

## 无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界

王琪<sup>1,2</sup>, Katia Jaffrès-Runser<sup>3</sup>, 孙毅<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 张珺<sup>4</sup>, 笪斌<sup>5</sup>, 李忠诚<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 计算机与控制学院, 北京 100049;  
3. 法国图卢兹大学 国立综合理工学院信息技术实验室, 法国 图卢兹 31061;  
4. 内蒙古大学 计算机学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 5. 理光软件研究所, 北京 100044)

**摘要:** 在无线 ad hoc 网络中, 基本性能边界对路由算法和资源分配协议的分析 and 评价具有重要的意义。对无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界进行了研究, 包括理论上最优的性能边界和实际可以得到的性能边界。提出了一种稳定状态(steady state)下的网络基本性能指标分析模型。该模型考虑了无线网络广播特性和无线信道干扰, 可同时分析多个性能指标, 包括: 吞吐量、端到端延迟和能量消耗。基于该模型, 针对 ad hoc 网络中最常见的多流一单/双中继拓扑分析基本性能指标, 求解多目标优化问题得到基本性能边界。仿真结果验证了模型的准确性, 均方根误差小于  $10^{-3}$  量级。

**关键词:** 基本性能边界; 性能评价; 多目标优化; 无线 ad hoc 网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## Fundamental performance bounds for multi-performance criteria in wireless ad hoc networks

WANG Qi<sup>1,2</sup>, Katia Jaffrès-Runser<sup>3</sup>, SUN Yi<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>4</sup>, DA Bin<sup>5</sup>, LI Zhong-cheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. University of Toulouse, IRIT / ENSEEIHT, Toulouse 31031, France;  
4. College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 5. Ricoh Software Research Center, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In wireless ad hoc networks, the fundamental performance bounds could provide insight to improve network routing or resource allocation protocol as well as an upper bound against which to compare the performance of existing protocols. This work addresses the problem of deriving fundamental performance bounds including Pareto optimal upper and lower bounds for wireless ad hoc networks when multiple criteria including throughput, delay and energy are of interest. It is based on a performance evaluation framework composed of a broadcast and interference-limited network model. Fundamental performance bounds derived for a 1-relay and a 2-relay with multi-flow topologies are assessed through simulations. The model is validated with highest RMSE lower than  $10^{-3}$ .

**Key words:** fundamental performance bounds; performance evaluation; multi-objective optimization; wireless ad hoc networks

收稿日期: 2014-08-17; 修回日期: 2015-01-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315806); 国家自然科学基金资助项目(61379133, 61100176); 江苏省未来网络前瞻性研究基金资助项目(BY2013095-1-11, BY2013095-1-13); 国家文化科技提升计划项目基金资助项目(201201-02); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2015MS0601); 理光软件研究所(北京)有限公司基金资助项目

**Foundation Items:** The National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB315806); The National Natural Science Foundation of China(61379133, 61100176); The Prospective Research Project of Jiangsu Province(BY2013095-1-11, BY2013095-1-13); The National Culture Promotion Project(201201-02); The Natural Science Foundation of Inner Mongolia(2015MS0601); Ricoh Software Research Center, Beijing

## 1 引言

无线 ad hoc 网络由于其自组织、无需基础设施和易于部署等特点,常被用于复杂和困难环境。因此,在设计相关路由算法和资源分配协议时,通常需要考虑多个性能指标,包括:网络容量<sup>[1,2]</sup>、吞吐量<sup>[2]</sup>、延迟<sup>[3]</sup>和能量消耗<sup>[4]</sup>等。了解网络的基本性能边界,包括性能上界和性能边界,对路由算法和资源分配协议的分析 and 评价具有重要意义。性能上界是理论上可以达到的最优性能;性能边界是采用某种优化的路由算法或协议可以达到的实际性能。通过比较性能边界与性能上界之间的差距,可以评价现有路由算法或资源分配协议的性能,指导设计优化的路由算法或协议。

对无线 ad hoc 网络基本性能边界的研究始于对网络容量的研究<sup>[2,5]</sup>。Gupta 和 Kuma<sup>[2]</sup>对无线 ad hoc 网络容量的研究被认为是无线网络容量研究领域的里程碑。Gupta 和 Kuma 基于比例法则,得到任意网络和随机网络,网络容量的上限和下限。Franceschetti 等<sup>[6]</sup>在 Gupta 研究的基础上证明,对于一个典型的多跳 ad hoc 网络,总吞吐量可达到  $\Theta(\sqrt{n})$ 。Grossglaue 和 Tse<sup>[7]</sup>指出,如果允许网络中的节点移动且移动服从独立同分布,则每对源节点和目的节点的吞吐量可以达到  $\Theta(1)$ 。但仅对单一性能指标基本性能边界的研究是不够的,需要对多性能指标的基本性能边界进行研究。这是由于多性能指标之间往往存在均衡关系,在性能优化中,仅优化单一性能指标可能导致其他性能降低,如为了提高吞吐量,可以通过增大节点的发送功率来实现,但这又会增加节点的能量消耗。

近年来,对无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界的研究逐渐成为热点,根据分析方法的不同,将其分为两大类:基于比例法则(scaling laws)和基于优化方法的。基于比例法则,即渐进分析,具体以无线信号空间传播模型和信噪比干扰模型为基础,使用几何计算、代数不等式等理论对性能边界进行推导,从而得到性能与网络节点数之间的数量级关系。该方法的优点是计算复杂度低,求解快,但难以求解二维 ad hoc 网络的 2 个以上性能指标的性能边界。基于优化方法,通过构造和求解优化问题,得到优化的性能边界,同时根据优化变量的不同,可以提供不同的优化网络配置策略,如功率控制策略,信道接入方式和路由策略等。虽然该方法

的计算复杂度较高,求解较慢,但是容易求解二维 ad hoc 网络的 2 个以上的性能边界,且可以得到指定网络规模的确切边界及优化的网络配置策略。

现有的基于优化方法对多性能指标基本性能边界的研究缺乏对吞吐量、端到端延迟和能耗 3 个性能指标的研究。这是由于干扰模型的物理计算复杂性,使同时分析 ad hoc 网络中的多个性能指标的性能边界具有挑战。本文重点研究无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界,包括性能上界和性能边界,通过建立无线网络广播特性和信道干扰的多性能指标的性能分析模型,分析各性能指标与网络策略的函数关系,然后利用多目标优化方法获得多性能指标的性能上界和性能边界。

## 2 相关工作

对无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界的研究,根据分析方法的不同,将其分为两大类:基于比例法则(scaling laws)和基于优化方法的。

### 2.1 基于比例法则的研究

El Gamal 等<sup>[8]</sup>分别研究了静态节点和动态节点的无线 ad hoc 网络,推导了容量与延迟的优化关系。Comaniciu 和 Poor<sup>[9]</sup>在满足传输延迟的条件下,定义了网络容量与  $k$  跳会话之间的关系,对 ad hoc 网络所能容纳的最大节点数进行了估计。Brand 和 Molisch<sup>[3]</sup>基于信道状况信息,利用香农定理推导出能量消耗和延迟的双曲函数上界(hyperbolic upper bounds)。Subramanian 等<sup>[10]</sup>研究了无线网络中链路传输错误对渐进意义下吞吐量和延迟关系的影响。Abouei 等<sup>[11]</sup>分析了有效吞吐量、延迟和分组丢失率对不同数据分组到达过程的均衡关系,但是模型仅适用于单跳无线网络,很难扩展至多跳网络。Gorce 和 Zhang 等<sup>[12,13]</sup>提出容量,能量与延迟的渐进意义下的分析模型,假设源节点和目的节点之间的中继节点规则分布(等间距分布)在近似无限的直线上(quasi-infinite line),获得能量和延迟与节点间距离的函数关系。但是模型仅限于线型网络拓扑,无法直接扩展至二维 ad hoc 网络。这是由于二维网络拓扑和流量场景的复杂性和物理干扰的存在,导致性能边界基于比例法则分析的难度增加。

### 2.2 基于优化方法的研究

Xue 等<sup>[14]</sup>基于功率消耗模型得到能耗与跳数的函数关系,利用多目标优化差分进化算法(MODE),最小化能耗和延迟(跳数),获得能耗和延迟的均衡

