

## 一种新的支持定向天线应用的忙音和功率控制多址接入协议

周晓东<sup>①</sup> 李建东<sup>①</sup> 杨军<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学ISN国家重点实验室信息科学研究所 西安 710071)

<sup>②</sup>(卢顿大学计算机与信息系 英国 LU1 3JU)

**摘要** 该文针对移动 Ad Hoc 网络(MANET), 提出了支持定向天线应用的忙音和功率控制多址接入协议(BT-DMACP)。协议充分考虑到定向天线应用中存在的特殊隐藏终端问题和旁瓣干扰, 利用 RTS/CTS 短分组对话机制、定向忙音信号和基于信噪比门限的功率控制策略, 对数据分组的定向发送功率进行实时调整。同时为准确估计接收节点处的最大干扰功率, 设计了自适应干扰功率估计算法。仿真结果证明, BT-DMACP 协议能有效支持定向天线在 MANET 中的应用, 在降低了系统功耗同时, 具有很高的信道利用率。

**关键词** 定向天线, 功率控制, 忙音, 多址接入协议

中图分类号: TN915.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0281-05

## A Novel Power Control Multiple Access Protocol for Mobile Ad hoc Network Using Directional Antennas and Busy Tone

Zhou Xiao-dong<sup>①</sup> Li Jian-dong<sup>①</sup> Yang Jun<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(National Key Lab. of ISN, Information Science Institute, Xidian Univ., Xi'an 710071 China)

<sup>②</sup>(Dept. of Computing & Information System, Univ. of Luton, LU1 3JU, UK)

**Abstract** A Busy Tone and Directional antenna Multiple Access Control Protocol with power control (BT-DMACP) for Mobile Ad hoc Network (MANET) is proposed. The special hidden terminal problems and side lobe interference in directional antennas used network are considered. Through RTS/CTS handshake mechanism, directional busy tone signals and the power control method, the directional transmission power of data packets can be adjusted in time. In order to estimation of the maximal interference power supported by receiving node, an adaptive estimation algorithm is presented. Simulation results show that BT-DMACP supports effectively the application of directional antennas and provides higher channel utilization and lower energy consumption.

**Key words** Directional antennas, Power control, Busy tone, Multiple access protocol

### 1 引言

MANET 是一种不需要固定基础设施支持的、由若干移动节点组成的多跳分布式无线网络。传统 MANET 中各节点在分布式多址协议控制下共享一个无线信道, 节点使用全向天线传输分组, 相互干扰很大, 隐藏终端与暴露终端的产生也与此有重要关系。目前许多文献研究在 MANET 中采用定向传输的多址接入(DMAC 协议)协议, 相应的网络本文称之为 DMANET, 实际是一种空分复用工作机制, 利用节点位置的空间可分性使多个节点在同一频带内无碰撞地并发传输, 从而显著提高网络的信道利用率。

根据 DMANET 中移动节点位置的发现方法不同,

DMAC 协议可分为 3 类, 一类是需要附加的硬件支持(如 GPS 接收机)来获得节点位置信息, 如文献[1,2], 在获得节点位置信息后, 收发节点就可以调整天线主瓣对准目标方向, 控制分组和数据分组以定向方式传输; 一类是无需 GPS 接收机, 首先通过全向传输的 RTS/CTS 短分组握手估计出节点的波达方向(DOA), 再以波束形成的定向方式传输数据分组, 如文献[3], 这类方法获得的节点位置比较准确, 但需要复杂的波束形成算法支持; 一类是通过对控制分组的接收功率的测量, 估计出接收信号入射角度(AOA), 如文献[4,5], 这类方法较前两类虽然只能粗略估计节点的位置, 但实现简单且实时性好。同时, 将功率控制方法引入 DMANET, 在文献[5,6]中有一些研究(采用的协议称之为 DMACP), 均是基于干扰功率的经验值进行计算, 当网络规模发生变化时, 这种功率控制方法的性能就会降低。

