

# 联合频谱切换调度和 QoS 重路由的性能优化算法

谢 鲲 刘学礼

(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

**摘要** 频谱切换技术可以降低无线传输干扰、优化网络结构,成为无线网络研究的热点。现有频谱切换技术忽视了频谱切换执行顺序对网络性能的影响,无法保证网络在切换过程中的连通性和吞吐量。为了最大化网络吞吐量,提出一新的频谱切换调度问题(SHSTM; Spectrum Handoff Scheduling for Throughput Maximization),并证明 SHSTM 是 NP 难问题。为解决 SHSTM 问题,提出联合频谱切换调度和 QoS 重路由的跨层优化算法 JSHSQ-R。在 JSHSQ-R 中,频谱切换分多轮执行。为了减少切换延时并保证网络连通性,该算法基于加权最小生成树来确定每轮需要切换的链路,并在切换过程中为数据流进行重路由来满足数据流的 QoS 需求。在 NS2 上进行了大量仿真实验,结果表明所提算法能够充分利用无线网状网多接口多信道资源,并能为多流提供较高的网络吞吐量保证。

**关键词** 多接口多信道无线网状网,频谱切换调度,QoS 重路由,切换时延

中图分类号 TP393 文献标识码 A

## Joint Spectrum Handoff Scheduling and QoS Re-routing for Performance Optimization

XIE Kun LIU Xue-li

(School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract** Spectrum handoff has attracted the interest of many people as it can reduce interference among wireless transmissions and optimize the structure of wireless network. Current studies on spectrum handoff can't guarantee the connectivity and high throughput of wireless network when spectrum handoff happens because these studies ignore that spectrum handoff order among multiple links can impact performance. To maximize the throughput of wireless network, this paper proposed a novel spectrum handoff scheduling problem (SHSTM), and proved that SHSTM is an NP-hard problem. To solve the SHSTM problem, we proposed a cross-layer optimization algorithm by jointly considering the spectrum handoff scheduling and QoS Re-routing (JSHSQ-R). Spectrum handoff executes in several rounds in JSHSQ-R. To reduce the total delay of spectrum handoff and to guarantee the network connectivity, JSHSQ-R computes links sets whose spectrum needs to handoff in every round based on weighted Minimum Spanning Tree. To satisfy the QoS requirement of every flow, JSHSQ-R computes a QoS routing for every flow in every round. We made lots of simulations in NS2. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm can make full use of multi-radios and multi-channels in wireless mesh network and obtain high throughput for multiple flows.

**Keywords** MRMC-WMN, Spectrum handoff and scheduling, QoS Re-routing, Handoff delay

## 1 引言

多接口多信道无线网状网(MRMC-WMN; Multi-Radio Multi-channel Wireless Mesh Network)是一种动态自组织、自配置的多跳网络,它具有高度灵活性、健壮性、高带宽和易维护等优点,已经成为下一代宽带无线接入网络的研究热点<sup>[1,2]</sup>。频谱切换技术可以根据网络的运行状态来改变网络节点的使用信道,完成网络的合理频谱规划,从而降低无线干扰并优化网络结构,成为 MRMC-WMN 性能优化的关键技术<sup>[3-5]</sup>。相对于单接口单信道的无线 mesh 网络,经过合理频谱规划的 MRMC-WMN 的吞吐量可提高 6~8 倍<sup>[6,7]</sup>。

现有的多跳无线网络中频谱切换技术主要解决的问题是:在已知网络拓扑和网络初始信道状态的情况下,确定链路频谱切换的目标信道以降低干扰并提高吞吐量,即解决网络链路最终信道的确定问题<sup>[8-15]</sup>。然而,现有研究大多忽视了频谱切换执行的顺序对无线网络性能的影响。由于结点完成频谱切换需要一定的时间<sup>[16,17]</sup>,当 MRMC-WMN 有多条链路需要进行切换时,若链路切换执行顺利不合理,就可能导致频谱切换过程中数据流路径不通而产生间歇性中断,严重影响无线网络的 QoS 服务质量。因此,MRMC-WMN 迫切需要研究频谱切换调度问题,即在确定切换链路的目标信道同时,还须确定链路切换的顺序,以保证网络在切换过程中具有较

到稿日期:2012-09-26 返修日期:2013-01-28 本文受国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB310702),国家自然科学基金(61003305),博士点基金(20100161120022),湖南省自然科学基金(11JJJA003)资助。

谢 鲲(1978-),女,博士,副教授,主要研究方向为无线网络与移动计算、网络监测、控制与管理,E-mail: cskxie@gmail.com;刘学礼(1987-),男,硕士生,主要研究方向为无线网络与移动计算。

高的网络连通性和吞吐量。目前仅有文献[3]研究了频谱切换调度问题。然而,文献[3]对频谱切换调度的研究还十分有限,不能保证切换过程中网络的高吞吐量,也不能满足数据流的QoS需求。因此,现有研究并不能保证QoS敏感的多媒体业务在多跳无线网状网中运行的性能,如时延敏感的音频数据流、带宽敏感的视频数据流。

不同于以往的研究工作,本文研究最大化网络吞吐量的频谱切换调度问题(SHSTM: Spectrum Handoff Scheduling for Throughput Maximization),即在MRMC-WMN频谱切换过程中,通过调度链路信道切换的顺序来保证信道切换过程中网络具有高的连通性和吞吐量。

