

# 一种基于能效与频效的路由优化算法

何林波<sup>1</sup>, 蒋定德<sup>2</sup>, 仲维佳<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学信息安全工程学院, 四川成都 610225; 2. 东北大学计算机科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 网络能效和网络频效作为当前的热点研究问题, 对网络性能有重要影响. 然而针对移动 Ad Hoc 网络中的能效和频效问题, 还缺乏深入研究, 而且大多数研究仅仅局限于单目标的网络能耗或网络能效, 联合考虑网络能效和网络频效的研究还不多. 本文分析移动 Ad Hoc 网络中的网络能效和网络频效问题, 讨论二者间的权衡关系, 利用多目标优化理论, 构建联合网络能效和网络频效的多目标优化模型, 并利用加权和方法将多目标优化转化成单目标优化, 提出资源效率的概念, 最后提出针对移动 Ad Hoc 网络资源效率优化的路由策略. 仿真结果表明, 所提出的算法具有较好的性能.

**关键词:** 移动 Ad Hoc 网络; 能效; 多目标优化; 频效; 路由算法

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2016)10-2314-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.10.005

## An Energy Efficiency and Frequency Efficiency Based Routing Optimization Algorithm

HE Lin-bo<sup>1</sup>, JIANG Ding-de<sup>2</sup>, ZHONG Wei-jia<sup>2</sup>

(1. College of Information Security Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Networks' energy efficiency and frequency efficiency are regarded as current hot topic, which have an significant impact on network performance. However, the in-deep studies about energy efficiency and frequency efficiency problem and mobile Ad hoc networks are absent. More studies only consider networks' energy efficiency and frequency efficiency of single object, while it is very few to combine networks' energy efficiency and frequency efficiency. This paper analyzes energy efficiency and frequency efficiency problem in mobile Ad Hoc networks. Then we discuss the tradeoff between both them. Multi-objective optimization theory is used to build multi-objective optimization model combining networks' energy efficiency and frequency efficiency. The weight sum method is exploited to convert the multi-objective optimization into the single-objective optimization. And we propose a notation of resource efficiency. Finally, we present a routing scheme for resource efficiency optimization in mobile Ad Hoc networks. Simulation results show that the proposed algorithm exhibits better performance.

**Key words:** mobile Ad Hoc networks; energy efficiency; multi-objective optimization; frequency efficiency; routing algorithm

## 1 引言

多跳无线网络是一种非常具有潜力的网络, 同时它也是一种复杂的系统, 目前仍然存在一些问题需要彻底的研究. 尤其随着互联网的飞速发展, 导致网络的流量不断增长, 因此网络能耗也与日剧增<sup>[1-7]</sup>. 按照目前增长趋势, 到 2025 年信息通信行业的平均能耗将变成 2006 年的 5 倍, 而网络领域将更高, 甚至可达到 13

倍<sup>[5-10]</sup>. 在网络领域中有一半以上的能耗是无线网络的能源消耗, 需要最优化理论进行解决<sup>[11-15]</sup>; 而网络频谱也是非常紧缺的资源. 因此, 研究能够降低移动多跳无线网络能耗并获得较高频谱效率的高能效传输机制已成为当今无线通信领域的热点问题<sup>[16-20]</sup>.

如何构建能效的网络路由具有挑战性, 文献[14]提出一种基于网络的路由算法来寻找到云数据中心的最能效路径, 以便处理和存储大数据; 文献[15]提出一

收稿日期: 2015-07-25; 修回日期: 2015-11-14; 责任编辑: 郭游

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61571104, No. 61071124), 辽宁省教育厅科学研究一般项目(No. L20150174), 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-11-0075), 中央高校基本科研业务费专项资助(No. N120804004, No. N130504003).

种新的安全而切实可行的迂回能效路由方法来解决 IP 网络中的节能问题;文献[17]利用跨层设计来获得 Ad Hoc 网络中能效的机会路由. IPv6 家庭网络中的能效路由也被研究<sup>[18]</sup>,能效路由性能<sup>[19]</sup>、频效多跳路由<sup>[20]</sup>也被分析.多跳网络具有干扰对消的频效路由<sup>[21]</sup>、频谱感知的多媒体路由<sup>[22]</sup>也被提出来解决频效问题.在多跳无线网络中,能效和频效一直是衡量系统的重要性能指标.对于移动 Ad Hoc 网络而言,节点通常采用电池供电,提高网络性能显得非常重要.文献[3-4]表明网络中能效与频效通常是矛盾,网络能效和频效无法同时达到最优,因此需要考虑网络中能效与频效的折中问题.尽管以上方法能获得较高能效或获得较高频效,但这些方法没有同时考虑频效和能效问题.然而,由于网络设备和协议的高能耗<sup>[23-24]</sup>,如何同时获得高能效和频效是困难的<sup>[3-4]</sup>.

本文首先针对无线网络端到端链路的研究,引出了无线网络中能效与频效权衡的问题.在此基础上给出了无线多跳网络中移动 Ad Hoc 的能效和频效模型并进行了分析.之后结合两个模型建立了能效和频效权衡优化的多目标优化问题,并利用多目标理论中加权和的方法将多目标问题转化为单目标问题并提出资源效率的概念.最后提出了 ESTROA 算法,并在吞吐量、能耗和资源效率等性能指标上与对比算法进行了对比分析,从而验证了算法的有效性.

## 2 问题阐述

### 2.1 频效与能效的权衡

考虑一条点到点的通信链路,设  $G$  是发送端与接收端信道增益, $P$  是发送功率, $P_c$  是电路设备功率损耗, $\sigma^2$  是噪声功率(高斯加性白噪声),该链路能效和频效可表示为:

$$\begin{cases} f_{SE}(P) = \log\left(1 + \frac{GP}{\sigma^2}\right) \\ f_{EE}(P) = \frac{f_{SE}(P)}{P + P_c} = \log\left(1 + \frac{GP}{\sigma^2}\right) / (P + P_c) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f_{SE}(P)$  表示频效,单位为 bit/Hz; $f_{EE}(P)$  表示频能效,单位为 bit/J/Hz.