本文提出了支持定向天线应用的忙音和功率控制多址接入协议(BT-DMACP), 无需额外硬件支持来监测节点的位置信息, 各节点自适应调节数据分组的发送功率, 在获得频

2005-03-21 收到, 2005-08-25 改回

国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划, 国家自然科学基金重大项目(60496316)第 6 子课题, 国家“863”计划项目《认知无线电技术研究》和教育部科学技术研究重点项目(104171)资助课题

谱空分复用同时,降低了移动节点的功耗。利用定向传输的忙音信号,解决了定向传输带来的定向隐藏终端<sup>[2]</sup>问题。

## 2 系统模型

假定 DMANET 中的每一个移动节点配备了定向天线系统,它由  $N$  组非重叠的扇区天线构成,每一个扇区具有相同的天线增益且覆盖角度为  $2\pi/N$ 。该天线模型无需智能天线的复杂波束形成算法,工作于两种模式:全向模式和定向模式。节点在空闲状态时,工作于全向模式;节点在信道预约过程中采用全向或定向模式,一旦信道预约成功,数据分组全部采用定向模式传输。

该天线模型无需 GPS 接收机来支持定位,假设每一个节点可根据接收信号的功率强度粗略估计出信号的入射角度(AOA)。当网络节点的移动速度相对于分组到达速率较低的时候,可进一步由节点通信的历史记录获得位置信息。这样每个节点需要维护一个 AOA 表(具体结构后文中介绍),节点在通信前,首先在 AOA 表中查找目的节点的位置记录,如果 AOA 表中存在该目的节点记录,就可以定向方式发送 RTS 预约分组。这样,可以减少全向发送 RTS 分组对其它节点的干扰,同时可降低系统的功耗。

## 3 忙音和功率控制的定向天线多址接入协议 (BT-DMACP)

### 3.1 定向忙音

忙音多址协议在文献[7]中有所研究,但将忙音用于 DMANET 的研究却不够充分。传统忙音多址协议主要是为了克服隐藏终端的影响,在 DMANET 中,由于分组的定向传输,使隐藏终端(本文称其为定向隐藏终端 DHT<sup>[6]</sup>)问题更加严重,大大降低了 DMANET 的性能。采用定向忙音机制,可以有效克服 DHT 的影响。

如图 1(a)所示,在节点  $A$  定向发送数据分组给节点  $B$  的同时,节点  $C$  与  $D$  也成功建立了定向通信联系,由于  $A$  与  $C$  彼此均未收到对方的 RTS 分组,因此互为定向隐藏终端。这样,当  $A$  与  $B$  结束通信后( $C$  与  $D$  的通信过程仍在进行), $A$  重新接入信道,与节点  $E$  建立定向通信联系。由于节点  $D$  和  $E$  在  $A$  的主瓣覆盖范围内, $A$  的 RTS 和 Data 分组将对接收节点  $D$  产生干扰。如果采用忙音方案,节点在接收和发送过程中,分别以最大功率定向发送收忙音 BTr 和发忙音 BTt,收到忙音信号的其它节点,将被禁止发送和接收。即如图 1(b)所示,由于  $A$  在  $D$  的定向 BTr 信号覆盖范围内, $A$  向  $E$  的发送请求将被禁止,从而避免了对节点  $D$  的干扰。同理  $C$  的发忙音信号 BTt 也会禁止  $E$  的接收。

### 3.2 基于节点密度和发送概率的自适应干扰功率估计

假设节点  $A$  为 DMANET 中的一个接收节点,其平面天线模型如图 2 所示<sup>[8]</sup>,其中  $R_0$  和  $R_1$  分别为主瓣天线和旁瓣