本文的主要贡献有:提出最大化网络吞吐量的频谱切换调度问题SHSTM,并证明该问题是NP难问题。为了解决该问题,综合考虑信道切换过程中网络连通性、链路调度、重路由、数据流的QoS保证,提出联合频谱切换调度和QoS重路由的跨层优化算法JSHSQ-R(Joint Spectrum Handoff Scheduling and QoS-ReRouting)。该算法采用多轮链路切换的方式来保证网络切换过程的连通性。在切换的过程中根据网络拓扑图,以链路带宽反比为链路权值,使用加权最小生成树来计算每轮需要切换的链路,从而保证切换过程中有较高的吞吐量和较小的切换总延时,并在切换过程中为数据流进行QoS重路由来满足数据流的QoS需求。在NS2中进行了大量仿真实验,结果表明本文所提算法能够充分利用WMN网络中的多接口多信道资源,具有较高的网络吞吐量并能为多个数据流提供QoS保证。

本文第2节讨论了相关工作;第3节给出了系统模型和相关定义;第4节给出了问题描述和分析;第5节阐释所提的联合频谱切换调度和QoS重路由的性能优化算法;第6节描述了频谱调度执行框架;第7节描述了仿真实验及分析;最后总结全文。

## 2 相关工作

按照链路切换的目标信道确定方式,现有多跳无线网络中频谱切换的研究可以分为2类<sup>[8-10]</sup>:先应式频谱切换机制和反应式频谱切换机制。先应式频谱切换机制是指需要切换的链路按照事先预定的信道列表切换到相应的目标信道。反应式频谱切换机制是指结点通过实时监测网络环境变化来确定目标信道。

文献[11-13]研究了先应式频谱切换机制的目标信道的选择问题。文献[11]提出了一种分布式的信道选择算法来提高频谱切换中数据包传递的成功率,保证选择的目标信道在用户之间具有较小的冲突,同时也保证多用户选择信道的公平性。文献[12]提出了一种分布式信道选择机制来减少用户间所选目标信道的冲突,该协调机制利用结点之间的公共信道来交互信道信息、控制信息等。文献[13]提出一种低复杂度的贪婪式算法来选择切换的目标信道以最小化切换时延。

文献[14]研究了不同的数据速率和延时要求的用户加入认知mesh网络时的频谱检测机制,以提出认知无线网络中的反应式频谱切换模型,该模型能够表征多次频谱切换总时延。

文献[15]在认知mesh网络环境下,提出了一种自适应的频谱切换调度机制,以解决何时检测信道信息、何时发送切

换信息、何时做频谱切换等问题,并通过强化学习算法来使认知mesh结点根据网络客户端的反馈信息,在频谱检测、频谱切换协调及频谱执行等之间作出最优的均衡决策。

上述频谱切换的研究主要解决链路切换的最终信道状态的确定问题。只有文献[3]研究了频谱切换调度的问题,该文献采用多轮链路切换来解决切换过程的连通性问题。但是,他们对频谱切换调度的研究还十分有限,仅满足了切换过程中的连通性,不能满足切换过程中业务流QoS需求,也不能获得切换过程中网络的高吞吐量。

不同于以往的研究,本文研究最大化网络吞吐量的频谱切换调度问题,提出联合频谱切换调度和QoS重路由的跨层优化算法来保证频谱切换过程中的高连通性和高吞吐量。

## 3 系统模型和相关定义

本文研究的网络模型是存在多条QoS敏感的数据流的MRMC-WMN。图1所示为由12个mesh路由器(Mesh Router, MR)组成的MRMC-WMN,该网络中存在5条数据流,用不同的颜色表示。所有的mesh路由器均配置有2个射频接口:NIC\_1、NIC\_2,每个射频接口可使用3个非重叠信道,分别记作 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 。

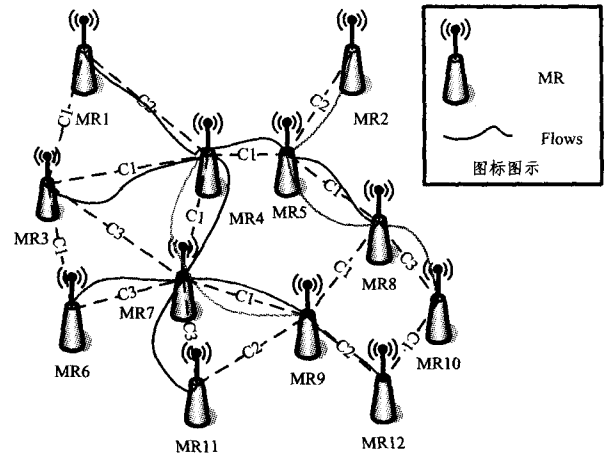


图1 MRMC-WMN网络拓扑结构

MRMC-WMN可定义为一个无向图 $G(N, L)$ ,其中 $N$ 代表mesh路由器且有 $|N|=n$ ( $n$ 为mesh路由器的个数), $L$ 代表无线mesh网络的链路集合。网络中有 $m$ 条数据流,各个数据流的QoS带宽需求分别表示为: $BW_{Flow_0}$ 、 $BW_{Flow_1}$ 、 $\dots$ 、 $BW_{Flow_{m-1}}$ 。每条数据流用它的源结点和目的结点标识,如图中的红色曲线标记的数据流可记为: $Flow_1(MR_1 \rightarrow MR_8)$ ,其中 $MR_1$ 、 $MR_8$ 分别为源结点及目的结点。