边界及源节点和目的节点通信的最优路径。但是模型假设所有链路无干扰,且模型仅涉及能耗与延迟的关系,无法直接扩展至与吞吐量关系的研究。Martins 等<sup>[15]</sup>针对无线传感器网络(WSN),研究覆盖范围和网络生存周期,选择 Pareto 解集中活跃的节点来保证传输范围的关系。但该模型没有考虑无线信道干扰以及吞吐量、延迟的性能指标。Zhang 等<sup>[16]</sup>结合信息论结果与统计 QoS 理论,建立模型得到无线网络功率和排队延迟的函数关系,并基于该模型提出优化的发送功率分配算法。Kim 等<sup>[17]</sup>建立了能量消耗和吞吐量与发送功率的函数关系模型,指出在无线网络中使用一个中继节点比直接传输具有更优的能量利用率或带宽效率。但该模型仅针对单中继网络,且没有考虑延迟与能耗和吞吐量的均衡关系。Goldsmith 等<sup>[18]</sup>提出了一个获得无线 ad hoc 网络基本性能边界的框架。但是该研究仅提出了一个基本的理论框架,没有针对具体问题研究性能边界。

我们的已有工作<sup>[19]</sup>,提出了一个无线网络性能分析模型,该模型考虑了无线网络广播和信道干扰,能够同时分析多个性能指标,包括可靠性、平均延迟和平均能量消耗。但该模型存在以下不足:首先,网络拓扑假设为有向无环图(DAG),但在现实网络中,链路环路往往是不可避免的,且环路的存在有助于补偿无线传输中可能发生的分组丢失带来的影响,避免重传;其次,各性能指标的计算是基于最大生存时间(TTL)的假设(如 TTL=3),无法分析存在更长的链路网络的性能指标。

本文重点研究无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界,包括性能上界和性能边界。首先建立稳定状态下无线网络的基本性能指标分析模型,该模型考虑无线网络广播特性和信道干扰,能够同时分析存在环路且跳数大于 3 跳网络的常用性能指标,包括吞吐量、端到端延迟和能量消耗。然后基于该模型对上述性能指标进行多目标优化,给出 Pareto 性能上界和 Pareto 性能边界。最后,利用仿真实验,比较理论和仿真 Pareto 性能上界,验证的性能指标分析模型的准确性。

### 3 网络模型

#### 3.1 网络和协议模型

假设无线 ad hoc 网络采用时分复用进行同步通信(具体时钟同步方法不在本文涉及范围)。一个帧(frame)分为  $|T|$  个时隙(slot),每个时隙可以看作一

个物理信道。在任意时隙  $\mu \in T$ , 2 个节点  $i$  和节点  $j$  可能存在一个干扰受限的信道。信道概率  $p_{ij}^\mu$  表示由节点  $i$  在时隙  $\mu$  发送的数据分组或数据位,成功传输到节点  $j$  的概率。信道概率<sup>[19]</sup>的计算基于比特错误率(BER)或分组错误率计算(PER),取决于网络中传输的数据单位是比特位还是数据分组,具体计算过程见 3.2 节。本文假设网络中传输的数据单位是数据分组。

将无线网络抽象为网络流模型:二元组  $G=(V,E)$  表示一个加权有向完全图,其中  $V$  和  $E$  分别表示网络中节点和信道的集合。节点  $i$  和节点  $j$  之间通过  $|T|$  个正交干扰信道连接。边  $(i,j,\mu) \in E$  表示在时隙  $\mu$  节点  $i$  和节点  $j$  之间的信道。每个信道赋以信道概率  $p_{ij}^\mu$  作为权值。考虑半双工通信,即节点不能同时发送和接收数据。

#### 3.2 信道概率

假设所有节点随机接入信道。发送速率  $\tau_i^\mu$  表示节点  $i$  在时隙  $\mu$  发送数据分组的速率。为了便于比较和分析,本文将发送速率归一化,使其值在区间  $[0,1]$ 。因此,发送速率  $\tau_i^\mu$  可以理解节点  $i$  在时隙  $\mu$  发送数据分组的概率。假设一个时隙最多发送一个数据分组,则节点  $i$  在时隙  $\mu$  发送速率为  $\tau_i^\mu = 0.5$ ,表示节点  $i$  以 0.5 的概率在时隙  $\mu$  发送一个数据分组。本文不考虑数据分组的确认(ACK)的过程。在一帧中,数据分组流入节点  $j$  的平均速率  $\bar{r}_j$  为

$$\bar{r}_j = \sum_{\mu \in T} \sum_{(i,j) \in \bar{N}_j^\mu} \tau_i^\mu p_{ij}^\mu$$

其中,  $p_{ij}^\mu$  为信道概率,即节点  $j$  成功接收到节点  $i$  在时隙  $\mu$  发送数据分组的概率。 $\bar{N}_j^\mu$  是在时隙  $\mu$  流入节点  $j$  的边集。

在一帧中,节点  $j$  的发送速率  $\vec{r}_j$  为节点  $j$  在所有时隙发送速率之和,即  $\vec{r}_j = \sum_{\mu \in T} \tau_j^\mu$ 。

对于任意一个发送速率  $\tau_i^\mu$  是可行的,当且仅当满足以下 2 个性质:流守恒(flow conservation)和半双工(half duplex)。流守恒即对于一个帧的所有时隙,流出节点速率之和小于或等于流入的平均速率(取决于节点对数据分组的转发和调度策略)。半双工指节点不能同时发送和接收数据分组,即对任意一个时隙,节点发送和接收数据分组速率之和最大为 1。

在给出信道概率的计算之前,对相关概念进行定义和形式化。

干扰：协议干扰模型和物理干扰模型<sup>[8]</sup>是无线网络中存在的2种被广泛使用的干扰关系描述模型。在协议干扰模型下，数据分组成功传输的条件是在发送节点的干扰范围内没有其他的节点发送数据分组。在物理干扰模型下，数据分组成功传输的条件是节点的接收功率和噪声与所有同时传输的节点产生的干扰之和的比必须大于等于给定的阈值。物理干扰模型被认为是一种更能反映网络的实际情况的干扰模型。因此，本文使用物理干扰模型中的信号与干扰加噪声比(SINR, signal to interference plus noise ratio)来计算数据分组从节点*i*在时隙 $\mu$ 成功传输到节点*j*的概率，即信道概率。

信道概率 $p_{ij}^\mu$ 定义为由节点*i*在时隙 $\mu$ 发送的数据分组，成功传输到节点*j*的概率。

对时分复用信道，干扰只是不同节点在相同时隙发送数据时产生。 $I_{ij}^\mu$ 定义为在节点*j*计算得到的边(*i, j,  $\mu$ )的干扰功率。当一组节点在时隙 $\mu$ 干扰节点*i*到节点*j*的通信，干扰功率 $I_{ij}^\mu = \sum_{k \in T_{ij}^\mu, k \neq i} P_T a_{kj}$ ，其中， $P_T$ 为节点发送功率， $a_{kj}$ 为节点*k*到*j*的路径增益， $T_{ij}^\mu$ 为与节点*i*在相同时隙 $\mu$ 发送数据的节点集合，称为干扰集。*

信号与干扰加噪声比(SINR)：在时隙 $\mu$ ，节点*i*和*j*的SINR定义为

$$\gamma_{ij}^\mu = \frac{P_T a_{ij}}{N_0 + I_{ij}^\mu}$$

其中， $I_{ij}^\mu$ 是干扰功率， $N_0$ 是环境噪声功率。

分组错误率(PER)：对给定的SINR值 $\gamma$ ，数据分组错误传输的概率 $PER(\gamma) = 1 - [1 - BER(\gamma)]^{N_b}$ ，其中 $N_b$ 是一个数据分组的大小(单位：bit)； $BER(\gamma)$ 是对给定的SINR值 $\gamma$ 的分组错误率，它取决于物理层采用的技术和信道的统计特征。对于加性高斯白噪声AWGN信道和BPSK无编码调制方式， $BER(\gamma) = 0.5 \times \text{erfc}(\sqrt{\gamma})$ 。

