

# 多接口多信道无线 mesh 网中一种基于信号干扰监测的路由度量机制

姬文江, 马建峰, 张俊伟, 马卓

(西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 多接口多信道无线 mesh 网中, 提出了一种基于信号干扰监测的路由度量机制(ISB)。现有的路由度量机制如 WCETT、iAWARE 等均存在各自的不足。通过对 iAWARE 深入分析, 发现其并不能正确地反映背景噪声这一重要因素。为此改进了该度量机制, 使其更加正确地反映背景噪声, 并且具有了等分性, 即可以在路由协议中使用如 Bellman-Ford 或 Dijkstra 路径计算方法。理论分析和网络仿真表明, 新度量机制下的网络性能如网络吞吐量 and 端到端延迟均优于 HopCount、ETT、WCETT 和 iAWARE。

**关键词:** 无线 mesh 网; 多接口多信道; 路由度量; 信号干扰

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)04-0158-07

## Routing metric based on interference measurement for multi-radio multi-channel wireless mesh networks

Ji Wen-jiang, Ma Jian-feng, Zhang Jun-wei, Ma Zhuo

(School of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** An interference sensing based (ISB) routing metric which mainly depend on the estimation of signal power was introduced for the multi-radio multi-channel wireless mesh networks. The existing metric such like WCETT and iAWARE all have their drawbacks were shown. As shown in the equations of iAWARE, it could be proved that worse background noise corresponds to a better metric value which was imprecise. The iAWARE to make it suited for the environment with background noise was improved, and the isotonic property was regained that the Bellman-Ford and Dijkstra algorithm could be deployed in ISB. The simulation results prove the novel algorithm takes the advantages of higher efficiency both in throughput and end to end delays, compared with the traditional ones HopCount, ETT, WCETT and iAWARE.

**Key words:** wireless mesh networks; multi-radio multi-channel; routing metric; interference

### 1 引言

多接口多信道无线 mesh 网以其易于布置、可自愈、高传输率的特点, 被认为是下一代无线移动终端 Internet 接入的关键技术, 近年来受到了广泛的关注<sup>[1]</sup>。无线 mesh 网可以广泛应用于办公室、家庭、校园、公共场所、紧急救护以及战场通信等多种场景。在网络中, 数据分组通过事先布置好的无

线路由器之间的多跳互联进行传送。无线路由器一般保持固定或很少移动, 从而为移动终端提供了一个类似“有线接入”的 Internet 接入骨干网。网络中包括了 3 种类型的节点: 网关(MPP, mesh portal point)、多跳路由器(MP, mesh point)和移动终端(STA, station)。

无线信号的传播特性决定了无线干扰的存在, 并使其成为制约网络性能的重要因素。无线信号能

收稿日期: 2012-06-21; 修回日期: 2012-12-27

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT1078); 国家科技部重大专项基金资助项目(2012ZX03002003); 国家自然科学基金资助项目(U1135002, 61100233); 中央高校基本科研业务费基金资助项目(JY10000903001, K50510030010)

**Foundation Items:** The Program Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1078); The Major National S&T Program(2012ZX03002003); The National Natural Science Foundation of China (U1135002, 61100233); The Fundamental Research Funds of The Central Universities(JY10000903001, K50510030010)

正确接收的必要条件为接收节点收到信号的信噪比能大于信噪比阈值。无线信号在广播过程中受到环境的影响，如吸收和反射等，信号强度也随着距离的增加而下降<sup>[2,3]</sup>，相应地信噪比也下降。一个节点  $u$  如果能正常收到来自节点  $v$  的信号，那么节点  $u$  就处于节点  $v$  的干扰范围内。研究表明干扰信号也可以被加入到噪声中从而降低信号的信噪比<sup>[4]</sup>。Saumitra 等人在文献[5]中证明了多个微量的干扰可以叠加起来，成为毁灭性的干扰，致使无线通信中断。IEEE 802.11a 和 IEEE 802.11b<sup>[2]</sup>分别提供了 11 条和 3 条互不干扰的正交信道，这使得多信道传输可以减少大量的信号干扰，从而极大地提高网络性能。多接口多信道的概念应运而生，即是在无线通信节点上装备多个无线接口卡，使其接口卡可以使用不同信道同时进行通信而不造成干扰。路由协议是影响网络性能的重要因素之一，因此与之相关的路由度量机制必须适应多接口多信道的新特性，使其更加准确地度量无线链路质量<sup>[6-8]</sup>。

