

基于蚁群算法的无线网状网 QoS 路由

沙海进¹, 白光伟^{1,2,3}, 沈 航², 张 芃¹

(1 南京工业大学 计算机科学与技术系, 江苏 南京 210009 ;

2. 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, 江苏 南京 210094;

3. 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, 江苏 南京 210003)

摘 要: 提出一种基于蚁群算法的无线网状网络 QoS 路由(ACQR), 用于求解多约束 QoS 路径优化选择问题. 该方法利用蚁群算法构造满足端到端带宽、时延、丢包率和时延抖动约束条件的路径集合, 然后根据适应函数值选择合适的路径. 仿真结果表明, ACQR 可以显著地降低端到端时延和抖动, 提高投递率, 同时为数据传输提供实时性和可靠性保证.

关键词: 无线网状网; QoS; 蚁群算法; 多约束

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)12-0010-06

QoS Routing for Wireless Mesh Networks Based on Ant Colony Algorithm

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

(1 Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2 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;

3 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)

Abstract: This paper proposes an Ant Colony algorithm based QoS Routing (ACQR) for wireless mesh networks, focusing on optimization problem regarding to multi-constrained QoS path selection. Using ant colony algorithm, this solution dynamically constructs path set that meets the requirements in end-to-end bandwidth, delay, packet loss rate and jitter, from which a node chooses a reasonable path according to predetermined fitness function. Our simulation results demonstrate that the proposed ACQR can reduce end-to-end delay and jitter, improve delivery ratio, and provide delay and reliability guarantees for data transmission.

Key words: wireless mesh networks; quality-of-service; ant colony algorithm; multi-constrained

1 引言

无线网状网(Wireless Mesh Networks, WMN)是一种新型的宽带接入网络, 具有自组织、自配置、

易部署、计算能力强等特点^[1]. 作为移动互联网的一部分, WMN 为用户提供各种各样的应用服务. 其中, 多媒体应用服务是 WMN 的主要业务之一, 如何为这些服务提供可靠的 QoS 保障却面临着严峻

收稿日期: 2014-01-28; **修回日期:** 2014-03-22

基金项目: 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)

的挑战。

近些年,研究人员对 WMN QoS 保障机制进行了大量的研究^[2]. 其中,路由构造与选择是提供可靠 QoS 保障的一个重要途径之一. 然而,现有的 WMN 路由算法大多只考虑单一的性能指标,没有同时考虑端到端带宽、时延、丢包率以及时延抖动等 QoS 参数指标。

针对这一问题,本文提出一种基于蚁群算法的 WMN QoS 路由,用于求解多约束 QoS 路径优化选择问题. 该路由算法利用具有正反馈机制的蚁群算法,综合考虑端到端带宽、时延、丢包率以及时延抖动等多个约束条件,构造并选择路径,保证数据传输的实时性和可靠性,从而为用户提供具有 QoS 保障的服务。

2 基于蚁群算法的 QoS 路由 (ACQR)

2.1 网络模型和相关定义

定义 1 无向图 $G = (V, E)$ 表示无线 Mesh 网络模型,其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 表示网络中节点的集合, $E = \{e_{1,2}, e_{1,3}, \dots, e_{i,j}\}$ 表示链路的集合, $e_{i,j}$ 表示从节点 v_i 到节点 v_j 之间的一条链路。

定义 2 给定无向图 $G = (V, E)$, $p_{s,d}$ 表示从源节点 s 到目的节点 d 的一条路径,它由节点 $v_1, \dots, v_n$ 组成. 这些节点满足以下两个条件: (1) $\forall i, 1 \leq i < n$, 满足 $(v_i, v_{i+1}) \in E$; (2) $\forall i, 1 \leq i \leq n$, 节点 v_i 当且仅当出现一次. 其中, $N_{s,d}$ 表示路径 $p_{s,d}$ 的节点集合,且 $N_{s,d} \subseteq V$; $L_{s,d}$ 表示路径 $p_{s,d}$ 的链路集合,且 $L_{s,d} \subseteq E$ 。

