

多跳无线网络跨层协作式路由 协议实现和性能分析*

费宁¹, 冯伟², 陈春玲¹, 杨亮³

(1. 南京邮电大学 计算机学院, 南京 210003; 2. 中国交通通信信息中心, 北京 100011; 3. 香港理工大学 计算学系, 香港)

摘要: 为了提高多跳无线网络的带宽利用率, 引入了辅助节点来帮助其他链路进行数据传输并重新定义了协作式路由的概念。在此基础上, 提出了协作式路由算法, 并且在实际平台上进行了实验。结果表明, 协作式路由能够显著提高网络传输带宽。

关键词: 辅助节点; 转发节点; 协作式通信; 协作式路由; 协作式路由路径

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)09-2839-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.071

Implementation and evaluation of cross-layer cooperative routing in multi-hop wireless networks

FEI Ning¹, FENG Wei², CHEN Chun-lin¹, YANG Liang³

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. China Transport Telecommunications & Information Center, Beijing 100011, China; 3. Dept. of Computing, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: To increase bandwidth in multi-hop wireless networks, this paper introduced the helper node to assist other links to transmit packets. It introduced a new concept cooperative routing which contained a routing path and corresponding helper nodes for each link. Based on this, the paper proposed a distributed cooperative routing algorithm and verified it on the real testbed. The results show the distributed algorithm can significantly improve the network performance.

Key words: helper node; forwarder node; cooperative communication; cooperative routing; cooperative routing path

0 引言

协作式通信是通过使用多跳无线网络中的辅助节点来提高网络带宽的一种技术。与传统无线通信只需要一条从源点到目的地的路径不同, 协作式路由需要考虑在辅助节点的帮助下发现最佳路由。在引入辅助节点的情况下, 除了需要考虑传统路由中相邻链路之间的干扰, 还要考虑每条链路和辅助节点之间的干扰。

现有的协作式通信的研究大多是在单跳情况下的性能分析, 研究也主要集中在物理层、MAC 层和网络层。在物理层, 文献[1]提出了 decode-and-forward 传输机制; 文献[2]设计并实现了基于 IEEE 802.11 开源代码的协作式 MAC 协议。在网络层, 文献[3~5]讨论了如何在辅助节点的帮助下最大化多条链路的最小带宽, 但没有考虑链路干扰和时隙调度; 文献[6~8]只研究了网络层的协作式通信和链路层的竞争问题。

现有协作式路由没有充分考虑实际应用场景中的链路干扰和时隙调度问题, 而且验证工作通过网络仿真而非在硬件设备上实现^[9]。本文在考虑这些干扰的基础上提出了基于分布

式的协作式路由算法, 并且在路由器上验证了此算法的有效性。据目前所知, 这是首次尝试在实际网络而非模拟环境中实现并验证协作式路由协议。

1 系统模型和问题分析

在本文的模型中, 所有链路工作在同一个信道, 采用 $\Omega(1)$ 模型^[10,11]来约束两个无线节点之间的距离, 即任意两个节点之间的距离不小于 d_0 , 因为在实际网络布署时不会把两个节点放置得过于靠近。

上述网络模型可以抽象成一个无向图 $G(V, E)$, 此处 V 代表 n 个节点的集合, E 代表 m 条链路的集合。如果 $d(u, v) \leq R_c$, 则表示存在一条连接 u 和 v 的链路 $e(u, v) \in E$ 。此处 $d(u, v)$ 是节点 u 和 v 之间的物理距离, R_c 是通信距离。

本文采用解码—转发 (decode-and-forward, DF) 机制来提高链路传输能力, 每个帧可以通过两个时隙传输, 如图 1 所示, 第一个时隙源点 s 向节点 h 和 d 广播消息, 这个阶段称为广播阶段; 第二个时隙中, 辅助节点 h 再次传送从 s 收到的帧到目的节点 d , 这个称为协作传输阶段。协作通信中的节点按功能

收稿日期: 2012-11-08; **修回日期:** 2012-12-21 **基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目 (61202354); 国家自然科学基金资助项目 (61003040)

作者简介: 费宁 (1977-), 女, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要研究方向为无线网络、嵌入式操作系统等 (fein@njupt.edu.cn); 冯伟 (1981-), 男, 江苏徐州人, 研究员, 博士, 主要研究方向为无线通信、卫星定位与导航; 陈春玲 (1961-), 男, 江苏南京人, 教授, 硕士, 主要研究方向为软件工程; 杨亮 (1977-), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 主要研究方向为无线网络。