信道概率 $p_{ij}^\mu$ 等于对所有可能的干扰集 $l \in L_{ij}^\mu$ 下的数据分组成功传输概率(1-PER)的均值，其中 $L_{ij}^\mu$ 为在时隙 $\mu$ 除节点*i*以外的发送速率大于0的节点集合 $A^\mu$ 的幂集，即以 $A^\mu$ 的全部子集为元素的集合。信道概率 $p_{ij}^\mu$ 为

$$p_{ij}^\mu = \sum_{l \in L_{ij}^\mu} [1 - PER_l] P_l \quad (1)$$

其中， $PER_l = PER(\gamma_l)$ ， $l \in L_{ij}^\mu$ 。 $\gamma_l$ 是干扰集*l*活跃时

的SINR。 $P_l$ 是干扰集*l*活跃的概率

$$P_l = \prod_{k \in l} \tau_k^\mu \prod_{m \in \{A^\mu \setminus l\}} (1 - \tau_m^\mu) \quad (2)$$

其中， $\prod_{k \in l} \tau_k^\mu$ 为干扰集中节点发送数据概率，

$\prod_{m \in \{A^\mu \setminus l\}} (1 - \tau_m^\mu)$ 为干扰集中节点不发送数据概率。

### 3.3 转发和调度决策

转发概率 $x_{ij}^{\mu\nu}$ 定义为节点*j*收到节点*i*在时隙 $\mu$ 发送的一个数据分组，节点*j*决定在时隙 $\nu$ 转发该数据分组的概率。所有节点在各时隙的转发概率组成转发概率矩阵 $\mathbf{X}$ 。转发概率与发送速率和信道概率之间的关系如下

$$\sum_{(i,j) \in N_j^\nu} \sum_{u \in T} \tau_i^\mu p_{ij}^\mu x_{ij}^{\mu\nu} = \tau_j^\nu, \forall (j, \nu) \in A \quad (3)$$

其中， $\tau_i^\mu p_{ij}^\mu$ 表示节点*i*在时隙 $\mu$ 以速率 $\tau_i^\mu$ 发送数据分组，该数据流到达节点*j*的速率。 $A$ 为活跃节点集，即在任意时隙所有发送速率大于0的节点集合： $A = \{(i, \nu) \in V \times T \mid \tau_i^\mu > 0\}$ 。式(3)决定了节点*j*的发送速率，也约束了转发概率的选择。

节点对数据分组的转发和调度决策具体描述为：当节点*j*收到节点*i*在时隙 $\mu$ 发送的一个数据分组，节点*j*生成一个随机变量 $x_{\text{rand}} \in [0, 1]$ 与转发概率 $x_{ij}^{\mu\nu}$ 进行比较。如果 $x_{ij}^{\mu\nu} \geq x_{\text{rand}}$ 且节点*j*的FIFO队列未满，则节点*j*将该数据分组存入FIFO队列，在下一帧的时隙 $\nu$ 进行转发；否则( $x_{ij}^{\mu\nu} < x_{\text{rand}}$ 或FIFO队列已满)，节点*j*丢掉该数据分组。

## 4 多性能指标基本性能边界

为了获得多性能指标的基本性能边界，本节首先提出基本性能指标分析模型，分别对吞吐量、端到端延迟和能耗进行定义和形式化，然后给出多目标优化问题和Pareto基本性能边界。

### 4.1 多性能指标分析模型

吞吐量：在无线ad hoc网络中，吞吐量为目的节点处数据分组的到达率。具体地，源节点 $s_i$ 以 $\tau_{s_i}$ 的速率发送数据分组，端到端吞吐量 $f(s_i, d_j)$ 为目的节点 $d_j$ 处数据分组的到达率。 $L$ 表示 $s_i$ 到 $d_j$ 的所有可能路径， $P(p)$ 表示一个数据分组通过一条从 $s_i$ 到 $d_j$ 的路径 $p \in L$ 的概率，则 $f(s_i, d_j)$ 为

$$f(s_i, d_j) = \sum_{p \in L} P(p) \tau_{s_i} \quad (4)$$

对所有源节点  $\forall s_i \in S$ , 目的节点  $d_j$  的吞吐量  $f(d_j)$  为从所有源节点到目的节点  $d_j$  的端到端吞吐量之和, 由下式得到

$$f(d_j) = \sum_{\forall s_i \in S} f(s_i, d_j) \quad (5)$$

由于源节点到目的节点可能存在多条路径, 目的节点多次收到相同的数据分组, 即冗余数据分组, 因此, 需要进一步定义有效吞吐量。

有效吞吐量: 为目的节点处非冗余数据分组的到达率。源节点  $s_i$  以  $\tau_{s_i}$  的速率发送数据分组, 端到端有效吞吐量  $f_R(s_i, d_j)$  为目的节点  $d_j$  处非冗余数据分组的到达率, 则有

$$f_R(s_i, d_j) = (1 - \prod_{p \in P} (1 - P(p))) \tau_{s_i} \quad (6)$$

对所有源节点  $\forall s_i \in S$ , 目的节点  $d_j$  的有效吞吐量  $f_R(d_j)$  为从所有源节点到目的节点  $d_j$  的端到端有效吞吐量之和, 由下式得到

$$f_R(d_j) = \sum_{\forall s_i \in S} f_R(s_i, d_j) \quad (7)$$

端到端延迟: 为数据分组从源节点到目的节点的平均端到端延迟, 本文用跳数表示延迟, 即一跳为一个延迟单位。  $f_D(s_i, d_j)$  表示一个数据分组从源节点  $s_i$  到目的节点  $d_j$  的平均端到端延迟。用  $H(p)$  表示一个分组通过一条从源节点  $s_i$  到达目的节点  $d_j$  的路径  $p \in L$  所经过的跳数, 那么数据分组从  $s_i$  到  $d_j$  的平均端到端延迟为

$$f_D(s_i, d_j) = \frac{\sum_{p \in L} H(p) P(p) \tau_{s_i}}{\sum_{p \in L} P(p) \tau_{s_i}} \quad (8)$$

对所有源节点, 数据分组到达目的节点  $d_j$  的平均端到端延迟  $f_D(d_j)$  可以用下面的公式计算得到

$$f_D(d_j) = \frac{\sum_{\forall s_i \in S} \sum_{p \in L} H(p) P(p) \tau_{s_i}}{f(d_j)} \quad (9)$$

能量消耗: 假设发送数据分组的能耗是主要能耗。本文考虑能量消耗为发送数据分组的能量消耗。假设单位发送速率消耗单位能耗。源节点  $s_i$  以  $\tau_{s_i}$  的速率发送数据分组,  $f_E(s_i, d_j)$  表示源节点  $s_i$  和所有中继节点的发送数据分组的能量消耗。对所有

源  $\forall s_i \in S$ , 总能量消耗  $f_E(d_j)$  为

$$f_E(d_j) = \sum_{\forall s_i \in S} f_E(s_i, d_j) \quad (10)$$

## 4.2 多目标优化问题

当  $|S|$  个源节点分别以  $\tau_{s_i}$  的速率发送数据分组, 目的节点  $d_j$  处非冗余数据分组到达速率的上限  $\min(\sum_{i=1}^{|S|} \tau_{s_i}, f(d_j))$ , 因此, 对所有源节点, 目的节点的实际有效吞吐量为  $f_R(d_j)$ , 而  $f_R(d_j)$  的上限为  $\min(\sum_{i=1}^{|S|} \tau_{s_i}, f(d_j))$ 。

当目的节点  $d_j$  处的有效吞吐量达到上限, 即目的节点收到的所有数据分组都为非冗余数据分组时, 数据分组从源节点  $s_i$  到达目的节点  $d_j$  的平均端到端延迟  $f_D^c(d_j)$  和平均能量消耗  $f_E^c(d_j)$  分别为

$$f_D^c(d_j) = f_D(d_j) / \min(f(d_j), \sum_{i=1}^{|S|} \tau_{s_i}) \quad (11)$$

$$f_E^c(d_j) = f_E(d_j) / \min(f(d_j), \sum_{i=1}^{|S|} \tau_{s_i}) \quad (12)$$

对所有目的节点  $d_j \in D$ , 最大  $f_D^c(d_j)$  和平均  $f_E^c(d_j)$  分别为

$$f_D^c = \max_{d_j \in D} f_D^c(d_j) \quad (13)$$

$$f_E^c = \text{mean}_{d_j \in D} f_E^c(d_j) \quad (14)$$

需要指出的是, 上述性能指标的定义是对给定的网络策略  $x$  下得到的, 网络策略  $x$  包括: 中继节点的位置、中继节点发送速率和转发概率。因此, 性能指标如  $f_D^c$  和  $f_E^c$  是网络策略  $x$  的函数。

