

# 无线 Mesh 网中一种基于 MPR 当选频度的 OLSR 扩展路由协议

沈 呈<sup>1,2</sup> 陆一飞<sup>1,2</sup> 夏 勤<sup>1</sup> 王萃寒<sup>1</sup>

(东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室 南京 210096)<sup>1</sup>

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 210096)<sup>2</sup>

**摘 要** 在研究无线 Mesh 网拓扑结构和业务模式的基础上,深度剖析适合其特性的路由协议类型,得出先验式的逐跳路由最适合无线 Mesh 网的结论。在此基础上,以典型的先验式逐跳路由协议 OLSR(Optimized Link State Routing)为原型,对其中的邻居表结构和 MPR(Multipoint Relay)选择算法进行了改进,通过引入“MPR 当选频度”的概念,克服了 OLSR 协议在无线 Mesh 网环境中资源利用不充分的缺陷。仿真实验的结果也验证了所提出的 EOLSR 协议对网络性能确实有较大程度的提升,能够在基本不增加协议开销的前提下,有效地增加网络吞吐量,降低端到端的平均延时。

**关键词** 无线 Mesh 网,路由协议,多点转播

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## MPR Election Frequency Based Extended OLSR Protocol in Wireless Mesh Networks

SHEN Cheng<sup>1,2</sup> LU Yi-fei<sup>1,2</sup> XIA Qin<sup>1</sup> WANG Cui-han<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)<sup>1</sup>

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Based on studying the characteristics of topology and business model of wireless mesh networks, depth analysis of the suitable routing protocol type for WMN was given out which shows that proactive hop-by-hop routing is most suitable for WMN. On the basis of Optimized Link State Routing which is a typical proactive hop-by-hop routing protocol, a MPR election frequency based routing protocol called EOLSR was proposed for Wireless Mesh Networks. EOLSR takes in the new concept of “MPR election frequency” and overcomes the defect of inadequate resource utilization of OLSR in Wireless Mesh Network environment by expanding the neighbor table structure and improving the MPR selection algorithm. The simulation results show that the proposed EOLSR protocol improves the network throughput and reduces the end-to-end delay without increasing the routing overhead.

**Keywords** Wireless mesh network, Routing protocol, Multipoint relaying

## 1 引言

随着近几年全球无线通信技术及其相关应用的飞速发展,一种新兴的具有众多优良特性和应用潜质的宽带无线通信技术——无线 Mesh 网(Wireless Mesh Network, WMN),引起了学术界和工业界的广泛关注。其自组织、自配置和自治愈的特性,以及对移动用户的有效管理和跟踪机制,使之成为部署社区宽带网络、企业内部网络和城域网络的理想选择<sup>[1]</sup>。

从网络拓扑结构的角度来看,无线 Mesh 网络和 Ad Hoc 网络相似,它们都是由无线通信设备组成的分布式系统,没有所谓的网络中心节点,网络节点之间借助其它节点的中继,以无线多跳方式进行通信<sup>[2]</sup>。通常来说,无线 Mesh 网有 3 种网络拓扑架构,分别为基础设施/骨干 WMN 架构、客户端

WMN 架构和混合 WMN 架构。其中,最常见的,也是应用最多的,是基础设施/骨干 WMN 架构,它被广泛地应用在无线城域网的建设中<sup>[3]</sup>,本文中所有的论述都是针对这种架构进行的。

如上所述,无线 Mesh 网络和 Ad Hoc 网络在拓扑结构方面存在相似之处,因此在为无线 Mesh 网设计路由协议时,可以借鉴 Ad Hoc 网络中的许多已有工作。但无线 Mesh 网的许多特性也使得其区别于 Ad Hoc 网络。首先,从网络节点的角度来看,无线 Mesh 网中的节点通常是固定的,有稳定的电源接入,所以无线 Mesh 网无需关注由节点移动所造成的网络拓扑时变问题以及能量消耗的问题;其次,从业务模式的角度来看,不同于 Ad Hoc 网络中的互访流量,无线 Mesh 网中的流量主要是节点到网关的 Internet 业务流量,但也存在着一部分节点之间的互访业务流量。鉴于无线 Mesh 网络的