则可建立如下的多目标优化模型:

$$\begin{cases} \max_P \{f_{SE}(P), f_{EE}(P)\} \\ 0 \leq P \leq P_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

不同于单目标优化,常多目标优化问题通常并不存在全局最优解.因此,多目标问题的最优解通常是满足预设条件的一些解的集合.最常用的最优解为 Pareto 最优解,Pareto 最优解可定义为如下<sup>[11,25]</sup>.

**定义 1** 设点  $P_0 \in (0, P_{\max}]$ ,如不存在点  $P \in (0, P_{\max}]$  使得  $f_{SE}(P) \geq f_{SE}(P_0)$  且  $f_{EE}(P) \geq f_{EE}(P_0)$ ,而且  $f_{SE}(P) > f_{SE}(P_0)$  与  $f_{EE}(P) > f_{EE}(P_0)$  至少一个满足时,则

称  $P_0 \in (0, P_{\max}]$  为该多目标问题的一个 Pareto 最优解.

**定义 2** 设点  $P_0 \in (0, P_{\max}]$ ,如不存在点  $P \in (0, P_{\max}]$  使得  $f_{SE}(P) > f_{SE}(P_0)$  与  $f_{EE}(P) > f_{EE}(P_0)$  都满足时,则称  $P_0 \in (0, P_{\max}]$  为该多目标问题的一个弱 Pareto 最优解.

**定义 3** Pareto 最优解集是所有 Pareto 最优解的集合.

**定义 4** 有效与无效:设点  $P_0 \in (0, P_{\max}]$ ,如果不存在点  $P \in (0, P_{\max}]$  使得  $f_{SE}(P) \geq f_{SE}(P_0)$  且  $f_{EE}(P) \geq f_{EE}(P_0)$  而且  $f_{SE}(P) > f_{SE}(P_0)$  与  $f_{EE}(P) > f_{EE}(P_0)$  至少一个满足时,则称  $P_0$  是有效的,否则无效.

通过上述定义可得一个点如果是弱 Pareto 最优解那么它一定是 Pareto 最优解,但是一个解是 Pareto 最优解那么它不一定是弱 Pareto 最优解.换句话说,在本文中一个点是 Pareto 最优解且有效的前提是不存在另外一个点能在不影响频效(能效)的情况下改善能效(频效).为了得到多目标问题的 Pareto 解,首先总结下式(1)中表示的能效和频效的性质.

(1)  $f_{SE}(P)$  是严格递增的.

(2) 存  $f_{EE}(P)$  在一点  $P^* \in [0, \infty)$ ,使得  $f_{EE}(P)$  在区间  $P \in [0, P^*)$  递增,在区间  $P \in [P^*, \infty)$  上递减即在  $P^*$  处达到最大.

证明:性质 1 显然成立,下面证明性质 2.

$$f'_{EE}(P) = \beta(P) / ((1 + \rho P)(P + P_c)^2)$$

$$\beta(P) = -(1 + \rho P) \log(1 + \rho P) + \rho(P + P_c)$$

因为  $\beta'(P) \leq 0$ ,故  $\beta(P)$  随  $P$  增加而递减.设  $\beta(P^*) = 0$  即  $f'_{EE}(P^*) = 0$ ,因此可得性质 2. 证毕

能效(Energy Efficiency, EE)和频效(Spectrum Efficiency, SE)的关系如图 1 所示.

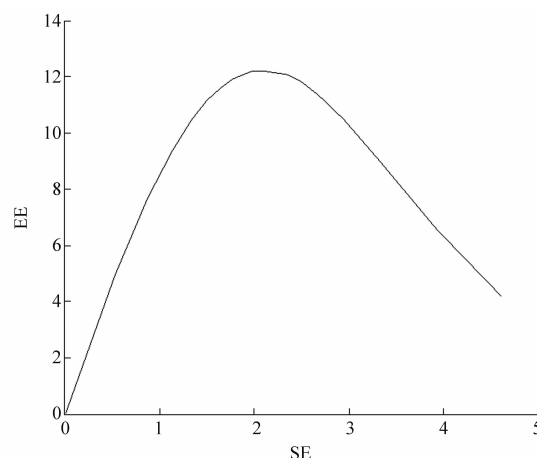


图1 能效和频效关系

由图 1 可清楚发现通常并不存在一种策略可以使得频效和能效同时达到最优,能效和频效间往往存在权衡(tradeoff)问题.因此,单单采取能效或频效这种单

目标优化的形式具有一定的局限性. 本文运用多目标优化理论, 将多目标问题转化成单目标问题, 再对各自网络进行优化.

## 2.2 联合能效与频效的优化模型

与固定网络和蜂窝网络不同, 移动 Ad Hoc 网络是一种不依赖任何基础设施的移动网络. 该网络具有无中心结构, 拓扑随时变化, 能量和带宽有限等特征. 如图 2 所示, 移动 Ad Hoc 网络是由一组移动节点组成, 这些节点不依赖已经存在的基础设施的支持就可以建立节点与节点之间的链路. 移动 Ad Hoc 网络所有节点地位平等, 可自由移动, 由于不需要中心控制所以具备很强鲁棒性. 但又由于网络的能量和带宽受限问题, 因此提高网络能效和频效就至关重要.

假设移动 Ad Hoc 网络有  $n$  个节点, 则节点发送功率为:

$$P_{ij} = c_{ij} \times f_{ij} \quad (3)$$

其中,  $c_{ij} = \alpha \times \beta' \times d_{ij}^n$ ,  $\beta' = \beta \times (d_{ij}^{avg}/d_{ij}^{(0)})$ ,  $d_{ij}^{avg}$  表示在时间间隔  $T = [t_0, t_1, \dots, t_k]$  内节点间的平均距离,  $d_{ij}^{(0)}$  为网络起始时刻节点间距离,  $\beta$  是一个通常与静态网络两节点间距离有关的一个系数,  $f_{ij}$  为数据流传输速率.