本文求解最小化  $f_D^c$  和最小化  $f_E^c$  的多目标优化问题, 优化目标函数为

$$\begin{aligned} & [\min f_D^c(x), \min f_E^c(x)]^T \\ \text{s.t. } & x = (l, \tau, X) \in C^N \Gamma \chi^r \end{aligned} \quad (15)$$

优化的变量为网络策略  $x$ , 包括  $N$  个中继节点的位置  $C^N$ , 可行发送速率矩阵  $\Gamma$  这对应的转发概率矩阵  $\chi^r$ 。

## 4.3 Pareto 基本性能边界

本文利用 NSGA-II 算法<sup>[20]</sup>对多目标优化问题 (15) 求解, 得到一组最优的网络策略, 即 Pareto 最优解集  $S_{\text{opt}}$ 。基于  $x \in S_{\text{opt}}$ , 分别研究了 Pareto 性能上界和 Pareto 性能边界。Pareto 性能上界是对多个性能指标, 理论上可以达到的最优性能; Pareto 性能边界是对多个性能指标, 实际可以达到的最优性

能。

1) Pareto 性能上界  $B_{\text{opt}}^c$

$$B_{\text{opt}}^c = \{(f_D^c(x), f_E^c(x)) \mid \forall x \in S_{\text{opt}}\}$$

Pareto 性能上界  $B_{\text{opt}}^c$  和 Pareto 解集  $S_{\text{opt}}$  是通过求解多目标优化问题(15)得到。

2) Pareto 性能边界  $B_{\text{opt}}^r$

$$B_{\text{opt}}^r = \{(f_D^r(x), f_E^r(x)) \mid \forall x \in S_{\text{opt}}\}$$

Pareto 性能边界  $B_{\text{opt}}^r$  是基于所有优化网络策略  $\forall x \in S_{\text{opt}}$  计算得到的。具体计算方法如下。

基于  $x \in S_{\text{opt}}$ ，通过仿真实验可以得到目的节点  $d_j$  的实际有效吞吐量  $f_R(d_j)$ 。在实际有效吞吐量下，数据分组从源节点  $s_i$  到目的节点  $d_j$  的平均端到端延迟  $f_D^r(d_j)$  和平均能量消耗  $f_E^r(d_j)$  分别为

$$f_D^r(d_j) = f_D(d_j) / f_R(d_j) \quad (16)$$

$$f_E^r(d_j) = f_E(d_j) / f_R(d_j) \quad (17)$$

对所有目的节点  $d_j \in D$ ，最大  $f_D^r(d_j)$  和平均  $f_E^r(d_j)$  分别为

$$f_D^r = \max_{d_j \in D} f_D^r(d_j) \quad (18)$$

$$f_E^r = \text{mean}_{d_j \in D} f_E^r(d_j) \quad (19)$$

利用式(16)~式(19)，对所有优化的网络策略  $x \in S_{\text{opt}}$  下，计算  $f_D^r(x)$  和  $f_E^r(x)$  得到 Pareto 性能边界  $B_{\text{opt}}^r$ 。

Pareto 性能上界  $B_{\text{opt}}^c$  表示理想情况下，目的节点处收到的所有数据分组都是非冗余的。但实际上，当源节点和目的节点之间存在不止一条路径，目的节点可能收到冗余数据分组，使  $f_R(d_j) < f(d_j)$ ，实际性能边界  $B_{\text{opt}}^r$  偏离性能上界  $B_{\text{opt}}^c$ 。当  $f_R(d_j) = f(d_j)$  时， $B_{\text{opt}}^r$  和  $B_{\text{opt}}^c$  边界相同。这种情况可能产生在源节点和目的节点之间只有一条路径，或者采用某种优化的编码策略，使网络的实际有效吞吐量达到有效吞吐量上限。

优化问题的搜索空间越大，会导致计算的复杂度增加。因此，为了降低计算复杂度，可以通过增加约束条件，缩小搜索空间来实现。例如，给节点  $i$  预先分配发送时隙  $\mu$ ，则在其他时隙  $\nu$ ，该节点的发送速率为 0，即将  $\tau_i^\nu = 0, \nu \neq \mu$  作为约束条件。

## 5 多流—单/双中继网络基本性能边界

为了得到 Pareto 基本性能边界并研究信道干扰和链路环路对 Pareto 基本性能边界的影响，本节针对无线 ad hoc 网络最常见的多流—单中继和双中继节点网络拓扑，分为 6 种研究场景，利用多性能指标分析模型，分析吞吐量、端到端延迟和能耗。

### 5.1 研究场景

针对多流—单/双中继网络拓扑(如图 1 和图 2 所示)的 6 种研究场景描述如表 1 所示。假设一个时隙最多发送一个数据分组，源节点  $s_1$  和  $s_2$  分别仅在每帧的第一个时隙和第二个时隙以  $\tau_{s_1}^1 = 1$  和  $\tau_{s_2}^2 = 1$  的速率发送数据分组。当节点  $j$  收到节点  $i$  在时隙  $u$  发送的数据分组，节点  $j$  根据  $x_{ij}^{uv}$  决定是否转发该数据分组，且在哪个时隙转发。

表 1 研究场景描述

场景	中继数	时隙数	各节点发送时隙				环路
			1	2	3	4	
1	单中继	3	$s_1$	$s_2$	$a$	—	—
2	单中继	2	$s_1, a$	$s_2, a$	—	—	—
3	双中继	4	$s_1$	$s_2$	$a$	$b$	无
4	双中继	4	$s_1$	$s_2$	$a$	$b$	有
5	双中继	3	$s_1$	$s_2$	$a, b$	—	无
6	双中继	3	$s_1$	$s_2$	$a, b$	—	有

如表 1 所示，对各场景选定不同的网络环境参数，包括：每帧包含的时隙数、各节点的发送时隙和中继节点间有无环路。通过对发送时隙的分配，考虑有、无信道干扰，对 Pareto 边界和解集的影响。例如，场景 1、场景 3 和场景 4 避免节点在相同时隙发送造成的信道干扰，而场景 2、场景 5 和场景 6 考虑了信道干扰因素。此外，本文还考虑了环路对 Pareto 边界和解集的影响。例如，场景 4 和场景 6 允许中继节点  $a$  和  $b$  之间存在环路，而场景 3 和场景 5 限制中继节点之间的环路。

### 5.2 基本网络性能指标分析

本节分别对多流—单中继节点和多流—双中继节点的网络拓扑，根据 4.1 节中多性能指标分析模型，对各研究场景的多性能指标进行分析。

多流一单中继网络拓扑如图 1 所示。

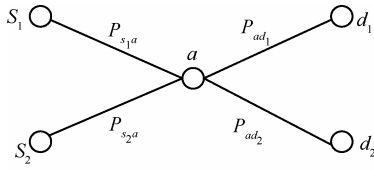


图 1 多流一单中继网络拓扑

针对多流一单中继节点的网络拓扑, 各基本性能指标分析如下。

1) 吞吐量  $f(d_1)$  和  $f(d_2)$

$$f(d_1) = \tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_1}^1 + \sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_1}^u + \tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_1}^2 + \sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_1}^u \quad (20)$$

$$f(d_2) = \tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_2}^1 + \sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_2}^u + \tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_2}^2 + \sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_2}^u \quad (21)$$

2) 有效吞吐量  $f_R(d_1)$  和  $f_R(d_2)$

$$f_R(d_1) = 1 - (1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_1}^1) \prod_{u=1}^{|T|} (1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_1}^u) + 1 - (1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_1}^2) \prod_{u=1}^{|T|} (1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_1}^u) \quad (22)$$

$$f_R(d_2) = 1 - (1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_2}^1) \prod_{u=1}^{|T|} (1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_2}^u) + 1 - (1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_2}^2) \prod_{u=1}^{|T|} (1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_2}^u) \quad (23)$$