$CAL(i) = \{CAL_{(NIC_1)}, CAL_{(NIC_2)}\}$ 表示第 $i$ 个mesh路由器的信道使用情况,其中两个射频 $NIC_1$ 、 $NIC_2$ 分配的频道分别是 $CAL_{(NIC_1)}$ 、 $CAL_{(NIC_2)}$ 。如图1所示, mesh路由器 $MR_1$ 的信道分配情况为 $\{C_1, C_2\}$ 。网络的初始信道使用状态可表示为:

$$CAL(G) = \{CAL(1), CAL(2), \dots, CAL(i), \dots, CAL(N)\}$$

为了最大化数据流的吞吐量,本文采用邻居切割机制信道分配算法<sup>[7]</sup>,可以得到网络最终的信道分配状态: $CAL'(G) = \{CAL(1), CAL(2), \dots, CAL(i), \dots, CAL(N)\}$ 。

以图1为例,当链路 $MR_8 - MR_{10}$ 和链路 $MR_9 - MR_{12}$ 同

时进行信道切换时,会使得结点  $MR_{10}$  和结点  $MR_{12}$  与网络断开,从而会使数据流  $MR_5 \rightarrow MR_{10}$  及  $MR_6 \rightarrow MR_{12}$  中断,严重影响了网络的吞吐量。因此,一次进行多链路的全部切换,并不能保证网络的连通性。为了保证网络在频谱切换过程的连通性,本文的链路信道切换分多轮进行,其目的就是确定多轮链路信道切换的次序。

## 4 系统模型和问题描述与分析

### 4.1 问题描述

本文研究最大化网络吞吐量的链路调度问题(SHSTM: Spectrum Handoff Scheduling for Throughput Maximization),可描述为:在给定网络信道初始使用状态  $CAL(G)$  和目标信道使用状态  $CAL'(G)$  的情况下,确定每轮需要切换的链路,以及在切换过程中数据流的 QoS 路径,在最小化网络切换延时的同时,最大化频谱切换过程中网络吞吐量并满足数据流的 QoS 需求。

记网络待切换链路集合为  $R\_require\_sets$ ,第  $\gamma$  轮需要切换的链路集合记为  $R\_require\_sets(\gamma)$ ,那么第  $\gamma$  轮中不进行信道切换的链路集合为:  $G(\gamma) = G(N, L) - R\_require\_sets(\gamma)$ 。为了保证数据流在切换过程中的连通性,每轮选择切换链路时,需满足除当前切换的链路外,剩余的链路组成的图是连通的。因为,切换的轮数越多,切换延时就越大,为了减少切换延时,需要每轮切换的链路越多越好。因此,保证网络切换过程连通性的切换链路选择问题可以表示为式(1):

$$\begin{aligned} & \text{Max } |R\_require\_sets(\gamma)| \\ & \text{Subject to } Con\_degree(G(\gamma)) \geq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $Con\_degree(G(\gamma))$  为图  $G(\gamma)$  的连通度。

为了减少切换时延,需要每轮都尽可能多地选择链路进行切换。因为  $R\_require\_sets(\gamma) = G(N, L) - G(\gamma)$ ,最大化  $R\_require\_sets(\gamma)$  的规模和最小化  $G(\gamma)$  的规模是等价的。因此本文基于最小生成树的方法来解决每轮链路切换问题。具体为在  $G(N, L)$  中生成保证网络连通性的最小生成树,使得  $G(\gamma)$  为这一最小生成树,即  $G(\gamma)$  为图  $G(N, L)$  保证连通性的最小子图。

除了保证切换过程中的网络连通性之外,数据流的 QoS 服务保障成为当前无线 mesh 网络的重大挑战。因为,数据流的流经链路可能会在  $\gamma$  轮中发生切换,为了保证数据流  $Flow_i$  的连通性和 QoS 性能,需要在切换过程中,在  $G(\gamma)$  中找到一条 QoS 路径  $path(Flow_i(\gamma))$  来重路由该数据流。而且,数据流的重路由路径需满足该数据流的 QoS 需求,即:

$$Handoff\_throughput\_ (path(Flow\_i(\gamma))) \geq BW_{Flow\_i} \quad (2)$$

切换过程中数据流的聚合吞吐量为:

$$C_\gamma = \sum_{i=0}^{m-1} Handoff\_throughput\_ (path(Flow\_i(\gamma))) \quad (3)$$

因此,综合考虑网络切换过程中的连通性、链路调度、重路由、数据流的 QoS 保证,最大化网络吞吐量的频谱切换调度问题 SHSTM 可形式化表示如下:

$$\begin{aligned} & \text{MAX } C_\gamma \\ & \text{Subject to:} \\ & Con\_degree(G(\gamma)) \geq 1 \\ & Handoff\_throughput\_ (path(Flow\_i(\gamma))) \geq BW_{Flow\_i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_\gamma &= \sum_{i=0}^{m-1} Handoff\_throughput\_ (path(Flow\_i(\gamma))) \\ & \forall i \in N \end{aligned} \quad (4)$$

为了最大切换过程中的网络吞吐量,式(4)中  $G(\gamma)$  除了保证连通性之外 ( $Con\_degree(G(\gamma)) \geq 1$ ),还需满足数据流的带宽需求,因此,基于对式(1)的求解过程,本文采用基于链路代价设计加权最小生成树来求解  $G(\gamma)$ ,以满足数据流的 QoS 需求。

### 4.2 问题分析

首先证明 SHSTM 问题的可解性,再证明该问题是一个 NP 难题。

**定理 1** SHSTM 问题是可解的。

证明:在最坏的情况下,网络中所有的链路都需要进行频谱切换。假设第  $\gamma$  轮需要切换的链路集合为  $R\_require\_sets(\gamma)$ 。对于  $\forall l_{i,j} \in R\_require\_sets(\gamma)$ ,因为  $G(\gamma)$  是连通图,总可以在  $G(\gamma)$  中找到一条路径链接  $i$  和  $j$  结点的路径 Path。所以,在多轮链路切换后,图  $G$  中的所有链路均可以在不破坏图的连通性的前提下完成频谱切换。因此,SHSTM 问题是可求解的。