可以分成转发节点和辅助节点。转发节点指在多跳网络中进行中继传输的节点;辅助节点指帮助其他链路进行数据转发的节点。考虑到网络拓扑的复杂性,每条链路只通过一个辅助节点帮助传输,每个节点在一条路由中只能充当转发节点或者辅助节点^[3,6]。双时隙下 DF 模式的链路容量^[12]为

$$C_{DF}(s, h, d) = W \times I_{DF}(s, h, d) \quad (1)$$

$$I_{DF}(s, h, d) = \frac{1}{2} \times \min \{ \log_2(1 + \text{SINR}_{sh}), \log_2(1 + \text{SINR}_{sd} + \text{SINR}_{hd}) \} \quad (2)$$

而直接传输的信道容量根据香农公式可表示为

$$C_{direct}(s, d) = W \times \log_2(1 + \text{SINR}_{sd}) \quad (3)$$

文献[9]证明了 DF 模式可以取得比直接传输模式更高的带宽。

在传统无线网络中,两条链路 l_{uv} 和 l_{xy} 形成干扰的前提条件是其中一条链路在另外一条链路终端节点的传输范围之内,即 $d(u, x) \leq R_t$ 或 $d(u, y) \leq R_t$ 或 $d(x, v) \leq R_t$ 或 $d(y, v) \leq R_t$ 。然而,这个条件并不适用于协作通信。如图 1 中,如果所有和 l_{sh} 及 l_{sd} 相干扰的节点保持沉默, s 就可以将数据包成功传输给节点 h 和 d 。而在非协作模式时,这两条链路是互相干扰的。

干扰链路集合 (IS) 定义为与给定链路 l 相干扰的其他链路;网络 $G(V, E)$ 中已存在的流量集合定义为 $F = \{f_1, f_2, \dots\}$, 每条流占用相应链路 l 的时间片为 $TF(l, F)$, 链路 l 的可用时间片为 $ATF(l)$, 从而有 $ATF(l) = 1 - \sum_{e \in IS(l)} \sum_{f \in F} TF(e, f)$ 。

定义 1 协作路由路径 (cooperative routing path)。给定一个网络 $G(V, E)$ 和一个连接请求 (s, d) , 协作路由路径是指找出网络 G 的一个子图, 其包含了从源点 s 到目的节点 d 的路径 P 以及对应辅助节点的集合 $P' = \{h_0, h_1, \dots, h_n\}$ 。此处 h_i 为路径 P 中链路 $l_{i,i+1}$ 的辅助节点, 该节点可以为空, 表明对应链路为直接传输模式。

定义 2 协作路由问题 (coop-routing, cooperative routing problem)。给定一个网络 $G(V, E)$ 以及每个链路的 SINR 和 ATF, 已有流的集合, 以及一个新的连接请求 $\rho(s, d)$ 。协作路由问题是指在保证既有流量不受干扰的情况下, 发现一条从 s 到 d 拥有最大带宽的协作路由路径 P 以及所包含链路的调度机制。该问题用数学式可表示为

目标: maximize ($BW(P)$)

约束条件:

路径可用带宽约束:

$$BW(P) = C(l_{i,i+1}, h_i) \times TF(l_{i,i+1}, h_i, \rho) \quad (4)$$

流预留约束:

$$\forall l_{i,i+1}, l_{j,j+1} \in P, C(l_{i,i+1}, h_i) \times TF(l_{i,i+1}, h_i, \rho) = C(l_{j,j+1}, h_j) \times TF(l_{j,j+1}, h_j, \rho) \quad (5)$$

可用时隙调度约束:

$$\forall l \in IS(P), \sum_{e \in IS(l)} TF(e, \rho) \leq ATF(l) \quad (6)$$

中继约束: $\forall i, j, m \in V$

$$\sum_{m \in V} x(m, p) + \sum_{l_{i,j} \in p} y(m, l_{ij}, P) \leq 1 \quad (7)$$

其中: $BW(P)$ 表示路径 P 的可用带宽; $IS(P)$ 表示和路径 P 中链路冲突的链路集合; $IS(P) = \bigcup_{l \in P} IS(l)$ 。 $C(l_{i,i+1}, h_i)$ 表明在辅助节点 h_i 的帮助下进行协同传输的链路 $l_{i,i+1}$ 的信道容量, $TF(l_{i,i+1}, h_i, \rho)$ 是链路 $l_{i,i+1}$ 占用的时隙。式(4)定义了路径的可用带宽;式(5)规定了两条链路之间流的关系;式(6)规