到稿日期:2009-05-25 返修日期:2009-08-11 本文受国家自然科学基金重大研究计划项目(90604003),国家自然科学基金项目(60603067)资助。

沈 呈(1982-),男,博士生,主要研究方向为移动通信与无线网络技术,E-mail:snimmiey@yahoo.com.cn;陆一飞(1982-),男,博士生,主要研究方向为移动通信与无线网络技术;夏 勤(1957-),男,高工,主要研究方向为计算机网络;王萃寒 女,高工,主要研究方向为计算机网络。

上述特性,照搬 Ad Hoc 网络的路由协议肯定是行不通的,必须为无线 Mesh 网络设计新的路由协议<sup>[5]</sup>。

本文第 2 节对适合无线 Mesh 网络的路由协议类型进行了剖析,并得出先验式的逐跳路由协议最适合 WMN 的结论;第 3 节对 OLSR 协议进行了简要介绍,并指出其不足之处;第 4 节在 OLSR 的基础上,对其中的 MPR 选择算法进行改进,提出了 EOLSR(Extended Optimized Link State Routing)协议;第 5 节对 EOLSR 进行了仿真实验及结果分析;最后对全文的研究工作进行了总结。

## 2 无线 Mesh 网路由类型分析

一般来说,路由协议根据路由的生成时间可以分为先验式和反应式两类,根据分组的转发机制又可以分为逐跳和源路由两类,所以,综合上面两种分类标准,路由协议一共有 4 种组合类型,分别为:先验式逐跳、先验式源路由、反应式逐跳和反应式源路由。

对于任何的路由协议,它们在保持网络连通性的同时也必将带来一定的控制开销,而且这些控制开销随着网络拓扑变化速率的增加而相应增大。在先验式的路由协议中,每个节点时刻维护着到达网络中任何其它节点的路由信息,所以每当节点需要发送分组时,立刻就能得到所需的路由信息,延迟相对较小。但随着网络拓扑变化速率的增大,为了使路由信息与最新的网络拓扑保持一致,节点就需要发送大量的更新消息,从而急剧地增加了网络的控制开销。所以先验式的路由协议一般适用于拓扑变化慢的网络环境,如有线网络。在反应式的路由协议中,只有当一个源节点需要发送分组给另一个目标节点时,此源节点才触发路由发现操作,来寻找一条到达目标节点的路由路径,因此,延迟相对较大。但正因为反应式路由的这种特性,随着网络拓扑变化速率的增大,其控制开销的增加不像先验式路由那样明显,而且反应式路由中泛洪方式的路由发现操作也更能保证网络的连通性,所以,反应式的路由协议更适合拓扑变化快的网络环境,如 Ad Hoc 网络。综上所述,在网络拓扑变化慢的网络中,适合使用先验式路由,它能够保证较短的延迟;而在网络拓扑变化快的网络中,适合使用反应式路由。对于无线 Mesh 网来说,网络节点相对固定,只有节点的故障、加入和退出以及无线链路的一些不确定性才会造成网络拓扑的变化,网络拓扑变化的速率要远远低于数据流的到达速率,并且无线 Mesh 网中的主流业务为存在一定延迟要求的 Internet 业务,所以,先验式的路由协议更适合无线 Mesh 网络。