3) 平均端到端延迟  $f_D(d_1)$  和  $f_D(d_2)$

$$f_D(d_1) = \frac{1}{f(d_1)} (\sum_{u=1}^{|T|} 2\tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_1}^u + \tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_1}^1 + \sum_{u=1}^{|T|} 2\tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_1}^u + \tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_1}^2) \quad (24)$$

$$f_D(d_2) = \frac{1}{f(d_2)} (\sum_{u=1}^{|T|} 2\tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_2}^u + \tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_2}^1 + \sum_{u=1}^{|T|} 2\tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_2}^u + \tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_2}^2) \quad (25)$$

4) 平均能量消耗  $f_E(d_1)$  和  $f_E(d_2)$

$$f_E(d_1) = f_E(d_2) = \tau_{s_1}^1 + \sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} + \tau_{s_2}^2 + \sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} \quad (26)$$

目的节点  $d_1$  的吞吐量  $f(d_1)$  是数据分组通过直接路径和中继路径到达  $d_1$  的速率。式(20)中,  $\tau_{s_1}^1 p_{s_1 d_1}^1$  和  $\tau_{s_2}^2 p_{s_2 d_1}^2$  分别是数据分组从源节点  $s_1$  和  $s_2$  直接到达目的节点  $d_1$  的速率(不通过中继节点),  $\sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{1u} p_{ad_1}^u$  和  $\sum_{u=1}^{|T|} \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{2u} p_{ad_1}^u$  分别是源  $s_1$  和  $s_2$  发出的数据分组, 在所有时隙通过中继节点发送到目的节点  $d_1$  的速率之和。同理可得  $f(d_2)$ 。

式(22)和式(23), 有效吞吐量  $f_R(d_1)$  和  $f_R(d_2)$  分别为目的节点  $d_1$  和  $d_2$  处非冗余数据分组的到达率。式(24)中, 平均端到端延迟  $f_D(d_1)$  是一个数据分组从源节点到  $d_1$  的平均端到端延迟。同理可得  $f_D(d_2)$ 。式(26)中, 平均能耗  $f_E(d_1)$  和  $f_E(d_2)$  都等于 2 个源节点和中继节点发送数据分组的总能量消耗。

对于多流一单中继节点的网络拓扑, 研究场景 1 和场景 2 的基本性能指标由式(20)~式(26)计算得到。

**场景 1** 时隙数  $|T|=3$ , 源节点  $s_1$  和  $s_2$  分别在时隙 1 和时隙 2 发送数据分组, 中继节点  $a$  仅在时隙 3 发送数据分组, 不存在信道干扰。这种情况下就可以对优化问题(15)增加一个约束条件  $\tau_a^1 = 0$  且  $\tau_a^2 = 0$ 。因此, 根据式(3), 转发概率  $\mathbf{X} \in \mathcal{X}$  矩阵是可行的, 需要满足如下约束条件

$$\tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 x_{s_1 a}^{13} + \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 x_{s_2 a}^{23} = \tau_a^3$$

多目标优化问题涉及的变量为中继节点的位置  $l_a \in C$ 、转发概率  $x_{s_1 a}^{13} \in [0,1]$  和  $x_{s_2 a}^{23} \in [0,1]$  这 3 个变量。当获得了中继节点位置和转发概率, 发送速率可以由式(3)得到。

**场景 2** 时隙数  $|T|=2$ , 源节点  $s_1$  和  $s_2$  分别在时隙 1 和时隙 2 发送数据分组, 中继节点  $a$  可在时隙 1 或时隙 2 发送数据分组, 存在信道干扰。根据式(3), 转发概率需要满足如下约束条件

$$\tau_{s_1}^1 p_{s_1 a}^1 (x_{s_1 a}^{11} + x_{s_1 a}^{12}) + \tau_{s_2}^2 p_{s_2 a}^2 (x_{s_2 a}^{21} + x_{s_2 a}^{22}) = \tau_a^3$$

多目标优化问题涉及的变量为中继节点的位置  $l_a \in C$  和转发概率  $x_{s_1 a}^{11} \in [0,1]$ ,  $x_{s_1 a}^{12} \in [0,1]$ ,  $x_{s_2 a}^{21} \in [0,1]$  和  $x_{s_2 a}^{22} \in [0,1]$ 。

多流一双中继网络拓扑如图 2 所示。

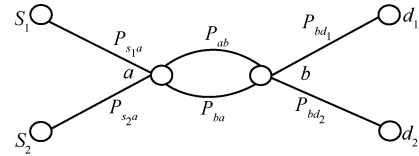


图 2 多流一双中继网络拓扑

**场景 3 和场景 4** 时隙数  $|T|=4$ , 源节点  $s_1$  和  $s_2$  分别在时隙 1 和时隙 2 发送数据分组, 中继节点  $a$  和节点  $b$  分别在时隙 3 和时隙 4 转发数据分组, 不存在信道干扰。按照这种时隙分配, 只需定义  $\tau_a^3$  和  $\tau_b^4$ , 中继节点在其他时隙发送速率为零。场景 3 中,  $a$  和  $b$  之间无环路, 则非零转发概率为  $x_{s_1 a}^{13}$ 、 $x_{s_1 b}^{14}$ 、 $x_{s_2 a}^{23}$

和  $x_{s_2b}^{24}$ ; 场景4中,  $a$  和  $b$  之间有环路, 非零转发概率为  $x_{s_1a}^{13}$ 、 $x_{s_1b}^{14}$ 、 $x_{s_2a}^{23}$ 、 $x_{s_2b}^{24}$ 、 $x_{ba}^{43}$  和  $x_{ab}^{34}$ 。为了简化表达式, 引入一个新的变量  $Q_{ij}^{uv} = p_{ij}^u x_{ij}^{uv}$ 。

针对多流—双中继节点的网络拓扑, 各基本性能指标分析模型如下。

1) 吞吐量  $f(d_1)$  和  $f(d_2)$

$$f(d_1) = \tau_{s_1}^1 p_{s_1d_1}^1 + \tau_{s_2}^2 p_{s_2d_1}^2 + \frac{1}{1 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}} \cdot [(E + FQ_{ba}^{43})p_{ad_1}^3 + (EQ_{ab}^{34} + F)p_{bd_1}^4] \quad (27)$$

$$f(d_2) = \tau_{s_1}^1 p_{s_1d_2}^1 + \tau_{s_2}^2 p_{s_2d_2}^2 + \frac{1}{1 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}} \cdot [(E + FQ_{ba}^{43})p_{ad_2}^3 + (EQ_{ab}^{34} + F)p_{bd_2}^4] \quad (28)$$

其中,  $E = \tau_{s_1}^1 Q_{s_1a}^{13} + \tau_{s_2}^2 Q_{s_2a}^{23}$ ,  $F = \tau_{s_1}^1 Q_{s_1b}^{14} + \tau_{s_2}^2 Q_{s_2b}^{24}$

2) 平均端到端延迟  $f_D(d_1)$  和  $f_D(d_2)$

$$f_D(d_1) = \frac{1}{f(d_1)} \left\{ \tau_{s_1}^1 p_{s_1d_1}^1 + \tau_{s_2}^2 p_{s_2d_1}^2 + \frac{1}{(1 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43})^2} \cdot [(2E + FQ_{ba}^{43}(3 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}))p_{ad_1}^3 + (EQ_{ab}^{34}(3 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}) + 2F)p_{bd_1}^4] \right\} \quad (29)$$

$$f_D(d_2) = \frac{1}{f(d_2)} \left\{ \tau_{s_1}^1 p_{s_1d_2}^1 + \tau_{s_2}^2 p_{s_2d_2}^2 + \frac{1}{(1 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43})^2} \cdot [(2E + FQ_{ba}^{43}(3 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}))p_{ad_2}^3 + (EQ_{ab}^{34}(3 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}) + 2F)p_{bd_2}^4] \right\} \quad (30)$$

3) 平均能量消耗  $f_E(d_1)$  和  $f_E(d_2)$

$$f_E(d_1) = f_E(d_2) = \tau_{s_1}^1 + \tau_{s_2}^2 + \frac{1}{1 - Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}} \cdot (E + F + EQ_{ab}^{34} + FQ_{ba}^{43}) \quad (31)$$

