

## Ad Hoc 网络中基于方向性天线的分布式拓扑控制算法<sup>\*</sup>

贺 鹏<sup>1,2+</sup>, 李建东<sup>1,2</sup>, 陈彦辉<sup>1,2</sup>, 陈 亮<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(综合业务网理论与关键技术国家重点实验室(西安电子科技大学),陕西 西安 710071)

<sup>2</sup>(西安电子科技大学 信息科学研究所 宽带无线通信实验室,陕西 西安 710071)

### Distributed Topology Control Algorithm for Ad Hoc Networks Using Directional Antennas

HE Peng<sup>1,2+</sup>, LI Jian-Dong<sup>1,2</sup>, CHEN Yan-Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory of Integrated Service Networks (Xidian University), Xi'an 710071, China)

<sup>2</sup>(Broadband Wireless Communications Laboratory, Information Science Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-29-88202529 ext 805, Fax: +86-29-88201337, E-mail: phe@mail.xidian.edu.cn

**He P, Li JD, Chen YH, Chen L. Distributed topology control algorithm for ad hoc networks using directional antennas. *Journal of Software*, 2007,18(6):1308–1318. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1308.htm>**

**Abstract:** A distributed topology control algorithm for ad hoc networks with directional antennas is proposed in this paper. The topology is controlled not only by adjusting the transmission powers of nodes but also by changing the antenna's pattern (direction). A node grows its transmission power until it finds some neighbor nodes in every sector of its directional antenna. Two planarized optimizations that further reduce some redundant edges are employed and make the topology as a planar graph eventually. The resulting network topology increases network lifetime by reducing transmission power and decreases traffic interference by having low node degrees. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** topology control; directional antennas; planar graph; wireless ad hoc networks

**摘 要:** 提出了一种基于方向性天线的分布式拓扑控制算法,可以同时通过调整网络中各节点的发射功率和改变节点天线的方向来对网络的拓扑进行控制,每个节点逐渐增大它的发射功率直到该节点在其方向性天线的每个扇区内找到足够数量的邻节点为止.在这种基于方向性天线的分布式拓扑控制算法的基础上又使用了两种不同的拓扑平面化优化算法,进一步删除了拓扑图中多余的交织边,使得网络最终的结构为一幅平面图.由于每个节点使用了较低的发射功率以及算法形成的网络拓扑图中的平均节点度数较小,从而提高了整个网络的使用寿命,减少了节点间的干扰.仿真结果充分说明了算法的有效性.

**关键词:** 拓扑控制;方向性天线;平面图;无线 ad hoc 网络

---

\* Supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China under Grant No.60496316 (国家自然科学基金重大项目); the National Natural Science Foundation of China and the Foundation of Microsoft Research Institute in Asia under Grant No.60372048 (国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2005AA123910 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Grand Fundamental Research Program of Education of China under Grant No.104171 (国家教育部科学技术研究重点项目); the Foundation of Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institute of China (高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划)

Received 2006-07-03; Accepted 2006-09-30

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

Ad Hoc 网络是由一组带有无线收发装置的移动终端组成的多跳的临时性自治系统.移动终端具有路由功能,可以通过无线连接构成任意的网络拓扑,这种网络可以独立工作,也可以与 Internet 或蜂窝无线网络连接.在 Ad Hoc 网络中,节点间的路由通常由多个网段(跳)组成,由于终端的无线传输范围有限,两个无法直接通信的终端节点往往通过多个中间节点的转发来实现通信.由于 Ad Hoc 网络中移动终端仅可携带有限的电池,使得节能逐渐成为 Ad Hoc 网络研究的一个突出问题<sup>[1]</sup>.

传统的拓扑控制主要通过功率控制机制来实现,在保证一定通信质量的条件下,通过调节信号发射功率,最终使节点以最小的发射功率构成一个全连通网络.通常,在收发机参数及信道条件一定的情况下,节点的发射功率决定了节点的最远通信距离,若每个节点都使用自己选择的传输距离,而不是以最大传输半径来组建网络,我们称其为拓扑控制.拓扑控制的重要性在于它可以从许多方面影响系统性能<sup>[2]</sup>,在保证网络连通的情况下,使节点的发射功率尽可能小,这样不但可以节省通信能量、延长电池寿命、简化网络拓扑,还可以减少节点在无线信道上的碰撞<sup>[3]</sup>,提高信道的空间复用度<sup>[4]</sup>,最终提高整个网络的容量.