至于逐跳和源路由两类路由协议,它们的主要区别在于分组转发的机制不同。在逐跳的路由协议中,每个节点的路由表中针对每个目标节点都记录了到达此目标节点的路径上的下一跳节点,源节点在发送分组时,只需在分组头中加入目标地址即可,路径中的每一跳节点都将根据分组头中的目标地址信息正确地转发分组至路径上的下一跳节点。这种分布式的分组转发机制原理简单,被大量地应用在传统的有线网络中,但需要注意避免出现循环路由。而在源路由协议中,与逐跳转发机制不同,分组转发的路径由源节点独自决定,并且源节点将决定好的整条路由由路径都包含在分组头中随分组一起发送,路径中的中间节点只需要按照分组头中的路由信息进行简单转发即可。这样操作,大大减少了中间节点的运算

开销,而且能有效地避免循环路由。对于无线 Mesh 网来说,其采用的是无线介质,众所周知,无线传输的出错率较有线传输会高很多,为了适应这样的环境,无线 Mesh 网中的分组一般会被限制得较小,如果采用源路由机制,每个分组的头部都要包含整条路由由路径,从而大大降低了有效数据载荷。所以,逐跳路由协议更适合无线 Mesh 网络。

综上所述,在 4 种基础的路由协议类型中,先验式的逐跳路由由最能够满足无线 Mesh 网络拓扑结构和业务模式的需求,所以其最适合无线 Mesh 网络。

## 3 OLSR 协议简介

如前面的分析所示,先验式的逐跳路由协议是最适合无线 Mesh 网络的。而在先验式逐跳路由中,最常见的两种协议是链路状态路由协议和距离矢量路由协议,其中链路状态路由协议收敛的速度比距离矢量路由协议快,考虑到无线 Mesh 网络中无线传输的不确定性,一定的网络拓扑变化是不可避免的,所以链路状态路由协议更适合无线 Mesh 网络。

OLSR<sup>[6]</sup>是在传统的链路状态路由协议的基础上为 Ad Hoc 网络设计的一种路由协议。与传统的链路状态路由一样,OLSR 需要每个节点定期向网络中广播包含该节点周围局部拓扑信息的拓扑控制分组,通过这样的分布式操作过程,每个节点都能够根据其接收到的足够多的局部拓扑信息构造出当前的全局子网拓扑,从而进行路由路径的计算。

但是,OLSR 采用多点转播技术<sup>[7]</sup>(Multipoint Relaying Technique)作为其构建的基础,对传统的链路状态路由协议做了两个方面的改进:一是在节点构造拓扑控制分组时,对所包含的局部拓扑信息进行了有效的压缩(只包含 MPR Selector 节点,MPR Selector 的概念请参考文献[7]),从而大大减少了传输拓扑控制分组所需的带宽开销;二是在拓扑控制分组的广播过程中采用多点转播技术来代替泛洪,这样能够在达到同样广播效果的同时,大大降低广播操作所造成的开销。这两点改进都旨在减少路由维护操作给网络带来的额外开销,能够在很大程度上减少路由协议所占用的网络资源。

然而,OLSR 的上述运行机制使得其满足这样的特性:在一定的运行周期内,OLSR 只利用了网络中的一部分链接来组成路由路径,也就是说,在特定的运行周期内,OLSR 只到了实际网络拓扑的一个子集。对于 Ad Hoc 网络来说,其网络拓扑的变化速率较快,从而促使 OLSR 在不同的运行周期中所使用的网络拓扑的子集也相应变化。然而,在无线 Mesh 网络中,如前所述,只有节点的故障、加入和退出以及无线链路的一些不确定性才会造成网络拓扑的变化,网络拓扑相对固定,所以在 OLSR 的运行过程中,协议固定使用网络中的一部分链接来组成路由路径,这样容易导致以下问题:网络中的流量集中于某些链路,从而形成一些“热区”,在这些“热区”中容易出现网络拥塞,导致经过这些区域的数据包会经历严重的延迟甚至被丢失;与此同时,网络中的另外一些节点和链路可能长期处于空闲状态,这些潜在的网络资源没有得到有效的利用。

为了避免这些问题,从而进一步提高无线 Mesh 网络的性能,本文以 OLSR 路由协议为基础,对其中的 MPR 选择算法进行改进,为无线 Mesh 网设计了一种 OLSR 扩展路由协议(EOLSR),该协议通过引入“MPR 当选频度”的概念,克服

