

# 无线网络中基于 DSDV 的最大化吞吐量的协作路由算法

赵方圆 韩昌彩 李 媛

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 为最大化无线自组织网络的吞吐量, 提出一种自适应的协作路由算法。在算法中, 协作分集技术与路由选择相结合, 通过在路由的每一跳选择最佳的中继节点协作发送节点传输信息来改善网络吞吐量。首先通过目的序列距离矢量路由协议(DSDV)初步建立最短路由路径, 在每条链路的发送节点和接收节点根据邻节点表选出公共邻居节点, 建立候选中继集合; 进一步, 每一跳根据链路吞吐量, 在候选中继集合中自适应选择最多两个中继来协助发送节点进行传输, 并根据选出的中继节点数动态分配节点发射功率。在保证系统发射功率一定的情况下, 最大化网络吞吐量。仿真结果表明, 在相同的发射功率下, 相对于非协作路由 DSDV 算法, 采用固定数量中继的协作路由算法提高了整个网络的吞吐量, 而自适应的协作路由算法可进一步提高吞吐量; 同时仿真了网络吞吐量与网络规模和节点最大移动速度的变化关系。

**关键词:** 自组织网络; 路由算法; 协作分集; 吞吐量

中图分类号: TN915.02, TN92 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2013)04-0480-06

## Cooperative Routing Algorithm based on DSDV to Maximize the Throughput for Wireless Networks

ZHAO Fang-yuan HAN Chang-cai LI Yuan

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to maximize the throughput of Ad Hoc networks, an adaptive cooperative routing algorithm is proposed. In this algorithm, cooperative diversity technology is combined with routing selection and best relays are selected to help the sender transmit message in each hop, which improves the network's throughput. First of all, a shortest-path route is established by destination sequenced distance vector (DSDV). According to the neighboring node table, the common neighboring nodes of the sender and receiver in each link are selected to establish relay set. Then, according to the link throughput, at most two relays are selected from relay set adaptively hop by hop to help the transmission and the transmission power of sender and relays are adjusted dynamically according to the number of selected relays. The proposed algorithm has the maximum network throughput while guaranteeing certain system transmission power. Simulation results show that with the same transmission power, the cooperative routing algorithms with fixed relays can improve the network throughput compared with the non-cooperative DSDV routing and the adaptive cooperative routing algorithm can achieve greater improvement of network throughput. In addition, the network throughput with different network sizes and the maximum mobility rate of nodes is simulated.

**Key words:** Ad Hoc network; Routing algorithm; Cooperative diversity; Throughput

收稿日期: 2012-07-17; 修回日期: 2013-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61002010)

## 1 引言

协作分集作为一种虚拟多天线分集技术,可以抵抗多径衰落,提高传输可靠性<sup>[1]</sup>。在物理层,协作分集技术已经得到广泛深入的研究。在网络层,可以将协作分集技术和路由选择相结合,设计基于协作通信的路由算法,即协作路由算法,选择最佳的中继节点协作每跳源节点发送信息,使接收节点获得分集增益,从而提升网络性能<sup>[2]</sup>。