目前提出的拓扑控制算法可分为集中式控制和分布式控制两大类.集中式控制算法,如 CONNEC<sup>[5]</sup>,MINR<sup>[6]</sup>,需要全网的拓扑信息,进而需要大量开销,可扩展性差,不适合移动 Ad Hoc 网络的应用.分布式算法如 LINT<sup>[5]</sup>,LMST<sup>[2]</sup>,CONPOW<sup>[7]</sup>则依靠节点配置的 GPS 接收机周期性地交换“Hello”包获取网络局部的拓扑信息,通过控制节点的发射功率使每个节点自己决定所使用的传输半径,构建新的拓扑并保持网络的连通性.与大多数分布式拓扑控制算法不同,CBTC<sup>[8]</sup>提出了一种基于扇区的拓扑控制思想,算法不要求知道节点的位置信息,它假设接收器在接收到信号时可以确定发送者的方向,一对通信的节点在交换了“Hello”消息后彼此就可以知道对方的方向.这种在没有位置信息的情况下估计方向的技术被称为 AOA(angle-of-arrival)<sup>[9]</sup>问题.众所周知,在无线 Ad Hoc 网络动态变化的过程中,要获得接收信号的方向信息(AOA)相对比较复杂,要求天线的信号处理能力较高,开销很大,很难及时维护正确的节点方向信息.本文提出了一种基于方向性天线<sup>[10]</sup>的分布式拓扑控制算法 DABTC(directional antenna-based topology control).与 CBTC 不同,该算法不需要知道邻节点的方向信息,只需获得邻节点所在的方向性天线的扇区信息 SOA(sector-of-arrival)即可,算法克服了由于网络动态变化所带来的到达角失效问题,对天线的体积、功耗及所需的信号处理能力要求不是很高,系统开销小,适用于现有的无线 Ad Hoc 网络.在 DABTC 算法的基础上,我们又使用了两种不同的拓扑平面化优化算法,使得网络最终的拓扑结构为一幅平坦图.

## 1 无线 Ad Hoc 网络模型

假设节点分布在一个二维平面中,每个节点具有唯一的 ID 号.任意节点  $u$  都配有一个带有  $N$  个扇区的方向性天线,而且节点  $u$  的发射功率  $p(u)$  可以在最小和最大之间连续调节,即  $0 \leq p(u) \leq p(u)_{\max}$ ,  $p(u)_{\max}$  表示节点  $u$  的最大发射功率.对于同质网络,所有节点都具有相同的最大发射功率  $P_{\max}$ .每个节点配备有 GPS 接收器,因此,它可以知道自己的位置信息(该假设是为了便于描述两种不同的拓扑平面化优化算法,对于基本的 DABTC 算法来说,不需要节点的 GPS 信息).假设节点具有相同的路径损耗模型,即无线信号的功率按照发送天线和接收天线之间距离的  $\beta$  次方衰减<sup>[11]</sup>,  $\beta \geq 2$ ,  $\beta$  取决于无线传播模型.对于自由空间(free space)模型,  $\beta=2$ ,发送功率  $P_t$  与接收功率  $P_r$  的关系为

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (1)$$

其中,  $G_t, G_r$  分别是发送和接收天线的增益,  $\lambda$  是波长,  $d$  是发送天线与接收天线之间的距离.对于双线(two-ray)模型,  $\beta=4$ ,发送功率  $P_t$  与接收功率  $P_r$  的关系为

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2)$$

其中,  $h_t$  和  $h_r$  分别为发射天线和接收天线的高度. 综上所述, 当发送节点  $u$  和接收节点  $v$  之间的距离为  $d(u,v)$  时, 节点  $u$  与节点  $v$  通信所需要最小功率值  $p(u,v)=td(u,v)^\beta$ . 假设传输介质是对称的, 则  $p(u,v)=p(v,u)$ . 在引出了上述网络模型后, 我们将给出一些与图相关的基本概念和术语, 在不引起混淆的情况下, 本文中图即表示无线 Ad Hoc 网络某时刻的网络拓扑.

1.  $R_{\max}$  表示节点的最大传输半径, 假定所有节点都具有相同的  $R_{\max}$ .
2.  $DIST(u,v)$  表示节点  $u,v$  之间的欧几里德距离.
3.  $\langle u,v \rangle$  表示从节点  $u$  到节点  $v$  的一条有向边.
4. 图  $G_0$  表示所有节点都使用  $R_{\max}$  半径, 整个网络形成的拓扑结构.  $V(G_0)$  为  $G_0$  中所有节点的集合,  $E(G_0)$  为  $G_0$  中所有有向边的集合. 它满足对于任意一条有向边  $\langle u,v \rangle \in E(G_0)$ , 当且仅当  $u \neq v$  且  $DIST(u,v) \leq R_{\max}$ .  $G_0$  表示了未进行拓扑控制时的网络拓扑结构.
5.  $N(u)$  表示未进行拓扑控制时节点  $u$  的 1 跳邻节点集, 即  $u$  在图  $G_0$  中的邻节点.
6. 节点  $u$  的邻节点个数称为节点  $u$  的度数, 记作  $d(u)$ .
7.  $G_E$  表示经过拓扑控制之后的网络拓扑图. 对于任意一条有向边  $\langle u,v \rangle \in E(G_E)$ , 当且仅当  $u \neq v$  且  $DIST(u,v) \leq r(u)$ , 其中,  $r(u)$  表示经过拓扑控制后节点  $u$  选择的传输半径,  $r(u) \in [0, R_{\max}]$ . 显然,  $V(G_E) = V(G_0), E(G_E) \subseteq E(G_0)$ .
8.  $N_E(u)$  表示节点  $u$  在图  $G_E$  中的 1 跳邻节点集, 即进行拓扑控制后节点  $u$  的实际 1 跳邻节点.  $\forall v \in N_E(u)$  有  $DIST(u,v) \leq r(u)$ , 显然,  $N_E(u) \subseteq N(u)$ .
9. 把一个图  $G$  的图示画在平面上, 使得任何两边除端点外无公共点, 则称此种图  $G$  为平面图.