了 OLSR 协议在无线 Mesh 网环境中资源利用不充分的缺陷,能够从很大程度上提高网络的吞吐量,降低端到端的平均延时。

#### 4 EOLSR 路由协议

造成 OLSR 协议不能够充分利用网络资源的根本原因在于 MPR 选择操作。MPR 选择操作的本质是对多点转播机制提供结构上的支持,具体操作为:网络中的每个节点根据自身的邻居表信息(包含了两跳链接范围内的邻居节点信息),从其一跳邻居节点中选择一组节点作为它的 MPR,只有这组 MPR 节点对该节点传输过来的广播分组进行转发,其它的邻居节点只对广播分组所包含的内容进行读取和处理,而不再对其做进一步的转发操作。当然,为了保证多点转播机制的完备性,MPR 节点的选择必须满足条件:一个节点的所有 MPR 节点所组成的 MPR 集合必须能够覆盖(无线电传输范围)该节点的所有两跳邻居节点,也就是说该节点的 MPR 集合和它的每个两跳邻居节点之间都必须存在双向链接,当然,所选择的 MPR 集合越小,多点转播的优化效果越明显。图 1 显示了网络中节点  $N$  的一种可能的 MPR 选择结果。

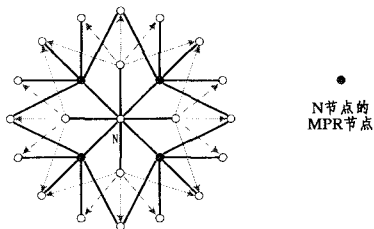


图 1 MPR 选择示例

网络中的节点进行了 MPR 选择操作后,对应的 MPR 选择结果会随着邻居探寻分组(HELLO 分组)传播出去,每个节点只需要对接收到的邻居探寻分组进行分析,就可以获知哪些邻居节点选择了自己作为它的 MPR 节点,并将这些信息保存在 MS 表中(MS 表保存了所有选择自己作为 MPR 节点的邻居节点信息,这些邻居节点组成了该节点的 MPR Selector 集合,此集合是该节点周围一跳邻居范围内的局部拓扑的一个子集)。节点定期根据 MS 表构造一个拓扑控制分组,并利用多点转播机制在全网中进行广播以确保网络中的每个节点都能够接收到一个副本。网络中的节点正是利用接收到的拓扑控制分组(包含了发送节点周围局部拓扑的子集)构造出全局子网拓扑的一个框架,进而利用这个框架进行路由路径的决策。所以,综上所述,MPR 选择操作直接决定了用于路由计算的全局子网拓扑框架。

传统的 MPR 选择机制通常采用基于贪婪策略的启发式算法<sup>[7]</sup>,在这样的算法中,MPR 选择的结果会随着网络拓扑的变化而改变。对于无线 Mesh 网来说,其网络拓扑基本固定,所以 MPR 选择的结果基本无变化,进而导致节点构造出的全局子网拓扑框架基本无变化,网络总是利用这一部分链接来形成路由,因此也就造成了网络资源的浪费。

针对上述问题,本文提出了一种新的 MPR 选择策略,在进行 MPR 选择时,综合考虑所选节点对于两跳邻居集合(操作过程中,可能是两跳邻居集合的子集)的连通度,以及该节点被选中为 MPR 节点的频度。为此,对节点上的邻居表进行了扩展,扩展后的邻居表结构如图 2 所示。可以看出,节点

的邻居表中增加了一个表项,称为 MPR 当选频度,对于每个一跳邻居节点,其记录了该一跳邻居节点被选择为 MPR 节点的频率大小。初始时,将一跳邻居节点的 MPR 当选频度设置为 0,每当该邻居节点被选中为 MPR 节点,对应的 MPR 当选频度加 1,反之则减 1(当某一轮 MPR 选择操作中,此邻居节点没有被选中为 MPR 节点,则对应的 MPR 当选频度减 1)。

