

## 一种Ad hoc网络中的协作路由方案及性能分析

袁 渊 郑宝玉 颜振亚

(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

**摘要:** 该文提出了一种新的Ad hoc网络协作路由方案,通过邻居节点的协同发射,多点接收及路径总功率的比较,形成一条多点协作的能量最小路径。在节点可以获知邻居节点相对位置的假设下,通过在路由请求报文中携带路径总功率和协作簇信息,分布式地实现了路由方案。仿真结果表明协作路由比传统非协作的路由能量效率有30~50%的改善,同时通过协作节点的选择,选择最有效的节点进行协同发射,在能量效率略有下降的同时,降低了协作控制的开销和计算的复杂度。

**关键词:** Ad hoc; 协作路由; 能量效率

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2238-04

## A Novel Cooperative Routing Protocols in Ad hoc Networks and Performance Analysis

Yuan Yuan Zheng Bao-yu Yan Zhen-ya

(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecom., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In this paper, a novel cooperative routing protocol is proposed in Ad hoc networks. A minimal energy multinodes cooperative path is built with the cooperative transmission of neighbor nodes and comparison of total power consumption. Under the assumption that nodes can know the relative location of neighboring nodes, the distributive routing scheme can be implemented by carrying information about power consumption of route and cooperative cluster in Router Requirements (RREQ) packet. Simulation results show that the energy-saving performance can be significantly improved compared with traditional non-cooperative routing. Meanwhile, using the selection strategy of cooperative nodes, the control expense and complexity of computation can be reduced, trading off a little decline in energy-efficiency.

**Key words:** Ad hoc; Cooperative routing; Energy-efficiency

### 1 引言

近年来,自组织、多跳的Ad hoc无线网络越来越受到人们的关注。在Ad hoc网络中,节点随机、动态地分布,他们之间的通信是通过一个或多个节点中继的方式实现的。因为Ad hoc网络不存在固定的基础架构,网络中的节点作为路由器发现并维持到其他节点的路由。通过近几年研究者的努力,Ad hoc网络中的路由问题已经得到了广泛的理解和深入研究<sup>[1]</sup>。在文献[2]中,作者对8种不同的协议进行了回顾,并对它们各自的优缺点进行了比较。

然而,随着新的天线技术的产生,使用传统无线传输模型的路由方案不再是最有效的解决方案。比如,协作分集技术通过共享网络中其他用户的天线,形成虚拟的多天线阵列来实现发射或接收分集,可以获得明显的性能增益,提高网络性能<sup>[3]</sup>。在协作通信中,网络中的每个节点作为虚拟多天系统的一部分,在正确解出传送的信息后,一组节点可以

协同地向一个目标节点(或一组目标节点)发送。而无线Ad hoc网络的广播特性使得在无额外开销的情况下,发送的节点的邻居能同时正确解出信息来帮助节点进行协同发射<sup>[4]</sup>。

传统的Ad hoc路由协议只支持单点的通信而无法获得协作分集的好处<sup>[5]</sup>。因此有必要对传统的Ad hoc路由协议进行改进来支持协作分集。协作分集技术和无线Ad hoc路由的结合称为协作路由。Khandani等研究了协作路由对传输能量的节省,并仿真了在非协作路径上采用协作策略后传输能量效率的改善<sup>[6]</sup>。Li等证明了最小能量路由是NP完全问题,提出了协作最短路径算法(CSP)作为次优的方案<sup>[7]</sup>。Aytac探讨了协作路由的分布式实现,分析了在协作MAC协议支持下协作路由的性能<sup>[8]</sup>。但是以上的研究都没有提出实际的协作路由实现方案。Li的算法要求任何节点的通信范围覆盖所有的节点,这在实际的Ad hoc网络中是不可能的。Aytac也只是对协作路由的算法进行描述而没有具体的方案。