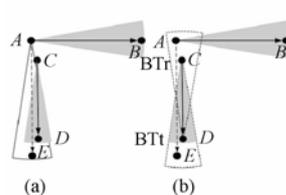


图 1 定向隐藏终端

Fig. 1 The directional hidden terminal

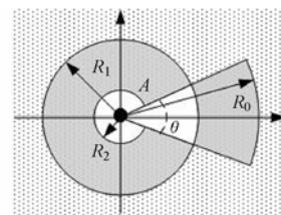


图 2 定向天线的干扰区域

Fig.2 The potential interference areas

天线的最大辐射距离,  $R_2$  为旁瓣的干扰限制距离,为主瓣水平方位角的  $3\text{dB}$  宽度。假设采用传统 DMACP 协议<sup>[5]</sup>类似的 RTS/CTS 分组预约机制,当  $A$  接受了某节点 RTS 分组的发送请求,并以最大功率定向发送 CTS 分组后,处于定向接收数据分组的状态。

所有在  $A$  的主瓣辐射距离  $R_0$  内的节点(图 2 所示灰色区域)将接收到  $A$  的 CTS 分组,这些节点在  $A$  的数据分组的接收时间内,被禁止向  $A$  节点方向进行定向发送,但可以向其它方向发送,即这些节点只能以旁瓣干扰节点  $A$ 。同理,在  $A$  的旁瓣辐射距离  $R_1$  内的节点同样被禁止以定向方式干扰节点  $A$ 。所有在  $A$  的主瓣和旁瓣的最大辐射范围以外的节点(图 2 所示点状区域),由于没有收到  $A$  的 CTS 分组,可以在任意方向上发送。所有在旁瓣的辐射距离  $R_2$  内和在主瓣的辐射距离  $R_1$  内的节点(图 2 所示白色区域),由于天线辐射功率足够大,这些节点的旁瓣也会对  $A$  的接收产生干扰,因此在此范围内的节点被禁止发送。

采用为 two-ray 传播模型,信号功率随距离衰减的公式为

$$P_r = \left( \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot h^2}{d^a} \right) \quad (1)$$

其中  $P_t$  为发送功率,  $P_r$  为接收信号功率,  $d$  为发送节点至接收节点间的距离,  $h$  为天线高度,  $G_t$  和  $G_r$  分别为发送和接收天线的增益。  $a$  为衰减因子 ( $a=4$ )。如果令节点最大发送功率为  $P_{\max}$ , 天线的归一化主瓣增益和旁瓣增益分别为  $G_1$  和  $G_2$ , 且  $G_1=1$ ,  $G_2 \in (0, 1)$ , 接收机的信噪比门限为  $P_{\text{th}}$ , 则  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  可分别表示为

$$R_0 = \left( \frac{P_{\max} \cdot G_1 \cdot G_1 \cdot h^2}{P_{\text{th}}} \right)^{1/a}, R_1 = R_0 (G_2)^{1/a}, R_2 = R_0 (G_2)^{2/a} \quad (2)$$

图 2 中点状区域内的节点在  $(0, 2\pi)$  方向上等概率发送,因此这些对节点  $A$  干扰的增益是一个随机变量,其均值为

$$E[G_r] = [(2\pi - \theta) \cdot G_2 + \theta \cdot G_1] / (2\pi) \quad (3)$$

图中的灰色区域内的非定向干扰节点对节点  $A$  的干扰增益为  $G_2$ 。

令  $I_1(r)$  为主瓣方向的一个节点对节点  $A$  的干扰功率,  $I_2(r)$  为旁瓣方向的一个节点对节点  $A$  的干扰功率,干扰节点的发送功率为  $P_t$ , 则

$$I_1(r) = \begin{cases} (P_I \cdot E[G_I] \cdot G_1 \cdot h^2) / r^a, & r > R_0 \\ (P_I \cdot G_2 \cdot G_1 \cdot h^2) / r^a, & R_1 < r < R_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$I_2(r) = \begin{cases} (P_I \cdot E[G_I] \cdot G_2 \cdot h^2) / r^a, & r > R_1 \\ (P_I \cdot G_2 \cdot G_2 \cdot h^2) / r^a, & R_2 < r < R_1 \end{cases} \quad (5)$$

