

基于探测的多信道无线网状网机会路由算法

沙海进¹ 白光伟^{1,2,3} 沈航² 张芑¹

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 211816)¹

(南京理工大学高维信息智能感知与系统教育部重点实验室 南京 210094)²

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)³

摘要 多信道无线网状网的性能在很大程度上依赖于信道分配和路由选择。现有的多信道无线网状网路由大多没有考虑信道之间的干扰问题,从而导致通信性能下降。针对这一问题,提出一种基于探测的多信道无线网状网机会路由(POR)算法。首先,根据干扰能量,选出最佳通信信道集来降低信道间的传输干扰。在此基础上,采用探测方式计算路径期望传输时延,确定候选链路集并运用机会路由机制进行数据传输以最小化端到端的传输时延。实验结果表明,POR可以显著地降低平均端到端时延,提高数据包投递率,为数据传输提供实时性和可靠性保证。

关键词 多信道,无线网状网,机会路由,干扰

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.026

Probing-based Opportunistic Routing Algorithm for Multi-channel Wireless Mesh Networks

SHA Hai-jin¹ BAI Guang-wei^{1,2,3} SHEN Hang² ZHANG Peng¹

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)¹

(Key Laboratory of Intelligent Perception and System for High-Dimensional Information of Ministry of Education of China, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)²

(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education of China, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)³

Abstract The performance of multi-channel wireless mesh networks mainly depends on channel assignment and routing. Most existing routings for multi-channel wireless mesh networks do not consider the problem of interference between channels, resulting in degradation of communication performance. To address this problem, this paper proposed a probing-based opportunistic routing (POR) for multi-channel wireless mesh networks. At first, the set of the best communication channels was selected, reducing the interference. On this basis, the detection method was used to calculate the expected end-to-end delay and choose the set of candidate links. At last, we used opportunistic routing mechanism for transmission to minimize the end-to-end delay. Our simulation results demonstrate that the proposed POR can reduce end-to-end delay significantly, improve delivery ratio, and provide real-time and reliability guarantee for data transmission.

Keywords Multi-channel, Wireless mesh networks, Opportunistic routing, Interference

1 引言

无线网状网(Wireless Mesh Networks, WMN)由无线网状路由和无线网状客户端组成^[1]。无线网状客户端可以通过无线网状路由组成的骨干网接入因特网^[2,3]。因为WMN为广域网的部署提供了一个较高性价比的选择,所以在过去的几年内得到了迅速的发展与广泛的应用^[4,5]。然而,WMN路由仍面临着极大的挑战。

为了解决WMN无线链路不可靠性这一问题,研究人员提出了一系列的路由协议。这些算法的实现方法大多数是发现一条最佳路由并定期更新它,但是为了降低路由发现的开销,以较低的频率更新路由。因此,路由一旦确定,每个中继节点都有一个固定的下一跳转发节点。为了提高灵活性,多路径路由算法随之出现,但是这些算法的下一跳转发节点的选择在很大程度上仍然依赖于预先分配^[6,7]。

本文提出一种基于探测的多信道无线网状网机会路由。

到稿日期:2014-06-13 返修日期:2014-08-25 本文受国家自然科学基金项目(60673185, 61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2011186),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11_0262, CXZZ12_0425),江苏省六大高峰人才基金资助项目(第八批)资助。

沙海进(1989-),男,硕士生,主要研究方向为无线 Mesh 网络路由, E-mail: shahaijin@126.com;白光伟(1961-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为移动互联网、无线传感器网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等;沈航(1984-),男,博士生,CCF 学生会会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线多媒体通信协议等;张芑(1965-),女,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线网络。

该路由在研究无线网状网多信道场景时,考虑了信道之间存在能量干扰的情况,并提出了信道选择算法,选出干扰能量小于阈值的信道,以备数据传输的需要。在进行路由的选择时,考虑了路径的期望时延,逐跳地进行路由选择和数据转发,并通过选择合适数量的候选链路,从而实现路径的期望时延最小化。