## 2 基于方向性天线的拓扑控制算法(DABTC)

由于无线 Ad Hoc 网络的拓扑是动态变化的, 故要求拓扑控制算法不仅能够初始时建立具有某种性质(或者优化目标)的网络拓扑结构, 而且在拓扑发生变化时, 算法能够重构网络, 保障网络的连通性, 并且以较小的开销维护网络已有的属性. 根据无线 Ad Hoc 网络的特点, 本文提出了一种基于方向性天线的分布式拓扑控制算法 DABTC. 为了保证算法的正确性, 我们假设网络中的节点都有一个方向性天线, 天线包含了  $N$  个互不重叠的扇区, 每个扇区覆盖了  $2\pi/N$  的弧度范围, 这样一来, 网络中的节点可以同时向  $k$  个 ( $1 \leq k \leq N$ ) 特定的方向发射和接收信号.

DABTC 算法主要由以下两个阶段组成: 信息收集和拓扑控制. 在信息收集阶段, 为了确定发射功率, 节点  $u$  首先需要收集其 1 跳邻节点的信息, 即确定  $N_E(u)$ . 节点  $u$  以功率  $p(u)$  向外发送“Hello”消息, “Hello”消息中包含了节点  $u$  的 ID 号以及此时节点  $u$  的发射功率  $p(u)$ . 节点  $v$  收到  $u$  发送的“Hello”消息后, 将向节点  $u$  回应“ACK”消息, “ACK”消息中同样包含了节点  $v$  的 ID 号以及节点  $v$  的发射功率  $p(v)$ . 这里我们仅考虑  $u,v$  之间的双向链路, 即节点  $u$  和节点  $v$  的邻接关系是对称的,  $v \in N_E(u)$  且  $u \in N_E(v)$ . 也就是说, 节点  $u$  的发射功率  $p(u)$  和节点  $v$  的发射功率  $p(v)$  要满足  $p(u) \geq p(u,v)$  且  $p(v) \geq p(u,v)$ . 当收到  $v$  的响应消息后, 节点  $u$  把节点  $v$  加入到集合  $N_E(u)$  中, 同时, 节点  $u$  可以得到它的方向性天线中覆盖节点  $v$  的那个扇区的扇区信息(SOA). 在网络中所有节点都收集到它们的邻节点信息后, 我们就可以构造出经过拓扑控制之后的网络拓扑图  $G_E$ . 下面给出 DABTC 算法的具体过程.

### 2.1 DABTC算法

- (1) 节点  $u$  设置其初始时发射功率  $p(u)=\varepsilon$ .
- (2) 节点  $u$  设置其天线的  $N$  个扇区都为空扇区(所谓空扇区是指该扇区所覆盖的范围内没有  $u$  的 1 跳邻节点).
- (3) 节点  $u$  逐渐增大发射功率并向其天线的空扇区发送“Hello”消息, 并收集来自其他节点的“ACK”, 如果节点  $u$  发现了一个新节点  $v$ , 则节点  $u$  将把  $v$  存入其本地邻节点集  $N_E(u)$  中, 并将  $u$  节点天线中覆盖节点  $v$  的扇区标志为非空扇区.
- (4) 重复步骤(3), 直到节点  $u$  的天线中没有空扇区或节点  $u$  的发射功率  $p(u)=p(u)_{\max}$  为止, 算法结束.

DABTC 算法的伪代码在算法 1 中给出.

**算法 1.** DABTC.

// Basic DABTC algorithm on node  $u$

$Current\_Pow=Init\_Min\_Pow$ ;

$N_E(u)=\emptyset, Total\_Sec(u)=NULL$ ;

$Emp\_Sec(u)=Total\_Sec(u)$ ;

**while** ( $Emp\_Sec(u)\neq NULL \ \&\& \ Current\_Pow\leq Max\_Pow$ )

$Broadcast(u,p)$ ; /\* Node  $u$  broadcasts a “Hello” message to  $N$  sectors with the initial minimum transmission Power \*/

$Gather(u,v,p,“ACK”)$ ; /\* Gather “ACK” sending by node  $v$  \*/

**for** (every node  $v$  sending the “ACK”)

**If** ( $v$  is not in  $N_E(u)$ )

$N_E(u)=N_E(u)\cup\{v\}$ ;

$Emp\_Sec(u)=$ The rest of sectors that are not covered by any node in  $N_E(u)$

**end if**

$Current\_Pow=IncreasePow(Current\_Pow)$ ;

**end for**

**end while**

## 2.2 DABTC算法优化

经过 DABTC 算法处理后形成的网络拓扑结构并不是一个平坦图,为了简化网络拓扑,降低节点度数,减少节点在信道上的碰撞<sup>[3]</sup>,提高网络吞吐量、网络传输容量和信道空间重用性<sup>[4]</sup>,我们在 DABTC 算法导出的拓扑图上加入了两种平面化处理算法,进一步删除了拓扑图中多余的交织边,使得网络最终的拓扑结构为一幅平坦图.下面我们分别对这两种不同的平面优化算法进行介绍.