本文在上述研究的基础上,提出了一种协作路由的分布式实现算法。在假定协作MAC的支持和接收端同步接收的

基础上,寻找一条能量最小的协作路径,利用无线网络的广播特性,节点和其同时能正确接收信息的邻居节点协作,组成一条多点多中继的链路来进行信息的传递。通过路由请求的广播,路由应答的返回和路由表的建立,给出了此链路实现的全过程。最后通过仿真,证明了本文的方案比传统的单点路径能量效率有明显的改善。下面的章节是这么安排的。在第2节,给出算法的数学描述和必要的假设。在第3节详细叙述路由发现的整个过程,第4节是算法仿真和性能分析,最后一节是结束语。

## 2 系统模型

### 2.1 功率衰耗模型

本文使用无线传输常用的一种功率衰耗模型,接收信号功率的衰减为  $d^{-\lambda}$ , 其中  $d$  表示发送节点与接收节点之间的距离,  $\lambda$  是由无线信道传输媒质确定的,一般取 2 到 4 之间的值。假定无线信道为单一媒质,则  $\lambda$  在通信区域内为一确定值。我们认为在给定数据传送速率下,接收信噪比 SNR 达到某一门限值  $SNR_{thr}$  时,接收端能正确解码出数据。因此节点  $i$  到节点  $j$  正确传送数据时,节点  $i$  需要的发送功率为

$$P_i = SNR_{thr} d_{ij}^\lambda \eta \quad (1)$$

其中  $\eta$  表示噪声功率。在将  $SNR_{thr}\eta$  规一化后,发送功率可以简单表示为  $d_{ij}^\lambda$ 。

假定点  $t_1, t_2, \dots, t_m$  协作向一目标节点  $r$  发送信息,在接收同步的假设下,接收端能正确接收的条件是联合接收的信噪比大于  $SNR_{thr}$ , 在这种情况下,使总的功率最小的功率分配方案由 Khandani 在文献[6]中给出:

$$P_{co} = 1 / \left( \sum_{i=1}^m \frac{1}{d_{i,r}^\lambda} \right) \quad (2)$$

其中  $d_{i,r}^\lambda$  表示  $t_i$  节点单独向  $r$  节点发送所需的功率。而每个节点所需要的功率分别为

$$P_{t_i} = \frac{d_{i,r}^\lambda}{\sum_{j=1}^m d_{j,r}^\lambda} \times \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{d_{j,r}^\lambda}}, \quad 1 \leq i \leq m \quad (3)$$

我们将网络表示为一张链路权重为  $d_{ij}^\lambda$  的能量衰耗图  $G = (V, E)$ , 其中  $V$  表示点集,  $E$  表示链路集,  $d_{ij}^\lambda$  为边  $\langle i, j \rangle$  的权重。对某个源,目的节点对  $S, D \in V$ , 希望找到一条  $S \rightarrow t_1, t_2, \dots, t_m \rightarrow D$  路径,及相应的传输序列安排,使得路径总能量(功率)  $\sum_{x \in \{S \rightarrow t_1, t_2, \dots, t_m \rightarrow D\}} P_x$  最小。

## 3 协议设计

### 3.1 协议假设

为了实现本文的协作路由算法,先做如下的假设和定义:网络中的节点通过信息交换,可以获知两跳范围内的邻居相对位置。

为了实现协作信道接入的控制<sup>[8]</sup>,定义在路由路径上保存路由信息和控制信道调度的节点叫做“主路径节点”,由

主路径节点组成的路径叫做“主路径”。帮助主路径节点进行协作发送的点集称之为发送协作簇。能同时正确接收的点集称之为接收簇。帮助协作的节点在主路径节点的一跳邻居中选择,同时接收的节点也在下一跳主路径节点的邻居中选择。

### 3.2 路由表管理

传统的 Ad hoc 路由算法分为表驱动的路由和按需式的路由<sup>[1]</sup>。因为本协作路由要求参与路由的节点较多,且不同源,目的节点对路由路径也可能不同,因此从实用角度出发,路由发现的过程采用按需方式。与传统的路由算法不同,协作路由中协作点和协作功率的选择不是由发出广播的节点决定的,而是由收到广播包的节点决定的。广播路由请求包,结构如下:

<路径总损耗,协作簇,源目的 ID 对>

其中路径总损耗表示到这一点为止总的功率消耗,协作簇表示这一节点周围有哪些点可以协同发射,源,目的 ID 对用来标记不同的路由请求。节点收到路由请求包时,需要存储一张路由表,结构如下:

<源 ID 号,上一跳节点 ID,上一跳协作簇及协作功率,路径总损耗,接收簇>

其中源 ID 号用来标记不同的路由请求,记录上一跳节点 ID 和上一跳协作簇用做路由回应,接收簇用来构建自身将广播的路由请求包。当路由请求最终传到目的节点后,目的节点向源节点发送路由回应包,结构如下:

<前一跳节点 ID,前一跳协作簇及协作功率分配,源目的 ID 对>

前一跳 ID 用来标识如何返回到源点,主路径上的点收到路由回应后,将路由表修改为

<源 ID 号,下一跳节点 ID,本跳协作簇及协作功率,路径总损耗>

当路由回应包沿主路径到达源节点后,主路径上的点就可以按照路由表进行协作传输了。因为协作路由参与节点较多,且节点调度复杂(一次传送中一个节点可能不止传送一次信息),所以路由表中只保存“下一跳”的信息,与 AODV 类似<sup>[9]</sup>。

### 3.3 路由发现

如图 1 所示的网络拓扑结构,源节点 1 有数据要发送到目的节点  $d$ 。它向邻居节点广播路由请求。2 节点收到路由请求包后,由节点可获知两跳范围内信息的假设,2 可知当 1 使用最小的功率发送数据时(即 2 的接收信噪比刚好达到门限)它和 1 的共同邻居 3,4 是否也能同时正确接收 1 发出的信息。因为在 2 已知 1 和 3,1 和 4 距离的条件下,根据路径衰耗模型,2 可以计算出 3 和 4 的接收功率来判断是否能正确接收。如果 2 认为 3,4 也能正确接收,2 构造如表 1 所示路由广播包,进行广播。

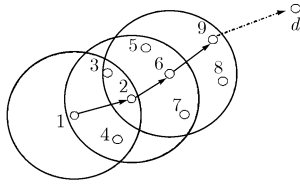


图1 路由发现过程示例

表1 节点2路由广播包结构

路径总损耗	协作簇	源目的ID对
$P_2$	1, 2, 3, 4	$1 \rightarrow d$

同时添加如表2路由表项:

表2 节点2路由表结构

源ID号	上一跳节点ID	上一跳协作簇及协作功率	路径总损耗	接收簇
1	1	$1, P_{1,2}$	$P_2$	3, 4

这里只判断3, 4是否正正确接收的原因是在真正数据发送时, 由2来控制信道的接入, 因为2的控制信号只能到达一跳邻居(发送控制信号时不协作), 所以只选择一跳邻居进行协同发射。6收到自2发来的路由广播包, 可获知有哪些节点可利用来向它协同发送, 6先通过一定的协同选择策略(如距离)来选择2将与其中哪些点协同向6发射, 在选定协同点后, 再通过某种功率分配算法, 如式(3)计算这些点分别所需要的发射功率。最后也是最重要的, 6根据两跳内节点的信息, 计算它的邻居有无能同时正确接收的。即在同步的假设下, 根据路径损耗模型, 计算接收信号功率累加值有没有超过正确接收门限。计算出结果后, 6执行同2的操作, 直到路由广播到达目的节点d。

节点在收到某一邻居的路由广播包后, 也有可能再收到来自其他邻居的广播包, 我们使用路径的总功率损耗来判断是否对路由表进行更新。若总功率低于原表项值, 则更新, 并再次广播新的路由包。当路由请求包最终到达目的节点d之后, d选择其中能量最小的一条路径, 通过路由应答包沿主路径传回到源节点, 主路径上的点在收到路由应答时, 将路由表项做如下的修改, 路由应答包的结构也如表3所示。表3中3项分别是9, 6, 2节点发出的路由应答包:

表3 路由应答包结构

前一跳节点ID	前一跳协作簇及协作功率分配	源目的ID对
6	$2, P_{2,9}, 5, P_{5,9}, 6, P_{6,9}, 7, P_{7,9}$	$1 \rightarrow d$
2	$1, P_{1,6}, 2, P_{2,6}, 3, P_{3,6}, 4, P_{4,6}$	$1 \rightarrow d$
1	$1, P_{1,2}$	$1 \rightarrow d$

表4中3项分别是1, 2, 6节点最后的路由表:

表4 更改后的路由表

源ID号	下一跳节点ID	本跳协作簇及协作功率	路径总损耗
1	2	$1, P_{1,2}$	$P_1$
1	6	$1, P_{1,6}, 2, P_{2,6}, 3, P_{3,6}, 4, P_{4,6}$	$P_2$
1	9	$2, P_{2,9}, 5, P_{5,9}, 6, P_{6,9}, 7, P_{7,9}$	$P_6$

至此, 我们完成了路由建立的全过程, 在路由应答包到达源1后, 1就可以开始进行数据的发送, 发送过程如图2所示(实线表示向主路径节点的发送, 虚线表示同时能正确接收的节点)。

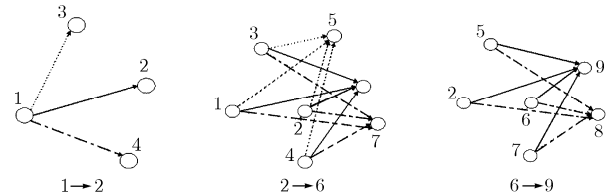


图2 协作发送过程

### 4 仿真结果及性能分析

本文将协作路由协议和几种常规路由协议进行能量效率的比较。这几种路由算法包括最短路径路由算法和沿主路径的非协作路由算法。假定在 $1000 \times 1000$ 的区域内随机分布N个节点。设置功率衰减因子 $\lambda = 2, 4$ 分别表示一般和深度衰减的网络。节点的最大通信半径设置为 $d_{max} = 100$ 米, 接收信噪比门限 $SNR_{thr}, \eta = 1$ , 则节点最大发送功率为 $P_{max} = d_{max}^\lambda$ , 节点发送功率在 $[0, P_{max}]$ 范围内动态可调。我们随机从N个点中取两个做为源和目的节点, 模拟100次, 计算整条链路所需的平均功率, 考虑到不同路径长度的差异, 取单位距离所需的传输功率做为功率(能量)效率的衡量标准。

$$P = \frac{P_{s \rightarrow d}}{D_{s \rightarrow d}} \tag{4}$$

其中 $P_{s \rightarrow d}$ 表示路径总功率,  $D_{s \rightarrow d}$ 表示源和目标之间的直线距离。

图3和图4表示不同点密度下, 3种路由算法在 $\lambda = 2, 4$ 时, 功率规一后的性能曲线。在 $\lambda = 2$ 时, 协作路由算法的功率效率随着网络节点密度的增加有明显的变化, 在节点个数为300左右时, 相比沿着主路径的非协作路由和最短路径路由有30~50%的功率节省。随着节点密度的增加, 可协作的节点数相应增加, 协作路由相对沿主路径的非协作路由性能改善明显。在信道深度衰减( $\lambda = 4$ )时, 协作路由对性能的改善不是很明显。因为接收簇变小, 可协作的点也变少。

在前面提到的协作原则中, 我们将所有的接收簇节点都

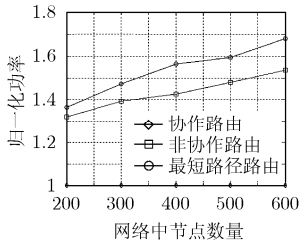


图3  $\lambda = 2$  时功率效率比较

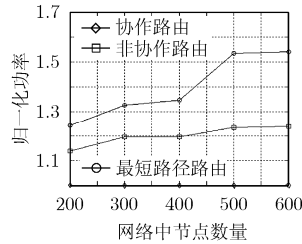


图4  $\lambda = 4$  时功率效率比较

用于协作,这在高密度网络中会使得协作节点过多,协作控制困难,节点计算量增大。实际上,某些协同点与接收簇距离较远,对整个功率分配所做的贡献较小,因此采用某种协作原则筛选协作点,虽然会损失一部分功率效率,但是降低了协作控制的难度和计算量。若主路径上相邻两点为  $a, b$ , 本文简单地用如下公式作为协作选择的原则:

$$d_{i,b} \leq \phi d_{a,b}, i \in C(a) \quad (5)$$

$C(a)$  表示  $a$  的协作簇。通过调整  $\phi$  的值,可以调整协作点的数目。仿真的结果如图 5, 图 6。

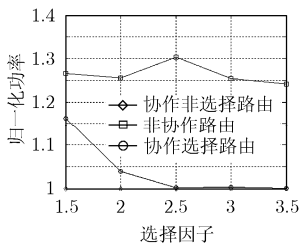


图5  $N = 200$  时路由性能比较

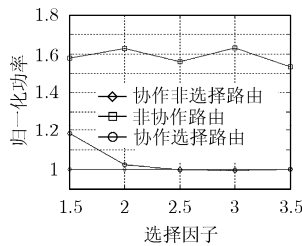


图6  $N = 1000$  时路由性能比较

本文分别在网络节点个数  $N = 200, 1000$ , 横坐标  $\phi$  取 1.5 到 3.5 时进行性能的比较。可以看出,在低密度的情况下,采用协作选择的路由性能比非选择路由差,因为网络中可供选择的节点较少,但协作选择路由的性能仍优于非协作路由。如图所示,随着  $\phi$  的增大,选择协作路由的性能逐渐向非选择协作路由的性能靠近。在高密度网络中,选择路由的性能有可能优于非选择路由,因为前一跳协作簇的选择会影响功率分配,这在高密度网络中直接影响了接收簇的大小,在性能相差不多甚至更优的情况下,选择协作同时降低了协作控制的复杂度和计算量。

### 5 结束语

本文提出了一种协作路由算法的分布式实现方案,通过路由请求和回应,建立一条能量最小的协作路径。在我们的方案中,节点利用正确接收信息的邻居节点进行协同发射,接收节点和同时能正确接收的其邻居节点再组成新的协作

发射簇,提高了整个链路的能量效率。仿真结果表明,本文的路由方案比沿主路径的非协作路由和最短路径算法有 30~50% 的能量节省。通过协同中继的选择策略,在能量效率基本保持不变的同时,减小了协作控制的复杂度和功率分配计算量。

我们下一步的工作是继续研究协作分集在网络中的实现方案,包括协作 MAC 层协议,自适应的空时编码,以及在移动网络中协作通信的实现方案。

### 参考文献

- [1] Vaidya N. Open problems in mobile Ad hoc networks. Keynote talk at the Workshop on Local Area Networks, Tampa, USA, Nov. 2001.
- [2] Royer E. A review of current routing protocols for Ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(2): 46-55.
- [3] Nosratinia A, Hunter E, and Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Comm. Mag.*, 2004, 42(10): 74-80.
- [4] Wieselthier J E, Nguyen G D, and Ephremides A. Algorithms for energy-efficient multicasting in Ad hoc wireless networks. Proc. IEEE Military Communications Conference, Atlantic City, USA, Nov.1999, 2: 1414-1418.
- [5] Laneman J N. Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures [D]. Cambridge, USA, MIT, 2002.
- [6] Khandani A, Abounadi J, Modiano E, and Zheng L. Cooperative routing in wireless networks. in the Proceeding of Allerton Conference, Monticello, USA, Oct. 2003: 1270-1279.
- [7] Li F, Wu K, and Lippman A. Energy-efficient cooperative routing in multi-hop wireless ad hoc networks. IPCCC 2006. Phoenix, USA, April 2006: 215-222.
- [8] Azgin A, Altunbasak Y, and AlRegib G. Cooperative MAC and routing protocols for wireless Ad hoc networks. GLOBECOM '05, St. Louis, USA, 28 Nov.- Dec.2005: 2854-2859.
- [9] Perkins C E and Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. WMCSA '99, New Orleans, USA, Feb.1999: 90-100.

袁 渊: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为现代通信中的信号处理。  
郑宝玉: 男, 1945年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为现代通信中的智能信号与信息处理。