近年来，很多针对多接口多信道无线 mesh 网的路由度量研究已经展开。最早的也是最简单的路由度量机制“跳数”(hop count)已经广泛应用于无线多跳网络。也正因为其简单，用单纯的跳数来计算路由不能区分每条链路的详细状况，从而可能选择一条跳数最少但是负载和干扰最严重的路径，使得网络性能下降。因此，期望传输次数<sup>[9]</sup>(ETX, expected transmission count)改进了传统的跳数，引入了成功传送一个数据分组的概率来测量链路质量。期望传输时间<sup>[10]</sup>(ETT, expected transmission time)又在 ETX 中加入了传输速率，计算成功传送一个数据分组的时间。然而，ETX 和 ETT 均被证实不能反映场景中的链路内干扰和链路外干扰<sup>[7,8]</sup>。考虑到信号干扰的路由机制中，极具代表性的有加权累计传输时间<sup>[10]</sup>(WCETT, weighed cumulative ETT)和干扰感知<sup>[11]</sup>(iAWARE, interference aware)已经受到了广泛的关注。然而，在文献[7,12,13]的研究中表明 WCETT 只考虑到路径中的干扰链路数量，而没有考虑这些链路的位置，结果导致选择非最优路径。同时，它也没有考虑链路外干扰。iAWARE 为路由度量机制引入了“信干噪比”(signal to interference and noise ratio)这一概念。信干噪比在无线通信领域中已有很多应用。在笔者的实际测试场景中，iAWARE 取得了良好的效果。这证明了使用信号监测方法来度量环境中干扰强度的可行性。

然而，本文通过对 iAWARE 的公式研究发现，坏的背景噪声反而取得了一个度量的优值，这是不准确的。此外，iAWARE 是非等分性的，即在使用 iAWARE 的路由协议中不能使用 Bellman-ford 或 Dijkstra 等算法来寻找最优路径。

综上所述，已有的路由度量机制均存在各自的不足。目前急需一个易于计算并且能准确把握无线链路质量的度量机制，这也是本文研究的目的。本文继承了 iAWARE 中的信干噪比概念，让路由器持续反馈收到的信号及干扰的强度，因此是基于干扰监测的机制。笔者修正了 iAWARE 的公式，使其能准确测量噪声环境下的链路质量，同时也具有了等分性。本文的研究背景为经典的多接口多信道无线 mesh 网，一旦网络构建，骨干网中的无线路由器基本保持固定或很少移动。此场景可以广泛应用于办公室、家庭、校园、医院和公共接入等。

本文的主要工作如下。

- 1) 研究了无线通信的特点并讨论了现有路由度量机制的不足。
- 2) 研究了路由度量机制需要考虑的因素，提出了基于信号干扰监测的路由度量机制(ISB, interference sensing based)。
- 3) 通过理论分析和 OPNET 网络仿真，对比了几种路由度量机制的性能，证明了新提出机制的高效性。

## 2 相关工作

针对多接口多信道无线 mesh 网的路由度量机制应当考虑链路的传输速率、成功传输率、带宽以及干扰强度等问题<sup>[7,12,14]</sup>。路由协议应当选择那些低干扰、低负载的路径，这也是路由度量的目标。低干扰的无线链接将会比其他链接更加可靠和高效。

下面对有代表性的一些路由度量机制进行介绍，因 iAWARE 在最新研究中的优良表现<sup>[7,14]</sup>，对其进行了着重介绍。

### 2.1 跳数

“跳数”作为一种度量机制，简单地计算路径中链路跳数的和，已经广泛应用于 ad hoc 网及传感器网络。它是初期无线 mesh 网随 ad hoc 网络移植而来。其理念是路径越短，自身的干扰越少，同时最小化路径外节点的冲突。在单信道条件假设下，采用跳数度量网络性能表现较好<sup>[7]</sup>。然而，当加入多信道概念之后，跳数度量将不再适合。在文献[15]的结论中，跳数度量很可能会选择低效率的链路从

而导致网络性能的下降。

### 2.2 ETX

ETX<sup>[9]</sup>的形式为

$$ETX = \frac{1}{d_t d_r} \quad (1)$$

其中,  $d_f$  和  $d_r$  表示传出与接收的成功传输率。ETX 设计的初衷是计算成功传送一个数据分组的概率。

### 2.3 Airtime

Airtime 是 IEEE 802.11s<sup>[1]</sup>标准中设定的路由度量机制。其形式为

$$c_a = \left[ O_{ca} + O_p + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{pt}} \quad (2)$$