目前,对于协作路由算法的研究大致分为能量有效和最优化网络服务质量(QoS)的路由算法两类。一方面,对于能量有效的路由算法,Khandani等利用跨层的思想,结合网络层的能量有效路由算法和物理层的通信策略,研究了无线网络中的协作路由和协作分集<sup>[3]</sup>。Ibrahim等提出了一种分布式最小功率协作路由算法(MPCR),它利用协作通信思想,通过建立最佳传输路径来最小化系统消耗功率。最佳路径由满足一定吞吐量限制的一系列单中继协作传输链路和直接传输链路组成<sup>[4]</sup>。最小功率选择译码转发协作传输策略(MPSDF)实现了在给定的误码率限制下的最小功率协作传输,以协作和分布的方式,利用机会中继的思想确定最佳中继<sup>[5]</sup>。结合MPSDF提出的高效路由算法可以在保证QoS的情况下,确定一个最小化系统功率的路由,网络性能相比MPCR有明显提高。另一方面,对于最优化网络QoS的路由算法,文献[6]通过限制路由跳数的平均数量来减少所需的频带扩展,从而最大化路由的数据传输速率。在文献[7]中,一个发送簇和一个接收簇组成协作传输链路,利用多输入多输出的传输模型,通过多中继协作来减少丢包率,增强点对点鲁棒性。还有一些路由算法提升了网络吞吐量<sup>[8-9]</sup>。Zhang Jin等在无线mesh网络的协作通信感知路由策略中,考虑了多链路的竞争关系,提出了竞争感知协作度量。它是一种以虚拟连接为基础,来获取不同链路的信道状态和竞争关系的路由度量,然后通过Dijkstra或Bellman-Ford的高效路由算法来创建协作路由<sup>[8]</sup>。Zhang Wan-sheng等提出了一种分布式,面向吞吐量优化的协作路由算法(TOCR),分析了协作链路的吞吐量性能。理论分析表明,中继节点可以提高接收信噪比,以功率的消耗

为代价,提高数据递交率和链路吞吐量<sup>[9]</sup>。

本文结合多跳协作的思想,提出了最大化网络吞吐量的自适应协作路由算法。首先采用DSDV算法建立最短路径路由<sup>[10]</sup>。作为先验式路由协议,DSDV可以通过路由表的更新,及时准确的获得信道信息。然后在每个节点上添加与路由表同步更新的邻节点表,通过邻节点表建立每跳的候选中继集合。最后,利用所有候选中继节点信息来分析比较每跳的链路吞吐量,在限制发射功率的条件下,自适应的选出最佳中继节点,通过最大化每跳的链路吞吐量来最大化整体的网络吞吐量,同时讨论了中继节点个数对吞吐量的影响。

## 2 系统模型

假设信道为平坦准静态衰落信道,所有的信道系数为复高斯随机变量,模值服从瑞利分布,即信道模型为瑞利衰落模型<sup>[11]</sup>。噪声变量为零均值、方差为 $N_0$ 的复高斯随机变量。网络中每个节点都安装一副全向天线,并都工作在半双工模式。每个节点都可以调节自己的发射功率,在链路层使用传统的时分多址(TDMA)协议。

路由路径由直接传输链路,单中继协作链路和两中继协作链路组成,图1为协作路由算法的传输模型。直接传输链路模型是由发送节点 $x$ 和接收节点 $z$ 组成的点对点传输链路,由 $(x,z)$ 来表示。对于点对点的直接传输链路,接收端 $z$ 接收到的经历衰落的带噪声信号可以表示为<sup>[4]</sup>

$$r_{xz} = \sqrt{P_t d_{xz}^{-\alpha} h_{xz}} s + n_{xz} \quad (1)$$

其中 $P_t$ 为直接传输链路中发送节点 $x$ 的发射功率、 $s$ 为单位功率的发射信号、 $d_{xz}$ 为节点 $x$ 与 $z$ 之间的距离、 $\alpha$ 为路径损耗因子、 $h_{xz}$ 为信道系数、 $n_{xz}$ 为噪声。

由发送节点 $x$ 、中继节点 $y$ 和接收节点 $z$ 组成了单中继协作链路 $(x,y,z)$ ,中继节点 $y$ 在 $x$ 和 $z$ 的公共传输范围内。协作链路分为两个时隙发送数据。在第一个时隙 $x$ 广播数据包,如果中继节点和接收节点都收到了信号,则可以分别表示为<sup>[4]</sup>