节点的接收功率为:

$$Q_{ij} = \gamma \times f_{ij} \quad (4)$$

其中,  $\gamma$  表示节点接收 1bit 数据所消耗的能量.

则公式(1)中的网络能效  $f_{EE}(P)$  和频效  $f_{SE}(P)$  表示为:

$$\begin{cases} f_{SE}(P) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) \\ f_{EE}(P) = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right)}{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} T_{ij} \times (P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2)} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $l$  表示网络路径数,  $h_i$  表示第条路径的跳数,  $G$  表示接收端与发送端间的信道增益.

联合能效和频效的多目标最优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \text{Max}_P \{ f_{SE}(P), f_{EE}(P) \} \\ \text{s. t.} & P_{ij} \leq P_{\max} \\ & T_{ij} \times Q_{ij} \leq \delta \times E_{resj} \\ & T_{ij} \times P_{ij} \leq E_{resi} \end{cases} \quad (6)$$

如何获得等式(6)的最优解是解决联合能效和频效的多目标路由优化问题.

## 3 联合优化路由算法

针对移动 Ad Hoc 网络, 下面讨论联合频效和能效的多目标优化路由算法.

### 3.1 联合频效能效的最优解

引理 1  $f_{SE}(P)$  随自变量  $P \in [0, \infty)$  递增.

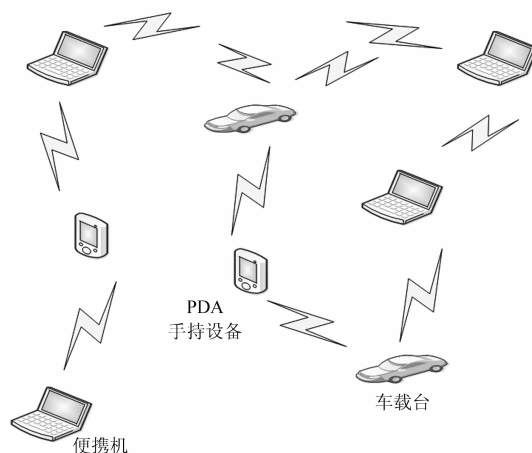


图2 移动Ad Hoc网络结构

引理 2 存在一点  $P^* \in [0, \infty)$ , 使得  $f_{EE}(P)$  在区间  $P \in [0, P^*)$  递增, 在区间  $P \in [P^*, \infty)$  上递减.

证明:

$$\begin{aligned} f'_{SE}(P) &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{T_{ij}(P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)}{\ln^2(\sigma^2 + GP_{ij})} - \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) T_{ij} \\ &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{T_{ij}(P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)}{T_{ij}^2(P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)^2} \\ &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{(P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)G - \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) \ln^2(\sigma^2 + GP_{ij})}{T_{ij}(P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)^2 \ln^2(\sigma^2 + GP_{ij})} \\ &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{\alpha(P_{ij})}{T_{ij}(P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)^2 \ln^2(\sigma^2 + GP_{ij})} \alpha(P_{ij}) \\ &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} (P_{ij} + \gamma f_{ij} + \sigma^2)G - \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) \ln^2(\sigma^2 + GP_{ij}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha'(P_{ij}) &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} G - \ln^2 \left[ G \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) + \right. \\ &\quad \left. (\sigma^2 + GP_{ij}) \frac{G}{\ln^2(\sigma^2 + GP_{ij})} \right] \\ &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} - \ln^2 \left( \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) G \right) < 0 \end{aligned}$$

又知  $\lim_{P_{ij} \rightarrow 0} \alpha(P_{ij}) > 0$  且  $\lim_{P_{ij} \rightarrow +\infty} \alpha(P_{ij}) < 0$

设  $\alpha(P^*) = 0$ , 则  $f'_{SE}(P)$  在  $P \in [0, P^*)$  上大于 0, 在  $P \in [P^*, \infty)$  小于 0. 引理 1 和引理 2 得证. 证毕

通过引理 1、引理 2 和定义 1, 则得到如下定理 1.

定理 1 等式(6)中的多目标问题  $\max \{ f_{SE}, f_{EE} \}$  的 Pareto 最优解 ( $P_{\text{pos}}$ ) 为:

$$P^{\text{pos}} = \left\{ \left\{ P \mid P^* \leq P \leq P_{\max} \right\} \quad \text{if } P^* \leq P_{\max} \left\{ P \mid P = P_{\max} \right\} \right. \quad (7)$$

直接求解等式(6)是困难的, 下面通过多目标最优化理论来获得等式(7)所表示的等式(6)的 Pareto 最优解.

为了获得等式(6)的 Pareto 最优解,等式(6)可变换为:

$$\begin{cases} \max & \omega f_{SE} + (1 - \omega) f_{EE} \\ \text{s. t.} & P_{ij} \leq P_{\max} \\ & T_{ij} \times Q_{ij} \leq \delta \times E_{resj} \\ & T_{ij} \times P_{ij} \leq E_{resi} \\ & 0 \leq \omega \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

**推论 1** 等式(8)中单目标问题的最优解  $P^{opt}$  就是等式(6)中多目标问题的一个 Pareto 最优解.

证明:设  $N$  为约束条件中不等式  $g_n(P_{ij})$  的个数,则可得如下等式:

$$\omega_1 = 1 - \omega_2; f_1(\cdot) = f_{SE}(\cdot); f_2(\cdot) = f_{EE}(\cdot) \\ \lambda_n g_n(P^{opt}) = 0 \quad (9)$$

根据(9),得到如下等式:

$$\nabla \left( \sum_{k=1}^2 \omega_k f_k(P^{opt}) \right) - \sum_{n=1}^N \lambda_n g_n(P^{opt}) = 0 \quad (10)$$

其中,  $\lambda_n$  是拉格朗日系数.