### 2.2.1 DABTC 平面优化之一

- (1) 网络中的每个节点  $u$  向外广播其位置信息,同时侦听来自它的 1 跳邻节点的位置信息.
- (2) 节点  $u$  收集其邻节点集  $N_E(u)$  中各节点的位置信息.
- (3) 对于任意一个  $N_E(u)$  中的节点  $v$  来说,若以  $DIST(u,v)$  为直径的圆内不再包含任何其他节点  $w\in N_E(u)$ ,则节点  $u$  广播消息  $proposal(u,v)$ ,建议在图  $G_E$  中保留边  $\langle u,v \rangle$ ,同时,节点  $u$  还要侦听来自周围节点的信息.
- (4) 当节点  $v$  接收到消息  $proposal(u,v)$  时,如果节点  $v$  发现节点  $u$  也在它的 1 跳邻节点集  $N_E(v)$  中,则节点  $v$  接受保留边  $\langle u,v \rangle$  的建议,并向外广播消息  $accept(u,v)$ ;否则,节点  $v$  拒绝该建议,并向外发送消息  $reject(u,v)$ .
- (5) 节点  $u$  收到  $v$  广播的消息  $accept(u,v)$  后,保留图  $G_E$  中的边  $\langle u,v \rangle$ .同样的方法应用于  $v$ .

### 2.2.2 DABTC 平面优化之二

- (1) 网络中的每个节点  $u$  向外广播其位置信息,同时侦听来自它的 1 跳邻节点的位置信息.
- (2) 节点  $u$  收集其邻节点集  $N_E(u)$  中各节点的位置信息.
- (3) 对于任意一个  $N_E(u)$  中的节点  $v$  来说,若以节点  $u$  和  $v$  为圆心、 $DIST(u,v)$  为半径的两个圆的公共区域内不再包含任何其他节点  $w\in N_E(u)$ ,则节点  $u$  广播消息  $proposal(u,v)$ ,建议在图  $G_E$  中保留边  $\langle u,v \rangle$ ,同时,节点  $u$  还要侦听来自周围节点的信息.
- (4) 当节点  $v$  接收到消息  $proposal(u,v)$  时,如果节点  $v$  发现节点  $u$  也在它的 1 跳邻节点集  $N_E(v)$  中,则节点  $v$  接受保留边  $\langle u,v \rangle$  的建议,并向外广播消息  $accept(u,v)$ ;否则,节点  $v$  拒绝该建议,并向外发送消息  $reject(u,v)$ .
- (5) 节点  $u$  收到  $v$  广播的消息  $accept(u,v)$  后,保留图  $G_E$  中的边  $\langle u,v \rangle$ .同样的方法应用于  $v$ .

经过以上两种平面化优化算法处理后的 DABTC 算法分别表示为 PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II,它们各自的伪代码由算法 2 和算法 3 给出.

**算法 2. PLA-DABTC-I.**

/\* PLA-DABTC-I algorithm on node  $u$ , the basic part of PLA-DABTC-I is the same as DABTC, and we add some optimizations as follows \*/

```

 $m$ =midpoint of  $\langle u,v \rangle$ 
for all  $v \in N_E(u)$  do
  for all  $w \in N_E(u)$  do
    if  $w == v$  then
      continue
    else if  $DIST(m,w) < DIST(u,m)$  then
      eliminate edge  $\langle u,v \rangle$ 
      break
    end if
  end for
end for

```

**end for**

**算法 3. PLA-DABTC-II.**

/\* PLA-DABTC-II algorithm on node  $u$ , the basic part of PLA-DABTC-II is the same as DABTC, and we add some optimizations as follows \*/

// Optimizations

```

for all  $v \in N_E(u)$  do
  for all  $w \in N_E(u)$  do
    if  $w == v$  then
      continue
    else if  $DIST(u,v) > \max(DIST(u,w); DIST(v,w))$  then
      eliminate edge  $\langle u,v \rangle$ 
      break
    end if
  end for
end for

```

**end for**

**3 DABTC 算法的性能仿真**

为了验证 DABTC, PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 算法的有效性,我们分别对这 3 种算法所导出的拓扑图的性质进行了仿真研究,在此基础上,我们又采用了经典的 AODV<sup>[12]</sup>作为分组路由,分析了不同业务负载下,这 3 种具有不同拓扑结构的网络的端到端通过量、平均分组传输时延和平均分组成功传输率。

**3.1 仿真条件**

在对拓扑图性质的研究中,我们假设节点均匀、随机分布在一个  $1000 \times 1000 \text{m}^2$  的区域中,节点的最大传输半径为 250m,节点数为 50~300 个。仿真中,我们设置节点方向性天线的扇区数  $N=6$ ,每个扇区覆盖  $\pi/3$  的弧度范围。我们选用了双线无线传播模型,即功率衰减系数  $\beta$  为 4,发送天线和接收天线的增益均为 0dB,高度均为 1.5m,接收阈值为 -94dBW。根据算法需要,仿真中,我们逐渐增大节点的发射功率,从 -10.0dBW~10.0dBW,与之对应的节点的传输半径从 35m~250m。

为了分析不同拓扑结构的网络在加载业务后的性能,我们采用了当前比较流行的网络仿真软件 NS (network simulator) 作为仿真平台,网络中各节点设置的运动场景如下:取 100 个节点随机分布在  $1000 \times 1000 \text{m}^2$  的平坦区域内,节点采用 Random Waypoint 的运动模型,节点在链路层采用了基于 802.11<sup>[13]</sup>标准的 MAC 协

议,DCF 使用了 RTS 和 CTS,该 MAC 协议采用了 CSMA/CD 多址接入方式,仿真时间为 900s,我们统计了 10 次仿真后的结果.仿真中,我们考虑到了两种不同的 CBR 业务流:1 跳业务和多跳业务,所有这些业务流都是随机地从 10 个节点对中产生的.所谓 1 跳业务就是源节点和目的节点相距 1 跳,而多跳业务是节点对之间相距 10 跳.CBR 分组流的到达间隔从 10ms~100ms,分组长度为 512 字节,因此,业务流总的到达率是从 40Kb/s~400Kb/s.