**定理 2** SHSTM 问题是 NP 难问题。

证明:SHSTM 问题可转化为一个集合覆盖问题。可描述为:在保证网络连通性的情况下,为所有待切换链路集合  $R\_require\_sets$  找到一个最小覆盖集合:

$$Set\_Cover = \{R\_require\_sets(0), R\_require\_sets(1), \dots, R\_require\_sets(\gamma), \dots, R\_require\_sets(N0)\}$$

使得该最小覆盖集合的并集等于所有的待切换链路集合,即:

$$\begin{aligned} R\_require\_sets &= R\_require\_sets(0) \cup R\_require\_sets(1) \\ & \cup \dots \cup R\_require\_sets(\gamma) \cup \dots \cup R\_require\_sets(N0) \end{aligned}$$

而且使得网络图去掉覆盖子集后网络汇聚容量最大化,即  $G(\gamma) = G(N, L) - R\_require\_sets(\gamma)$  有最大的汇聚吞吐量。

因为集合覆盖问题是一个 NP 难题<sup>[18]</sup>,所以 SHSTM 问题是 NP 难题。

## 5 算法设计

本文提出启发式 JSHSQ-R 算法来解决 SHSTM 问题。在频谱切换前,本文采用文献[7]中提出的信道分配算法计算出网络最终的切换信道图  $CAL'(G)$ 。

JSHSQ-R 算法的输入为:网络拓扑  $G(N, L)$ 、网络初始信道图  $CAL(G)$ 、网络最终信道图  $CAL'(G)$ 、数据流的带宽需求。该算法输出为:频谱切换需要的总切换轮数  $N_0$ 、待切换链路的切换次序、每轮待切换链路的重路由路径。

多条链路全部同时切换可能会造成网络中部分数据流的中断,因此需要进行多轮切换。定义  $Diff(CAL_\gamma(G), CAL'(G))$  表示每轮切换后所得的网络信道图与最终信道图的差异,如果  $\gamma$  轮切换后的网络信道图  $CAL_\gamma(G)$  和最终信道图  $CAL'(G)$  完全吻合,则令

$$Diff(CAL_\gamma(G), CAL'(G)) = 0$$

否则令

$$Diff(CAL_\gamma(G), CAL'(G)) = 1.$$

当  $Diff(CAL_\gamma(G), CAL'(G)) = 0$  时,切换完成,否则还需进行下一轮的切换。

为了尽可能地降低切换时延和保证切换过程中的连通

性,每轮的信道切换过程中,JSHSQ-R 算法会根据当前网络拓扑图计算出最小生成树  $T_{min}$ ,该树外的待切换链路可在该轮进行信道切换,记第  $\gamma$  轮需要切换的链路为:

$$R\_require\_sets(\gamma) = (G - T_{min}) \cap R\_require\_sets \quad (5)$$

更进一步,为了保证切换过程中的高吞吐量,JSHSQ-R 中的最小生成树基于链路代价(权值)产生,本文定义链路代价为带宽的反比,即

$$Cost(i, j) = 1/bw(i, j) \quad (6)$$

$bw(i, j)$  表示链路  $l_{ij}$  的剩余带宽,该值可根据文献[19]计算。基于文献[20]中的 Kruskal 算法,本文的最小生成树为加权最小生成树。由于采用链路代价作为带宽的反比,因此加权最小生成树就是最大带宽生成树, QoS 重路由路径就可在该最大带宽生成树中去找。

由于当前数据流的运行路径中可能存在需要切换的链路,当这些链路进行频谱切换时会使得数据流中断,为了保证数据流的 QoS 需求,在切换过程中需要为该数据流重路由,即找一条满足数据流的 QoS 带宽需求的路径。而且,当数据流  $Flow_i$  上的所有链路的可用容量均大于等于  $BW_{Flow_i}$  时,该新路径是满足 QoS 需求的。为了防止某些待切换链路长时间无法切换,即总是为最小生成树中的链路,本文为每条需要切换的链路设置切换阈值,如果需要切换的链路等待了很长时间(超过切换阈值)而仍未切换,就启用防饿死机制,在计算下一轮的最小生成树时排除该链路。

JSHSQ-R 算法的伪代码如图 2 所示。

输入:  $G(N, L); CAL(G);$

输出: 频谱切换轮数  $N_0$ ; 频谱切换次序  $R\_require\_sets(\gamma)$ ; 每轮待切换链路上数据流的重路由路径  $P(\gamma)$ ;

初始化: 切换总轮数  $N_0=0$ ; 当前轮数  $\gamma=0$ ;

根据流量感知信道分配算法来计算待切换链路组的目标信道图  $CAL'(G)$ ;

根据  $CAL(G)$  和  $CAL'(G)$  计算出所有的需要进行频谱切换的链路  $R\_require\_sets$ ;

WHILE(Diff( $CAL_\gamma(G), CAL'(G)$ ))

{  
根据文献[19]中剩余带宽估计公式计算出链路的可用容量  $bw(i, j)$ ;

给拓扑图  $G(N, L)$  中的每条链路分配  $Cost(i, j) = 1/bw(i, j), i, j \in N$ ;

根据链路代价  $Cost(i, j), i, j \in N$ , 采用 Kruskal 算法计算出最小生成树  $T_{min}$ ;

计算本轮需要切换的链路集合  $R\_require\_sets(\gamma) = (G - T_{min}) \cap R\_require\_sets$  (最小生成树外);

if(本轮待切换链路上无数据流通过)