式(27)~式(31)是对数据分组经过源节点到目的节点所有可能路径无限求和得到的稳定状态下的性能指标。由于中继节点之间可能存在环路, 导致数据分组可能在网络中无限次转发(死循环)。如果  $Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43}$  收敛(满足  $Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43} < 1$ ), 即通过转发概率控制, 数据分组在中继节点之间转发的次数是有限的, 那么对  $\forall d_j \in D$ ,  $f(d_j)$ 、 $f_D(d_j)$  和  $f_E(d_j)$  可以通过模型计算得到相应的值。当中继节点  $a$  和中继节点  $b$  之间存在环路时, 由于基本性能指标分析模型无法区分环路中的冗余分组,  $f_R(d_j)$  需要通过仿真实验得到。如果  $Q_{ab}^{34} Q_{ba}^{43} = 1$ , 即转发概率  $x_{ab}^{34} = x_{ba}^{43} = 1$  时, 数据分组将在中继节点之间无限次转发。在这种情

况下(场景4可能存在该情况), 为了避免死循环的产生, 在多目标优化问题(15)中, 增加如下限制条件

$$\forall X \in \mathcal{X} \text{ if } (p_{ab}^3 = 1 \wedge p_{ba}^4 = 1) \begin{cases} x_{ab}^{34} < 1 - \Delta \\ x_{ba}^{43} < 1 - \Delta \end{cases}$$

其中,  $\Delta$  选取一个经验值 0.05。

**场景3和场景5** 中继节点  $a$  和中继节点  $b$  之间不存在环路, 因此到达目的节点的数据分组只经过一跳或两跳。对场景3和场景5, 由于不存在环路, 可以推导出有效吞吐量  $f_R(d_j)$  的公式, 如下所示

$$f_R(d_1) = 1 - (1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1d_1}^1)(1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1a}^1 x_{s_1a}^{1u} p_{ad_1}^u) \cdot (1 - \tau_{s_1}^1 p_{s_1b}^1 x_{s_1b}^{1v} p_{bd_1}^v) + 1 - (1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2d_1}^2) \cdot (1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2a}^2 x_{s_2a}^{2u} p_{ad_1}^u)(1 - \tau_{s_2}^2 p_{s_2b}^2 x_{s_2b}^{2v} p_{bd_1}^v) \quad (32)$$

其中, 场景3,  $u=3$ ,  $v=4$ ; 场景5,  $u=v=3$ 。同理可得  $f_R(d_2)$ 。

**场景5和场景6** 与场景3和场景4的区别在于发送时隙的分配。上述基本性能指标分析类似于场景3和场景4分析方法, 就不再重复了。

## 6 实验结果与分析

本节首先针对各研究场景求解多目标优化问题(15), 得到 Pareto 解集和理论 Pareto 性能上界  $B_{\text{opt}}^c$ 。然后基于 Pareto 解集, 利用事件驱动的仿真软件 WSNNet<sup>注1</sup>进行仿真, 获得仿真 Pareto 性能上界  $\tilde{B}_{\text{opt}}^c$  和仿真 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{\text{opt}}^r$ , 并比较理论  $B_{\text{opt}}^c$  和仿真  $\tilde{B}_{\text{opt}}^c$ , 验证为性能指标分析模型的准确性。

### 6.1 实验参数和环境

对所有研究场景, 源节点和目的节点之间的距离设置为 600 m。中继节点的 Pareto 最优的部署位置在一个的连续的正方形表面中查找, 面积  $C = 600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 。

#### 1) 多目标优化

NSGA-II<sup>[20]</sup>(non-dominated sorting genetic algorithm-II)是一个典型的多目标遗传算法(MOGA, multi-objective genetic algorithms), 采用非支配排序机制和精英策略, 无需共享参数, 具有很好的运行效率和收敛性。本文利用 NSGA-II 算法求解多目标优化问题(15), 计算 Pareto 最优解集和理论 Pareto 边界  $B_{\text{opt}}^c$ 。在 NSGA-II 中, 设定种群规模为 300, 迭

注1 <http://wsnet.gforge.inria.fr/>

代次数为 1 000 次，交叉变异概率为 0.9。

2) 仿真设置

仿真参数设置如表 2 所示。由 Pareto 最优解集  $S_{opt}$  获得中继节点的位置及其转发概率。采用 TDMA 接入方式，源节点  $s_1$  和  $s_2$  分别在每个帧的第一个和第二个时隙发送数据分组 ( $\tau_{s_1}^1 = 1$  和  $\tau_{s_2}^2 = 1$ )，持续运行 10 000 帧。

参数	值
发送功率	0.151 mW
信道带宽	1 Mbit/s
天线增益	$G_T = G_R = 1$
传播模型	Log-distance
噪声功率谱密度	-192 dBm/Hz
数据分组大小	2 560 B
频率	2.4 GHz
调制方式	BPSK
衰减系数	3

6.2 实验结果

本节对所有场景下的 Pareto 最优解集  $S_{opt}$ ，Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$  和 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{opt}^r$  进行分析。采用均方根误差 RMSE 和世代距离(GD, generation distance)，比较理论  $B_{opt}^c$  和仿真  $\tilde{B}_{opt}^c$ ，验证基本性能指标分析模型的准确性。

$$RMSE = \frac{1}{N_{opt}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{opt}} \frac{(f(i) - \tilde{f}(i))^2}{f(i)^2}}$$

其中， $N_{opt}$  是多目标优化算法得到的 Pareto 解的个数， $f(i)$  和  $\tilde{f}(i)$  分别是第  $i$  个 Pareto 解对应的理论 ( $f_D^c(i), f_E^c(i)$ ) 与仿真 ( $\tilde{f}_D^c(i), \tilde{f}_E^c(i)$ ) Pareto 性能上界。

$$GD = \frac{1}{N_{opt}} \left( \sum_{i=1}^{N_{opt}} d_i^2 \right)^{1/2}$$

其中， $d_i$  是第  $i$  个理论 ( $f_D^c, f_E^c$ ) 与仿真 ( $\tilde{f}_D^c, \tilde{f}_E^c$ ) Pareto 性能上界的欧氏距离。RMSE 和 GD 越小，说明模型误差越小，仿真与理论结果越接近。如表 3 所示，理论  $B_{opt}^c$  和仿真  $\tilde{B}_{opt}^c$  对比，最大 RMSE 和 GD 误差分别为  $4.66 \times 10^{-4}$  和  $7.04 \times 10^{-3}$ ，验证了模型的准确性。表 4 对比了各性能指标理论和仿真结果的 RMSE。

表 3 均方根误差(RMSE)和世代距离(GD)

场景	$f_D^c$	$f_E^c$	GD
1	$4.66 \times 10^{-4}$	$4.53 \times 10^{-4}$	$7.04 \times 10^{-3}$
3	$8.52 \times 10^{-5}$	$7.64 \times 10^{-5}$	$6.97 \times 10^{-4}$
4	$1.36 \times 10^{-4}$	$1.48 \times 10^{-4}$	$2.51 \times 10^{-3}$
5	$3.88 \times 10^{-5}$	$3.64 \times 10^{-5}$	$5.73 \times 10^{-4}$
6	$8.35 \times 10^{-5}$	$7.82 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-3}$

表 4 各性能指标均方根误差(RMSE)

场景	$f_c$	$f_D$	$f_E$
1	$1.72 \times 10^{-4}$	0	$2.11 \times 10^{-5}$
3	$5.4 \times 10^{-3}$	0	$2.35 \times 10^{-5}$
4	$8.86 \times 10^{-3}$	$4.99 \times 10^{-3}$	$2.29 \times 10^{-3}$
5	$1.56 \times 10^{-4}$	0	$1.62 \times 10^{-5}$
6	$2.49 \times 10^{-3}$	0	$9.88 \times 10^{-5}$