定义 3 给定一带权重的无向图 $G = (V, E)$, 源节点 $s(s \in V)$ 到目的节点 $d(d \in V)$ 的路径集合 $P_{s,d}$, 对于任意一条路径 $p_{s,d} \in P_{s,d}$, $L_{s,d}$ 表示路径 $p_{s,d}$ 的链路集合, $L_{s,d} \subseteq E$, 则路径 $p_{s,d}$ 相应的 QoS 参数计算公式如下所示:

$$D(p_{s,d}) = \sum_{l \in L_{s,d}} D(l) \quad (1)$$

$$L(p_{s,d}) = 1 - \prod_{l \in L_{s,d}} (1 - L(l)) \quad (2)$$

$$J(p_{s,d}) = \sum_{l \in L_{s,d}} J(l) \quad (3)$$

式中, $D(p_{s,d})$, $L(p_{s,d})$, $J(p_{s,d})$ 分别表示路径 $p_{s,d}$ 的时延, 丢包率以及时延抖动. 而 $D(l)$, $L(l)$, $J(l)$ 则分别表示链路 l 的时延, 丢包率以及时延抖动。

定义 4 链路干扰集: 相互干扰的链路组成的集合定义为链路干扰集。

2.2 最优路径构造问题

当源节点要发送数据给目的节点时, 需要构造一条从 s 到 d 的路径 $p_{s,d}$ 。

如图 1 所示, 在构造路径 $p_{s,d}$ 时, 综合考虑端到端带宽、时延、丢包率以及时延抖动等 QoS 指标. 因此最优路径构造问题转换为如下优化问题:

Given: s, d, V, E

Find: $p_{s,d}$ (4)

Maximum: $f(p_{s,d})$

Subject to:

$$B(p_{s,d}) \geq B_{\min} \quad (5)$$

$$D(p_{s,d}) \leq D_{\max} \quad (6)$$

$$L(p_{s,d}) \leq L_{\max} \quad (7)$$

$$J(p_{s,d}) \leq J_{\max} \quad (8)$$

式中, $B(p_{s,d})$ 表示端到端最大可用带宽, $B_{\min}$ 表示端到端带宽限制, $D_{\max}$ 表示端到端时延限制, $L_{\max}$ 表示端到端的丢包率限制, $J_{\max}$ 表示端到端时延抖动限制^[3-4]。

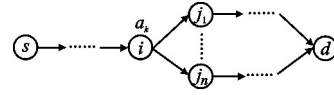


图 1 路由构造实例

$f(p_{s,d})$ 是适应函数. 它综合考虑了端到端时延、丢包率以及时延抖动等 QoS 指标, 相应的计算公式如下:

$$f(p_{s,d}) = w_d \times f_d(p_{s,d}) + w_l \times f_l(p_{s,d}) + w_j \times f_j(p_{s,d}) \quad (9)$$

式中, w_d, w_l, w_j 分别是时延、丢包率和时延抖动各自所占的权重. 同时, $w_d + w_l + w_j = 1$, 且 $w_d, w_l, w_j \geq 0$. 时延、丢包率和时延抖动惩罚函数定义如下:

定义 5 路径 $p_{s,d}$ 的时延惩罚函数定义为

$$f_d(p_{s,d}) = 2^{-D(p_{s,d})} \quad (10)$$

定义 6 路径 $p_{s,d}$ 的丢包率惩罚函数定义为

$$f_l(p_{s,d}) = 2^{-L(p_{s,d})} \quad (11)$$

定义 7 路径 $p_{s,d}$ 的时延抖动惩罚函数定义为

$$f_j(p_{s,d}) = 2^{-J(p_{s,d})} \quad (12)$$

定理 1 多约束最优路径构造的优化问题是 NP 完全问题。

证明: 给定 s 和 d , 在满足两个 QoS 指标的要求下, 求解满足条件的路径属于 NP 难问题^[5]. 而本文提出的关于最优路径构造的优化问题有 4 个 QoS 指标约束, 可以通过分割将该优化问题转换成具有

2 个 QoS 指标约束的子问题. 而分割问题是著名的 NP 完全问题, 因此该优化问题是 NP 完全问题.

2.3 路径最大可用带宽

本节将描述如何计算路径 $p_{s,d}$ 的最大可用带宽 $B(p_{s,d})$. 如图 2(a) 所示, 描述了一个节点集合 $V = \{a, b, c, d, e, f\}$, 链路集合 $E = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 的链式网络拓扑. 而图 2(b) 表示的是图 2(a) 所对应的链路碰撞图^[6]. 链路碰撞图反映了网络中链路之间的干扰关系. 链路碰撞图中的每一个节点表示网络中一条链路, 其中, 节点中的编号为实际网络中对应链路的编号. 如果网络中某两条链路相互干扰, 则链路碰撞图中对应的两个节点间存在一条边.