{  
切换链路到目标信道  
}

else if(本轮待切换链路上有数据流通过)

{  
统计数据流的数目为  $F$ ;

for( $i=1; i++ < F$ )

{  
给每条数据流找一条满足 QoS 带宽需求的重路由路径,并将该业务流切换到新路径上运行;

```

} End for
切换链路到目标信道;
}End if.
N0++;
γ++;
计算出 CAL_γ(G)并更新网络信道分布差值 Diff(CAL_γ(G),
CAL'(G))
}End WHILE

```

图 2 JSHSQ-R 算法伪代码

为了进一步降低重路由路径的干扰,在 JSHSQ-R 算法的基础上,本文设计了改进的 JSHSQ-R-U 算法。不同于 JSHSQ-R 算法, JSHSQ-R-U 算法进一步考虑了多信道环境下的同信道干扰情景,在寻找 QoS 路由时,求解链路剩余可用容量用  $bw(i, j)/n$  来表示,其中  $bw(i, j)$  仍然根据文献[19]计算得出,而  $n$  为链路干扰范围同信道链路的个数(本文假设无线干扰范围为 2 跳之内)。

## 6 算法执行流程

图 3 所示为本文频谱切换调度的执行流程。初始时网络处于稳定状态,各个结点已经分配了初始信道  $CAL(i)$ ,当网络中有新的授权用户加入或是现有信道质量变差时,结点就会向 SERVER 发出信道切换的请求,然后 SERVER 会启用相应的协调机制来调度多链路进行频谱切换。当中心 SERVER 检测出 Diff 的非零状态时,就会启动频谱切换,分多轮计算需要进行切换的链路,并为数据流进行 QoS 重路由,频谱切换发生在重路由之后。执行过程包括两方面,一方面,SERVER 根据结点的请求信息来确定切换链路集合的切换次序及链路的信道分配情况,另一方面,结点根据 SERVER 的反馈信息来执行切换并更新路由表。

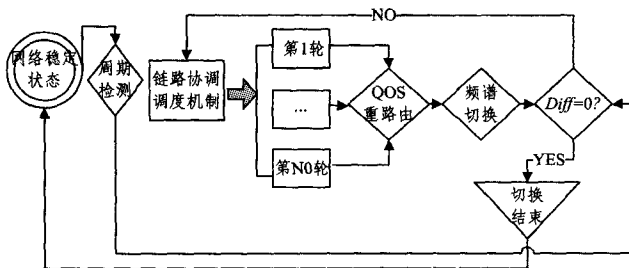


图 3 多链路频谱切换调度框架

## 7 仿真实验及性能测试

### 7.1 仿真场景描述

本文采用文献[6,7]中的 Hyacinth 方案在标准 NS2<sup>[21]</sup> 中添加多信道和多接口的支持。仿真拓扑为由 16 结点 4 条流组成的矩形拓扑(如图 4 所示):  $Flow_0(S_0 \rightarrow D_0)$ ,  $Flow_1(S_1 \rightarrow D_1)$ ,  $Flow_2(S_2 \rightarrow D_2)$ ,  $Flow_3(S_3 \rightarrow D_3)$ 。实验采用 802.11b 传输协议,链路数据速率是 11Mbps,结点间传输距离为 250m,干扰距离为 550m,每个结点配置 2 个无线射频接口,可选择的信道数为 3 个,物理层采用 DSSS 机制。无线传播模型为 two-ray ground reflection, MAC 层使用 IEEE 802.11RTS/CTS 机制。仿真时间为 100s,每个 CBR 数据流速率为 0.5Mbps,数据包大小为 1000bit,数据流的 QoS

需求为传输带宽大于 220Kbps。

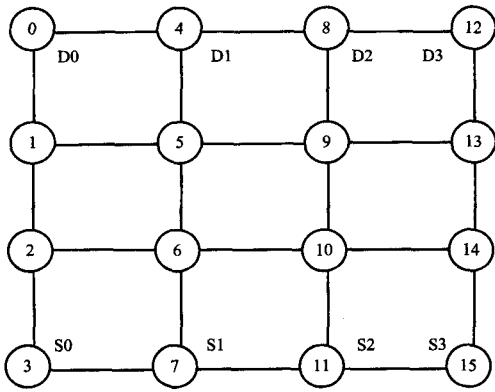


图 4 16 结点 4 条流矩形拓扑的仿真场景

仿真实验中共实现了 4 种频谱切换算法:直接信道切换即不进行切换调度的信道切换算法、文献[3]中提出的 C-JSHRP 频谱切换调度算法以及本文提出的 JSHSQ-R 和 JSHSQ-R-U 算法。