一跳邻居 节点地址	链路 类型	MPR 当 选频度	有效期	两跳邻居 节点子表
--------------	----------	--------------	-----	--------------

图 2 扩展后的邻居表的结构

对于一个特定的两跳邻居集合的子集  $\tau$ ,定义一跳邻居节点  $v_i$  的优选因子  $\epsilon_i$  如式(1)所示:

$$\epsilon_i = \text{connectivity}(\tau) \times \frac{N - f_i}{N} \quad (1)$$

其中,connectivity( $\tau$ )表示  $v_i$  对于集合  $\tau$  的连通度,也就是  $\tau$  中与  $v_i$  存在双向链接的节点的个数,  $f_i$  表示  $v_i$  所对应的 MPR 当选频度,  $N$  为预设的参数,表示网络中节点的平均一跳邻居节点的个数,本文中  $N$  取值为 8。按式(1)计算所得的值越大,节点越应优先考虑。MPR 选择算法的形式化描述表示如图 3 所示。

输入:  $n$ :任意节点;  $N1$ :  $n$  的一跳邻居节点的集合,它们与  $n$  之间存在双向链接;  $N2$ :  $n$  的两跳邻居节点的集合,它们与  $N1$  中的节点存在双向链接,且  $N2$  不包含  $N1$  中的节点。

输出:节点  $n$  的 MPR 集合

```

1 MPR_selection( $n, N1, N2$ )
2 {
3   MPR 初始化为空;
4   如果  $N1$  中存在这样的节点  $a$ ,它是  $N2$  中某个节点的唯一一跳邻居,将  $a$  加入 MPR,将邻居表中与  $a$  对应的 MPR 当选频度加 1;
5   从  $N1$  中删除  $a$ ,从  $N2$  中删除与  $a$  存在双向链接的所有两跳邻居节点;
6   while ( $N2$  非空)
7   {
8     从  $N1$  中选择节点  $b$ ,满足:对于当前的  $N2$  来说, $b$  的优选因子最大,将  $b$  加入 MPR,将邻居表中与  $b$  对应的 MPR 当选频度加 1;
9     从  $N1$  中删除  $b$ ,从  $N2$  中删除与  $b$  存在双向链接的所有两跳邻居节点;
10  }
11  对于  $N1$  中的剩余节点,将其在邻居表中对应的 MPR 当选频度减 1;
12 }

```

图 3 MPR 选择算法的形式化描述

经过上述改进,即使无线 Mesh 网的拓扑结构基本固定,每轮 MPR 选择操作所选择出的 MPR 集合都会有所变化,从而使得网络中的资源得到充分合理的利用。

#### 5 协议仿真与性能分析

为了评价和分析本文所提出的 EOLSR 路由协议的性能,利用 Network Simulator 2<sup>[8]</sup>(version 2.29)对 EOLSR 协议进行了仿真实现,并与 OLSR 协议在网络吞吐量、端到端平均延时和标准化路由负载 3 个方面进行了性能比较。

##### 5.1 仿真场景描述

测试采用的仿真拓扑如图 4 所示,为一个  $7 \times 7$  的网格,共有 49 个网络节点,其中节点  $n_8, n_{12}, n_{36}$  和  $n_{40}$  为超网关节点,而其它的节点均为无线接入点,图中的所有节点都是静止的,这也和无线 Mesh 网拓扑相对静态的基本特征相吻合。仿真中节点的传输范围  $R_T$  为 250m,干扰范围  $R_I$  为 550m,相邻节点之间的距离为 170m(如图中  $n_0$  和  $n_1$  之间的距离为 170m,这样,对角线的节点,如  $n_0$  和  $n_8$  正好处在相互的无线电传输范围内),无线链路带宽为 2Mbps,节点缓冲区最多可容纳 50 个分组。另一方面,为了模拟无线 Mesh 网络中偶尔出现的拓扑变化,测试中,向网络中加入了 3 个移动的无线接入点(图 4 中没有画出)。这 3 个节点采用 Random Waypoint 运动模型,最大运动速度为 20m/s,停留时间为 20s,运动范围为  $1000m \times 1000m$ 。在实验中,分别针对无线 Mesh 网络中的两种业务模式进行了仿真测试,对于每组测试场景,本文都进行了 10 次实验,具体实验结果为这 10 次实验的平均值。