$$r_{xy} = \sqrt{P_c d_{xy}^{-\alpha} h_{xy}} s + n_{xy} \quad (2)$$

$$r_{xz} = \sqrt{P_c d_{xz}^{-\alpha} h_{xz}} s + n_{xz} \quad (3)$$

其中 $P_c$ 为单中继协作链路中节点的发射功率。

当信号被接收,接收节点和中继要对它进行解码。我们假设当接收信噪比大于一个特定的门限时,就认为正确的接收到了信号<sup>[4]</sup>。如果  $y$  正确接收到了信号,则在第二个时隙中继转发数据到接收节点,发送功率与源节点相同,转发的信号表示为<sup>[4]</sup>

$$r_{y,z} = \sqrt{P_c d_{yz}^{-\alpha}} h_{yz} s + n_{yz} \quad (4)$$

由  $(x, y_1, y_2, z)$  所表示的为双中继协作链路,  $y_1$  和  $y_2$  为中继节点,都在  $x$  和  $z$  的公共传输范围内。在第一个时隙  $x$  广播数据包,  $y_1, y_2$  接收到数据包并正确解码后,在第二个时隙将数据包转发给  $z$ 。如果  $z$  收到了重复数据包,则丢弃。

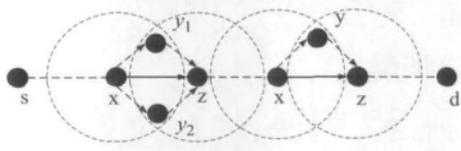


图1 协作路由算法传输模型

Fig. 1 Transmission model of the cooperative routing algorithm

在瑞利衰落信道中,对于点对点传输的直接链路,中断概率可以表示为<sup>[4]</sup>

$$p_{x,z}^o = 1 - \exp\left(-\frac{(2^{R_0} - 1) N_0 d_{xz}^\alpha}{P_t}\right) \quad (5)$$

其中  $R_0$  为源节点的数据发送速率。

在本文提出的算法中,每个中继节点的发射功率与源节点的发射功率相等,则单中继链路的中断概率为<sup>[4]</sup>

$$p_{x,y,z}^o = 1 - \exp(-gd_{xz}^\alpha) - \exp(-gd_{xy}^\alpha - gd_{yz}^\alpha) + \exp(-gd_{xy}^\alpha - gd_{yz}^\alpha - gd_{xz}^\alpha) \quad (6)$$

其中  $g = \frac{(2^{R_0} - 1) N_0}{P_c}$ 。

同理可得,两中继协作链路的中断概率为

$$p_{x,y_1,y_2,z}^o = 1 - \exp(-gd_{xz}^\alpha) - \exp(-gd_{xy_1}^\alpha - gd_{y_1z}^\alpha) - \exp(-gd_{xy_2}^\alpha - gd_{y_2z}^\alpha) + \exp(-gd_{xy_1}^\alpha - gd_{y_1z}^\alpha - gd_{xz}^\alpha) + \exp(-gd_{xy_2}^\alpha - gd_{y_2z}^\alpha - gd_{xz}^\alpha) + \exp(-gd_{xy_1}^\alpha - gd_{y_1z}^\alpha - gd_{xy_2}^\alpha - gd_{y_2z}^\alpha) - \exp(-gd_{xy_1}^\alpha - gd_{y_1z}^\alpha - gd_{xy_2}^\alpha - gd_{y_2z}^\alpha - gd_{xz}^\alpha) \quad (7)$$

其中,  $g = \frac{(2^{R_0} - 1) N_0}{P_w}$ ,  $P_w$  为两中继协作链路中节

点的发射功率。

### 3 最大化吞吐量的协作路由算法

#### 3.1 问题描述

对于每一对源点和终点  $(s, d)$ ,本文的目标是使每一跳的总发射功率不大于  $P_{\max}$  时,寻找从  $s$  到  $d$  的最佳路径,来最大化网络的吞吐量。对于一个给定的源点终点对,路由的吞吐量定义为路径中所有链路吞吐量的最小值。因此,最大化路由中的每一跳的链路吞吐量则可以相应的提高整个路由的吞吐量性能。对于路由  $r$ ,定义  $r_i$  为路由的第  $i$  跳,则问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{r_i \in r} \eta_{r_i} \\ & \text{s. t. } \sum_{r_i} P \leq P_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\sum_{r_i} P$  表示在第  $i$  跳源和中继的发射功率总和。 $P_{\max}$  为节点允许发射功率的最大值、 $\eta_{r_i}$  表示路由  $r$  中的第  $i$  跳的吞吐量。