根据等式(10),得到等式(8)中的单目标问题的库恩塔克条件(K-T条件)为:

$$\left( \sum_{k=1}^2 \omega_k \nabla f_k(P^{opt}) \right) - \sum_{n=1}^N \lambda_n g_n(P^{opt}) = 0$$

由于  $f_1, f_2$  的凹性,所以等式(6)中多目标问题的 Pareto 最优解与满足 K-T 条件互为充分必要条件. 可知单等式(8)中目标问题的解包含在多目标问题的 Pareto 最优解集中. 证毕

**推论 2** 以下条件满足其一时,  $\omega f_{SE} + (1 - \omega) f_{EE}$  在  $P \in [0, \infty)$  上递增:

$$\frac{1 - \omega}{2\omega T_{ij}} - \frac{\sigma^2}{G} \leq 0 \quad (11)$$

$$2\omega GT_{ij}(f_{ij}\gamma + \sigma^2) + G(1 - \omega) - 2\omega T_{ij}\sigma^2 - \\ (1 - \omega) \ln 2 G \log_2 \left( \frac{G(1 - \omega)}{2\omega T_{ij}} \right) \geq 0 \quad (12)$$

证明:设

$$L = \omega \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) + \\ (1 - \omega) \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right)}{T_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2)}$$

则得到:

$$L' = \omega \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{G}{\ln 2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) \sigma^2} + (1 - \omega) \times \\ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{T_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2) G}{\ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij})} - T_{ij} \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) \\ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \frac{\omega G}{\ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij})} + (1 - \omega) \times$$

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \left[ \frac{G}{T_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2) \ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij})} - \right. \\ \left. \frac{\log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right)}{T_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2)^2} \right] \\ = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{h_i} \left[ \omega GT_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2)^2 + (1 - \omega) G(P_{ij} + \right. \\ \left. \gamma \times f_{ij} + \sigma^2) - (1 - \omega) \ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij}) \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) \right] / \\ \left[ \ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij}) T_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2)^2 \right] \\ \triangleq \\ \beta = \omega GT_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2)^2 + (1 - \omega) G(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} \\ + \sigma^2) - (1 - \omega) \ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij}) \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right)$$

则得到等式:

$$\beta' = 2\omega GT_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2) + G(1 - \omega) - \\ (1 - \omega) \ln 2 G \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right) - G(1 - \omega) \\ = 2\omega GT_{ij}(P_{ij} + \gamma \times f_{ij} + \sigma^2) \\ - (1 - \omega) \ln 2 G \log_2 \left( 1 + \frac{GP_{ij}}{\sigma^2} \right)$$

且有

$$\beta'' = 2\omega GT_{ij} - (1 - \omega) \ln 2 G \frac{G}{\ln 2 (\sigma^2 + GP_{ij})} \\ = 2\omega GT_{ij} - \frac{(1 - \omega) G^2}{\sigma^2 + GP_{ij}}$$

令  $\beta''(P_{ij}^0) = 0$ , 则  $P_{ij}^0 = \frac{1 - \omega}{2\omega T_{ij}} - \frac{\sigma^2}{G}$ . 当  $P_{ij}^0 = \frac{1 - \omega}{2\omega T_{ij}} - \frac{\sigma^2}{G} \leq 0$  时, 在  $P \in [0, \infty)$  上,  $\beta'' \geq 0$ .  $\beta'$  递增且  $\beta'(0) > 0$  和  $\beta(0) > 0$ , 则可得  $\beta$  在  $P \in [0, \infty)$  上递增且大于 0. 因此,  $L$  在  $P \in [0, \infty)$  上递增. 式子(11)得证.

当  $P_{ij}^0 = \frac{1 - \omega}{2\omega T_{ij}} - \frac{\sigma^2}{G} \geq 0$  时,  $\beta''$  在  $(0, P_{ij}^0)$  小于 0, 在  $(P_{ij}^0, \infty)$  大于 0. 因此,  $\beta'$  在  $(0, P_{ij}^0)$  递减 0, 在  $(P_{ij}^0, \infty)$  上递增. 将  $P_{ij}^0 = \frac{1 - \omega}{2\omega T_{ij}} - \frac{\sigma^2}{G}$  代入  $\beta'$  中, 如果  $\beta'(P_{ij}^0) \geq 0$ , 则  $\beta'$  在  $(0, \infty)$  上大于 0. 因此, 可得  $\beta$  在  $P \in [0, \infty)$  上递增且大于 0. 则  $L$  在  $P \in [0, \infty)$  上递增. 等式(12)得证. 证毕

**推论 3** 设

$$\max \frac{\cos \theta}{\cos \theta + \sin \theta} f_{SE}(P) + \frac{\sin \theta}{\cos \theta + \sin \theta} f_{EE}(P) \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

当  $\omega = \cos \theta / (\sin \theta + \cos \theta)$  时, 该问题和等式(8)所表示的问题具有相同 Pareto 最优解, 即线性加权问题可以转化为三角线性加权问题, 对于一个  $\theta$  值可以求出一个 Pareto 最优解. 并且可知当 Pareto 曲线为凹时,  $\theta \in [0, \pi/2]$  可以覆盖整个曲线. 从而可得当 Pareto 曲线为凹时, 对于等式(8)所表示的问题, 时可以覆盖整个曲线.

**推论 4** 当 Pareto 曲线为凹时,线性问题可以转换为三角线性加权问题后求解. 对于一个固定的  $\theta$ , Pareto 最优解就是  $F = f_{SE}(P) \cos\theta + f_{EE}(P) \sin\theta$  与  $f_{SE}(P)$  和  $f_{EE}(P)$  确定的曲线在  $f_{SE} - f_{EE}$  坐标系的切点.