如果令网络节点的分布密度为 $\rho$ , 节点的发送概率为 $P_{act}$ , 则节点 $A$ 处的总干扰功率为

$$I_{tot} = \theta \int_{R_1}^{\infty} I_1(r) \cdot \rho \cdot P_{act} \cdot r \cdot dr + (2\pi - \theta) \int_{R_2}^{\infty} I_2(r) \cdot \rho \cdot P_{act} \cdot r \cdot dr \quad (6)$$

在基于信噪比门限的功率控制协议中, 干扰节点的发送功率 $P_I$ 是在 $(0, P_{max})$ 内分布的随机变量, 其分布函数复杂, 直接求均值难度较大。这里采用文献[7]中的近似方法, 在网络中节点的信噪比门限恒定时, 节点的平均发送功率可近似表示为 $P_{av} = P_{max} / (\sqrt{2})^a$ 。因此, 当式(6)中 $P_I$ 取 $P_{max}$ 时, 节点 $A$ 处的总的干扰功率的估计值为

$$\hat{I}_{tot} = I_{tot} / a \quad (7)$$

这个估计值可以随着网络节点的分布密度和发送概率变化而自适应调节。

### 3.3 BT-DMACP描述

BT-DMACP 将整个射频带宽划分为 3 个子信道, 业务信道(DCH), 控制信道(CCH)和忙音信道。收发忙音信道分别位于控制信道低端和业务信道高端, 传输单频信号, 控制信道带宽为业务信道的 25%。RTS 和 CTS 分组在控制信道传输, 控制信道可以全向或定向方式传输, 因此可以认为 CCH 是存在分组碰撞公共信道。DATA 和 ACK 分组在业务信道中定向传输, 可以认为空分复用的专用信道。以上 3 个信道在频率上互不重叠, 彼此正交。

介绍 BT-DMACP 协议前, 先作如下假设:

(1)在一个数据分组传输期内, 信道增益保持不变, 且收发信道对称。

(2)节点在定向接收数据分组过程中, 其它扇区均关闭(不会引入干扰信号)。

(3)RTS/CTS分组, ACK分组和忙音信号以恒定功率 $P_{max}$ 发送。

(4)物理层可以向上层提供接收信号功率、背景噪声功率和忙音接收功率的数值。

(5)每一个节点维护一个 AOA 表, 如表 1 所示。其中节点 ID 即邻节点的唯一标示; 扇区号记录该邻节点在哪个扇区覆盖范围内; 更新时间是最近一次对邻节点位置的更新时间, 生存期是该节点在此扇区的最大停留时间。如果生存期超时, 表示该节点已经移动出此扇区覆盖范围。

(6)节点采用指数退避过程(与 IEEE802.11 增强型 DCF 协议中的退避算法类似), 即发送节点在没有正确接收到 CTS 分组或 ACK 分组后执行退避过程。退避窗口随 RTS 分组的重复次数指数增加。当分组成功传输后, 退避窗口复位。退

表 1 AOA 表

Table 1 The AOA table

节点ID	扇区号	更新时间	生存期
ID <sub><i>n</i></sub>	Sector <sub><i>n</i></sub>	Time <sub><i>n</i></sub>	Life-on
ID <sub><i>m</i></sub>	Sector <sub><i>m</i></sub>	Time <sub><i>m</i></sub>	Life-off

避过程仅在控制信道中执行载波侦听, 而不考虑业务信道, 并且节点进入退避过程中天线处于全向工作状态。

假设节点 $i$ 发送数据分组给节点 $j$ , BT-DMACP 具体功率控制方法和信道接入机制如下:

第 1 步 节点 $i$ 首先确定 RTS 分组的发送方式, 定向发送 RTS 分组需要满足 3 个条件: 一是节点 $i$ 的 AOA 表中存在节点 $j$ 的位置记录且生存期未超时, 并根据这一记录确定出 $j$ 所在节点 $i$ 的扇区号; 二是等待该扇区的 DNAV 超时; 三是在该扇区未检测到忙音信号。满足二、三条件的扇区我们称为空闲扇区。当以上 3 个条件同时满足后, RTS 分组就可以定向方式发送, 发送前要等一个空闲的 DIFS 时间。如果以上 3 个条件中的任何一个不满足, 就必须等待节点 $i$ 的所有扇区都空闲后, 全向发送 RTS 分组。

节点 $i$ 发送完 RTS 分组后, 如果在 $t_w$ 等待时间内没有收到的 CTS 分组, 分两种情况处理: 一种情况, 如果 RTS 是以定向方式发送, 则在执行完退避算法后, 以定向方式重传 RTS 分组, 如果 3 次重传均失败, 则认为节点 $j$ 已经移动出该扇区, 发送节点必须等待其它所以扇区都空闲, 并在一个空闲的 DIFS 后, 全向发送 RTS 分组。另一种情况, 如果 RTS 是以全向方式发送, 执行退避算法, 退避结束后以全向方式重传 RTS 分组, 达到最大重传次数后丢弃该分组。

第 2 步 节点 $j$ 成功收到 RTS 分组后, 首先根据接收信号强度, 确定节点 $i$ 的位置, 更新自己的 AOA 表, 然后通过物理层检测节点 $i$ 所在的扇区有无发忙音信号 BTt, 如果检测到忙音信号存在, 节点 $j$ 就拒绝接收, 不回应 CTS 分组。如果没有检测到忙音信号, 则通过以下步骤计算节点 $i$ 发送数据分组的功率。

节点 $j$ 根据物理层提供的 RTS 分组的接收功率 $P_r$ , 计算出信道增益 $G_{ij}$

$$G_{ij} = \frac{P_{max}}{P_r} \quad (8)$$

则节点 $j$ 在当前的干扰情况下, 数据分组能正确接收所需的最小接收功率 $P_{r-min}$ 为:

$$P_{r-min} = \max(Rx_{thresh}, SINR_{thresh} \times P_n) \quad (9)$$

其中 $Rx_{thresh}$ 为接收机门限,  $SINR_{thresh}$ 为接收机信噪比门限,  $P_n$ 为节点 $j$ 处当前的干扰功率(包括热噪声和其它节点的干扰功率), 则节点 $i$ 的最小发送功率 $P_{i-min}$ 为

$$P_{i-min} = G_{ij} \times P_{r-min} \quad (10)$$

如果节点 $i$ 以功率 $P_{i-min}$ 发送数据分组, 节点 $j$ 在该分组接收时间内就不再允许周围新的节点发送, 因为这些发送节点会通过天线旁瓣对 $j$ 产生干扰, 这是一种危险状态。为了允许

更多邻节点的并发传输,必须调整*i*的发送功率 $P_{i-\min}$ 。根据上文的自适应干扰估计方法,令网络当前的节点密度为 $\rho$ ,节点的发送概率 $P_{\text{act}}$ ,由式(7)可得节点*j*在数据分组接收过程中最大干扰功率的估计值为 $\hat{I}_{\text{tot}}$ ,则建议发送功率 $P_{i-\text{advise}}$ 为

$$P_{i-\text{advise}} = (\hat{I}_{\text{tot}} - P_n) + P_{i-\min} \quad (11)$$

节点*j*将 $P_{i-\text{advise}}$ 插入CTS分组中,在CCH中以功率 $P_{\text{max}}$ 定向发送,同时在忙音信道以功率 $P_{\text{max}}$ 定向发送音信号BTt,直至成功接收完数据分组或等待数据分组超时情况下关闭收忙音,返回空闲状态。节点*j*在以定向方式接收数据分组过程中,关闭其它扇区。