由图 2(b) 可知, 链路 2 和链路 3 是相互干扰的, 这是因为节点 b 不可以在同一时刻处于发送数据和接收数据两个状态, 由此得到这样一个链路干扰集 $q = \{2, 3\}$. 图 2(b) 中还存在很多链路干扰集, 如 $\{1, 3\}$, $\{2, 3, 4\}$, $\{1, 2, 3, 4\}$, $\{2, 3, 4, 5\}$ 等. 其中只有 $\{1, 2, 3, 4\}$, $\{2, 3, 4, 5\}$ 是该网络中的两个最大链路干扰集, 因为这两个链路干扰集不包含于其他链路干扰集.

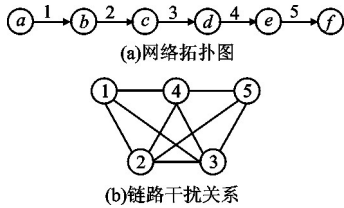


图 2 网络干扰模型

假设 $Q_p = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$ 是路径 p 的最大链路干扰集的集合, $B(l_{i,j})$ 是链路 $l_{i,j}$ 的可用带宽. 对于任意的 $q \in Q_p$, 在同一时刻, q 中的链路只可以有一条链路在传输数据, 因此路径 p 的最大可用带宽 $B(p)$ 的计算公式^[7] 如下:

$$B(p) = \min_{q \in Q_p} C_q \quad (13)$$

$$C_q = \left(\sum_{l \in q} \frac{1}{B(l)} \right)^{-1} \quad (14)$$

式中, C_q 为干扰集 q 所支持的最大数据传输率. 本文简化描述, 假定网络中最大链路干扰集都是相连的四跳链路组成的. 于是路径 $p = \langle v_1, v_2, \dots, v_h \rangle$ 的最大可用带宽计算公式表示如下:

$$B(p) = \min_{1 \leq k \leq h-4} C_k \quad (15)$$

$$C_k = \left(\sum_{i=0}^3 \frac{1}{B(k+i)} \right)^{-1} \quad (16)$$

式中, $B(k+i)$ 表示 v_{k+i} 与 v_{k+i+1} 之间的链路的可用带宽.

2.4 ACQR 设计

蚁群算法是解决 NP 完全问题的有效途径. 本节将探讨如何通过蚁群算法实现最优路径的构造, 并根据适应函数选择最终的路径.

如图 1 所示, 要构造一条从源节点 s 到目的节点 d 的一条路径 $p_{s,d}$, 蚁群中的某一只蚂蚁 a_k 在搜索路径时于 t 时刻到达了节点 v_i , 一个自然的步骤是从可选的下一跳节点集合 J_1 中选择一个节点作为下一跳节点.

对于所有 $v_j \in J_1$, 首先根据 $D(l_{i,j})$ 、 $D(p_{s,i})$ 并结合式(1) 计算出 $D(p_{s,j})$. 同理, 计算出 $L(p_{s,i})$ 和 $J(p_{s,i})$. 最后, 根据式(6)、(7)、(8) 排除 J_1 中不满足 QoS 约束条件的节点, 得到新的节点集合 J_2 .

对于所有 $v_j \in J_2$, 节点 v_i 通过 $B(l_{i-3,i-2})$, $B(l_{i-2,i-1})$, $B(l_{i-1,i})$, $B(l_{i,j})$ 和 $B(p_{s,i})$, 并结合式(13), 得到 $B(p_{s,j})$ 的计算公式如下:

$$B(p_{s,j}) = \min\{B(p_{s,i}), B(p_{i-3,j})\} \quad (17)$$

其中,

$$B(p_{i-3,j}) = \left(\frac{1}{B(p_{i,j})} + \sum_{m=0}^2 \frac{1}{B(p_{i-m-1,i-m})} \right)^{-1} \quad (18)$$

若 $B(p_{s,j}) < B_{\min}$, 则选择 v_j 作为下一跳的概率为 0; 否则通过以下公式选择下一跳.

$$j = \begin{cases} u^*, & r \leq r_0 \\ j', & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

式中, u^* 的计算公式如下:

$$u^* = \arg \max_{u \in \mu_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{iu}(t)]^\beta \quad (20)$$

μ_k 表示蚂蚁 a_k 可选的下一跳节点的集合; α 和 β 为启发式因子; $\tau_{iu}(t)$ 为 t 时刻链路 $l_{i,u}$ 信息素的大小, 其中, $\tau_{iu}(t) = Q_0$; $\eta_{iu}(t)$ 为链路 $l_{i,u}$ 的适应函数值. r_0 取值范围 $(0, 1)$, r 是通过随机函数产生的; 根据式(21) 计算出概率 p_{ij}^k , 然后依据这个值选择节点 j' .

