大量网络带宽,随着单播节点数量的增加,组播性能下降,当个单播成员多于一定数目时,视频效果迅速下降。

## 5 结论

Mesh 网络具有重要的理论价值和广泛的应用前景,它是当今无线网络领域的研究热点。本文提出了 M2U 和 M2UO 解决方案,其核心是保持大部分组播节点性能相对稳定的情况下,提高少数几个组播节点的性能。在实际应用中,这少数几个节点可以是 VIP 用户,也可以是链路状况较差的用户。因此,在组播中各节点链路状况差别较大的情况下,可以对链路状况较差的节点采用单播形式发送包,在链路状况基本相同的情况下,可以对比重要的节点(如 VIP 用户)采用单播形式发送包。

### 参考文献:

- [1] 沈强,方旭明.无线 Mesh 网络中一种基于综合准则的 DSR 扩展路由方法[J].电子学报,2007,35(4):614-620.

- Shen Qiang, Fang Xuming. An Integrated Metrics Based Extended Dynamic Source Routing Protocol in Wireless Mesh Networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 614 – 620 (in Chinese).
- [2] LIANG Zhengping, WANG Zhiqiang. QoS Routing in Wireless Mesh Networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 17(1): 105 – 110.
- [3] Sanjit Biswas, Robert Morris. ExOR: Opportunistic Routing in Multi – hop Wireless Mesh Networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004(1): 69 – 74.
- [4] 许胤龙, 詹成. Ad hoc 网络中基于网络编码的可靠组播[J]. 中国科学技术大学学报, 2008(7): 860 – 866.  
Xu Yinlong, Zhang Cheng. Network coding based reliable multicast for wireless Ad hoc networks[J]. Journal of University of Science Technology of China, 2008(7): 860 – 866.
- [5] Sanjit Biswas and Robert Morris. Opportunistic Routing in Multi – hop Wireless Mesh Networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006(1): 59 – 63.
- [6] 米晓琴, 卜永波. 组播技术的研究与实现[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2008(1): 168 – 171.  
Mi Xiaoqin, Bu Yongbo. Research and Realization on Multicast Technology[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2008(1): 168 – 171.
- [7] Multicast Routing[OL]. <http://www.cisco.com/warp/public/614/17.html>
- [8] Internet Group Management Protocol [OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_Group\\_Management\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_Group_Management_Protocol).
- [9] Azalea MSR4000[OL]. <http://www.azaleanet.com.cn/products/msr4000.asp>.

- [10] IEEE802. 11 [OL]. <http://net.chinaunix.net/3/2008/11/13/1311496.shtml>.

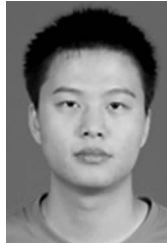
#### 作者简介:



**樊秀梅** 女, 1967 年出生于山西省山阴县, 博士, 现北京理工大学教授, 教育部 2007 年新世紀优秀人才入选者. 主要研究领域为计算机网络 QoS 控制、无线 Ad hoc 网络路由技术、容迟网络、网络性能评价. E-mail: xmfan@bit.edu.cn



**李晓辉** 男, 1980 年出生于河南洛阳, 硕士, 现工作于河南省图书馆数字资源部, 研究领域为无线传感网、无线 Mesh 网络的路由技术. E-mail: lixiaohuijob@gmail.com



**何 骞** 男, 北京理工大学软件学院本科生. 研究领域为无线机会性网络研究. 参与基于蓝牙技术的无线自组网与大容量网络的路由算法研究. E-mail: me@heqian.name