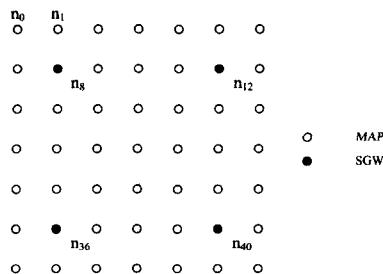


图 4 仿真拓扑

## 5.2 仿真结果及相关分析

### 5.2.1 Internet 业务模式

对于 Internet 业务模式,仿真实验在该网络中随机生成 10 条指向超网关节点的 CBR 数据流,数据包大小为 512 字节,改变数据流的发送速率,从 2 包/s 一直增长到 28 包/s,将发送速率作为衡量网络负载的参数,分析上述 3 个性能指标随网络负载的变化情况,仿真时间为 400s。实验结果如图 5 一图 7 所示。

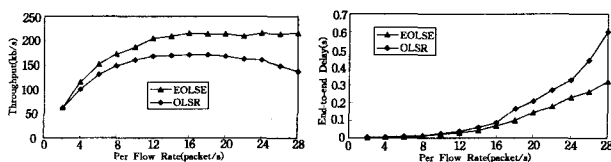


图 5 网络吞吐量分析(Internet 业务)

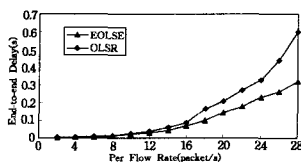


图 6 端到端平均延时分析(Internet 业务)

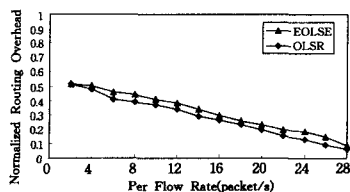


图 7 标准化路由负载分析(Internet 业务)

从图 5 和图 6 中可以看出,随着数据流的发送强度加大,也即网络的负载增加,EOLSR 和 OLSR 的网络吞吐量的增加速率逐渐放缓,在网络达到饱和状态后甚至出现回落,而端到端的平均延时也相应增大。这是由于网络负载的增加使得数据包在节点缓冲队列中的等待延时变大,同时,信道上的无线干扰和冲突也相应加剧,导致丢包率增加。从图中还可以看

出,在不同的网络负载情况下,EOLSR 的网络吞吐量明显高于 OLSR,而端到端的平均延时明显低于 OLSR。造成上述性能差异的主要原因是:无线 Mesh 网拓扑结构基本固定的特性使得 OLSR 协议在运行过程中固定使用网络中的一部分链接来组成路由,从而导致网络资源的极大浪费。而 EOLSR 在 MPR 选择算法中引入了“MPR 当选频度”的参数,促使节点选择的 MPR 集合不断地改变,从而使得网络中的闲置资源得到了合理的利用。从图 7 中可以看出,由于 EOLSR 和 OLSR 都是先验式的路由协议,因此随着网络负载的增加,路由协议的开销变化不明显,标准化路由负载曲线大致呈现线性递减的趋势,而且,EOLSR 基于 OLSR 的运行机理,没有对网络造成实质性的额外开销,所以两者的标准化路由负载也没有太大的本质区别。