场景 1 中继节点与源节点在不同的时隙发送，不存在信道干扰。理论 Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$ ，仿真 Pareto 性能上界  $\tilde{B}_{opt}^c$  和 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{opt}^r$ ，如图 3 所示。 $B_{opt}^c$  与  $\tilde{B}_{opt}^r$  边界重合，这是由于直接路径  $p_{s,d_j}^u = 0, \forall u \in T, \forall i, j \in N$ ，数据分组只能通过唯一的中继路径到达目的节点，目的节点不会收到冗余分组。在 Pareto 最优解集  $S_{opt}$  中，对所有解，转发概率为  $x_{s_1 a}^{13} = x_{s_2 a}^{23} = 1$ ，中继节点位置如图 4 所示。

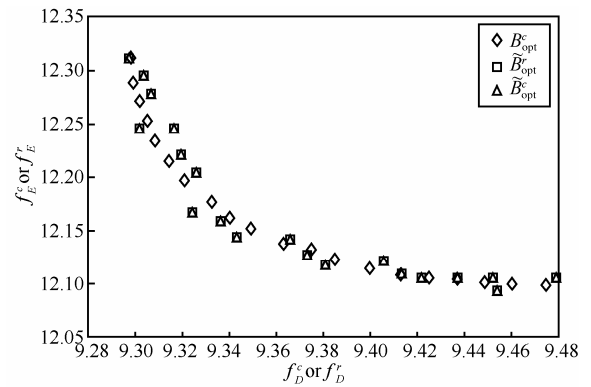


图 3 场景 1 Pareto 边界

图 4~图 6 表示在笛卡尔坐标系，各场景中中继节点的位置，且在节点之间的边上赋以信道概率作为权值。信道概率  $p_{ij}^u = \{p_{ij}^u, p_{ij}^u\}$  表示最小延迟  $f_D^c$  (或最大能耗) 和最大延迟  $f_D^r$  (或最小能耗) 2 个极值点对应的信道概率，若两信道概率相等，则只用一个信道概率的值表示。

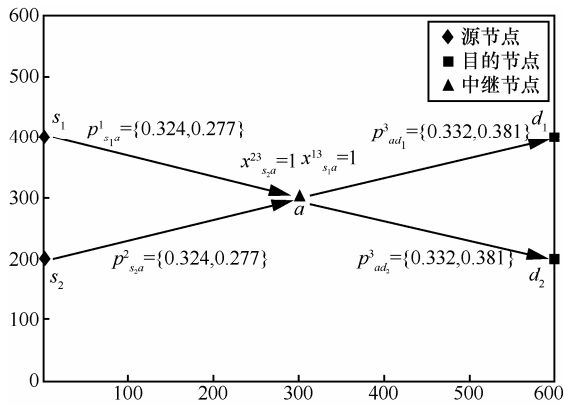


图4 场景1 Pareto 解集: 中继节点位置和转发概率

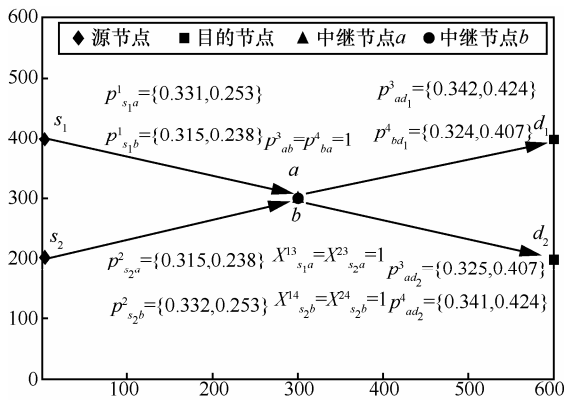


图5 场景3 Pareto 解集: 中继节点位置和转发概率

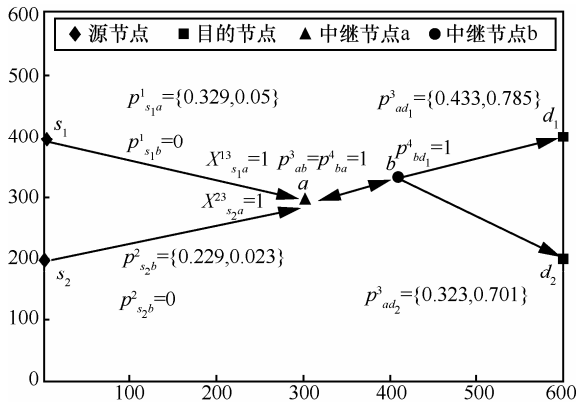


图6 场景4 Pareto 解集: 中继节点位置和转发概率

**场景 2** 中继节点与源节点在相同的时隙发送, 存在信道干扰。源节点和目的节点直接路径的信道概率为 0。在源节点与中继节点存在干扰的情况下, 不存在一个中继节点位置可以同时保证源节点和中继节点之间, 且中继节点和目的节点之间的信道概率非零, 因此本场景不存在最优解。

**场景 3** 2 个中继节点在不同时隙发送, 不存在信道干扰, 且中继节点之间不存在环路, 不能相互转发数据分组。如图 7 所示, Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$

与 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{opt}^r$  不重合, 因为数据分组可以分别通过中继节点  $a$  和中继节点  $b$  的这 2 条路径到达目的节点。所有最优解  $x \in S_{opt}$  的 2 个中继节点的转发概率均为 1, 即中继节点转发收到的所有数据。2 个中继节点位置和转发概率如图 5 所示。

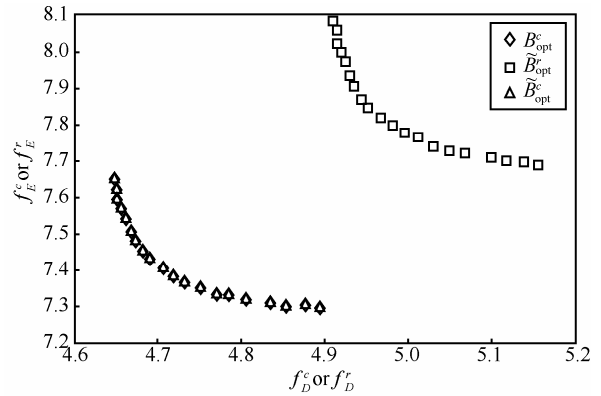
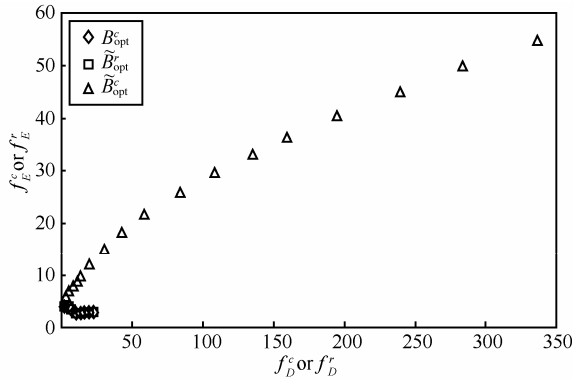


图7 场景3 Pareto 边界

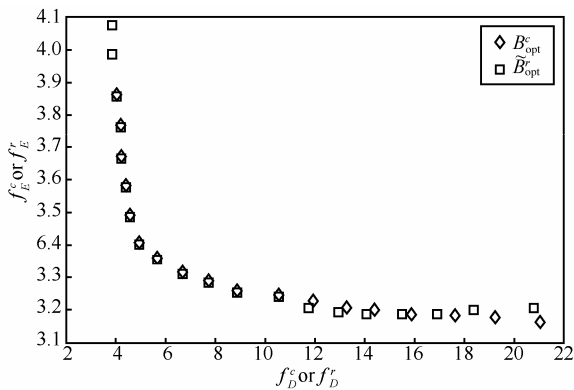
**场景 4** 与场景 3 的区别仅在于中继节点之间存在环路, 可以相互转发数据分组。如图 8(a)所示, 由于 2 个中继节点存在环路, 目的节点处收到大量的冗余数据分组(冗余数据分组占总数据分组最大百分比为 61.2%), 使  $B_{opt}^c$  与  $\tilde{B}_{opt}^r$  边界间距很大。最优的中继节点位置如图 6 所示, 节点  $a$  位于源节点和目的节点的中垂线附近, 节点  $b$  更接近 2 个目的节点, 使  $p_{s1b}^1 = p_{s2b}^2 = 0$ 。节点  $a$  和节点  $b$  距离较近, 使得  $p_{ab}^3 = p_{ba}^4 = 1$ 。图 8(b)可以更清楚地看到  $B_{opt}^c$  和  $\tilde{B}_{opt}^c$  边界。在最大平均端到端延迟  $f_D^c$  和最小平均能量消耗量  $f_E^c$ , 中继节点之间的转发概率接近最大转发概率 0.95; 在最小  $f_D^c$  和最大  $f_E^c$ , 中继节点之间为了避免环路, 保证  $x_{ab}^{34} = 0.95$   $x_{ba}^{43} = 0.0649$ 。