本文第2节研究并分析了一些典型的 WMN 路由算法及其存在的问题;第3节提出一种基于探测的多信道无线网状网机会路由,并对实现细节进行描述;第4节通过实验仿真的方法对路由算法进行性能分析与评价;最后总结全文。

2 相关工作

近年来,研究人员针对多信道 WMN 的路由协议已经做了一些研究工作,提出了多种同时解决路由选择和信道分配问题的方案。

Mohsenian-Rad 和 Wong 提出了一种基于线性规划的方法^[8]来解决路由选择和信道分配问题。该方法首先机会选择初始化路由和信道分配方案,然后通过有限的配置步骤对初始化方案进行优化。但该方法的精准程度依赖于配置步骤实现的步数。

针对上述方法的不足,Gardellin 等人提出了 G-PaMeLA 方案^[9]。该方案基于有序分而治之的方法,将路由选择和信道分配问题分成多个局部优化的子问题,其中,子问题的数目等于源节点到网关的最大跳数。然后,通过分枝剪枝过程求解子问题。但是,该方法没有考虑到负载均衡问题。

Bakhshi 等人提出了一种解决联合 QoS 路由选择和信道分配的算法(JQRCA)^[10]。该算法根据每一次的数据转发需要,寻找 k 条路径,并按要求给每条路径分配可行的信道。该算法可以很好地利用可用信道,提高了网络性能,但没有考虑到时延以及网络传输的可靠性。

CA-LQSR(Channel Assignment with LQSR)^[11]是一种适用于多信道 WMN 的链路质量感知的源路由算法。该算法以加权累计期望传输时间为路由指标,保证了负载均衡和链路带宽。但 CA-LQSR 没有考虑链路质量以及时延。

上述解决方案虽然都考虑了多信道场景,但都假定所有信道是正交的、相互之间没有干扰的。其次,这些解决方案都是集中式的,不能适应网络状况的动态变化。本文提出的分布式路由算法考虑了信道之间的干扰、路径的期望时延,增强了网络传输的可靠性,提高了网络服务质量。

3 基于探测的多信道无线网状网机会路由

本节将具体阐述基于探测的多信道无线网状网机会路由算法。首先给出无线网状网模型和相关术语的定义。在此基础上,给出干扰模型和信道选择算法。最后详细阐述路由算法。

3.1 网络模型和相关定义

定义1 无向图 $G=(V,E,C)$ 表示多信道无线网状网模型,其中, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示网络中节点的集合, E 表示网络中链路的集合, $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 表示网络中信道的集合, c_1 是控制信道,专门用来协调节点之间的通信。

当且仅当 $i) e_{i,j} \in E; ii) v_i$ 和 v_j 工作在相同信道上,这两个条件同时成立时, v_i 才可以与 v_j 进行数据传输。

表1列出本文所使用的符号。

表1 本文使用的符号标记

参数符号	参数意义
$d_{i,j}$	节点 v_i 到节点 v_j 的距离
G_t	天线发射的增益
G_r	天线接收的增益
$I(x,y)$	信道 c_x 与 c_y 的干扰因子
B_x	信道 c_x 的带宽
R_i	节点 v_i 的干扰半径
P_{Th}	信道所能承受的干扰能量阈值
$P_i(x)$	节点 v_i 上的信道 c_x 当前受到的干扰能量总和
$p_{i,j}^s$	v_i 与 v_j 通过 c_x 传输数据成功的概率
$q_{i,j}^f$	v_i 与 v_j 通过 c_x 传输数据失败的概率
P_s	数据包的大小
$r_{i,j}^x$	v_i 通过 c_x 给 v_j 发送数据的速率
τ	节点发送数据失败后,等待下一次传输的时间
p_i^h	v_i 的第 h 个通信链路 e_h 成功传输数据的概率
r_i^h	v_i 的第 h 个通信链路 e_h 的数据传输速率
$T_{i,d}$	v_i 到目的节点 v_d 的期望时延