### 5.2.2 互访业务模式

对于互访业务模式,仿真实验在该网络中随机生成 10 条 CBR 的数据流,数据包大小为 512 字节,改变数据流的发送速率,从 2 包/秒一直增长到 28 包/秒,将发送速率作为衡量网络负载的参数,同样分析上述 3 个性能指标随网络负载的变化情况,仿真时间为 400s。实验结果如图 8 一图 10 所示。从图中可以看出,互访业务模式下的仿真结果和 Internet 业务模式下的仿真结果一致,在网络负载较重时,EOLSR 的网络吞吐量和端到端平均延时两个性能指标较 OLSR 有较大幅度的提升。

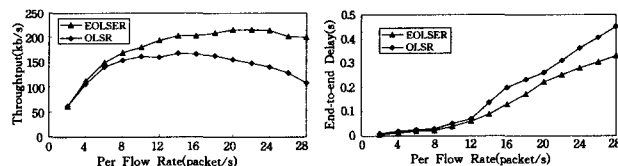


图 8 网络吞吐量分析(互访业务)

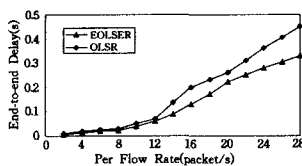


图 9 端到端平均延时分析(互访业务)

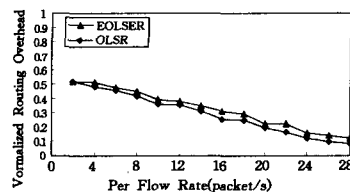


图 10 标准化路由负载分析(互访业务)

**结束语** 本文在研究无线 Mesh 网拓扑结构和业务模式的基础上,深度剖析适合其特性的路由协议类型,得出先验式的逐跳路由最适合无线 Mesh 网的结论。在此基础上,以典型的先验式逐跳路由协议 OLSR 为原型,对其中的邻居表结构和 MPR 选择算法进行了改进,通过引入“MPR 当选频度”的概念,克服了 OLSR 协议在无线 Mesh 网环境中资源利用不充分的缺陷。仿真实验的结果也验证了所提出的 EOLSR 协议对网络性能确实有较大程度的提升,能够在基本不增加协议开销的前提下,有效地增加网络吞吐量,降低端到端的平均延时。

## 参考文献

- [1] 傲丹,方旭明,马志建.无线网格网关键技术及其应用[J].电讯技术,2005(2):16-22

(下转第 137 页)