定义某跳链路的吞吐量为每秒成功发送的比特数,则直接链路的吞吐量为<sup>[9]</sup>

$$\eta_{x,z} = (1 - p_{x,z}^o) \times R_0 \quad (9)$$

同理可得,单中继协作链路的吞吐量为

$$\eta_{x,y,z} = (1 - p_{x,y,z}^o) \times R_0 \quad (10)$$

两中继协作链路的吞吐量为

$$\eta_{x,y_1,y_2,z} = (1 - p_{x,y_1,y_2,z}^o) \times R_0 \quad (11)$$

#### 3.2 基于 DSDV 的协作路由算法

本算法在 DSDV 构建好的最短路径上逐跳选择中继节点,通过提高每跳链路的吞吐量,来提升整个网络的吞吐量。首先,DSDV 是一种先验式路由协议,每个节点维护一张路由表,路由表随着网络拓扑变化而更新,来维护实时的路由信息。相比较于发包时才在网络中发起路由查找过程的反应式路由协议,DSDV 算法可以更加及时、准确的获得网络拓扑结构和信道信息。同时,在节点收到广播的路由信息时,更新自己的邻居节点表,通过比较发送节点和接收节点的邻居节点,来获得每跳的候选中继集合,即所有与发送节点和接收节点都能通信的节点集合,记为  $R$ 。然后,通过逐跳计算吞吐量来从候选中继集合中选择中继,在每一跳根据中继数目动态调整节点发射功率,使得路由中的每一跳的总发射功率都相等。即在协作路由算法中,每跳所

有需要发送信息的节点等分在非协作路由算法中的单节点发送功率,保证了协作路由的总发射功率与非协作路由相等,避免了更多功率的消耗,从而发掘协作分集的优势,提升网络的吞吐量性能。但是随着中继数目增多,每个节点的发射功率减少,使得大部分数据包的接收信噪比小于门限值而被丢弃,从而导致吞吐量下降。因此,中继的数目是有限制的。通过下面的仿真结果发现,在本路由算法中,每跳选择最多两个中继节点是最佳选择。

对于自适应协作路由算法,在每一跳自适应选择中继节点的具体过程如下:

(1) 发送节点  $x$  利用公式(9) 计算在直接传输链路( $x, z$ ) 下的链路吞吐量  $\eta_{x,z}$ , 其中  $P_t = p^{\max}$ ; 利用公式(10) 计算候选中继集合  $R$  中的所有候选节点对应的单中继协作链路( $x, y, z$ ) 的链路吞吐量  $\eta_{x,y,z}$ , 其中  $P_c = p^{\max}/2$ 。选出最大吞吐量  $\eta_{x,y,z}^{\max}$ , 其中  $\eta_{x,y,z}^{\max} = \max_{y \in R}(\eta_{x,y,z})$ ; 利用公式(11) 计算所有候选中继节点两两组合对应的两中继协作链路( $x, y_1, y_2, z$ ) 的链路吞吐量  $\eta_{x,y_1,y_2,z}$ , 其中  $P_w = p^{\max}/3$ 。选出最大吞吐量  $\eta_{x,y_1,y_2,z}^{\max}$ , 其中  $\eta_{x,y_1,y_2,z}^{\max} = \max_{y_1, y_2 \in R}(\eta_{x,y_1,y_2,z})$ 。特殊情况下, 如果候选中继节点集合  $R$  为空, 则令  $\eta_{x,y,z}^{\max}$  和  $\eta_{x,y_1,y_2,z}^{\max}$  等于 0。如果候选中继集合  $R$  中只有一个候选节点, 则令  $\eta_{x,y_1,y_2,z}^{\max}$  等于 0。