### 3.2 网络拓扑结构的性质

网络拓扑结构的好坏直接反映了拓扑控制算法性能的优劣,而评价拓扑图性能好坏的一个很重要的衡量标准就是节点度  $d(u)$ ,仿真中,我们选了 3 个与节点度数有关的指标来验证 DABTC,PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 算法的有效性,它们分别是:最大节点度(maximum degree)、平均节点度(average degree)和节点平均传输半径(average transmission radius).

图 1 示例了网络节点数为 150、不同算法所形成的拓扑结构.图 1(a)是未经过拓扑控制的网络拓扑,节点以最大功率进行通信,每个节点的传输半径都为 250m.图 1(b)~图 1(d)是经过拓扑控制后的网络拓扑图,从图 1(c)和图 1(d)中可以很明显地发现,经过平面化优化后的 DABTC 算法所导出的网络拓扑结构简单,图的平均节点度小,节点的功率有效性高.

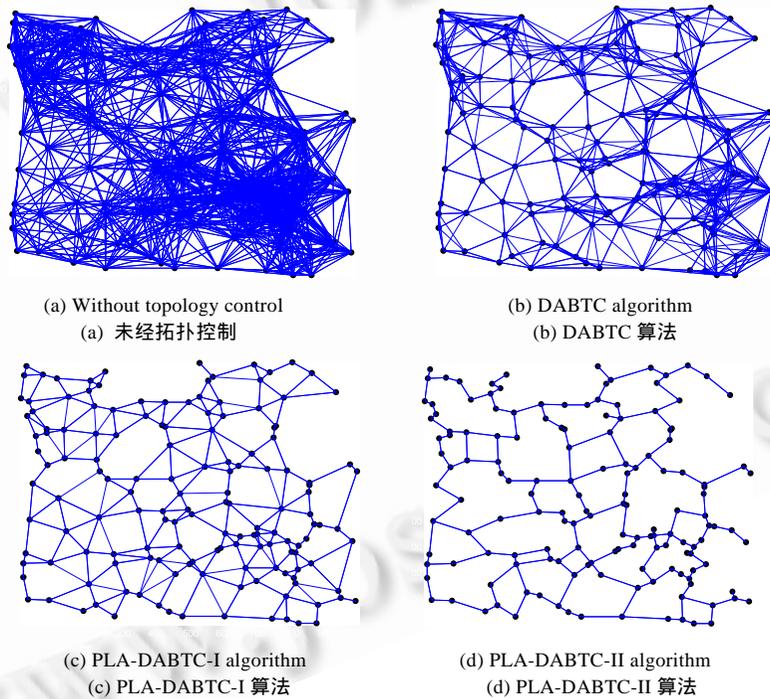


Fig.1 Network topology obtained by different topology control algorithm

图 1 不同拓扑控制算法导出的网络拓扑

图 2 显示了不同算法所导出的拓扑的平均节点度.节点度小有利于信道的空间复用度,提高网络的容量,减少分组碰撞的概率.从图 2 中可以看出,当未采用拓扑控制机制时,随着节点密度的增加,节点度以近似节点增长的倍数快速地增加,DABTC 算法引出的拓扑的平均节点度随着网络节点数的增加依然呈现出缓慢增加的趋势,而 PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 算法形成的拓扑的平均节点度随着网络节点数的增加几乎保持不变.图 3(a)、图 3(b)分别反映了算法形成的拓扑图中最大节点度的平均值和最大值与节点数量之间的关系,经过平面化优化后的 DABTC 算法导出的拓扑图中最大节点度的平均值和最大值在各种节点密度下都比较稳定,通常在 8 以内.

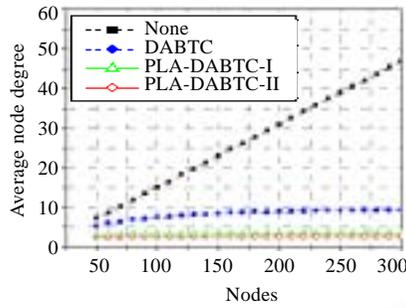


Fig.2 Comparison of None, DABTC, PLA-DABTC-I and PLA-DABTC-II with respect to average node degree

图 2 未经拓扑控制以及经过 DABTC,PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 三种算法控制后形成的网络拓扑的平均节点度数比较