## 7.2 仿真实验及结果分析

仿真实验分别从网络汇聚吞吐量、端到端时延和平均丢包率等方面比较 4 种算法的性能。

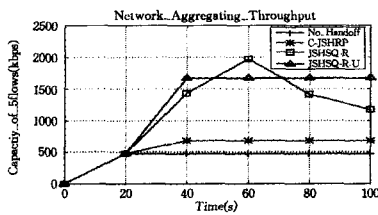


图 5 汇聚吞吐量比较

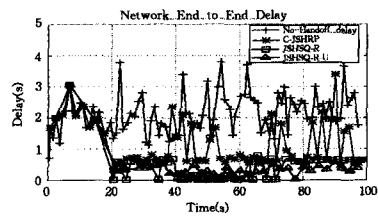


图 6 端到端时延比较

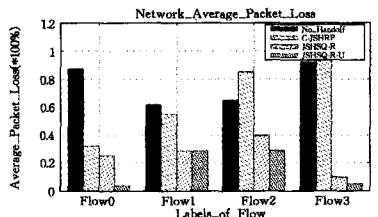


图 7 平均丢包率比较

图 5 描绘了在无切换调度及不同切换调度算法下网络汇聚吞吐量的比较。在图 5 中,横坐标为仿真时间,纵坐标代表网络的汇聚吞吐量。从图中可以看出,在无切换调度时网络的汇聚容量始终是处于低的水平,这是由网络中不合理的信道分配及未考虑切换调度造成的;而在采用了切换调度的算法中,都保持了相对较高的汇聚吞吐量,同时每种算法的切换执行都是多轮完成,这是因为为了保持网络的连通性,这 3 种算法都采用了多轮切换策略。而在频谱切换的过程中及频谱切换结束后,相比 C-JSHRP 算法,本文提出的 JSHSQ-R 及

JSHSQ-R-U 算法的吞吐量维持较高的水平,这是因为实验中,算法都考虑了频谱切换中对各数据流 QoS 带宽的保证。如在第二轮切换后(第 60s),无切换调度算法的汇聚吞吐量是 469.5761Kbps, C-JSHRP、JSHSQ-R 及 JSHSQ-R-U 的汇聚吞吐量分别为 675.0235Kbps、1971.199Kbps、1666.936 Kbps, JSHSQ-R 及 JSHSQ-R-U 算法相比 C-JSHRP 算法分别提高了约 192.02%、146.94%, 相比无切换调度情况分别提高了约 319.78%、254.99%。JSHSQ-R 及 JSHSQ-R-U 算法由于同时考虑了网络连通性及 QoS 重路由机制,在每次选取重路由路径时均考虑了 QoS 带宽需求,因此要比仅仅考虑了网络连通性的 C-JSHRP 算法具有更高的网络汇聚容量。

图 6 描绘了在无切换调度及不同切换调度算法下的网络端到端时延比较。在图 6 中,横坐标表示发送数据包的时间,纵坐标代表数据包的端到端时延。在频谱切换过程中,由于无线干扰的存在,每个数据包的端到端时延是不定的,会出现如图 6 所示的抖动。比较 3 种切换调度算法的性能可以知道,本文提出的 JSHSQ-R 及 JSHSQ-R-U 算法具有较低的端到端时延,因为在频谱切换时重路由选择了 QoS 带宽保证的路径,数据包的实际传输速率相对较大,数据包的时延也就较小。而 JSHSQ-R-U 又考虑了重路由路径的同信道干扰,进一步降低了重路由路径的干扰,保证了实际传输速率,进一步降低了数据包端到端时延。

图 7 描绘了在无切换调度及不同切换调度算法下的网络平均丢包率的比较。在图 7 中,横坐标表示网络中每条数据流的标号,纵坐标代表每条流的数据包的平均丢包率。比较 3 种算法可知,对于每条流来说,相对于 C-JSHRP 频谱切换算法,本文提出的 JSHSQ-R 及 JSHSQ-R-U 算法具有更低的丢包率,且 JSHSQ-R-U 算法优于 JSHSQ-R 算法。

图 8 所示为在无切换调度及不同切换调度算法下的数据流的吞吐量随仿真时间的变化。

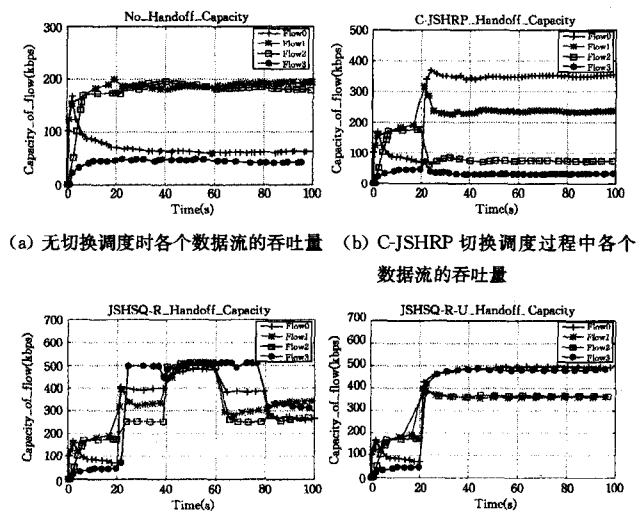


图 8 切换过程中各个数据流的吞吐量

图 8(a)示出无切换调度策略下各个数据流的吞吐量变化情况,从图中可以看出,在不采取切换调度时,网络中的数据流始终是处在一个较低的速率范围内,同时各个数据流的平均吞吐量也无法满足 QoS 带宽需求。如网络中的数据流均小于 200Kbps,部分数据流甚至不足 100Kbps。

图 8(b) 示出采用 C-JSHRP 算法时各个数据流的吞吐量变化情况, 从图中可以看出, 频谱切换仅需要进行一次, 约在 20s 时频谱切换开始, 此时网络中部分数据流的吞吐量在上升, 这是信道分配趋向合理的结果; 而部分数据流的吞吐量在下降, 这是由 C-JSHRP 算法仅考虑最小化切换次数而未考虑数据流重路由时的 QoS 带宽保证造成的。而在频谱切换过程中分配给各个数据流的吞吐量并不合理, 有的数据流吞吐量很高, 有的很低, 甚至濒临“饿死”状态, 绝大部分数据流的吞吐量处在 220Kbps 以下, 无法满足数据流的 QoS 带宽需求, 最小数据流速率仅为 29.82Kbps。在约 40s 时全部数据流吞吐量趋于稳定, 此时频谱切换结束。