证明: 设  $F = f_{SE}(P) \cos\theta + f_{EE}(P) \sin\theta$ , 则等式 (6) 中多目标问题可变为推论 3 中三角线性加权问题, 求解推论 3 中的问题等同于求解  $F / (\cos\theta + \sin\theta)$  最大值. 从而由  $F = f_{SE}(P) \cos\theta + f_{EE}(P) \sin\theta$  可以得到:

$$\begin{aligned} f_{EE} &= -\frac{\cos\theta}{\sin\theta} f_{SE} + \frac{F}{\sin\theta} \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}] \\ &= -\cot\theta f_{SE} + \frac{F}{\sin\theta} \end{aligned}$$

则在  $f_{SE} \sim f_{EE}$  坐标系中, 上面等式的意义就是斜率一定 (给定) 时, 在该曲线范围内寻找截距  $f_{SE}$  的最大值. 显然, 只有在直线与凹曲线相切时, 截距达到最大. 那么切点便是 Pareto 最优解. 证毕

从而通过以上推导, 可以获得等式 (7) 所表示的等式 (6) 多目标最优化模型的 Pareto 最优解.

### 3.2 路由优化算法

上面已经推导了关于能效与频效权衡的多目标路由优化模型 (如等式 (6) 所示) 的 Pareto 最优解求解过程, 下面提出联合考虑能效与频效折中的最优路由算法 (Energy efficiency and Spectrum efficiency-based Tradeoff optimization Routing Algorithm, ESTORA). ESTORA 算法流程如图 3 所示, ESTORA 算法具体步骤如下:

步骤 1: 初始化网络状态、路由参数, 分析流量请求, 将请求按照业务大小从大到小进行排序, 并生成请求队列  $R$ ;

步骤 2: 从队列  $R$  中取出流量请求, 进行处理;

步骤 3: 如果目的节点在源节点覆盖范围内, 则完成该请求的寻路过程, 同时更新相应的链路状态信息跳转至步骤 5; 若该节点为孤立节点, 则跳转至步骤 5, 否则计算功率能量比并以此采用 Dijkstra 算法进行选路以此来选择资源效率较高的路径; 如果存在权重相同的情况, 则随机选择其中一条路径;

步骤 4: 若存在满足 QoS 的路径, 则完成该请求的寻路过程, 同时更新相应的链路状态信息, 否则寻路失败, 链路状态信息不做任何改变;

步骤 5: 将该业务请求从请求队列中删除, 并判断  $R$  是否为空. 若为空, 则程序结束, 否则跳转到步骤 3.

## 4 仿真分析

本节对 ESTORA 算法进行仿真分析, 通过一系列仿真实验来验证所提出的 ESTORA 算法. 最短优先路径路由算法 (Shortest Path First routing algorithm, SPF) 和基于节点剩余能量路由算法 (Based on the Remaining Energy routing al-

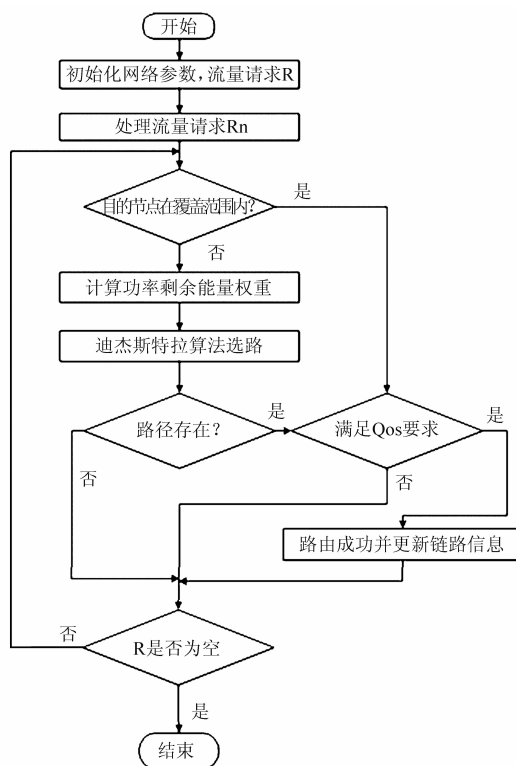


图3 ESTORA流程图

gorithm, BRE) 被报道为两种重要的路由算法; SPF 算法从源节点到目的节点进行选路时, 以节点间距离为权重, 采用 Dijkstra 算法, 以起始点为中心向外层层扩展, 直到扩展到终点为止, 从而完成选路; BRE 算法让网络中剩余能量多的节点来转发报文, 保护网络中能量较小的节点, 提高网络利用率, 延长网络的整体寿命, 改善网络能效. 为了验证 ESTORA 算法, 本文对比分析三种算法的性能.

### 4.1 仿真环境以及参数

仿真平台为 Matlab2012a, 仿真实验使用随机产生的网络拓扑和随机产生的流量请求来进行验证分析. 网络拓扑中节点数为 50 个, 对应最大通信半径为 600m, 任意两个节点在另外一个节点的覆盖范围内即可形成链路, 且两节点之间形成的链路是双向的; 仿真场景中节点的移动模型为随机行走模型; 业务带宽范围 1M-2M; 网络仿真的区域大小为 1200m × 1200m. 网络仿真具体参数如表 1 所示.

表 1 网络仿真参数

| 参数       | 参数设定值                       |
|----------|-----------------------------|
| $\alpha$ | 0.00045J/b                  |
| $\beta$  | 0.0000001J/b/m <sup>4</sup> |
| $\delta$ | 0.9                         |
| $\gamma$ | 0.000135J/b                 |
| $f_{ij}$ | 2Mbps                       |
| $n$      | 4                           |
| $\omega$ | 0.5                         |

## 4.2 仿真结果及分析

本节对比分析三种算法失败次数、能耗、吞吐量、能效、资源效率以及网络流质量等,同时分析 ESTROA 随节点速度变化时资源效率的变化情况.