**第3步** 节点*i*成功收到*j*的CTS分组,如果其RTS分组是以全向方式发送,即节点*i*在节点*j*位置信息未知情况下全向发送RTS分组,则*i*首先根据CTS分组接收功率的强度,确定节点*j*的位置,并更新AOA表,然后从CTS分组中提取出 $P_{i-\text{advise}}$ 。节点*i*的数据分组的发送功率 $P_{i-\text{data}}$ 可确定为

$$P_{i-\text{data}} = \min(P_{i-\text{advise}}, P_{\text{max}}) \quad (12)$$

这样节点*i*就以功率 $P_{i-\text{data}}$ 定向发送数据分组,同时在忙音信道以功率 $P_{\text{max}}$ 定向发送忙音信号BTt,直到成功发完最后一个数据分组后,才将发忙音关闭。在数据分组的发送过程中,其它扇区处于关闭状态。

**第4步** 节点*j*每成功接收到一个数据分组后,以功率 $P_{\text{max}}$ 定向发送ACK分组。节点*j*发完最后一个ACK分组后将其它扇区打开,同样节点*i*成功接收到最后一个ACK分组后也将其它扇区打开。

#### 4 BT-DMACP的性能评估

由于BT-DMACP主要研究的是MAC层的性能,所以仿真时,路由开销不予考虑,重点从信道利用率和系统功耗等指标来分析。令数据分组长度固定,每个节点的分组到达过程服从泊松分布,速率为 $\lambda$ (每秒到达的分组数目,单位为packet/s),分组的目的是节点在一跳的邻节点中随机选取。仿真区域设为边长1000m的正方形区域,节点随机分布。采用随机waypoint运动模型,节点的运动速率在0-2m/s范围内均匀分布。由于协议中RTS,CTS和数据分组的传输周期一般为1ms内,网络拓扑在这样短时间内变化不大,因此节点运动对协议性能影响很小。仿真具体参数确定如表2所示。

表2 仿真参数  
Table 2 Simulation parameters

分组长度	1kB	SINR <sub>th</sub>	10dB
数据速率	10Mbps	载波检测门限	-78dBm
控制分组速率	2Mbps	接收机门限	-64dBm
定向重传次数	3	噪声功率	-90 dBm
全向重传次数	7	天线高度	1.5m
最大发送功率	25dBm	仿真区域	1000×1000m

图3-图5给出了网络节点数为100时的性能对比,其中图3给出了3种协议在不同分组到达率情况下的信道利用率

曲线,可以看出随着天线扇区数的增加,定向传输协议的信道利用率随之增加,其中BT-DMACP的性能最优。当天线扇区数为4时,BT-DMACP饱和情况的信道利用率较DMACP提高了50%-80%;天线扇区数为8时,BT-DMACP协议饱和情况的信道利用率较DMACP提高了1.5倍。这是由于BT-DMACP采用独立的控制信道和业务信道,降低了RTS/CTS分组预约过程中的分组碰撞概率,采用有效的功率控制策略,提高了业务信道中的数据分组并发传输数量,使得BT-DMACP性能较传统的DMACP有很大提高。

图4给出了3种的能量消耗,能量消耗定义为平均成功传输一个数据分组所需的全部能量(包括所有控制分组、数据分组及重传分组,单位为焦耳每分组)。对图3可以看出BT-DMACP在保持较高的信道利用率同时并没有消耗更多的能量,与其它两种协议比较平均能耗最低,且平均能耗随天线扇区数目增多而降低。这是因为BT-DMACP没有采用固定的最大干扰功率值来调节发送功率,而是根据网络规模对实际干扰功率进行估计。同时由于节点的收发忙音信号,降低了DCH中数据分组的碰撞概率,减少了多次重传带来的功率消耗。