其中,  $O_{ca}$ 、 $O_p$  和  $B_t$  均为常数, 分别表示信道访问开销、协议开销和测试分组大小。待定值  $r$  和  $e_{pt}$  分别表示针对于测试分组  $B_t$  的位传输率(单位 Mbit/s)和分组失误率。Airtime 目标是估算出传输数据分组所需要的时间。

### 2.4 WCETT

WCETT<sup>[10]</sup>针对于多接口多信道无线 mesh 网设计。根据 Airtime 的理念, 笔者首先给出了 ETT 用来估算成功传送数据分组的时间开销。ETT 的形式为

$$ETT_i = ETX_i \cdot \frac{S}{B_i} \quad (3)$$

其中,  $S$  为常量, 表示数据分组平均大小,  $ETX_i$  为该链路  $i$  的 ETX 值,  $B_i$  为链路  $i$  的带宽。在此基础上得出 WCETT 的形式为

$$WCETT = (1 - \beta) \cdot \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (4)$$

其中,  $X_j$  表示路径中使用信道  $j$  的链路 ETT 值之和,  $k$  为可用信道数目,  $0 \leq \beta \leq 1$  为随场景选择可变的参量。式(4)中的前半部分体现了路径中的端到端延时, 后半部分是为了增加信道选择的多样性。然而研究表明 WCETT 只是考虑了路径内节点自身的干扰, 而未考虑路径外部的干扰。

### 2.5 iAWARE

iAWARE<sup>[11]</sup> 路由度量基于无线链路的信干噪比。考虑节点  $u$  和  $v$  之间的无线链路, 把节点  $u$  所收到节点  $v$  的信号强度记为  $P_u(v)$ , 笔者定义了路由度量中的信干噪比(SINR)为

$$SINR_i(u) = \frac{P_u(v)}{N + \sum_{? \in ?(u) \rightarrow ?} t(?)P_u(?)} \quad (5)$$

其中,  $N$  表示背景噪声,  $?(u)$  为节点  $u$  可接收到数据分组的节点集合,  $t(?)$  为节点  $?$  在 10s 内的平均分组产生率。按照无线传输的要求, 信干噪比只有大于某个阈值, 来自节点  $i$  的数据分组才能被节点  $u$  正确接收。因此, 信干噪比值越大越有利于数据传输。在此基础上, 笔者给出了链路  $i$  的一个端点  $u$  的干扰率为

$$IR_i(u) = \frac{SINR_i(u)}{SINR_i(u)} = \frac{N}{N + \sum_{? \in ?(u) \rightarrow ?} t(?)P_u(?)} \quad (6)$$

这样, 一条路径  $p$  的 iAWARE 度量值为

$$iAWARE(p) = (1 - a) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{ETT_i}{IR_i} + a \cdot \max_{1 \leq j \leq k} X_j \quad (7)$$

$$X_j = \sum_{\text{conflicting links } i \text{ on channel } j} \frac{ETT_i}{IR_i}, 1 \leq j \leq k \quad (8)$$

和 WCETT 类似, 式(7)中的  $X_j$  是为了增加信道选择的多样性。 $IR_i$  为节点  $u$  和  $v$  中干扰率的最小值(如式(6)所示)。

iAWARE 考虑了路径中干扰及路径外干扰, 因此其表现在文献[7,14]中相对优秀。但是基于 ETX 的度量机制的通病是导致短期内信道多变问题的原因<sup>[12]</sup>。同时, iAWARE 的作者也承认, 由于式(7)中  $X_j$  的加入, 该度量不具备等分性。

综上所述, 目前的路由度量机制均存在各自的不足。因此, 对当前的机制进行改良还有很多余地。新型的能够易于计算、体现无线干扰并且准确反映链路质量的路由度量机制亟待出现。