### A. 寻路失败次数

图 4 表示了三种算法寻路失败次数随请求数目的变化情况,其中失败率是网络没有寻找到路径的业务数与总业务数的比值.从图 4 可看出,ESTROA 和 BRE 都可以达到较好的寻路成功率,并且 ESTROA 稍微优于 BRE 算法,而 SPF 失败率最大.这是因为 SPF 只是基于最短路径进行选路,很容易造成路径过于集中

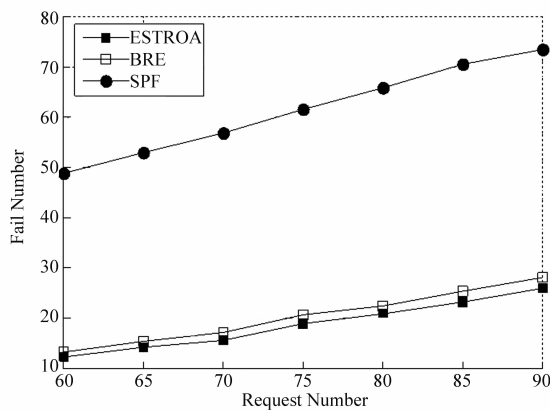


图4 失败次数

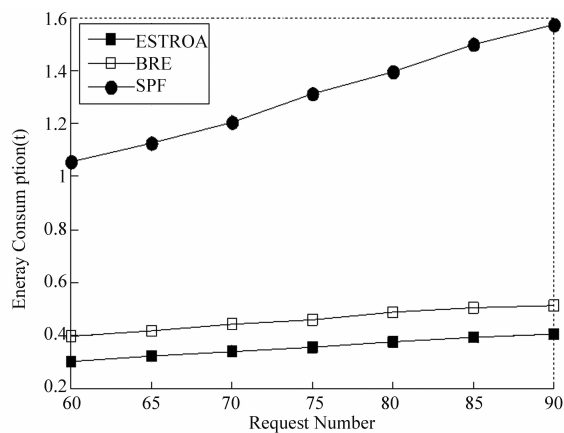


图5 网络能耗

而造成节点过早死亡,从而影响整个网络的寻路情况;而 ESTORA 和 BRE 算法在进行选路时都避免了选路过于集中的问题,能拥有较高的寻路成功率.

### B. 网络能效

图 5 表示了三种算法能耗随网络请求数目的变化情况.图 5 表明,ESTROA 的能耗最小,BRE 能耗居中,而 SPF 能耗最大;随着请求数目的增加,三种算法能耗都会有所增加.从图 5 也可以看出,ESTROA 相比 BRE 而言,能耗减少了大约一半.这说明 ESTROA 算法没有以牺牲能耗为代价去换取其他指标的优化,可见 ES-

TROA 算法能以较低的网络能耗获得具有较好的性能.

### C. 网络吞吐量

图 6 表示了三种算法网络吞吐量随请求数目的变化情况,其中网络吞吐量通过网络中所有成功传输的请求大小进行衡量.图 6 表明,ESTROA 吞吐量最大,其次是 BRE,SPF 吞吐量最低.这是因为 SPF 的寻路失败率最高,其网络吞吐量自然是最低的,这也是由于选路过于集中的原因引起的;而 ESTROA 和 BRE 算法在寻路失败率上很接近,则它们的网络吞吐量也十分接近;相比之下,ESTROA 稍优于 BRE 算法.

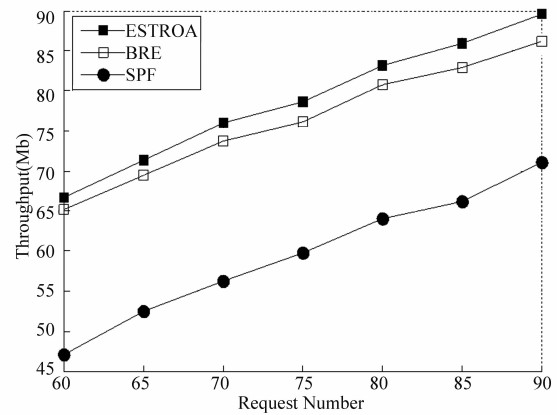


图6 网络吞吐量

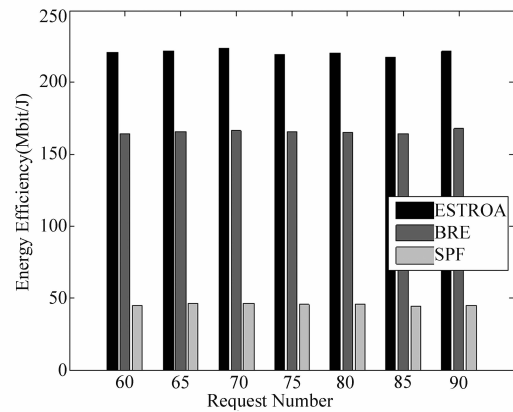


图7 网络能效

### D. 网络能效

图 7 表示了三种算法网络能效 (bit/J) 随请求数目的变化情况.图 7 表明,SPF 具有最低的网络能效,其次是 BRE,ESTROA 网络能效最大.这是因为 SPF 吞吐量最低和能耗较高,则其能效最低;ESTROA 在吞吐量最大和能耗最低,则其能效最高.从图 7 也可以看到,ESTROA 能效相对于 BRE 提高了大约 65%,这也说明了功率能量比权重所选路径的能效更优.图 7 也表明,随着请求数目的增多,三种算法的网络能效有些波动,但是整体都维持在一个固定的水平.

### E. 网络资源效率

图 8 表示了三种算法网络资源效率随请求数目的

变化情况. 资源效率是为了频效与能效平衡而提出的一个度量, 该度量结合了网络能效和频效两个方面去反应网络的情况. 图 8 表明, ESTROA 在资源效率方面要由于其他两个算法, 分别提高了大约 27% 和 160%; 随着请求数目的增多, 三种算法的资源效率都呈现递增趋势. 图 8 也表明, 在进行选路时结合功率和能量两个方面设计权重更适合对于网络频效和能效的整体优化, 而单单从一个方面进行考虑往往无法满足多目标的优化需求.