定了在 P 中链路的节点不能互相干扰;式(7)表明任何一个节点只能承担转发节点或辅助节点中的一个角色。

2 算法设计

关于协作路由的算法设计, 可以考虑集中式和分布式两种方案。集中式方案可以保证选取出最优协作式路由, 但在实际网络中可行性很低, 这是因为: a) 协作路由问题是个 NP-hard 问题, 最优网络路由虽然存在但却无法在多项式时间内发现; b) 获取每个节点的链路层信息会给全网络带来巨大的开销。

基于以上原因, 本文提出了分布式路由算法来解决协作式通信问题。在分布式算法中, 每个节点只需要知道干扰范围内的链路信息即可, 同时也只与在自身干扰半径内的邻居交换链路信息。因为实际网络中的无线节点的物理位置无法探知, 所以用跳数来代替距离的检测。根据网络部署的实际情况, 可以假设两个节点之间的跳数不超过 K 跳 ($K = 2$ 或 $K = 3$) 时存在干扰。

基于无线自组网按需平面距离矢量路由协议 (AODV) 的协作式分布式路由算法如下:

算法 1 分布式协作路由算法 (distributed coop-routing)

输入: 网络 $G(V, E)$, 每条链路的 SINR 和 ATF, 路由请求 $\rho(s, d)$ 以及相应的带宽要求 RBW。

输出: 协作路由路径 P , 时隙调度算法 s , 发现路由带宽 $BW(P)$ 。

a) 每个节点和 K 跳邻居交换链路信息;

b) 每个节点建立本地数据库以存储相邻链路的 MAC 层信息;

c) 源节点广播 RREQ 消息;

d) 如果节点 j 收到节点 i 发送过来的 RREQ 消息, 节点 j 根据存储的链路层信息计算从 i 到 j 的最大可用带宽 $EBW(P, l_{ij})$;

e) 如果存在 l_{ij} 使得 $EBW(P, l_{ij}) \geq RBW$, 则 j 继续广播 RREQ 消息, 否则 i 将 j 从可选下一跳中移除并放入备选辅助节点当中;

f) 如果目的节点 d 收到多份 RREQ 满足 RBW, 选取最大带宽的路径作为最终路由, 同时返回 RREP 消息, $BW(P) = \max(EBW(P, l_{s,d}))$, 如果不存在满足带宽的路径, 则拒绝该路由请求;

g) 中间节点 j 收到 RREP, 发送请求邀请其辅助节点加入路由。

3 系统设计与实现

3.1 跨层协作式通信系统

协作式通信要根据链路层的状况来选取辅助节点和发现路由, 所以需要把链路层的信息发送到网络层进行处理。但链路层运行在操作系统的内核空间, 而网络层运行在用户空间, 所以协作通信系统需要在内核和用户态之间进行通信。这样一个跨层协作式通信系统的架构如图 2 所示。它主要包含三个模块: 协作通信路由协议 (coop-routing)、协作通信 MAC 协议 (coop-MAC) 以及它们之间的通信模块。

路由协议是基于开放源码 AODV-0.95 上实现, MAC 协议

基于 Madwifi-0.9.3.2, Linux 内核版本是 2.6.31.14, 内核和用户空间的通信机制采用了 Netlink 套接字, 无线网卡芯片为 Atheros AR5005GS. Coop-MAC 协议栈包含三个模块: NET 802.11、ATH 和 HAL. NET 802.11 主要实现了和 IEEE 802.11 数据帧相关的解析和封装功能; ATH 定义了 Atheros 芯片与 NET802.11 模块交互的回调函数以及通过 HAL 来访问硬件的功能; HAL 为硬件抽象层 (hardware abstraction layer), 主要为上层软件提供访问 Atheros 硬件的能力. Coop-routing 包含路由模块和消息模块两个部分. 路由模块主要负责发现协作路由路径; 消息模块主要负责和 K 跳邻居周期性地交互通过 Netlink 得到的链路层信息。