## 3 基于信号干扰监测的路由度量机制(ISB)

本节详细介绍本文所提出的基于信号干扰监测的路由度量机制, 包括其设计思路及实际应用方案。ISB 基于信干噪比模型, 改进了之前度量机制的不足。

### 3.1 ISB 的构建

在排除干扰的理想情况下, Airtime 及 ETT 能够准确反映链路的通信质量从而预测出数据成功传输的时间。因此笔者同样也利用了 ETT, 然后在其中加入影响链路质量的链路负载因素及无线干扰因素。

iAWARE 中提出的干扰监测机制新颖且易于实现。作者在纽约州立大学 Stony Brook 建立了自己的测试床环境。其结果显示了 iAWARE 的优越性。同样在文献[7,14]的研究结果倾向于 iAWARE 在多

接口多信道 mesh 网中的优良表现。其中，提出的信干噪比 SINR 基于物理干扰模型<sup>[16]</sup>，能够准确地反映网络的干扰情况。

为了简化 iAWARE 的计算，笔者使用 SINR 与 SNR 的比值 IR 来代替 SINR，用以体现干扰状况。信号强度“ $P_u(v)$ ”在除法中被消去了，这样节省了取得信号强度参数的操作。但笔者研究发现这样的简单消去并不可取：根据式(6)， $IR_i$  的值随着干扰的增加而减少，相应地 iAWARE 值增大，获得一个劣值，这是正确的；然而， $IR_i$  的值随着背景噪声  $N$  的增大而增大，相应地 iAWARE 值减少，获得一个优值，这显然是不合理的。iAWARE 之所以在文献[7,14]中表现良好，因为在文献[7,14]的仿真中并未体现背景噪声的因素；而在其测试床中的优秀表现也和其测试环境中背景噪声的单一性有关。iAWARE 测试床的范围有其局限性：12 个 mesh 节点，节点间的距离为 1.219 2m，总范围面积不到 10m<sup>2</sup>。在这样的范围内，背景噪声可认为是相等的。事实上，背景噪声在无线通信中的影响力是公认的<sup>[2-5,16]</sup>。糟糕的背景噪声会导致无线通信的不稳定，甚至通信失败。

因此，iAWARE 的公式简化变形导致了其不准确性。笔者取消了这次简化，并且重新定义了信干噪比( $SINR^+$ )为

$$SINR_i^+(u) = \frac{P_u(v)}{N + \sum_{v \in neighbor(u)} t(?)P_u(?) + \sum_{v \in neighbor(u)} P_u(?)} \quad (9)$$

$$SINR_i^+ = \min\left(\frac{SINR_i^+(u)}{SNR_{threshold} \cdot (1+t(u))}, \frac{SINR_i^+(v)}{SNR_{threshold} \cdot (1+t(v))}\right) \quad (10)$$

其中， $neighbor(u)$ 表示  $u$  的单跳邻居集合， $t(u)$ 表示节点  $u$  的分组产生率。 $t(u)$ 为规格化的数，其值取[0,1]区间。值为 0 表示节点  $u$  没有数据分组需要传输，值为 1 表示节点  $u$  处于所支持的最大分组传输速率，即满负载。如 iAWARE 所说，对于单跳邻居之外的干扰节点，其分组产生率很难精确获得，即便获得，其操作也比较繁琐。据笔者所知，最简单的方案是让两跳或两跳以上的节点都互相传输测试帧(HELLO message)。这将会产生过多的额外开销，同时需要修改路由协议的策略，得不偿失。因此，不同于 iAWARE，ISB 方案只是考虑了节点自身及其单跳邻居节点的负载。

下面考虑路径中的信道多样性。如图 1 所示，

上下 2 个路径均有数据进行传输，其中，上半部分路径需要对链路进行选择。无线链路  $g$ 、 $f$  和  $j$  正在使用信道 1 进行通信， $i$  和  $k$  正在使用信道 2 进行通信。 $i$  和  $k$  相互处于对方的干扰半径内，来自  $k$  的干扰信号会降低链路  $i$  的信噪比。由前面的讨论可知，信噪比越大越好。因此相对于  $i$ ， $g$  为图中上半部分路径的最优选择。事实上，从空间角度来说，信噪比并不区分节点的位置，而只和节点之间的距离有关。iAWARE 中追求信道的多样性目的也是增加信干噪比值。然而，基于信号干扰的度量机制不同于 WCETT 等机制，它直接和信噪比挂钩，优点在于能直接反映出链路当时的干扰状况。显然链路  $i$  经过重新定义的信干噪比( $SINR^+$ )会一直受到链路  $k$  的影响，而不管  $k$  是属于图 1 中上半部分路径还是属于下半部分路径。路径内部信道多样性已经体现在了  $SINR^+$  中。因此，笔者移除 iAWARE 中定义的  $X_j$  即式(7)的后半部分，使得新度量机制依然反映了路径内干扰和路径外干扰。