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \mu_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \times [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \mu_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

蚂蚁 a_k 重复上面的步骤直到搜索到目的节点 d 为止. 当蚁群中的所有蚂蚁都到达目的节点 d 之后, 根据式(22) 更新链路的信息素.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^M \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (22)$$

式中, $\tau_{ij}(t+1)$ 表示更新后, 链路 $l_{i,j}$ 的信息素; ρ 为信息素挥发因子, 且 $\rho \in [0, 1]$; M 为蚁群中蚂蚁的

数量; $\Delta\tau_{ij}^k(t+1)$ 表示第 k 只蚂蚁 t 时刻留在链路 $l_{i,j}$ 上的信息素,其计算方法如式(23)所示:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{|L_{s,d}^k|}, & l_{i,j} \in L_{s,d}^k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

式中, Q 表示每只蚂蚁在一次完整的路径搜索中所释放的总信息素; $L_{s,d}^k$ 表示第 k 只蚂蚁构造的路径 $p_{s,d}$ 的链路集合。

每当蚁群中所有蚂蚁完成一次路径搜索时,迭代次数 T 自加 1. 若 $T < T_0$, 继续上面叙述的过程, 构造路径. 否则, 蚁群构造路径的过程结束, 并根据式(9) 计算出各路径相应的 $f(p_{s,d})$, 然后选取 $f(p_{s,d})$ 值最大的路径。

基于蚁群算法的 WMN QoS 路由的伪代码实现过程如算法 1 所示。

算法 1.

```

1  Input :  $T_0, M, Q, Q_0, \alpha, \beta, s, d, r_0$ 
2  Output:  $p_{s,d}$ 
3   $T=0, P_{s,d}=\Phi$ 
4  while  $T < T_0$ 
5   $P_{s,d}=\Phi$ 
6  choose source node  $s$  as start node
7   $i=s$ 
8  for each ant  $k$  do
9  while node  $i$  isn't destination node  $d$ 
10 Initialize  $r$ 
11 if  $r \leq r_0$  then
12 for  $u \in \mu_k$  do
13 Find  $u$  maximum  $[\tau_{iu}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{iu}(t)]^\beta$ 
14 end for
15 else
16 choose  $u$  from  $\mu_k$  with probability  $p_{ij}^k$ 
17 end if
18  $i=u$ 
19 end while
20  $P_{s,d} = P_{s,d} \cup \{p_{s,d}^k\}$ 
21 end for
22 update links' pheromone based on Eq. (22)
23  $T=T+1$ 
24 end while
25 for  $p \in P_{s,d}$  do
26 Find  $p$  maximum  $f(p_{s,d})$ 
27  $p_{s,d}=p$ 
28 end for

```

算法 1 首先对参数进行了初始化, 算法的第 4~24 行实现了蚁群 T_0 次迭代构造满足约束条件的路径集合, 算法的第 25~28 行则是根据式(9) 计算各路径的适应函数值, 并选取适应函数值最大的

路径。

3 实验仿真与结果分析

本节针对性地设计了一系列的仿真实验, 对算法的性能进行全面的分析. 本节首先介绍了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^[8]。

3.1 实验设计

本文使用 MATLAB 实现基于蚁群算法的无线 Mesh 网络 QoS 路由. 通过仿真实验, 对其性能进行分析和评价. 并将其与基于 ETX 的路由算法 (ETXR) 和基于 ETT 的路由算法 (ETTR) 作性能比较。

仿真实验采用 $N \times N$ 网格拓扑结构. 拓扑结构中的基本单元如图 3 所示. 图中虚线两端的节点互为邻居, 相互之间可以直接通信. 如: 节点 e 与其余八个节点互为邻居节点. 基本参数的设置见表 1。