3.2 干扰模型

在多信道网络环境中,信道完全不重叠的假设可能不完全符合真实场景。比如,在 IEEE802.11b 中,相邻信道之间是存在着能量干扰的。因此,本文假设信道之间存在重叠和干扰。如图1所示, v_j 在 v_i 的干扰范围之内,并与 v_i 相距 $d_{i,j}$, v_j 正在通过信道 c_y 接收数据。若此时 v_i 通过信道 c_x 传输数据,则 v_j 上的信道 c_y 受到的干扰能量为 $P_{i,j}(x,y)$ 。根据文献^[12]可知, $P_{i,j}(x,y)$ 计算公式如下:

$$P_{i,j}(x,y) = \frac{I(x,y) \cdot G_t G_r P_x}{d_{i,j}^{\alpha}} \quad (1)$$

其中, P_x 表示 c_x 的相关属性值,如带宽等。

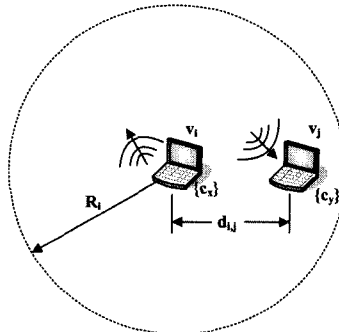


图1 信道干扰场景

本文假设每个节点配有多个网卡,因此,节点可同时工作于多个信道,并行地实现数据的发送和接收。定义 S_i^r 和 S_i^t 分别为节点 v_i 干扰范围内接收数据的节点集合和发送数据的节点集合。 C_i^r 和 C_i^t 分别为节点 v_i 当前接收数据所用的信道集合和发送数据所用的信道集合。如图2所示,节点A对应的4个集合分别为, $S_A^r = \{B,C\}$, $S_A^t = \{D\}$, $C_A^r = \emptyset$, $C_A^t = \{1\}$ 。

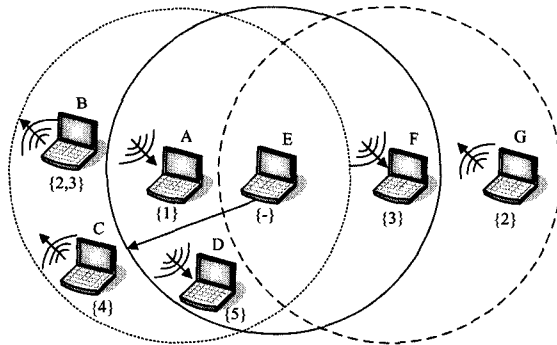


图2 多信道传输模型

3.3 通信信道集选择

本节将引入最佳发送信道集和最佳接收信道集这两个概念,并给出如下定义。

定义 2 节点 v_i 的最佳发送信道集 BC_i^T :若 v_i 通过某一信道发送数据所带来的干扰是 S_i^R 中节点接收数据时所能承受的,则所有这样的信道组成的集合定义为 BC_i^T 。

定义 3 节点 v_j 的最佳接收信道集 BC_j^R : v_j 通过某一信道 c_x (其中, $c_x \in BC_i^T$) 接收数据,若 c_x 受到的总干扰是能承受的,则所有这样的信道组成的集合定义为 BC_j^R 。

定义 2 和定义 3 中提到的“能承受”是指节点上的信道受到的干扰能量总和小于干扰能量阈值。根据式(1),可以推导出节点 v_i 上的信道 c_x 受到的干扰能量总和,计算公式如下所示:

$$P_i(x) = \sum_{\forall v_j \in S_i^T, c_k \in C_j^T} P_{j,i}(k, x) \quad (2)$$

结合定义 2 和式(2), BC_i^T 可以表示为:

$$BC_i^T = \{c_x \mid \forall v_j \in S_i^R, c_y \in C_j^R, P_{i,j}(x, y) < P_{Th} - P_j(y)\} \quad (3)$$