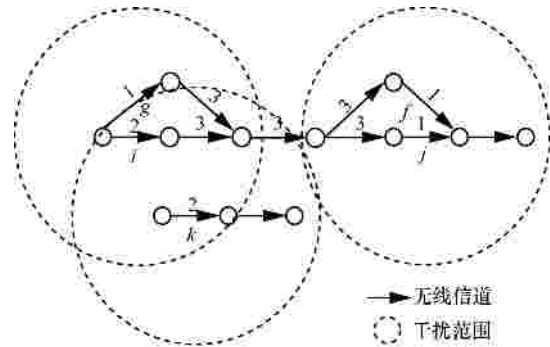


图 1 路径中的干扰

至此，笔者所提出的新度量机制 ISB 的形式为

$$ISB_i = a \cdot \frac{ETT_i^{t-1}}{SINR_i^{t-1}} + (1-a) \cdot \frac{ETT_i^t}{SINR_i^t} \quad (11)$$

其中， $t-1$  表示  $ETT_i$  和  $SINR^+$  在当前时间  $t$  的前一个值，变量  $a$  ( $0 < a < 1$ ) 是随应用场景变化的变量。笔者将  $t-1$  时刻度量值加入到当前时间  $t$  度量值计算的目的是为了减少前面所提的短期内信道多变问题<sup>[12]</sup>。使得如式(11)所示， $ETT_i$  反映了链路的传输速率以及成功传输率； $SINR^+$  形式化了当前链路的负载及环境干扰状况。

一条路径的度量值即是该路径中所有链路的  $ISB_i$  值累加。需要强调的是，ISB 的计算过程是分布在每个节点中的，路由计算过程只需要对路由帧中记录的数据简单求和，这也使得 ISB 具有了

等分性。

### 3.2 参数获取及路由配置

为了计算  $ISB_i$ , 笔者需要得出式(11)中的变量  $ETT_i$  和  $SINR^+$ 。其中,  $ETT_i$  可以通过 WCETT 的方案获得。经过周期性地广播测试帧(HELLO message), 节点可以得到 HELLO 源到自身的传输速率和成功传输概率, 从而计算出  $ETT_i$ 。  $SINR^+$  可以通过类似 iAWARE 的方案获得。令每个节点周期性(1s)地广播 HELLO 测试帧。测试帧只需要接收, 不需要转发。每个路由器的驱动程序可以记录收到测试帧的信号强度及当时的背景噪声, 这些数据自动保存在路由器的管理帧头中<sup>[11]</sup>。通过对这些管理帧的读取, 可以得到每一信道所传输数据的信号强度。路由器的驱动程序同样可以报告其每个接口的传输速率。对于分组产生率, 令路由器将其规格化后, 写入到 HELLO 帧中, 再进行广播。这样, 通过 HELLO 帧的广播机制, 每个节点可以获得收到测试帧的信号强度  $P_u(v)$ 、单跳邻居的分组产生率  $t(u)$ 、自身的传输速率  $B_i$  及当时的背景噪声  $N$ 。为了得到  $SINR^+$ , 仍需要获得单跳邻居之外节点的干扰信号强度  $P_u(?)$ 。如 iAWARE 中所说, 路由器通过载波监听, 可以将收到的信号强度记录在芯片寄存器 51<sup>[17]</sup>中, 通过对其采样, 可以得到  $P_u(?)$ 。至此, 可以计算出网络中所有链路的  $ISB_i$  值。

### 3.3 系统额外开销

从上文可知, 新的度量机制主要操作是测试帧的广播和路由器寄存器的读取。而测试帧的广播操作在 MANET 的 AODV 路由协议中及 WMN 的 HWMP 协议中是已经存在的。笔者只需要在这些路由协议的测试分组中加入 2byte, 其中, 1byte 用以记录分组产生率, 1byte 记录成功接收率, 而不需要其他操作, 就可以实现 ISB 的配置。相对于 AODV 或 HWMP, 如果存在  $N$  个节点, 使用 ISB 的网络整个发送的总测试帧流量将增加  $16N$  bit/帧间隔。如果设置帧间隔为 1s, 100 个节点约 1600bit/s, 1000 个节点为 16kbit/s, 这相对于 IEEE 802.11 的带宽而言是可以接受的。从计算量来说, 路由器直接调用和读取管理帧的数据、度量参数的计算都是线性的。