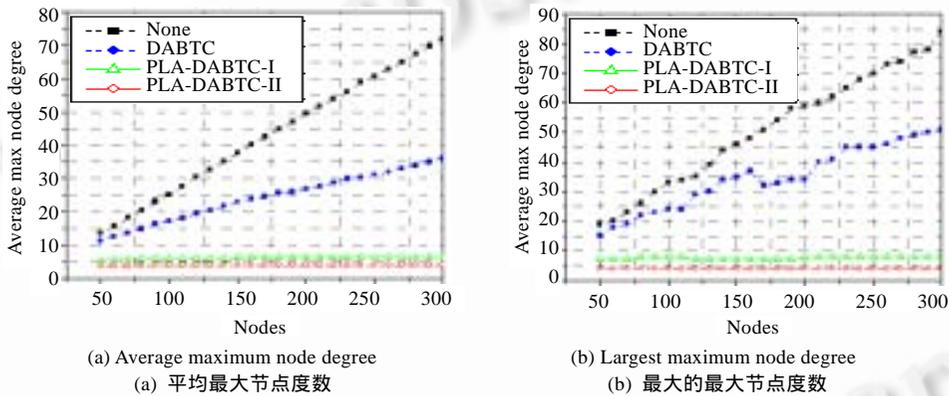


Fig.3 Comparison of None, DABTC, PLA-DABTC-I and PLA-DABTC-II with respect to maximum node degree

图 3 未经拓扑控制以及经过 DABTC,PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 三种算法控制后形成的网络拓扑的最大节点度数比较

图 4(a)、图 4(b)分别描述了算法形成的拓扑图中节点的平均传输半径和平均最大传输半径,通过仿真我们可以看出,PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 算法确定的平均传输半径较小,算法在维护网络连通性的同时保证了节点最小能量特性,有效地节省了通信能量,延长了整个网络的使用寿命.图 5 从不同侧面反映了算法确定的发射功率的效率,显示了节点平均发射功率占最大功率的百分比.从图 5 的结果可以看出,经过拓扑控制算法后确定的节点发射功率要远远优于未经拓扑控制的节点发射功率,PLA-DABTC-II 在所有情况下确定的发射功率不超过最大功率的 55%,当网络中的节点数大于 200 时,其确定的发射功率不超过最大功率的 30%.

3.3 网络性能仿真

我们利用经典的 AODV<sup>[12]</sup>作为网络的路由协议,分析了不同业务负载下 3 种不同结构网络的网络性能.仿真中考虑到了两种不同的 CBR 业务流:1 跳业务和多跳业务,所有这些业务流都是随机地从 10 个节点对中产生的.具体的仿真参数见表 1.

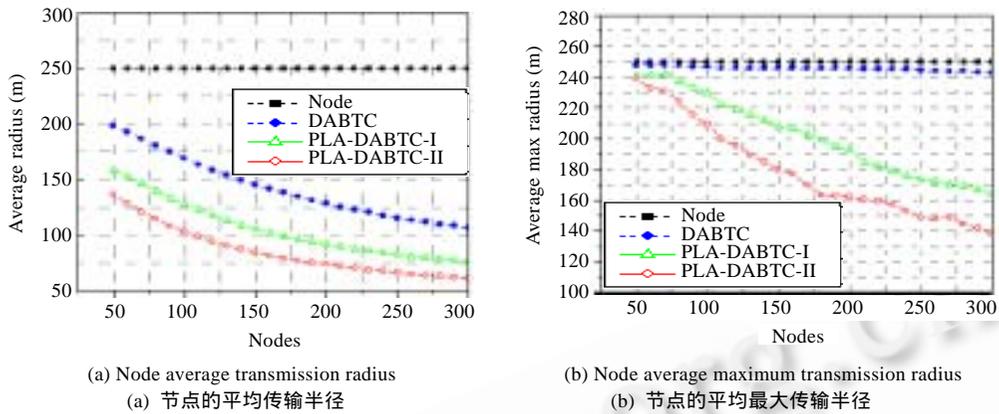


Fig.4 Comparison of None, DABTC, PLA-DABTC-I and PLA-DABTC-II with respect to the radius  
图 4 未经拓扑控制以及经过 DABTC,PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 三种算法控制后节点发射半径的比较

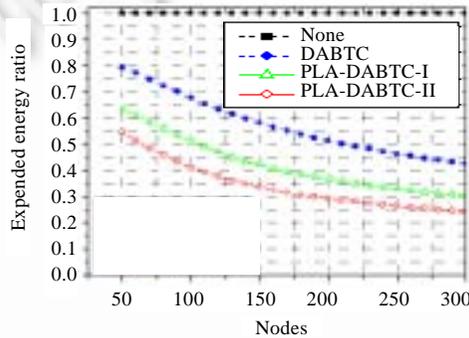


Fig.5 Comparison of NONE, DABTC, PLA-DABTC-I and PLA-DABTC-II with respect to the expended energy ratio (EER)

图 5 未经拓扑控制以及经过 DABTC,PLA-DABTC-I 和 PLA-DABTC-II 三种算法控制后节点平均传输功率占最大功率的百分比

Table 1 Parameters of simulation

表 1 仿真参数值

Number of nodes	100
Maximum transmission range (m)	250
Rate of channel (Mbit/s)	2
Region (m <sup>2</sup> )	1000×1000
Type of traffic	CBR
CBR flows	10
Packet arrival interval (ms)	10~100
Length of packet (Byte)	512
Simulation time (s)	900

我们首先来考虑 1 跳业务,图 6 得到了不同业务负载下的网络平均分组成功传输率、平均分组传输时延和端到端通过量.图 6(a)描述了 1 跳业务在不同业务负载下的平均分组成功传输率,由于未经拓扑控制时节点都以最大功率发送信号,此时,在某一节点通信范围内的节点数增多,对于 1 跳业务来说,随着业务负载的不断增大,某一时刻分组对信道的竞争加剧,从而使得冲突迅速增加,导致网络丢包概率变大.相反地,经过拓扑控制后的网络由于节点以相对较小的传输功率发送分组,缓解了分组对信道的竞争现象,从而获得了相对较高的平均

分组成功传输率.