**场景 5** 2 个中继节点在相同时隙发送, 存在信道干扰, 且中继节点之间不能相互转发数据分组。 $B_{opt}^c$  和  $\tilde{B}_{opt}^r$  边界与场景 1 中的边界相同, 即一个中继节点的 Pareto 边界占优(dominated)于有信道干扰下的 2 个中继节点 Pareto 边界, 这是由于信道干扰的存在, 降低了网络的性能。

**场景 6** 2 个中继节点在相同时隙发送, 存在信道干扰, 且中继节点之间可以相互转发数据分组。与场景 5 相似, 由于信道干扰的存在, Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$  和 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{opt}^r$  与场景 1 中的边界相同。



(a) 场景 4 Pareto 边界



(b) 场景 4 Pareto 边界(仅  $B_{opt}^c$  和  $\tilde{B}_{opt}^c$ )

图 8 场景 4 Pareto 边界

### 6.3 各场景结果对比分析

综上所述, 场景 5 和场景 6(双中继且有信道干扰)的 Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$  趋于单中继得到的 Pareto 性能上界, 即有干扰场景下的 Pareto 解劣于无干扰场景下的 Pareto 解。因此, 对网络性能的优化应该包括 2 个步骤: 首先, 信道分配尽可能保证无干扰; 然后, 优化中继节点的转发决策。

对无干扰场景(场景 1、场景 3 和场景 4)的 Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$  和 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{opt}^r$  进行对比, 如图 3、图 7 和图 8 所示, 可以看出场景 3 的  $B_{opt}^c$  和  $\tilde{B}_{opt}^r$  分别占优场景 1 的  $B_{opt}^c$  和  $\tilde{B}_{opt}^r$ 。因此, 无信道干扰时, 使用双中继节点得到的网络性能(包括吞吐量、端到端延迟和能量消耗)优于单中继节点的网络性能。此外,  $\tilde{B}_{opt}^r$  占优说明该场景的有效吞吐量更大。因此, 在无线广播下, 当无信道干扰时, 使用双中继比单中继能够提供更优的性能。场景 3 和场景 4 中, 源节点到目的节点存在不止一条的路径, 目的节点处会收到大量的冗余分组, 使实际获得的 Pareto 性能边界  $\tilde{B}_{opt}^r$  与 Pareto 性能上界  $B_{opt}^c$  偏离很大。

## 7 结束语

本文旨在研究无线 ad hoc 网络多性能指标基本性能边界, 提出了一种稳定状态下的网络性能分析的模型。该模型的建立考虑了无线网络广播特性和无线信道干扰, 可以同时分析多个性能指标, 包括: 吞吐量、端到端延迟和能量消耗。基于性能分析模型, 针对多流一单/双中继拓扑的多种性能指标进行推导。通过求解多目标优化问题, 得到 Pareto 解集, Pareto 性能上界和 Pareto 性能边界, 并研究了信道干扰和链路环路对 Pareto 性能上界和 Pareto 性能边界的影响。最后, 仿真结果验证了基本性能指标分析模型的准确性, 其均方根误差小于  $10^{-3}$  量级。

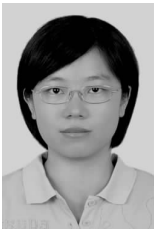
### 参考文献:

- [1] LUO J, ROSENBERG C, GIRARD A. Engineering wireless mesh networks: joint scheduling, routing, power control and rate adaptation[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2010, 18(5): 1387-1400.
- [2] GUPTA P, KUMAR P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46:388-404.
- [3] BRAND M, MAYMOUNKOV P, MOLISCH A F. Routing with probabilistic delay guarantees in wireless ad hoc networks[A]. IEEE Global Telecommunications Conference[C]. LO, USA, 2008.1-6.
- [4] VASSILEVA N, BARCELO-ARROYO F. A survey of routing protocols for energy constrained ad hoc wireless networks[A]. Proceedings of the Future Generation Communication and Networking (FGCN2007)[C]. Ramada Plaza Jeju, Korea, 2007.522-527.
- [5] TOUMPIS S, GOLDSMITH A J. Capacity regions for wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 736-748.
- [6] FRANESEHETTI M, DOUSSE O, TSE D, *et al.* Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory[J]. IEEE Trans Inform, Theory, 2007, 53(3): 1009-1018.
- [7] GROSSGLAUSER M, TSE D. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(4): 477-486.
- [8] EL AMAL A, MAMMEN J, PRABHAKAR B, *et al.* Throughput-delay trade-off in wireless networks[A]. Proceedings of the Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM2004)[C]. HongKong, China, 2004.464-475.
- [9] COMANICIU C, POOR H V. On the capacity of mobile ad hoc networks with delay constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5:2061-2071.
- [10] SUBRAMANIAN R, LAND I, K.RASMUSSEN L. Asymptotic

throughput and throughput-delay scaling in wireless networks: the Impact of Error Propagation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4):1974-1987.

- [11] ABOUEI J, BAYESTEH A, KHANDANI A K. On the delay-throughput tradeoff in distributed wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(4): 2159-2174.
- [12] GORCE J, ZHANG R, JAFFRÈS-RUNSER K, *et al.* Energy, Latency and capacity trade-offs in wireless multi-hop networks[A]. IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC2010)[C]. Istanbul, 2010.2757-2762.
- [13] ZHANG R, GORCE J M, DONG R, *et al.* Energy efficiency of opportunistic routing with unreliable links[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Budapest, 2009.1-6.
- [14] XUE F, SANDERSON A, GRAVES R. Multi-objective routing in wireless sensor networks with a differential evolution algorithm[A]. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control[C]. Ft Lauderdale, FL, USA, 2006.880-885.
- [15] MARTINS F, CARRANO E, WANNER E, *et al.* A hybrid multiobjective evolutionary approach for improving the performance of wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3):545-554.
- [16] ZHANG X, TANG J. Power-delay tradeoff over wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3673-3683.
- [17] KIM S, STARK W. Cross-layer analysis of energy-throughput tradeoff for relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12):6716-6726.
- [18] GOLDSMITH A, EFFROS M, KOETTER R, *et al.* Beyond shannon: the quest for fundamental performance limits of wireless ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 44(5): 195-205.
- [19] JAFFRÈS-RUNSER K, SCHURGOT M, WANG Q, *et al.* A cross-layer framework for multiobjective performance evaluation of wireless ad hoc networks[J]. Elsevier Ad Hoc Networks Journal, 2013, 11(8): 2147-2171.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.

#### 作者简介:



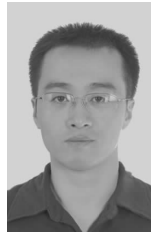
**王琪** (1985-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 中国科学院博士生, 主要研究方向为无线多跳网络性能评价和性能优化等。



**Katia Jaffrès-Runser** (1979-), 女, 法国人, 博士, 法国图卢兹大学副教授, 主要研究方向为无线网络性能评价和网络编码等。



**孙毅** (1979-), 男, 山东青岛人, 博士, 中国科学院副研究员, 主要研究方向为未来互联网体系结构管理、网络资源管理、流媒体服务质量保障、移动计算等。



**李军** (1974-), 男, 浙江丽水人, 博士, 中国科学院高级工程师, 主要研究方向为计算机网络与数据通信等。



**张珺** (1975-), 女, 广西融安人, 博士, 内蒙古大学副教授, 主要研究方向为未来互联网。



**竺斌** (1984-), 男, 江苏南京人, 博士, 理光软件研究所副研究员, 主要研究方向为未来无线办公解决方案和相关标准化工作。



**李忠诚** (1962-), 男, 山东烟台人, 博士, 中国科学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络。