## 4 性能分析与仿真

本节通过 OPNET 仿真<sup>[18]</sup>, 研究各种路由度量机制的性能。

### 4.1 性能随网络规模的变化

首先, 本文讨论吞吐量和端到端延时伴随网络节点数目增多情况下, 几种具代表性的路由度量机制的性能。在仿真场景中, 路由器两两间隔 150m, 按照正方形拓扑, 整齐地分布在 1000m × 1000m 的范围内。路由器均配备 2 个无线通信接口, 每个通信接口可以选用 3 种互相正交信道中的一种进行通信。信道的选择以着色原理, 在每次仿真中固定到路由器中, 并保持不变。笔者将 5 种具有代表性的路由度量机制分别配置到 HWMP 协议中。仿真参数如表 1 所示。式(4)、式(7)和式(11)中的变量  $a$  和  $\beta$  均设置为 0.5。笔者让每个 MP 每秒产生 20 个 1024bit 数据分组, 目的地址均指向 Internet 即 MPP。笔者不断增加网络中的 mesh 节点数量, 统计吞吐量和端到端延时对网络规模的变化。仿真结果如图 2 和图 3 所示。

表 1 仿真参数

参数	值
网络范围	1000m×1000m
MAC 层	IEEE 802.11b 11Mbit/s
可选信道	1, 6, 11
通信范围	150m
干扰半径	310m
路由协议	HWMP
HELLO 测试帧间隔	1s
RANN 帧间隔	1s
数据分组大小	1024bit
数据队列缓存大小	20 packet

从图 2 中可以看出在“跳数”度量机制下, 网络的吞吐量随节点数目增多而急剧下降。而 iAWARE 和 ISB 的平均吞吐量均高于其他几种, 且两者相差不大。在图 3 中, ISB 的端到端延时为几种机制中最小的。从前面的分析可以看出, “跳数”及 ETT 并不能有效利用多接口多信道的优势, 过多地选择了干扰较多或负载过重的路径, 导致网络性能下降。而考虑到干扰的度量机制 WCETT, iAWARE 和 ISB 的网络性能均得到了提高。虽然 ISB 取消了增加路径中信道多样性的“ $X_j$ ”, 网络性能表现依然良好。

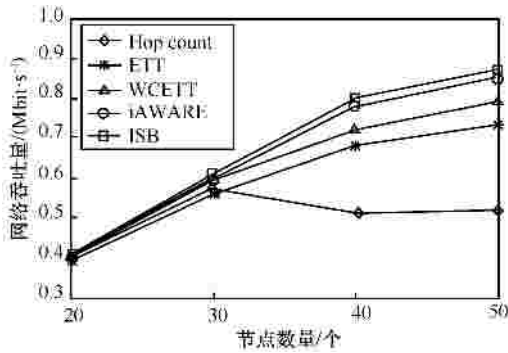


图 2 吞吐量随节点数目变化

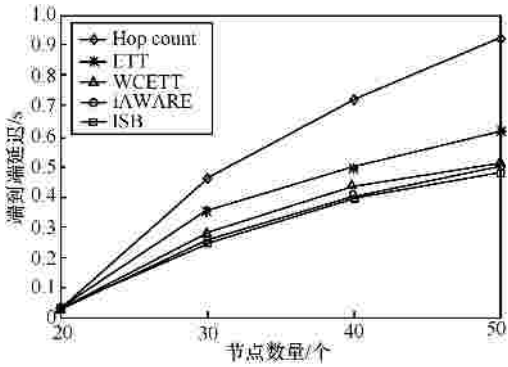


图 3 端到端延时随节点数目变化

### 4.2 加入背景噪声环境下的 iAWARE 和 ISB 性能对比

笔者在网络中加入了大量的背景噪声,用以对比 iAWARE 和 ISB 的性能。如图 4 所示,笔者在 1000m × 1000m 范围中整齐布置了 25 个路由器 MP, 间隔 150m。信道设置和 4.1 节类似。仿真参数如表 1 所示。笔者将 iAWARE 和 ISB 分别配置到路由器中,令每个路由器每秒产生 40 个 1024bit 数据分组,均发往 Internet 即 MPP。路由器的无线调频方式设为