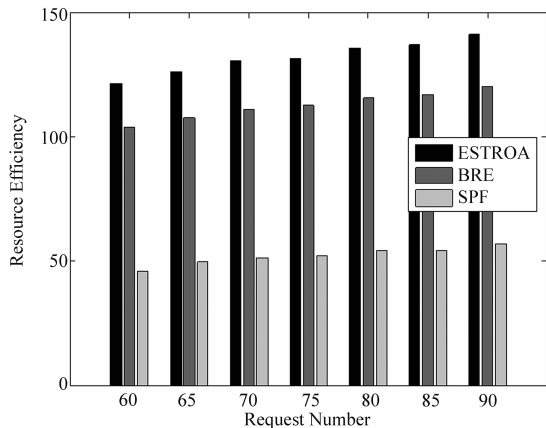


图8 网络资源效率

### F. 流质量性能

假设有  $Z$  个数据流在移动多跳 Ad Hoc 网络中. 数据流共有  $K$  类 ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_k$ ); 每一类别有 3 个参数进行描述分别是 ( $D_k, W_k, \lambda_k$ ), 其中  $D_k$  表示  $C_k$  中数据流的最大延迟,  $W_k$  表示中数据流平均资源速率,  $\lambda_k$  表示中数据流的质量影响系数; 每一类中的所有流具有相同的影响系数; 并且这个质量影响系数可通过在解码数据包时候衡量平均失真减少量 (average distortion reduction). 此外, 对于, 在链路  $l$  上最大传输速率表示为  $T_{l,k}$ , 这个值取决于传出功率. 那么如果采用基于轮寻的时间分配, 数据流的在链路上有效传输速率为. 其中反应了数据流的在链路上的时间分配比例.

设,  $x_z$  表示对于数据流的调度. 那么表示运用时数据流端到端延迟. 通过前面的分析. 可表示为:

$$D_z(X) = \sum_{l: t_{l,z} > 0} \frac{L_k}{T_{l,k} t_{l,z}} \quad z \in C_k \quad (13)$$

其中,  $L_k$  表示第  $k$  类数据流的平均数据包长度.

因此, 从源节点  $n$  接收到的数据流质量  $Q_n$  可表示为:

$$Q_n(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^{N_{n,k}} \lambda_k W_k I(D_z(X) \leq D_k) \quad (14)$$

其中,  $N_{n,k}$  表示从节点发出的数据流中第类数据流的个数.  $I(\cdot)$  表示一个指数函数.

那么网络的平均流质量可表示为:

$$\bar{Q} \triangleq \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{N} \quad (15)$$

网络的平均流质量可进一步表示为:

$$Q_n(X) = \sum_{l=1}^K \sum_{z=1}^{N_{n,k}} \lambda_k W_k I(H_z(X) \leq H_{k,max}) \quad (16)$$

其中,  $H_{k,max}$  表示第类数据流的允许的最大跳数,  $H_z(X)$  表示数据流的跳数.

图 9 表示三种算法在流质量方面的对比情况. 图 9 表明 ESTROA 的流质量优于 BRE 和 SPF 算法. 这是因为 SPF 选路过于集中因而会造成网络链路利用不均匀, 其网络质量也就最差; 而 ESTROA 和 BRE 的网络链路利用率优于 SPF 算法, 二者的网络质量更好. 图 9 也表明, ESTROA 要稍优于 BRE 算法, 这也说明 ESTROA 所选路径在延迟方面更低一些; 此外随着节点数目的增多, 三种算法的流质量都有所增加, 不过 ESTROA 和 BRE 的增加幅度更大一些, 也就是说明这两个算法在请求数目增多时候, 也能很好地保证网络质量.

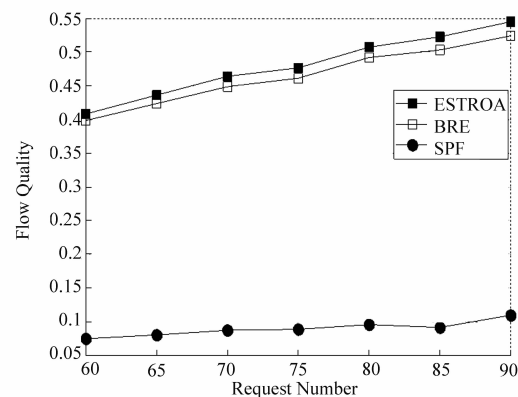


图9 网络流质量

### G. 节点移动速度对资源效率的影响

图 10 表示了 ESTROA 算法中节点移动速度 (从 5m/s 到 20m/s 之间变化) 不断变化时网络资源效率的变化情况. 图 10 表明, 随着节点移动速度的增加, 网络

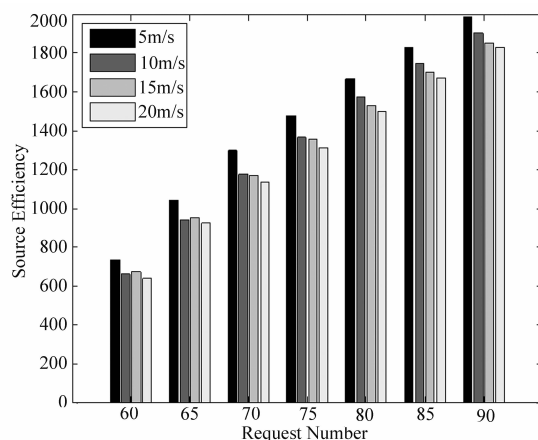


图10 节点移动速度对资源效率的影响

拓扑变化越大,网络资源效率会出现下降的趋势,但在较高移动速度时 ESTORA 仍表现出较好的性能.从图 10 也可以看到,随着请求数目的增多,网络资源效率呈现递增的趋势,这说明 ESTORA 合理的路径选择并没有使得网络效率随着请求的增多而有所降低,从而能很好地降低了网络拥塞,提高了网络性能.