图 6(b)描述了 10 组 1 跳业务在不同业务负载下网络的平均分组传输时延.在业务负载小于 100Kb/s 时,网络的平均分组传输时延都很小,随着业务量的不断增加,未经拓扑控制的网络分组竞争信道加剧,信道的空间复用度降低,导致大量分组滞留在 MAC 层的等待队列中,分组传输时延加大,经过拓扑控制后这种现象得到了一定程度上的缓解.出于相同的原因,未经拓扑控制的网络端到端通过量相对较低,如图 6(c)所示.

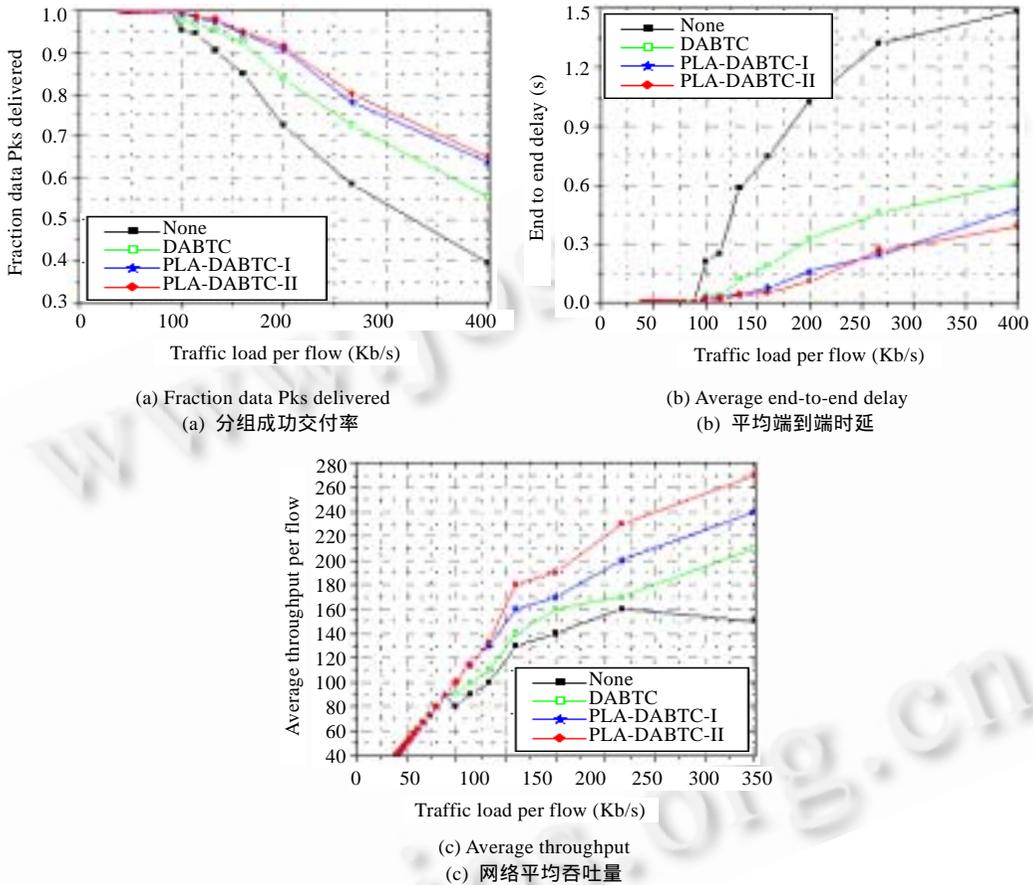


Fig.6 Performance obtained from one-hop CBR flows at various loads

图 6 单跳业务在不同业务负载下的网络性能比较

接下来考虑多跳业务,网络承载了 10 个 10 跳的业务流,我们从经过拓扑控制算法形成的网络中随机选取 10 对源和目的节点,用于产生 CBR 业务,而且源节点和目的节点之间相距 10 跳,仿真过程中分组传输的路径是由 AODV<sup>[12]</sup>路由由协议完成的.图 7(a)描述了网络的平均分组传输时延,从图中我们可以看出,在网络业务负载不是很大时,由于未经拓扑控制时节点都以最大功率发送信号,这使得分组平均转发次数较少,导致业务流的端到端时延降低;相反地,经过拓扑控制后的网络由于使用了较小的发射功率,分组平均转发次数增加,业务流的端到端时延加大.图 7(b)反映了网络的端到端通过量,当网络负载较低时,分组竞争信道的程度不是很大,有无拓扑控制对网络的性能影响不是很大.随着负载的加大,经过拓扑控制后由于分组的平均转发次数增多,这使得在某一时刻分组竞争信道的概率变大,而分组对信道竞争的加剧会导致网络丢弃大量的数据分组,从而降低业务流的端到端通过量.