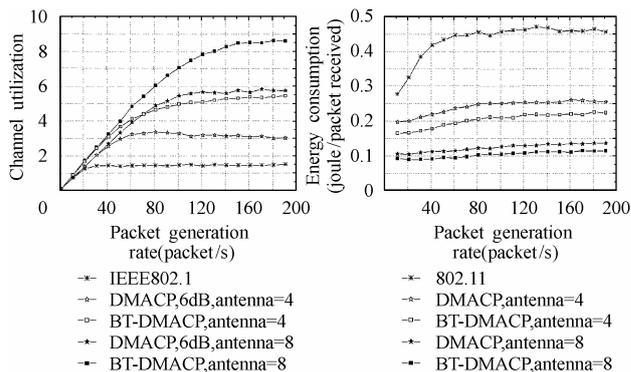


图3 信道利用率

Fig. 3 Channel utilization

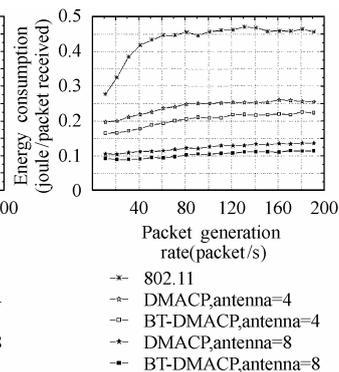


图4 平均能量消耗

Fig. 4 Average power consumption

为了比较3种协议在信道预约过程中能量消耗,图5给出了平均成功传输一个数据分组所消耗的控制分组能耗(RTS/CTS分组及其重传分组),可以看出BT-DMACP控制分组的能量消耗低于DMACP,并且两种协议能耗在开始阶段都经历一个下降过程,然后逐步增加。这是由于两种协议均采用节点通信的历史记录AOA表来获取位置信息,当分组到达率较低时,网络负载相对较轻,目的节点在AOA表中的记录不存在或超时,进行预约RTS分组就会以较大概率全向发送,消耗较大的功率;随着分组到达率接近饱和时,节点的AOA表记录开始生效,RTS分组的定向发送概率将随之增大,降低了功率消耗;当分组到达率饱和时,CCH信道分组碰撞概率随之增加,RTS和CTS的重传次数增加,功率消耗将随着分组到达率的增加而增加。而DCF协议始终以最大功率全向传输RTS/CTS分组,因此其控制分组能耗最大。

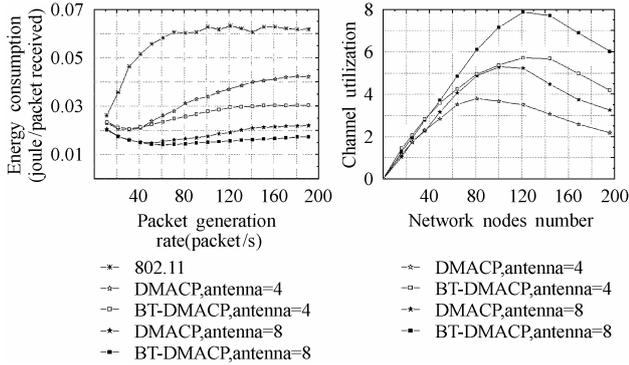


图 5 控制分组能量消耗  
Fig.5 The power consumption of control packets

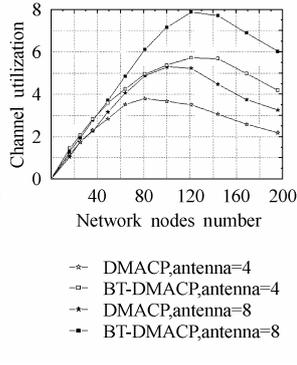


图 6 网络密度变化的信道利用率  
Fig.6 Channel utilization versus nodes number

图 6 和图 7 分别给出两种定向协议在节点数时的信道利用率和平均能量消耗，其中分组到达率固定为 100。由图 6 可以看出，在相同扇区数情况下，BT-DMACP 性能的最大值比 DMACP 提高了 50%，并且 BT-DMACP 在最大性能时的节点数比 DMACP 提高了 40%。由图 7 可以看出，两种定向协议在网络节点稀疏情况下，平均能量消耗接近，当网络密度超过一定规模时，BT-DMACP 的优势将更加明显。这是由于 BT-DMACP 可根据网络密度的不同，自适应调节发送节点功率，在保证数据分组成功接收同时，允许更多的并发传输存在。但当网络规模过大时，单个扇区覆盖范围内的节点数剧增，难以满足定向传输的空分复用条件，因此两种定向传输协议的性能都会降低。