图 8(c) 示出采用 JSHSQ-R 算法时各个数据流的吞吐量变化情况, 从图中可以看出, 20s 后开始进行频谱切换, 在频谱切换过程中各个数据流的吞吐量处于上升状态, 在 100s 时吞吐量趋于稳定, 此时频谱切换结束。在切换过程中, JSHSQ-R 算法的吞吐量在趋于平衡之前有所下降, 这是该算法采取防饿死机制的结果(防止链路无止境的切换下去)。在整个频谱切换过程中, 各个数据流均保持在较高的吞吐量水平, 最小数据流速率能达到 241.3Kbps, 满足数据流的带宽传输需求, 相比于 C-JSHRP 算法, JSHSQ-R 算法提高了约 7 倍。

图 8(d) 示出采用 JSHSQ-R-U 算法时各个数据流的吞吐量变化情况, 从图中可以看出, 切换开始于 20s, 在频谱切换过程中各个数据流的吞吐量处于上升状态, 在 40s 时吞吐量趋于稳定。在整个频谱切换过程中, 各个数据流均保持在较高的吞吐量水平, 最小数据流速率能达到 360.19Kbps, 满足数据流的带宽传输需求, 相比于 C-JSHRP 算法, JSHSQ-R-U 算法提高了约 11 倍。

综上所述, 比较仿真结果可知: 相比 C-JSHRP 算法, 本文提出的 2 种算法能够很好地保证网络在整个切换过程中具有较高的吞吐量, 同时也能保证重路由路径的 QoS 带宽需求。

**结束语** 以往的频谱切换算法仅仅是考虑了多条链路切换的始终状态, 而未考虑频谱切换执行过程中的切换顺序对网络性能的影响。现有的频谱切换算法无法保证频谱切换中的网络连通性和吞吐量, 严重影响了数据流的网络性能, 因此需考虑频谱切换中的多链路切换顺序问题。本文研究 MRMC-WMN 网络中的频谱切换调度, 提出最大化吞吐量的频谱切换调度问题, 并证明该问题是 NP 难问题。为了解决该问题, 本文综合考虑信道切换过程中网络连通性、链路调度、重路由、数据流的 QoS 保证, 提出了联合频谱切换调度和 QoS 重路由的跨层优化算法 JSHSQ-R 及其改进算法 JSHSQ-R-U。JSHSQ-R 和 JSHSQ-R-U 采用了最小生成树的构建, 其中 JSHSQ-R 算法综合考虑了网络连通性及链路剩余带宽, 而 JSHSQ-R-U 更进一步地考虑了网络中的多信道 mesh 网络中信道的干扰因素。仿真结果表明, 在频谱切换过程中, 本文提出的算法能满足数据流的 QoS 需求, 同时使网络汇聚吞吐量保持较高的水平。

## 参 考 文 献

[1] Huang Rong-sheng, Kim S, Zhang Chi, et al. Exploiting the Capacity of Multichannel Multiradio Wireless Mesh Networks[J]. *Vehicular Technology*, 2009, 58(9): 5037-5047

[2] Bhandari V, Vaidya N H. Connectivity and Capacity of Multi-Channel Wireless Networks with Channel Switching Constraints [C]// *INFOCOM 2007*. 26th. Anchorage, AK: IEEE, 2007: 785-793

[3] Feng Wei, Cao Jian-nong, Zhang Chi-sheng, et al. Joint Optimization of Spectrum Handoff Scheduling and Routing in Multi-hop Multi-radio Cognitive Networks [C]// *IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS' 09*. 29th). Montreal, QC: IEEE, 2009: 85-92

[4] Adisorn L, Naceur M, Serge F. Spectrum handoff strategy using cumulative probability in cognitive radio networks [C]// *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. Budapest: IEEE, 2011: 1-7

[5] Yoon S-U, Ekici E. Voluntary Spectrum Handoff: A Novel Approach to Spectrum Management in CRNs [C]// *2010 IEEE International Communications (ICC) Conference*. Cape Town: IEEE, 2010: 1-5

[6] Raniwala A, Chiueh T-C. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network [C]// *the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*. 2005: 2223-2234

[7] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T-C. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks [J]. *ACM SIGMOBILE. Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(2): 50-65

[8] Chen Yin, Kowalik K, Davis M. MeshScan: Performance of Passive Handoff and Active Handoff [C]// *Wireless Communications & Signal Processing (WCSP 2009)*. Nanjing: IEEE, 2009: 1-5

[9] Wang Li-chun, Chen A. On the Performance of Spectrum Handoff for Link Maintenance in Cognitive Radio [C]// *Proceedings of ISWPC 2008*. Santorini: IEEE, 2008: 19-22

[10] Wang Chun-li, Wang Chung-wei. Spectrum handoff for cognitive radio networks: reactive-sensing or proactive-sensing [C]// *Performance, Computing and Communications Conference*. Austin, Texas: IEEE, 2008: 343-348

[11] Song Y, Xie J. ProSpect: A Proactive Spectrum Handoff Framework for Cognitive Radio Ad Hoc Networks without Common Control Channel [J]. *Mobile Computing*, 2012, 11(7): 1127-1139

[12] Wang Chung-wang, Wang Li-chung. Modeling and Analysis for Proactive-Decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks [C]// *IEEE International Conference on (ICC 2009)*. Dresden: IEEE, 2009: 1-6

[13] Song Yi, Xie Jiang. Common Hopping Based Proactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Ad Hoc Networks [C]// *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM2010)*. Miami, FL: IEEE, 2010: 1-5