## 5 结束语

本文研究了研究了无线多跳网络中移动 Ad Hoc 网络能效与频效权衡折中资源效率联合优化路由算法.首先通过对端到端链路分析引出了无线网络中能效与频效权衡的多目标优化问题,随后给出了相关定义和联合考虑移动 Ad Hoc 能效和频效的优化模型,并利用多目标理论中加权求和方法将多目标问题转化为单目标问题,最后结合理论分析,提出了一种联合考虑网络能效和频效的路由优化算法.仿真结果表明,本文所提出的算法可行和有效的.

### 参考文献

- [1] Fettweis G, Zimmermann E. ICT energy consumption-trends and challenges [A]. Proc. the International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications [C]. 2008. 1-4.
- [2] Hooper A. Green computing [J]. Communications of the ACM, 2008, 51(10): 11-13.
- [3] Onireti O, Heliot F, Imran M. On the energy efficiency-spectral efficiency trade-off in the uplink of CoMP system [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2): 556-561.
- [4] Deng L, Rui Y, Cheng P, et al. A unified energy efficiency and spectral efficiency tradeoff metric in wireless networks [J]. IEEE Communication Letters, 2013, 17(1): 55-58.
- [5] Jiang D, Xu Z, Li W, et al. Network coding-based energy-efficient multicast routing algorithm for multi-hop wireless networks [J]. Journal of Systems and Software, 2015, 104: 152-165.
- [6] Jiang D, Yao C, Xu Z, et al. Multi-scale anomaly detection for high-speed network traffic [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2015, 26(3): 308-317.
- [7] Jiang D, Xu Z, Liu J, et al. An optimization-based robust routing algorithm to energy-efficient networks for cloud computing [J]. Telecommunication Systems, 2016, 63(1): 1-10.
- [8] Dimitriou N, Polydoros A, Barnawi A. Cooperative path establishment for robust connectivity in mobile ad-hoc networks [J]. Proc. 2013 20th International Conference on Telecommunications (ICT), 2013: 1-5.
- [9] Jiang D, Xu Z, Zhang P, et al. A transform domain-based anomaly detection approach to network-wide traffic [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 40(2): 292-306.
- [10] Rizzelli G, Morea A, Tornatore M, et al. Energy efficient traffic-aware design of on-off multi-Layer translucent optical networks [J]. Computer Networks, 2012, 56(10): 2443-2455.
- [11] Marler R, Arora J. Survey of multi-objective optimization methods for engineering [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6): 369-395.
- [12] 蒋定德, 王兴伟, 郭磊, 等. 大尺度 IP 骨干网络流量矩阵估计方法研究. 电子学报, 2011, 39(4): 763-771.  
Jiang Ding-de, Wang Xing-wei, Guo Lei, et al. Approach of traffic matrix estimation in large-scale IP backbone networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 763-771.
- [13] Jiang D, Xu Z, Nie L, et al. An approximate approach to end-to-end traffic in communication networks. Chinese Journal of Electronics, 2012, 21(4): 705-710.
- [14] Baker T, Al-Dawsari B, Tawfik H, et al. GreeDi: An energy efficient routing algorithm for big data on cloud [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 35(4): 83-96.
- [15] Li Q, Xu M, Yang Y, et al. Safe and practical energy-efficient detour routing in IP networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(6): 1925-1937.
- [16] Agrawal H, Johri P, Kumar A. Emerging trends in energy efficient routing protocols [A]. Proc. the International Conference on Computing, Communication and Automation [C]. 2015. 523-528.
- [17] Zuo J, Dong C, Nguyen H, et al. Cross-layer aided energy-efficient opportunistic routing in Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 522-535.
- [18] Kaiser A, Boc M. Energy-efficient routing in IPv6 home networks [A]. Proc. the 23rd International Conference on Computer Communication and Networks [C]. 2014. 1-8.
- [19] Sarker A, Fatema N, Binti B, et al. Performance evaluation of energy efficient routing algorithm for ad-hoc network [A]. Proc. the International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology [C]. 2014. 1-6.
- [20] Ba-Hutair M, Saad M. A spectrum-efficient routing protocol for multi-hop 802.11 networks [A]. Proc. the International Conference on Information and Communication Technology Research [C]. 2015. 242-245.
- [21] Wang Y, Sheng M, Lui K, et al. Spectrum-efficient routing algorithms with successive interference cancellation in multi-hop wireless networks [A]. Proc. IEEE Wireless

- Communications and Networking Conference [C]. 2014. 2492 – 2497.
- [22] Shah G, Alagoz F, Fadel E, et al. A spectrum-aware clustering for efficient multimedia routing in cognitive radio sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3369 – 3380.
- [23] 商云飞, 徐明伟, 李丹. 联网路由设备与协议节能研究综述. 电子学报, 2012, 40(11): 2290 – 2297.  
Shang Yun-fei, XU Ming-wei, Li Dan. Research on energy-saving routing devices and protocols in the internet [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(11): 2290 – 2297.
- [24] 刘权, 王晓东. MR2-GRADE: 一种基于梯度值的无线传感器网络高效多径干扰避免路由协议. 电子学报, 2011, 39(3A): 147 – 152.  
Liu Quan, Wang Xiao-dong. MR2-GRADE: a high energy efficiency and interference-free multipath routing protocol based on grade for wireless sensor network [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3A): 147 – 152.
- [25] Kasprzak E, Lewis K. Pareto analysis in multi-objective optimization using the collinearity theorem and scaling method [J]. Structural and Multi-disciplinary Optimization, 2001, 22(2): 208 – 218.

## 作者简介



**何林波** 男, 1978 年 1 月生于四川遂宁, 硕士, 讲师, 主要研究领域为网络通信、移动互联网、无线网络, SDN 等, 为本文通讯作者.  
E-mail: hlb@cuit.edu.cn



**蒋定德** 男, 1974 年 2 月生于四川德阳, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络测量、建模与优化、软件定义网络、绿色通信等, 为本文通讯作者.  
E-mail: jiangdingde@ise.neu.edu.cn

**仲维佳** 男, 1990 年 19 月生于辽宁沈阳, 硕士研究生, 主要研究方向为网络测量、绿色通信.