如图 2 所示,当且仅当

$$i) P_{E,A}(4, 1) < P_{Th} - P_A(1)$$

$$ii) P_{E,D}(4, 5) < P_{Th} - P_D(5)$$

$$iii) P_{E,F}(4, 3) < P_{Th} - P_F(3)$$

同时成立时,信道 4 才可以加入到 BC_A^T 中。

节点 v_i 将计算得到的 BC_i^T 告知其邻居节点 v_j , v_j 通过式(4)计算出最佳接收信道集。

$$BC_j^R = \{c_x \mid \forall c_x \in BC_i^T, P_j(x) < P_{Th}\} \quad (4)$$

最佳发送信道选择算法和最佳接收信道选择算法分别如算法 1 和算法 2 所示。

算法 1 最佳发送信道选择算法

1. Input: S_i^R
2. Output: BC_i^T
3. flag=0
4. for each c_x in C do
5. flag=0
6. for each v_j in S_i^R do
7. for each c_y in C_j^R do
8. if $P_{i,j}(x, y) < P_{Th} - P_j(y)$ then
9. flag=flag+1
10. end if
11. end for
12. end for
13. if flag== $\sum_{\forall v_j \in S_i^R} |C_j^R|$ then
14. $BC_i^T = BC_i^T \cup \{c_x\}$
15. end if
16. end for

算法 1 的第 4-14 行实现对信道 c_x 逐个进行检测,并通过第 13 行判断该信道是否满足式(3)的条件。若满足,则通过第 14 行将信道 c_x 加入 BC_i^T 。

算法 2 最佳接收信道选择算法

1. Input: BC_i^T
2. Output: BC_j^R
3. for each c_x in BC_i^T do
4. if $P_j(x) < P_{Th}$ then
5. $BC_j^R = BC_j^R \cup \{c_x\}$

6. end if

7. end for

3.4 路由

图 3 给出了一般的数据传输模型。可以看出, v_i 通过信道 c_x 把数据成功传输给 v_j 的期望传输时间 $ET_{i,j}^x$ 可使用如下公式计算:

$$ET_{i,j}^x = \frac{p_{i,j}^x \cdot P_s}{r_{i,j}^x} + q_{i,j}^x \cdot \left(\frac{P_s}{r_{i,j}^x} + \frac{\tau}{p_{i,j}^x} \right) = \frac{P_s}{r_{i,j}^x} + \frac{q_{i,j}^x \cdot \tau}{p_{i,j}^x} \quad (5)$$

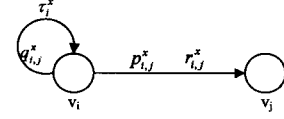


图 3 数据传输模型

于是 v_i 把数据成功传输给 v_j 的期望传输时间 $ET_{i,j}^x$ 可使用如下公式计算:

$$ET_{i,j} = \frac{\sum_{\forall c_x \in C_j^R} T_{i,j}^x}{|C_j^R|} \quad (6)$$

机会路由的实现依赖于合适地选择当前节点通往下一跳的候选链路集合。机会路由通过探测,动态地选择通往下一跳的链路。

如图 4 所示, v_i 与邻居节点的通信链路集合为 $L_i = \{e_1, e_2, \dots, e_s\}$, 从中选取 h 条链路作为通往下一跳的候选链路集 CL_i 。 v_i 首先通过控制信道探测链路 e_1 , 若该链路可用, 则使用该链路传输数据; 否则探测下一条链路, 直到找到一条可用的信道。假设探测到 e_h , 探测包的大小为 b , 时隙间隔为 t , 于是探测时间 T_{probe} 为:

$$T_{probe} = \frac{2b}{r_{i,j}^x} + t \quad (7)$$

于是 v_i 经过 e_h 到达目的节点 v_d 的时延 T_h 可通过式(8)表示如下:

$$T_h = T_{probe} + \frac{P_s}{r_{i,j}^x} + T_{j,d} \quad (8)$$

T_h 值越小, 时延就越小。因此, v_i 按照 T_h 升序的顺序选择下一跳链路。

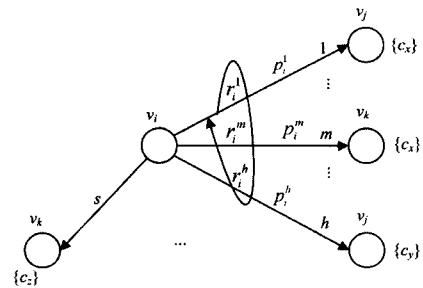


图 4 通往下一跳的链路集选择

候选链路集的大小 h 对时延有着重要影响。 h 越大, 找到好的通信链路的机率就越高, 但探测的开销就越大。因此, 本文通过以下方法确定候选链路集。将通信链路逐个添加到候选链路集, 并更新期望时延。若期望时延变大, 则停止添加过程。根据式(5)可以得到第一条通信链路到达 v_d 的期望时延计算公式如下所示:

$$ET_1(i, d) = T_1 + \frac{q_1 \cdot \tau}{p_1} \quad (9)$$

v_i 经过第 h 条通信链路到达 v_d 的期望时延可通过式(10)计算:

$$ET_h(i, d) = \frac{\theta_h + Q_h \cdot \tau}{P_h} \quad (10)$$

其中,

$$Q_h = \prod_{l=1}^h q_l \quad (11)$$

$$P_h = 1 - Q_h \quad (12)$$

$$\theta_h = \sum_{l=1}^h Q_{l-1} p_l T_l \quad (13)$$

定理 1 当且仅当 $\lambda_h < 0$ (其中, $\lambda_h = P_h T_{h+1} - \theta_h - \tau$) 时, $ET_{h+1} < ET_h$.

证明:

$$\begin{aligned} ET_{h+1} - ET_h &= \frac{\theta_{h+1} + Q_{h+1} \cdot \tau}{P_{h+1}} - \frac{\theta_h + Q_h \cdot \tau}{P_h} \\ &= \frac{P_h \cdot (\theta_{h+1} + Q_{h+1} \cdot \tau) - P_{h+1} \cdot (\theta_h + Q_h \cdot \tau)}{P_h P_{h+1}} \\ &= (P_h T_{h+1} - \theta_h - \tau) \cdot \frac{Q_h - Q_{h+1}}{P_h P_{h+1}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $(Q_h - Q_{h+1})/P_h P_{h+1}$ 恒大于 0, 因此, 当且仅当 $\lambda_h < 0$ 时, $ET_{h+1} < ET_h$. 若 $\lambda_h < 0$, 将第 $h+1$ 条通信链路加入候选链路集; 否则结束候选链路集的选择.

候选链路集的选择过程如算法 3 所示.

算法 3 候选链路集选择算法

1. Input: v_i, v_d, L_i
2. Output: CL_i
3. $CL_i = \{e_1\}, h = 1$
4. Calculate T_{probe} by Eq. (7), $ET_h(i, d)$ by Eq. (10)
5. $L_i = L_i - \{e_1\}$
6. while ($h \leq s$ and $L_i \neq \emptyset$) do
7. $ET_{min} = ET_h(i, d)$
8. $h = h + 1$
9. Calculate T_{probe} by Eq. (7), $ET_h(i, d)$ by Eq. (10)
10. if $ET_h(i, d) < ET_{min}$ then
11. $CL_i = CL_i \cup \{e_h\}$
12. $L_i = L_i - \{e_h\}$
13. else
14. break
15. end if
16. end while

每当源节点 v_i 需要发送数据给目的节点 v_d 时, 首先根据算法 3 选择候选链路集, 然后循环探测该链路集直到数据包成功转发至 v_i . 不停地重复上述过程, 直到数据包转发到 v_d , 则完成一次数据传输.

4 实验仿真与结果分析

本节首先介绍仿真环境和实验参数设置, 然后对实验结果进行讨论和分析.

4.1 仿真环境和参数设置

本文使用仿真实验实现了 POR. 通过一系列的仿真实验, 对其性能进行全面地分析和评价, 并将 POR 与 JQRCA 和 CA-LQSR 进行了对比.

网络拓扑结构在仿真实验中的应用较为广泛. 本文的所有仿真实验采用的正是 20×20 网络拓扑. 基本参数的设置如表 2 所列.