- alization[S]. ISO/IEC 9646-4. 1994
- [7] Information technology – Open Systems Interconnection – Conformance testing methodology and framework – Part 5: Requirements on test laboratories and clients for the conformance assessment process[S]. ISO/IEC 9646-5. 1994
- [8] Information technology – Open Systems Interconnection – Conformance testing methodology and framework – Part 6: Protocol profile test specification[S]. ISO/IEC 9646-6. 1994
- [9] Information technology – Open Systems Interconnection – Conformance testing methodology and framework – Part 7: Implementation Conformance Statements[S]. ISO/IEC 9646-7. 1995
- [10] Fujiwara S, Bochman G. Test selection based on finite state machine
- [11] Luo G, Bochman G. Test selection based on Communicating nondeterministic finite state machine using a generalized wp-methods
- [12] Heerink L, Tretmans J. Formal methods in Conformance testing; a probabilistic refinement[C]// Baumgarten B, Burkhardt H, Giessler A, eds. Ninth International Workshop in Testing and Communication System. Volume IX, 1996; 261-276
- [13] Goga N. A probabilistic coverage for on-the-fly test generation algorithms[C]// Automated Verification of Critical Systems (AVoCS '03). Southampton, UK, 2003
- [14] Segala R. Modeling and Verification of Randomized Distributed Real-time Systems[D]. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, 1995
- [15] Aggarwal S. Time optimal self-stabilizing spanning tree algorithms[D]. Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, May 1994
- [16] Lynch N A, Saias I, Segala R. Proving time bounds for randomized distributed algorithms[C]// Proceedings of the 13<sup>th</sup> Annual ACM Symposium on the Principles of Distributed Computing. 1994; 314-323
- [17] Pogoyants A, Segala R, Lynch N A. Verification of the randomized consensus algorithms of Aspnes and Herlihy; a case study[J]. Distributed Computing, 2000, 13(3): 155-186
- [18] Stoelinga M I A, Vaandrager F W. Root contention in IEEE 1394[C]// Proceedings 5<sup>th</sup> International AMAST Workshop on Formal methods for Real-time and Probabilistic Systems. volume 1601 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 1999; 53-74
- [19] Segala R. Testing Probabilistic Automata[C]// Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Concurrency Theory. LNCS 1119. 1996; 299-314
- [20] Christoff I. Testing equivalence and fully abstract models of probabilistic processes[C]// Proceedings CONCUR 90. volume 458 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 1999
- [21] Gregorio - Rodriguez C, Nunez M. Denotational semantics for probabilistic refusal testing[C]// Proceedings of ProbMIV 98. volume 22 of Electronic Notes in Theoretical Computer Science. 1998
- [22] Cleveland R, Dayar Z, Smolka S A, et al. Testing preorders for probabilistic processes[J]. Information and Computation, 1999, 154(2): 93-148
- [23] Josson B, Yi W. Compositional testing preorders for probabilistic processes[J]. Theoretical Computer Science, 2001
- [24] De Nicola R, Hennessy M. Testing equivalence for processes[J]. Theoretical Computer Science, 1984, 34: 83-133
- [25] Larsen K G, Skou A. Bisimulation through probabilistic testing[J]. Information and Computation, 1991, 91: 1-28
- [26] Cheung L, Stoelinga M, Vaandrager F. A Testing Scenario for Probabilistic Processes[J]. Journal of the ACM, 2007, 54(6)
- [27] Younes H L S, Simmons R G. Probabilistic verification of discrete event systems using acceptance sampling[C]// Computer-Aided Verification. volume 2404 of Lecture Notes in Computer Science. 2002; 223-235
- [28] Younes H L S, Kwiatkowska M Z, Norman G, et al. Numerical vs. statistical probabilistic model checking; an empirical study[C]// Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. volume 2988 of Lecture Notes in Computer Science. 2005; 46-60
- [29] Sen K, Viswanathan M, Agha G. Statistical model checking of black-box probabilistic systems[C]// Computer-Aided Verification. volume 3114 of LNCS. 2004; 202-215
- [30] Younes H L S. Probabilistic verification for black-box systems[C]// Proceedings CAV 2005. 2005; 253-265
- [31] Blute R, Desharnais J, Edalat A, et al. Bisimulation for labeled Markov processes[J]. Information and Computation, 2002, 179(2): 163-193
- [32] Baier C, Kwiatkowska M. Model checking for a probabilistic branching time logic with fairness[J]. Distributed Computing, 1998, 11(3): 125-155
- [33] Edalat A. Domain theory in stochastic processes[C]// Proceedings LICS 95. 1995; 244-254

(上接第 96 页)

- [2] Waharte S, Boutaba R, Iraqi Y, et al. Routing protocols in wireless mesh networks; challenges and design considerations[J]. Multimed Tools Appl, 2006(29): 285-303
- [3] 姜红旗, 康凯, 林孝康. 拓展宽带接入的无线 Mesh 网技术[J]. 电信科学, 2005(1): 24-30
- [4] 沈强, 方旭明. 无线 Mesh 网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
- [5] 沈强, 方旭明, 宋文. 无线 Mesh 网络路由协议研究[J]. 数据通信, 2005(4): 30-33
- [6] Jacquet P, Muhlethaler P, Clausen T, et al. Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks[C]// Proceedings of IEEE international Multi Topic Conference. Pakistan; IEEE, 2001; 62-68
- [7] Qayyum A, Viennot L, Laouiti A. Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks[C]// Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference, Hawaii; IEEE, 2001
- [8] <http://www.isi.edu/nsnam/ns>