(2) 比较  $\eta_{x,z}$ 、 $\eta_{x,y,z}^{\max}$  和  $\eta_{x,y_1,y_2,z}^{\max}$ , 获得该条链路吞吐量的最大值  $\eta^{\max}$ 。如果  $\eta^{\max}$  对应的链路为直接传输链路, 则建立发送节点  $x$  到接收节点  $z$  的直接传输链路, 发送节点  $x$  以发射功率  $P^{\max}$  直接发送数据到下一跳节点  $z$ ; 如果对应的链路为单中继协作传输链路, 则将  $\eta_{x,y,z}^{\max}$  对应的候选中继节点  $y$  选为单中继, 设置发射节点和中继节点的发射功率为  $P^{\max}/2$ ; 如果对应的链路为两中继协作传输链路, 则将  $\eta_{x,y_1,y_2,z}^{\max}$  对应的两个候选中继节点  $y_1$  和  $y_2$  选为链路的两中继, 设置发送节点和两个中继节点的发射功率为  $P^{\max}/3$ 。

在这两种协作传输链路中, 发送节点  $x$  在第一时间隙以规定的发射功率广播数据分组; 当接收到数据分组, 接收节点  $z$  和中继节点(单中继协作传输为  $y$ , 两中继协作传输为  $y_1$  和  $y_2$ ) 要对其进行解码, 当接收信噪比大于一个特定的门限时, 则认为正确的

接收到了信号。如果解码失败, 则节点丢弃该分组。若中继节点正确接收到了信号, 则在第二时间隙以规定的发射功率转发数据到接收节点  $z$ 。若接收节点  $z$  最终正确接收到从发射节点  $x$  或中继节点发来的数据分组, 则传输成功, 否则本次路由传输数据失败, 整个路由过程结束。

为了与自适应协作路由算法相比较, 给出三种固定中继数目的协作路由算法, 分别为单中继协作路由算法, 两中继协作路由算法以及三中继协作路由算法。这三种算法都在 DSDV 构建好的最短路径上逐跳选择中继节点, 不同于自适应路由算法的是每跳的中继数目是固定的, 即规定每跳固定选择  $\gamma$  个中继来协作传输。其中, 单中继算法规定每跳固定选择一个中继, 即  $\gamma$  等于 1, 节点发射功率为  $P^{\max}/2$ ; 两中继算法的  $\gamma$  为 2, 节点发射功率为  $P^{\max}/3$ ; 三中继算法的  $\gamma$  为 3, 节点发射功率为  $P^{\max}/4$ 。三种算法均利用公式(10) 计算本跳所有候选中继节点对应的单中继协作链路吞吐量  $\eta_{x,y,z}$ , 并进行比较。在每跳分别将比较出的各自  $\gamma$  个最佳的  $\eta_{x,y,z}$  对应的候选节点选为中继节点。

### 4 仿真结果

在  $200m \times 200m$  的拓扑区域中, 随机放置 20 个节点, 并随机选择一对源点和目的节点。最大发射功率为 15 dBm, 噪声功率为  $N_0 = -70$  dBm, 路径损耗因子  $\alpha = 4$ , 数据发送速率  $R_0 = 2$  bit/s/Hz。每个节点携带全向天线, 每个仿真结果为重复 10000 次的平均值。