通过对网络性能的仿真我们可以看出,与最大功率拓扑相比,拓扑控制通过减少节点的发射功率,建立了相对而言较为稀疏的连通网络,提高了带宽的重利用率和网络的吞吐量;但是,对于那些承载了大量多跳业务的网

络来说,拓扑控制后的网络性能优势由于受到 MAC 层竞争机制的影响而有所减弱。

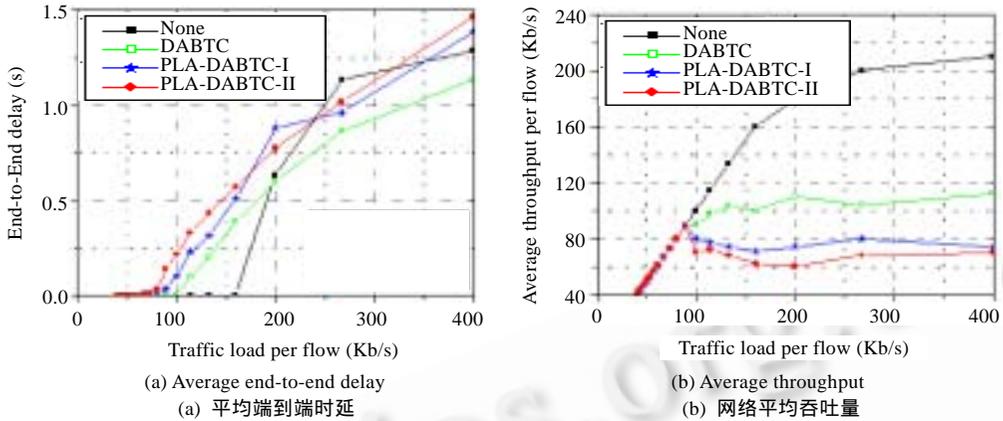


Fig.7 Performance obtained from multi-hop CBR flows at various loads

图 7 多跳业务在不同业务负载下的网络性能比较

#### 4 结束语

我们利用方向性天线的特点,通过调整网络中各节点的发射功率以及改变节点天线的方向来对网络的拓扑进行控制.在此基础上,我们又使用了两种不同的拓扑平面化优化算法,形成网络最终的稀疏平坦结构.由于每个节点使用了较低的发射功率以及算法形成的网络拓扑图中的平均节点度数较小,从而优化了网络的性能,节省了节点的功率,延长了网络的生存时间.但通过仿真我们发现,由于 MAC 层竞争机制的影响,在保证网络连通的条件下一味地降低节点的传输功率,并不一定能够提高网络性能,节点发射功率的选取要在节点功耗、分组平均转发次数和信道空间复用度之间加以折衷.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是西安电子科技大学通信工程学院的李建东教授表示感谢.

#### References:

- [1] Jones CE, Sivalingam KM, Agrawal P, Chen JC. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. *Wireless Networks*, 2001,7(4):343–358.
- [2] Li N, Hou JC, Sha L. Design and analysis of an MST based topology control algorithm. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005,4(3):1195–1206.
- [3] Santi P, Blough DM, Vainstein F. A probabilistic analysis for the range assignment problem in ad hoc networks. In: Lee SJ, ed. *Proc. of the ACM Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2001. 212–220.
- [4] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000,46(2):388–404.
- [5] Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. In: Irene K, Yuval S, eds. *Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies*. Tel Aviv: IEEE Press, 2000. 404–413.
- [6] EstheR J, Clayton O. Topology control for efficient information dissemination in ad hoc networks. In: Mohammad SO, ed. *Proc. of the Int'l Symp. on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*. San Diego: Soc. for Modeling and Simulation Int'l, 2002. 179–191.

- [7] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS, Kumar PR. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In: Luciano L, ed. Proc. of the European Wireless Conf., Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Application. Florence: EW Press, 2002. 156–162.
- [8] Li L, Halpern J, Bahl V, Wang YM, Wattenhofer R. Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks. In: Mark T, Dave D, eds. Proc. of the 20th ACM Symp. on Principle of Distributed Computing (PODC). New York: ACM Press, 2001. 264–273.
- [9] Krizman K, Biedka TE, Rappaport TS. Wireless position location: Fundamentals, implementation strategies, and source of error. In: Eric S, ed. Proc. of the 47th IEEE Vehicular Technology Conf. Phoenix: IEEE Operation Center, 1997. 919–923.
- [10] Huang ZC, Zhang ZS, Ryu B. Power control for directional antenna-based mobile ad hoc networks. In: Clifford J, King R, eds. Proc. of the 2006 Int'l Conf. Communications and Mobile Computing. New York: ACM Press, 2006. 917–922.
- [11] Rodoplu V, Meng TH. Minimum energy mobile wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8):1333–1344.
- [12] Perkins CE, Royer EM. Ad-Hoc on demand distance vector routing. In: Kristine K, ed. Proc. of the 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New Orleans: IEEE Computer Society, 1999. 90–100.
- [13] IEEE 802.11. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) Specifications. 1999.



贺鹏(1975 - ),男,北京人,博士生,主要研究领域为无线个人通信,无线局域网,算法设计,网络优化.



陈彦辉(1972 - ),男,副教授,主要研究领域为移动通信和通信信号处理,软件无线电,无线宽带接入,无线移动通信网.



李建东(1962 - ),男,教授,博士生导师,主要研究领域为宽带无线 IP 网络,无线 Ad Hoc 网络,软件无线电,自组织网络.



陈亮(1979 - ),男,博士生,主要研究领域为通信信号处理,无线 Ad Hoc 网络.