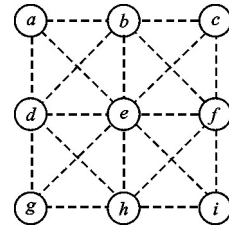


图 3 网格拓扑基本单元示意图

表 1 基本参数设置

名称	数值
链路带宽	5~10 Mb/s
链路时延	10~25 ms
链路丢包率	0~0.05
链路时延抖动	10~25 ms
蚂蚁数目	50
最大迭代次数	50
仿真时间	100 s
B_{min}	1.5 Mb/s
Q	50
α	2
β	2
$w_d + w_l + w_j$	1/3, 1/3, 1/3

本文主要从端到端时延、丢包率、时延抖动以及所选路径端到端带宽几个方面考察算法的性能. 通过改变网格拓扑中节点的数目来得到不同的 QoS 指标随网络拓扑规模的变化, 进而考察 ACQR 的性能。

3.2 结果分析

图 4 对应路径的最大可用带宽随拓扑规模的变化情况. 与 ETXR 相比, ACQR 和 ETTR 所选路径的最大可用带宽都有所提高. 在拓扑规模较小时, 三种算法都能满足端到端带宽不小于 1.5 Mb/s 的要求. 在拓扑规模较大时, ETTR 在某些情况下选取的路径, 其最大可用带宽大于 ACQR 所选取路径的带宽, 但 ETTR 不能确保在所有网络场景下选择的路径一定能够满足最小带宽要求; 只有通过 ACQR 选取的路径的端到端带宽能够满足最小带宽要求; 而 ETXR 则无法满足带宽要求.

图 5 中给出了各 QoS 指标随拓扑规模的变化情况. 由图 5(a)可知, 随着网络拓扑规模的增大, 三种算法的端到端时延都是呈上升趋势的. 在相同的网络拓扑规模下, ETXR 的端到端时延最大, ACQR 的端到端时延最小, 而 ETTR 的端到端时延则介于两者之间. 运行于 35×35 的网络场景下, 比较三种算法的端到端时延发现, ACQR 较 ETXR 降低了 25% 左右, 较 ETTR 降低了 11% 左右. 这是因为, ETXR 在选择路由时没有考虑时延这一指标; ETTR 则在 ETXR 的基础之上考虑了链路传输时延, 保证了局部时延较小, 端到端时延仍然较大; 而 ACQR 在选择路径时考虑了适应函数随端到端时延的变化, 从而尽可能地选择端到端时延较小的路径.

端到端时延抖动随网络拓扑规模的变化情况如图 5(b)所示. 在网络拓扑规模较小时, 三个算法的端到端时延抖动相差不大; 当网络拓扑规模变大时, ACQR 明显优越于其他两种算法. 这是因为 ACQR 在路由选择时, 通过选择适应函数值较小的路径, 从而降低了端到端时延抖动. 而 ETXR 和 ETTR 在构造路由时均没有考虑到时延抖动这一指标.

图 5(c)显示了投递率与网络拓扑规模的关系. 由图可知, 随着网络拓扑规模的变大, 投递率呈下降趋势. 随着网络规模的拓展以及路径跳数的增多, 投递率呈现下降的趋势. 在不同的场景下, ACQR 都能保证 80% 以上的投递率. 与其他两种算法相比, ACQR 的投递率都有所提高. 在 50×50 的网络拓扑场景下, 可以看出 ACQR 的投递率比 ETTR 提高了近 5%, 比 ETXR 提高了 18% 左右.

由图 4 和图 5 可知, 在不同的网络场景下, ACQR 都能够选择满足端到端带宽要求, 并且时延低、时延抖动小, 投递率高的路径, 从而保证数据的成功传输, 并提供可靠的 QoS 保障.