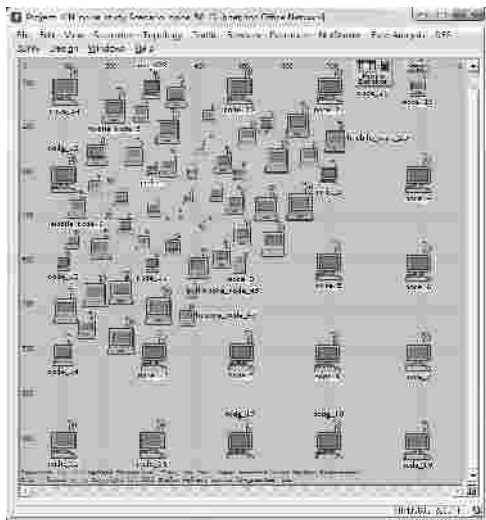


图 4 带 50 噪声节点仿真场景

DPSK(differential phase shift keying)模式。为了测试前面所提到的 iAWARE 存在的问题,向场景中的左上半部分不断加入噪声节点,这样场景中的噪声会分布不均,左上和右下对比比较明显。噪声节点每秒产生 20 个随机目的地址的数据分组,无线调频方式设为“jammod”(OPNET 自带的干扰调频模式)。因为调频方式不同,噪声节点的所有信号在路由器接收端均会被认为是背景噪声。随着噪声节点的增多,笔者记录 2 种度量机制的端到端延时,其结果如图 5 所示。柱形图上面的线段上下 2 个端点分别表示仿真中端到端延时的最大值和最小值。

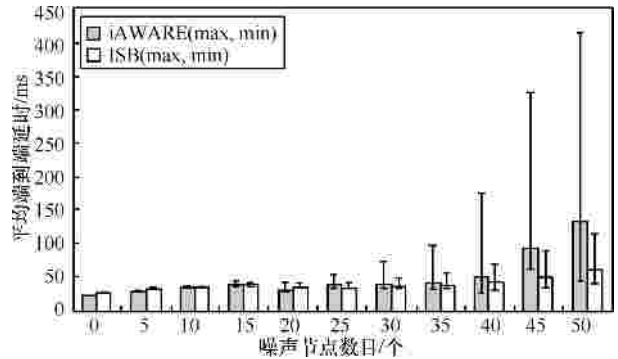


图 5 端到端延时随噪声节点数目变化

从图 5 中可以看出,随着噪声节点数目的增多,即背景噪声的增加,iAWARE 的端到端延时迅速增加。当噪声节点增加到 30 个以上时,iAWARE 的端到端延时开始变得不稳定,网络中的部分路由器处于高延时状态。这种状况变得越来越明显,尤其当噪声节点为 50 个时,iAWARE 的端到端延时的最大值和最小值分别为 414.8ms 和 45.7ms,这表明受噪声影响,iAWARE 有时会选择背景噪声干扰大的节点,从而导致在仿真实验网络中偏向于网络左上半部分的路径,部分路由路径通信质量急剧下降。ISB 相对于 iAWARE,性能明显提高。当噪声节点为 50 个时,ISB 端到端延时的最大值和最小值仅为 115.87ms 和 41.72ms。本文没有对吞吐量做出对比,因为虽然延迟增加,数据分组丢失率仍然很低,25 个 MP 产生的数据分组均能被成功接收,从而 2 种度量机制下的吞吐量是基本相同的。

综上所述,仿真结果表明了采用 ISB 的路由协议相对其他度量机制可以取得更好的网络性能表现。ISB 依靠信号干扰的监测方法,准确地反映了链路的质量,为路由协议提供了最优路径的正确选择。

## 5 结束语

本文提出了适用于多接口、多信道无线 mesh 网的一种基于信号干扰监测的路由度量机制。新的度量方案通过路由器接口的监测功能,以信号强度及背景噪声做参数,反映无线链路的通信质量,抓住了影响网络性能的关键因素。OPNET 的仿真结果证明了本文所提出机制的优越性和高效性。因此,ISB 满足了路由度量的基本要求,相对于现有的度量机制,更加适合于多接口、多信道无线 mesh 网。