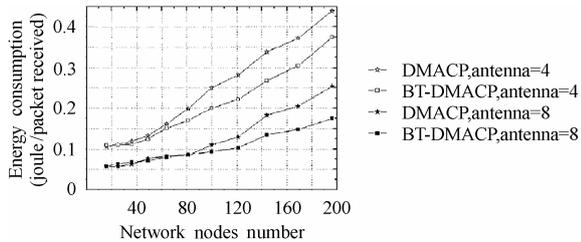


图 7 网络密度变化的能量消耗  
Fig.7 The power consumption versus nodes number

### 5 结束语

在充分考虑MANET和定向天线特点的基础上，提出了支持定向天线应用的功率控制和忙音多址接入协议(BT-DMACP)。在功率控制实施过程中，首先基于网络节点密度和发送概率，设计了自适应干扰功率估计算法，然后提出了依据接收节点信干噪比门限的功率控制策略，在保证通信质量的前提下，增加了节点并发传输的能力。利用忙音信

号机制，对DNAV设置方法进行了改造，提高节点信道接入效率，并克服了DMANET中的定向隐藏终端的影响。仿真结果表明，BT-DMACP协议能有效支持定向天线技术应用具有很高的信道利用率与较低的系统功耗。

### 参考文献

- [1] Ko Y, Shankarkumar V, Vaidya N H. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks[A]. Proceedings of IEEE. INFOCOM'2000[C]. Israel: Tel Aviv, 2000: 13 – 21.
- [2] Takai M, Martin J, Bagrodia R, Ren A. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks[A]. Proceedings of IEEE. ACM/SIGMOBILE MobiHoc'2002[C], USA: New York, 2002: 183 – 193.
- [3] Yang Jun, Li Jiandong, Sheng Min. MAC protocol for mobile Ad Hoc network with smart antennas[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(6) : 555 – 557.
- [4] Nasipuri , Ye S, You J, Hiromoto R. A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas[A]. Proceedings of IEEE. WCNC 2000[C]. Chicago: IL, 2000: 1214 – 1219.
- [5] Nasipura I, Li K, Sappidi U R. Power consumption and throughput in mobile Ad hoc networks using directional antennas[A]. Computer Communications and Networks. ICCCN2002[C], Florida: Miami, 2002: 620 – 626.
- [6] Ramanathan R. On the performance of Ad hoc networks with beamforming antennas[A]. Proceedings of IEEE. MobilHoc[C]. USA: Long Beach, CA, 2001: 95 – 105.
- [7] Lin S, Tseng Y, Sheu J. Intelligent medium access for mobile Ad hoc networks with busy tone and power control[J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, .2000, 18(9) : 1647 – 1657.
- [8] Spyropoulos A, Raghavendra C S. Capacity bounds for Ad-hoc networks using directional antennas[A]. Proceedings of IEEE. ICC '03[C]. USA: Anchorage, 2003: 348 – 352.

周晓东： 男，1975年生，博士生，研究兴趣为移动通信、分组无线网络与军事抗干扰通信。  
 李建东： 男，1962年生，博士，教授，现任西安电子科技大学通信工程学院院长，ISN国家重点实验室主任，博士生导师。从事宽带无线IP技术、移动通信、软件无线电、Ad Hoc自组织网络等方面的研究。  
 杨 军： 男，1975年生，博士后，主要研究兴趣为蜂窝无线网络规划、分组无线网络与扩频通信。