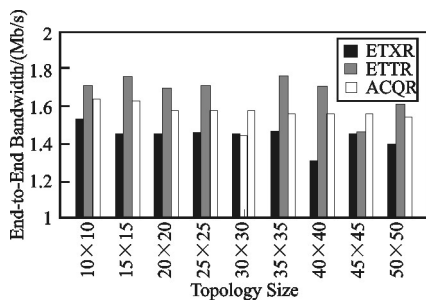
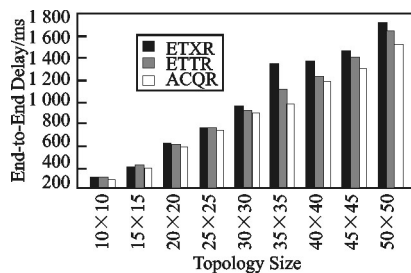
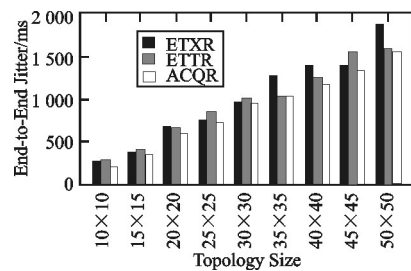


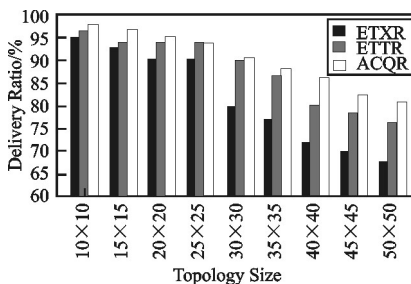
图 4 路径最大可用带宽



(a) 端到端时延随拓扑规模的变化



(b) 端到端时延抖动随拓扑规模的变化



(c) 投递率随拓扑规模的变化

图 5 各 QoS 指标随拓扑规模的变化

4 结束语

本文提出了一种基于蚁群算法的无线网状网 QoS 路由. 该路由算法是一种启发式的算法, 同时考虑了端到端时延、丢包率以及时延抖动, 很好地解决了多约束 QoS 路径优化选择这一 NP 完全问题, 并提出了适应函数的概念. 该路由算法利用蚁群算法的正反馈性和自组织性等特点, 构造并选取适应函数最大的路径, 从而保证数据的传输. 实验结

果表明,该路由可以满足端到端带宽要求,同时降低时延、丢包率以及时延抖动,为数据传输提供了实时性和可靠性保证。

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] Sun Y, Liu X, Zhang B. An available transmission time routing metric for wireless ad-hoc sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2011, ID(815987):79-85.
- [3] Jakllari G, Eidenbenz S, Hengartner N, et al. Link positions matter: A noncommutative routing metric for wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(1): 61-72.
- [4] Hou R, Lui K S, Baker F, et al. Hop-by-hop routing in wireless mesh networks with bandwidth guarantees [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(2): 264-277.
- [5] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal

on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228-1234.

- [6] Jain K, Padhye J, Padmanabhan V N, et al. Impact of interference on multi-hop wireless network performance[J]. Wireless networks, 2005, 11(4): 471-487.
- [7] Yang Y, Kravets R. Contention-aware admission control for ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(4): 363-377.
- [8] Li H, Cheng Y, Zhou C, et al. Minimizing end-to-end delay: a novel routing metric for multi-radio wireless mesh networks[C]// INFOCOM 2009, IEEE. Brazil IEEE, 2009: 46-54.

作者简介:

沙海进 男,(1989-),硕士研究生.研究方向为无线 Mesh 网络路由. E-mail:shahaijin@126.com.

白光伟 男,(1961-),博士,教授,博士生导师.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 男,(1984-),博士研究生.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.

张芃 女,(1965-),副教授.研究方向为无线网络.

(上接第9页)

参考文献:

- [1] Wang A, Calhoun B H, Chandrakasan A P. Sub-threshold design for ultra low-power syatems[M]. Berlin:Springer, 2006.
- [2] Dreslinski R G, Wieckowski M, Blaauw D, et al. Near-threshold computing: reclaiming moore's law through energy efficient integrated circuits[J]. IEEE, 2010,98(2):253-266.
- [3] Rabaey J. Low power design essentials[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [4] Keating M, Flynn D, Aitken R. Llow power methodology manual for system-on-chip design[M]. Berlin:

Springer, 2007.

- [5] Pu Y, Gyvez J P, Corporaal H, et al. An ultra-low-energy multi-standard JPEG coprocessor in 65nm CMOS with Sub/Near threshold supply voltage [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 2010,45(3):668-680.
- [6] Synopsys. Siliconsmart User's Guide, Version 2010. 04[EB/OL]. [2014-04-15]. <https://solvnet.synopsys.com>.

作者简介:

袁甲 男,(1985-),博士研究生.研究方向为数字信号处理器的极低功耗技术. E-mail:yuanjia@ime.ac.cn.