本文的不足之处在于,ISB 依然采用了 ETX 机制,仍然避免不了短时间内信道多变问题。虽然在理论上证明了 ISB 的性能,离实际应用还相差甚远。笔者希望将 ISB 布置到实际环境中,对其性能进行更加完善的测试,以期对其进一步完善。ISB 只适用于骨干网静态拓扑的 mesh 环境,如何对 ISB 进行改良,使其适应如战场通信、紧急救护等大规模动态场景,也是未来研究的方向。

### 参考文献:

- [1] IEEE. IEEE Amendment: Mesh Networking[S]. IEEE P802.11s/D1.06, 2007.
- [2] IEEE. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. IEEE Std 802.11, 1999.
- [3] HOLT A, HUANG C Y. 802.11 Wireless Networks Security and Analysis[M]. Springer, 2010.
- [4] PADHYE J, AGARWAL S, PADMANABHAN V N, *et al.* Estimation of link interference in static multi-hop wireless networks[A]. ACM SIGCOMM Conference[C]. Berkeley, USA, 2005.28.
- [5] DAS S M, KOUTSONIKOLAS D, HU Y C. Characterizing multi-way interference in wireless mesh networks[A]. ACM WINTECH'06[C]. Los Angeles, California, USA, 2006.57-64.
- [6] GUNGOR V C, NATALIZIO E, PACE P, *et al.* Challenges and Issues in Designing Architectures and Protocols for Wireless Mesh Networks[M]. Springer, Wireless Mesh Networks, 2007.
- [7] JONATHAN G, MARIUS P. Routing metrics for multi-radio wireless mesh networks[A]. Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference[C]. Christchurch, New Zealand, 2007. 343-348.
- [8] WAHARTE S, ISHIBASHI B, BOUTABA R, *et al.* Performance study of wireless mesh networks routing metrics[A]. IEEE International Conference on Computer Systems and Applications[C]. Doha, Qatar, 2008. 1100-1106.
- [9] COUTO S J D, AGUAYO D, BICKET J, *et al.* A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[A]. 9th Annual International Conference on Mobile Computing (MobiCom 03)[C]. Hingham, MA, USA, 2005. 419-434.
- [10] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks[A]. Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Philadelphia, USA, 2004. 114-128.
- [11] SUBRAMANIAN A P, BUDDHIKOT M, MILLER S. Interference aware routing in multi-radio wireless mesh networks[A]. Second IEEE

Workshop on Wireless Mesh Networks[C]. Stony Brook Univ, NY, USA, 2006. 55-63.

- [12] AHMEDAS S S, ESSEID E A. Review of routing metrics and protocols for wireless mesh network[A]. Second Pacific-Asia Conference on Communication and System (PACCS)[C]. Elfath Univ, Libya, 2010. 27-30.
- [13] TIAN Q M. A new interference-delay aware routing metric for multi-interface wireless mesh networks[A]. IEEE International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)[C]. Wenzhou, China, 2010. 1-5.
- [14] SANA G, SONIA M G. Multi-radio multi-channel routing metrics in IEEE 802.11s-based wireless mesh networks-and the winner is[A]. IEEE First International Conference on Communications and Networking[C]. Manouba, Tunisia, 2009.1-8.
- [15] AWERBUCH B, HOLMER D, RUBENS H. High Throughput Route Selection in Multi-rate Ad Hoc Wireless Mesh Networks[M]. Wireless On-Demand Network Systems, 2003. 253-270.
- [16] JAIN K, PADHYE J, PADMANABHAN V N, *et al.* Impact of interference on multi-hop wireless network performance[A]. MOBICOM 2003[C]. New York, USA, 2003. 66-80.
- [17] HFA3683 data sheet, direct sequence spread spectrum baseband processor with rake receive and equalizer[EB/OL]. <http://doc.chipfind.ru/intersil/hfa3683.htm>, 2000.
- [18] OPNET[EB/OL]. <http://www.opnet.com>, 2008.

### 作者简介:



姬文江(1984-),男,陕西西安人,西安电子科技大学博士生,主要研究方向为无线网络安全、路由协议及网络仿真等。



马建峰(1963-),男,陕西西安人,西安电子科技大学计算机学院院长、博士生导师,主要研究方向为信息与无线网络安全和密码学。



张俊伟(1982-),男,陕西西安人,博士,西安电子科技大学副教授,主要研究方向为密码学和网络安全。



马卓(1980-),男,陕西西安人,博士,西安电子科技大学副教授,主要研究方向为无线网络安全、安全协议的形式化分析与设计理论及方法和可信计算理论与技术等。