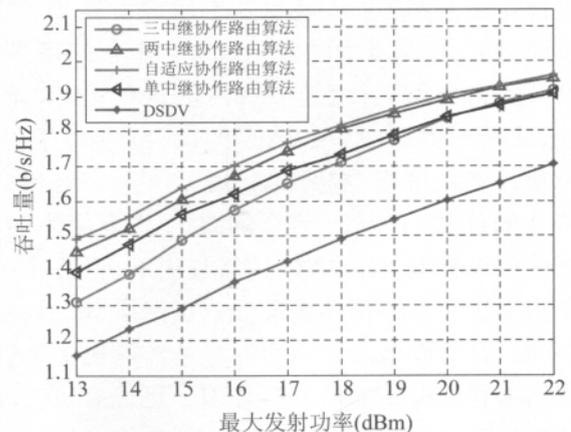


图 2 吞吐量随最大发射功率的变化

Fig. 2 Throughput versus maximum transmission power

吞吐量随着不同最大发射功率  $P_{\max}$  的变化如图2所示。从图中可以看出,两中继协作路由算法要优于单中继和三中继。这是因为两个中继节点相对一个中继节点来说可以提供更高的分集增益,更大程度上提高网络性能,对于三个中继节点,每个节点的发送功率减少,使得大部分数据包的接收信噪比小于门限值而被丢弃,导致吞吐量下降,因此,在此网络环境下,选择两个中继是最优的选择。自适应协作路由算法的吞吐量性能最佳,在最大发射功率为 18 dBm 时,自适应路由算法的吞吐量性能比 DSDV 提高了 21.83% 左右。由于协作路由算法的总发射功率与非协作算法的发射功率相等,因此,吞吐量的提升充分体现了协作分集带来的优势。

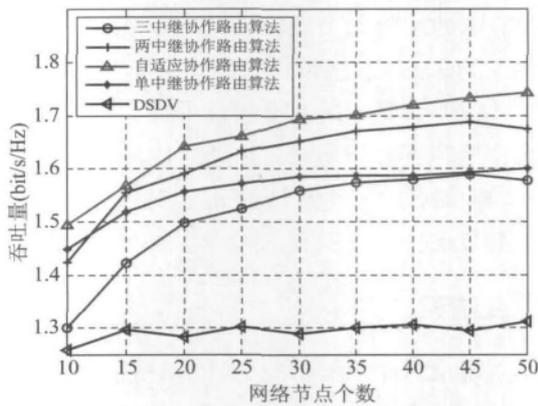


图3 吞吐量随网络节点个数的变化

Fig. 3 Throughput versus network size

图3为吞吐量随网络节点个数的变化情况。所有协作路由算法的吞吐量随着网络中节点个数增多而增大,这是因为随着网络节点个数的增多,网络节点密度增大,中继节点的选择有了更大的空间,选择到更好的中继节点的机会增加。协作路由通过多跳协作,有效的利用了协作分集和广播特性的优势,提高了整个网络的吞吐量性能。从图中可以看出,在所有的网络规模下,自适应协作路由算法的吞吐量性能最佳。在网络节点数目为30时,自适应路由算法的吞吐量性能比单中继协作路由算法提高了6.85%左右。可以看出在此网络环境下,适当增加中继节点有助于提高吞吐量性能。

吞吐量随节点最大运动速度的变化如图4所示。自适应和两中继路由算法相对于单中继路由而言,能够提供更多的协作链路,因此成功传输包的机会增加,丢包的概率会更小,从而更大程度上提高了网络吞吐量。在最大移动速度为 25 m/s 时,自适应路由算法的吞吐量比 DSDV 高 22.75% 左右,比单中继路由算法高 6.78% 左右。这是由于节点运动速度加快,网络拓扑迅速变化,DSDV 算法建立的路径可能会失效,从而造成丢包,而协作路由算法可以通过协作链路找回丢掉的包,增强每跳链路的可靠性,从而提高了网络吞吐量。可以看出,几种算法的吞吐量都随着节点运动速度的加快而降低。因此,本文提出的算法更适合于准静态网络。