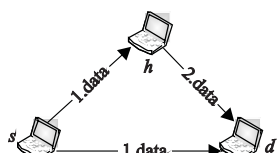


图1 DF协作传输机制

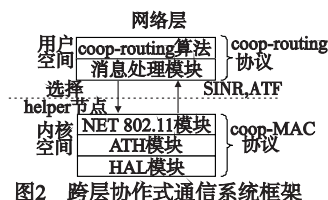


图2 跨层协作式通信系统框架

跨层协作式通信系统工作原理如下:

- 各个节点通过 ATH (读取 Atheros 的寄存器) 来收集链路层的信息, 包括 SINR 和 ATF;
- Coop-MAC 通过 Netlink 发送收集来的链路层信息给 coop-routing;
- Coop-routing 的消息模块和 K 跳邻居交换链路层信息;
- 当一个新的连接请求发起时, coop-routing 的路由模块计算出协作路由路径;
- Coop-routing 通知 coop-MAC 协作路由路径节点;
- 本节点若被选为辅助节点, NET 802.11 模块按 DF 传输模式来处理数据包; 否则按直接传输模式来传输数据包。

3.2 Coop-routing 协议实现细节

在 coop-routing 中, 沿用 AODV 的 HELLO 和 LINK 数据报文来获取相邻节点从 Madwifi 驱动汇报上来的链路信息。在原始的 AODV 实现中, HELLO 报文用来和直连节点周期性地交互信息以确认邻居的连接状态; coop-routing 修改了 HELLO 报文来携带额外的链路信息, 如 SINR 和 ATF。图 3 描述了新的 HELLO 报文的帧格式。HELLO 报文只和一跳邻居进行交互, 所以它的 TTL 为 1; LINK 报文在它的 K 跳邻居范围内进行传输, 其目的是向在干扰范围内的所有节点广播 SINR 和 ATF, 所以它的 TTL 设置为 K 。

Coop-routing 系统通过修改 AODV 的 RREQ、RREP 来发现满足带宽的路径。在 RREQ 里增加三个新的域: a) 该路径上一个节点计算出的可用带宽; b) 上一条转发链路的 SINR; c) 上一条链路为达到所要求的带宽占用的时隙。在 RREP 里增加两个新的字段: a) 已选择路径的可用带宽; b) 各条链路的辅助节点 (如有)。同时也定义了新的 helper 报文来通知辅助节点为转发链路重传收到的数据包, 其报文格式如图 4 所示。

类型	A	保留	跳数
目的 IP 地址	目的序列号		
源 IP 地址	源序列号		
SINR	ATF		

图3 HELLO 报文帧格式

类型	A	保留	跳数
辅助节点 IP 地址	辅助节点序列号		

图4 Helper 报文帧格式

图 5 描述了协作式路由控制报文交互的全过程。每个收到 RREP 的转发节点根据算法 1 选取合适的辅助节点并更新

可用带宽。目标节点从满足带宽要求的所有路径中选择最大带宽的路由, 并且向源点发送 RREP 消息。该路径上的转发节点负责通知各自的辅助节点要求它们帮助转发数据。

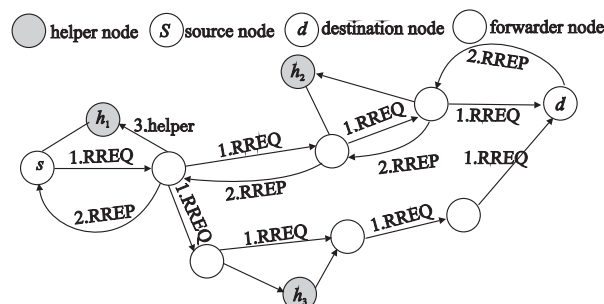


图5 Coop-routing协议控制报文消息

3.3 Coop-MAC 协议实现细节

如前所述, coop-MAC 主要有收集链路信息和实现 DF 传输机制两个功能。

1) 收集链路信息 通过修改 Madwifi 驱动来收集 coop-routing 需要的额外信息, 如 SINR、ATF 和传输速率。对于 SINR, 可以直接从 Madwifi 中的 ATH 模块获取; 相邻链路的传输速率可以从接收到数据包的 MAC 头解析得到; 由于无法直接从驱动中获得 ATF 信息, ATF 根据经验统计值转换为

$$ATF = 1 - (\text{num_trans_packets} / \text{max_trans_packets})$$

其中: num_trans_packets 为单位时间内实际传输的数据包个数, max_trans_packets 为同一信道传输数据包的历史最高纪录。

2) 实现 DF 传输机制 和网络层维护路由转发表类似, 在 MAC 层同样维护了一份全新的 MAC 表 (CQ-MAC-table) 用来存储协作式通信所需要的额外信息: 辅助节点 MAC 地址、相邻链路的 SINR 和传输速率。