[14] Wang Chung-wei, Wang Li-chun, Adachi F. Modeling and Analysis for Reactive-Decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks [C]// *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*. Miami, FL: IEEE, 2010: 1-6

[15] Di Felice M, Chowdhury K R, Kessler A, et al. Adaptive Sensing Scheduling and Spectrum Selection in Cognitive Wireless Mesh Networks [C]// *2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. Maui, HI: IEEE, 2011, 20: 1-6

例下的失效传递攻击情况进行了研究,仿真结果如图3所示。其中不同比例情况为,当 $ps:pd=1:1$ 时进行供应失效传递攻击,当 $ps:pd=0:1$ 时进行需求失效传递攻击,而 $ps:pd=0:0$ 时为供求失效双向传递攻击(即同时发生供应失效和需求失效)。

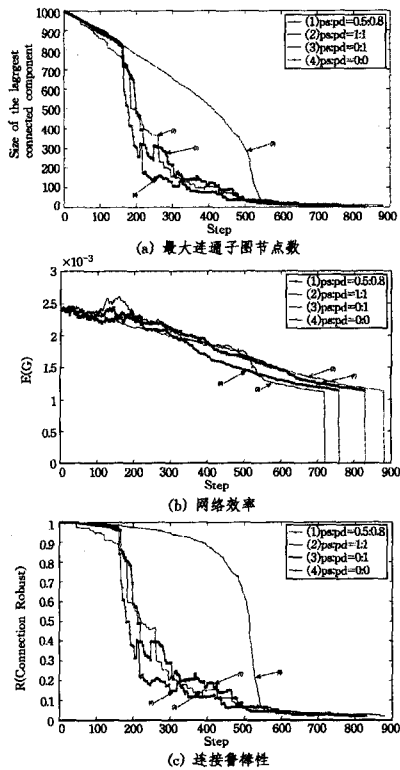


图3 不同比例的传递攻击下网络性能的变化情况

由图3可见,供应链网络面对不同比例的传递攻击时,结构稳定性和连接鲁棒性的总体变化情况为:供求失效传递攻击<供应失效传递攻击<3种类型都存在的传递攻击<需求失效传递攻击,其中仅发生供应失效传递攻击时,网络效率最好。

**结束语** 本文从复杂网络的攻击策略角度描述供应链网络的脆弱性和鲁棒性,考虑失效事件的传递特性,提出传递攻击策略。由于供应链网络中只有少数企业和供应关系为核心企业和核心供应关系,而大多数企业为非核心企业,因此面

对传递攻击,网络结构表现得相对比较脆弱,但优于选择性攻击带来的影响。因此,在供应链管理应该尽可能地采取一切措施保护好网络中的核心企业和关键供应关系,在供应链网络中,可以适度地增强网络的冗余度,如对于供应失效的情况,可以考虑执行多源供应商策略,这样当一个供应商不能按时提供下级所需产品的时候,多余的供应商可以保障供应链正常运行。

## 参考文献

- [1] Kuhnert C, Helbing D. Scaling laws in urban supply networks [J]. *Physica A*, 2006, 363(1): 89-95
- [2] Helbing D. Information and material flows in complex networks [J]. *Physica A*, 2006, 363(1): xi-xvi
- [3] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. The Internet's Achilles' Heel; Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Nature* (London) (S0028-0836), 2000, 406: 378-382
- [4] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512
- [5] Thadakamla H P, Raghavan U N, Kumara S, et al. Survivability of multiagent-based supply networks: a topological perspective [J]. *Intelligent Systems and Their Application*, 2004, 19(5): 24-31
- [6] Latora V, Marchiori M. Vulnerability and Protection of Infrastructure Networks [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(1): 015103
- [7] 刘小锋, 陈国华. 基于复杂网络的供应链鲁棒性分析 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2007, 26: 147-150
- [8] 姜洪权, 高建民, 陈富民, 等. 基于网络特性的分布式复杂机电系统脆弱性分析 [J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(4): 791-796
- [9] 闫妍, 刘晓, 庄新田. 基于复杂网络理论的供应链级联效应检测方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(3): 322-325
- [10] Petrovic D, Roy R, Petrovic R. supply chain modeling using fuzzy sets [J]. *International Journal of Production Economics*, 1999, 59(1): 443-453
- [11] Freeman L. A set of Measures of centrality based upon betweenness [J]. *Sociometry*, 1977, 40(1): 35-41
- [12] Latora V A, Marchiori M. Efficient Behavior of Small-World Networks [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(19): 198701
- [13] Motter A E, Lai Ying-cheng. Cascade-based attacks on complex networks [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, 66(6)

(上接第66页)

- [16] Kalil M A, Al-Mahdi H, Mitschele-Thiel A. Spectrum handoff reduction for cognitive radio ad hoc networks [C] // *Wireless Communication Systems (ISWCS)*. York, IEEE, 2010: 1036-1040
- [17] Aman M, Mahfooz S, Rehman W. Handoff delay in cognitive radios-A concept paper on utilization of guard channels [C] // *Computer Networks and Information Technology*. Abbottabad: IEEE, 2011: 211-215
- [18] Chvatal V. A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem

- [J]. *Mathematics of Operations Research*, 1979, 4(3): 233-235
- [19] Mohsenian-Rad A H, Wong V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks [J]. *Wireless Communications*, 2007, 6(12): 4432-4440
- [20] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L. Clifford Stein. Introduction to Algorithms (Second Edition) [M]. Boston: MIT Press and McGraw-Hill, 2001
- [21] Issariyakul T, Hossain E. Introduction to Network Simulator NS2 [M]. New York: Springer Publishing Company, 2008