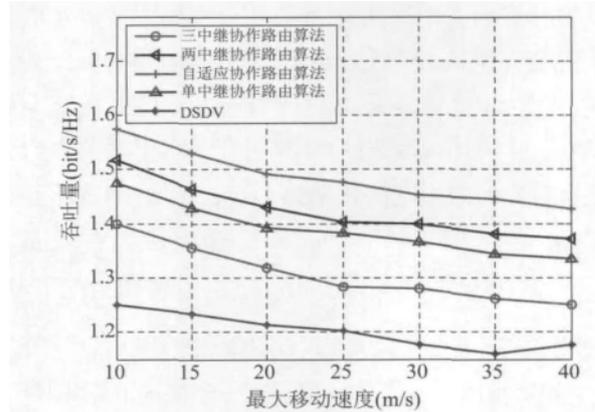


图4 吞吐量随节点最大运动速度的变化

Fig. 4 Throughput versus maximum mobility rate of nodes

## 5 结论

本文提出了一种基于 DSDV 的最大化网络吞吐量的自适应协作路由算法,在不增加发射功率的情况下,每跳自适应的选择中继来提升 Ad Hoc 网络的吞吐量。仿真结果表明,在相同的发射功率、网络规模和节点最大移动速度下,相对于固定中继的协作路由算法,自适应协作路由算法的吞吐量性能更好,表明自适应选择中继节点比固定中继数目的策略要更有优势。而所有协作路由算法相比 DSDV 算法,都显著提升了网络吞吐量,充分体现了协作分集技术在网络层的优越性。

## 参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation

- diversity part I system description [J]. IEEE Transactions on Communications ,2003 ,51( 11) : 1927-1938.
- [2] Li F L , Wu K , and Lippman A. Minimum energy cooperative path routing in all-wireless networks: NP-completeness and heuristic algorithms [J]. Journal of Communications and Networks ,2008 ,10( 2) : 1-9.
- [3] Khandani A E , Abounadi J , and Modiano E. Cooperative routing strategies in wireless networks [C]. Proceedings of Allerton Conference on Communications , Control and Computing , United States , 2003: 1270-1279.
- [4] Ibrahim A S , Zhu H , and Liu K J. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication , 2008 , 7 ( 10) : 3930-3941.
- [5] Sheng Z G , Ding Z G , and Leung K K. Distributed and power efficient routing in wireless cooperative networks [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications , Dresden , 2009: 1-5.
- [6] Beres E and Adve R. Cooperation and routing in multi-hop networks [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications , Glasgow , 2007: 4767-4772.
- [7] Elhawary M and Haas Z J. Energy-efficient protocol for cooperative networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking , 2010 , 19( 2) : 561-574.
- [8] Zhang J and Zhang Q. Contention-aware cooperative routing in wireless mesh networks [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications , Dresden , 2009: 1-5.
- [9] 张晚生 , 刘凯 , 王力. 移动 Ad Hoc 网络中的分布式协作路由算法 [J]. 西安电子科技大学学报 , 2011 , 38 ( 5) : 43-50.
- Zhang Wan-sheng , Liu Kai , and Wang Li. Distributed cooperative routing algorithm for mobile Ad Hoc networks [J]. Journal of Xidian University , 2011 , 38( 5) : 43-50. ( in Chinese)
- [10] Perkins C E and Bhagwat P. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing ( DSDV) for mobile computers [C]. SIGCOMM' 94 Proceedings of the Conference on Communications Architectures , Protocols and Applications , United States , 1994: 234-244.
- [11] Proakis J G. . Digital communications [M]. New York: McGraw-Hill , 2000: 128-200.

#### 作者简介



赵方圆 女 ,1988 年生 ,河北人 ,天津大学电子信息工程学院硕士研究生 ,主要研究方向为无线网络中协作路由的研究。E-mail: fyzhao02@gmail.com



韩昌彩 女 ,1980 年生 ,山东人 ,博士 ,天津大学电子信息工程学院讲师 ,主要研究方向为协作通信、MIMO 技术等。E-mail: cchan@tju.edu.cn



李 媛 女 ,1957 年生 ,天津人 ,天津大学电子信息工程学院副教授 ,主要研究方向为电波传播与天线、微波集成电路理论及设计、协作通信、电磁场数值分析等。E-mail: liyuan@tju.edu.cn