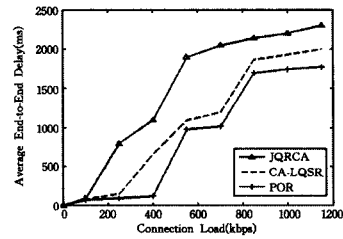
表 2 基本参数设置

参数名称	参数值
目标区域	1000m×1000m
数据包大小	1024Bytes
仿真时间	100s
信道数目	{5, 7, 9, 11}
传输速率	{1, 2, 5, 10}Mbps
连接数	1~8 个
连接负载	{100, 250, 400, 550, 700, 850, 1000, 1150}kbps

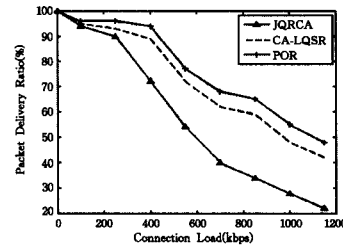
本文主要从可靠性、数据包平均端到端时延等几个方面考察算法的性能. 通过改变网络中信道的数目、数据包发送速率以及连接数来得到变化的网络通信场景, 然后考察不同的网络负载下算法性能的变化.

4.2 结果分析

网络负载对平均端到端时延的影响情况如图 5(a) 所示. 随着网络负载的增大, 平均端到端时延逐渐增大. 其中, POR 的平均端到端时延最小, CA-LQSR 平均端到端时延比 POR 略高一点, JQRCA 的平均端到端时延最大. 当网络负载达到 850kbps 时, POR 的平均端到端时延比 JQRCA 降低了近 10%. 网络负载对数据包投递率的影响情况如图 5(b) 所示. 随着连接数目的增多, 数据包成功投递率在逐渐变小. 从图 5(b) 中可以看出, 即使网络负载达到 1150kbps, POR 也能保证 50% 的投递率, CA-LQSR 的投递率可以维持在 40%, 而 JQRCA 的投递率已经降到了 20% 左右. 结合图 5(a) 和图 5(b) 可以得出, POR 为数据传输提供了实时性和可靠性保障.



(a) 平均端到端时延随负载的变化



(b) 数据包投递率随负载的变化

图 5 负载对通信质量的影响

图 6(a)、(b) 刻画了 3 个算法的平均端到端时延和数据包投递率随连接数的变化关系. 由图 6(a) 可知, 随着连接数的增大, 3 个算法的平均端到端时延均呈上升趋势. POR 的平均端到端时延最低, CA-LQSR 其次, JQRCA 最高. 当连接数达到 8 时, POR 的端到端时延与 CA-LQSR 相比略微降低了一些, 而相较于 JQRCA, POR 的端到端时延降低了 30% 以上. 从图 6(b) 中可以明显看出, 数据包的成功投递率随着连接数目的增大而降低. 其中, POR 的数据包投递率始终比其它两种算法都要高. 随着连接数目的越来越多, POR 的数据包投递率与 JQRCA 数据包投递率的差距也越来越明显. 当连接数目达到 6 或更多时, POR 的数据包投递率比 JQRCA 提高了一倍多.

(下转第 148 页)

Networks; Progress, Challenges, and Solutions[J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(1):128-135

- [12] Hossain M S, Atiquzzaman M, Ivancic W. Performance evaluation of multihomed NEMO[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2012; 5429-5433.
- [13] Sousa B, Pentikousis K, Curado M. MeTHODICAL: Towards the next generation of multihomed applications[J]. Computer Networks, 2014, 65: 21-40
- [14] Sousa B M, Pentikousis K, Curado M. Multihoming management for future networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(4): 505-517

- [15] Boucadair M, Venaas S. Updates to the IPv6 Multicast Addressing Architecture[S]. IETF RFC 7371. 2014
- [16] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008
- [17] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [18] OMNeT++ [EB/OL]. <http://www.omnetpp.org>
- [19] 万琳, 范秋灵, 胡海荣. 复杂网络路由策略优化设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(11): 103-105
- [20] 荆栋, 肖刚. 网络拓扑发现算法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2012, 26(9): 90-95

(上接第 135 页)