Coop-MAC 相对于传统的 MAC 机制有以下三处改进:

a) 修改源点的操作如下: (a) 检查协作式路由表, 当源点需要发送数据 L 字节的数据时, 解析 IP 报文头部获取目标 IP 地址, 根据 ARP 表查找 MAC 地址; (b) 在 MAC 层搜索 coop-MAC-table, 确定下一跳的传输模式为直接传输还是协作式传输。在协作式传输中, 辅助节点需要时间转发从源点接收到的数据报文, 源点和相邻节点的等待时间为

$$\text{duration}_{\text{coop}} = 3T_{\text{SIF}} + \frac{L}{r_{sh}} + \frac{L}{r_{hd}} + T_{\text{ACK}} \quad (8)$$

其中: T_{SIF} 表示 SIF (short IFS) 占用的时间。

b) 修改辅助节点 h 的行为如下: 在 IEEE 802.11 MAC 协议中, 节点会丢弃目的地址和自身 MAC 不匹配的单播数据包; 然而在 coop-MAC 中, 节点需要检查 coop-MAC-table 来确定是否需要帮助转发所收到的不是发送给自己的报文。

c) 转发数据报文。如果节点 h 发现自己为某目的 MAC 的转发节点, 那么在收到对应的数据包后立刻进行转发。在传统的 IEEE 802.11 MAC 协议中, 发送方需要修改 MAC 包的源地址为自己的 MAC 地址; 然而在协作式通信时, 辅助节点不需要修改所转发的数据报文。此外, 传统 IEEE 802.11 协议中, 发送方需要等待 ACK 消息, 否则要重传数据包; 在协作通信中, 规定辅助节点只须帮助源点重传数据包一次, 源点仍然需要处理 ACK 来保证报文的正确接收。

4 实验和性能分析

4.1 实验设备和指标

实验设备有两种:a)带有 Atheros 芯片无线网卡 Thinkpad T61,软件为定制的驱动和 AODV 路由协议;b)基于 OpenWRT 的开发板。笔者在校园里部署了总共有 19 个测试节点的 Mesh 网络,两个节点之间的距离为 30~50 m。

评估 coop-routing 系统性能基于以下指标:带宽、传输延迟、丢包率以及路由发现时间。路由发现时间是指源节点发起传输请求到发现满足带宽要求的路径。同时比较了 coop-routing 系统和其他两种路由协议:shortest routing protocol^[13,14]和 widest routing protocol^[15,16]。后两种协议都是在 AODV 的开源代码上实现的,前者以选取最短跳数为标准,后者为最大带宽。

4.2 性能分析

对于上述三种路由协议,通过 Iperf 设置了 10 条 TCP 流去验证可获得的最大带宽并记录平均值作为最后的结果。

图 6 是各种路由协议所发现路由的可用带宽的比较,结果表明 coop-routing 协议发现的路由可用带宽比 widest routing 提高约 27%,比 shortest routing 提高约 90%。

网络延迟测试的结果比较如图 7 所示。结果表明,相比 widest routing 和 shortest routing,coop-routing 协议的网络延迟可以分别降低约 18% 和 170%。这同样表明 coop-routing 可以显著降低多跳无线网络的传输延迟。

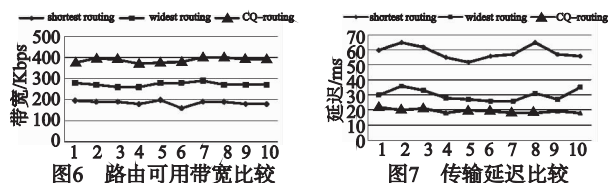


图6 路由可用带宽比较

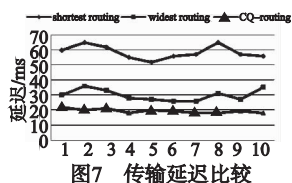


图7 传输延迟比较

对于网络丢包率,coop-routing 可以比 widest routing 和 shortest routing 分别降低约 26% 和 180%,如图 8 所示,coop-routing 协议可以显著减少网络丢包。总之,coop-routing 可以明显提高多跳无线网络的利用率和传输性能。

从图 9 中可以看到,coop-routing 的路由发现时间比最快的 shortest routing 增加了约 35%。这是因为 coop-routing 协议增加了控制消息报文的长度,如 RREQ 和 RREP;此外还增加了新的控制报文类型来和辅助节点进行交互。发现合适的辅助节点也同样增加了计算的复杂度。虽然 coop-routing 增加了路由发现时间,但这是可以接受的,因为路由发现对于同样目的地址的数据流只需要进行一次。

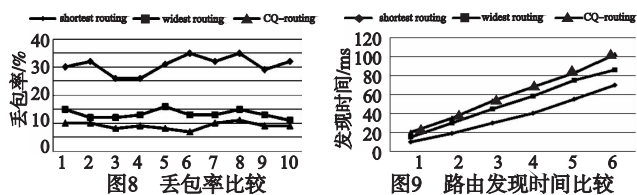


图8 丢包率比较

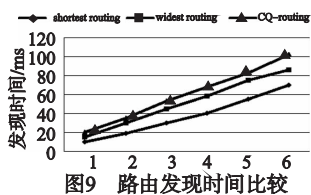


图9 路由发现时间比较

5 结束语

本文主要研究了在多跳无线网络中的协作式路由问题,给出了协作式通信的模型并提出了协作式路由的分布式算法。在此基础上,在路由器上实现并验证了协作式通信的可行性并给出了和传统路由的性能比较。结果表明,协作式路由在可接

受的网络发现延迟的情况下,可以显著提高多跳无线网络的传输性能。

参考文献:

- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AZHANG B. User cooperation diversity part I and part II [J]. IEEE Trans on Communication, 2003, 51 (11): 1927-1938.
- [2] LIU Pei, TAO Zhi-feng, NARAYANAN S, et al. CoopMAC: a cooperative MAC for wireless LANs [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25 (2): 340-354.
- [3] SHARMA S, SHI Yi, HOU Y T, et al. Cooperative communications in multi-hop wireless networks: joint flow routing and relay node assignment [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2010: 1-9.
- [4] LIN Yu-xia, SONG J H, WONG V W. Cooperative protocols design for wireless Ad hoc networks with multi-hop routing [J]. Mobile Networks and Applications, 2008, 14 (2): 143-153.
- [5] SHI Yi, SHARMA S, HOU Y T, et al. Optimal relay assignment for cooperative communications [C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2008: 2-12.
- [6] ZHANG Jin, ZHANG Qian. Cooperative routing in multi-source multi-destination multi-hop wireless networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2008: 2369-2377.
- [7] MAHAM B, DEBBAH M, HJRUNGNES A. Energy-efficient cooperative routing in BER constrained multihop networks [C]//Proc of the 3rd International Conference on Communications and Networking. 2008: 168-172.
- [8] JIANG Fan, FAN Jiu-lun, CHANG Zhi-xian. Enhanced cooperative MAC for wireless local area networks [J]. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18 (5): 7-14.
- [9] ZHANG Jin, JIA Jun-cheng, ZHANG Qian, et al. Implementation and evaluation of cooperative communication schemes in software-defined radio testbed [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2010: 1-9.
- [10] GUPTA D, WU D. Experimental comparison of bandwidth estimation tools for wireless Mesh networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2009: 2891-2895.
- [11] KUHN F, WATTENHOFER R, ZOLLINGER A. Worstcase optimal and averagecase efficient geometric Ad hoc routing [C]//Proc of the 4th ACM MobiHoc. 2003: 267-278.
- [12] JIAN Tang, GUO Liang-xue, WEI Yi-zhang. Interference-aware topology control and QoS routing in multi-channel wireless Mesh networks [C]//Proc of the 6th ACM MobiHoc. 2008: 68-77.
- [13] ZONOOZI M, DASSANAYAKE P, FAULKNER M. Optimum hysteresis, signal averaging time and handover delay [C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. 1997: 310-313.
- [14] KHALIFEH A F. QoS routing of VoIP using a modified widest-shortest routing algorithm [C]//Proc of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications. 2007: 116-123.
- [15] HOU Rong-hui, LUI King-shan, CHIU H, et al. Routing in multi-hop wireless Mesh networks with bandwidth guarantees [C]//Proc of the 10th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2009: 353-354.
- [16] ANALOUI M, ESFAHANI A. Decrement delay with widest K-shortest paths Q-routing algorithm [J]. Journal of Communication and Computer, 2008, 6 (10): 28-32.