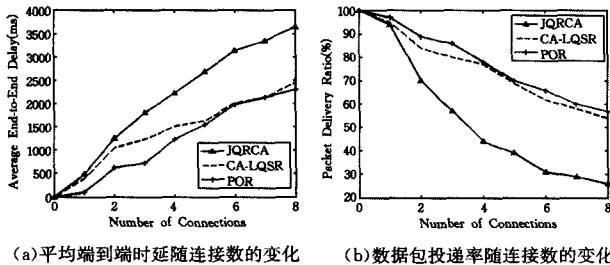


图 6 连接数对通信质量的影响

图 7(a)给出了网络中信道数目对平均端到端时延的影响情况。从图中可以看出,随着信道数目的增加,平均端到端时延越来越小。其中, POR 的平均端到端时延始终是最小,这是因为 POR 在选择路径时依据的就是端到端时延这一指标。在信道数目较多的情况下, POR 的平均端到端时延与 JQRCA 相比,降低了至少 37%;与 CA-LQSR 相比,降低了 15%以上。图 7(b)显示随着信道数目的增多,数据包投递率呈上升趋势。这是因为网络中信道数目的增多,节点之间可以通信的链路也随之增多,从而提高了数据包成功投递率。

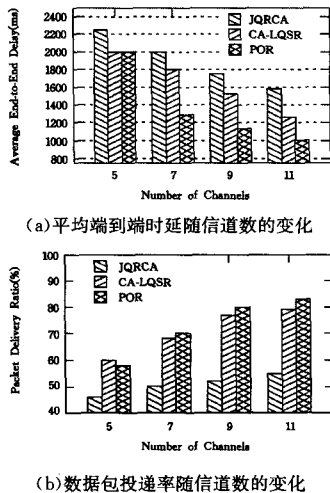


图 7 信道数目对通信质量的影响

结束语 本文提出了一种基于探测的多信道无线网状机会会路由(POR)算法。POR 中提出了最佳通信信道集合的概念。节点根据自身受到的干扰能量,将干扰能量小于干扰能量阈值的信道添加到该节点的最佳通信信道集合。节点在进行路由选择时,分布式地寻找和构造端到端时延较小的候选链路集合,然后从中选择链路进行数据传输。最后通过一系列的仿真实验,对其性能进行了全面而详细的分析和评价。实验结果表明, POR 可以降低平均端到端时延,提高数据包

投递率,为网络通信提供实时性和可靠性等 QoS 保障。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(9): 23-30
- [2] Cicconetti C, Akyildiz I F, Lenzi L. Bandwidth balancing in multi-channel IEEE 802.16 wireless mesh networks[C]//26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007). IEEE, 2007: 2108-2116
- [3] Cicconetti C, Akyildiz I F, Lenzi L. FEBA: a bandwidth allocation algorithm for service differentiation in IEEE 802.16 mesh networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2009, 17(3): 884-897
- [4] Ning Z, Guo L, Peng Y, et al. Joint scheduling and routing algorithm with load balancing in wireless mesh network[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(3): 533-550
- [5] Ajmal M M, Madani S A, Maqsood T, et al. Coordinated opportunistic routing protocol for wireless mesh networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 39(8): 2442-2453
- [6] Nandiraju N S, Nandiraju D S, Agrawal D P. Multipath routing in wireless mesh networks[C]//IEEE international conference on Mobile adhoc and sensor systems (MASS), 2006. IEEE, 2006: 741-746
- [7] Tam W H, Tseng Y C. Joint Multi-Channel Link Layer and Multi-Path Routing Design for Wireless Mesh Networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. IEEE, 2007: 2081-2089
- [8] 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]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12): 4432-4440
- [9] Gardellin V, Das S K, Lenzi L, et al. G-PaMeLA: A divide-and-conquer approach for joint channel assignment and routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. Journal of parallel and distributed computing, 2011, 71(3): 381-396
- [10] Bakhshi B, Khorsandi S, Capone A. On-line joint QoS routing and channel assignment in multi-channel multi-radio wireless mesh networks[J]. Computer Communications, 2011, 34(11): 1342-1360
- [11] Yuan F, Li X, Liu K, et al. Distributed channel assignment combined with routing over multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2012, 19(4): 6-13
- [12] Holland G, Vaidya N, Bahl P. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks[C]//Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2001: 236-251