

## 移动 Ad Hoc 网络中应用智能天线的 多址协议及其性能分析

杨 军 李建东 周亚建

(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)

**摘 要** 对智能天线在移动 Ad Hoc 网络(MANET)中的应用进行研究,提出了自适应波束形成 CSMA/CA(ABF-CSMA/CA)协议,该协议利用 RTS/CTS 对话实现信道预约;在 RTS 与 CTS 分组中设置了训练序列,收发节点的智能天线基于训练序列进行自适应波束形成以传输数据分组与 ACK. 提出改进的“虚拟载波监测”机制进行冲突避免(CA). 每个节点中设置两类网络分配矢量(NAV),用一个 oNAV 记录邻节点以全向模式占用信道的时间,用多个 bNAV 分别记录各邻节点以波束形成模式传输分组的时间. 推导了信道利用率的近似计算公式并进行了仿真,考察了节点传输距离、训练序列长度及天线模式切换时间对网络性能的影响. 结果表明,ABF-CSMA/CA 协议与智能天线的结合能有效实现信道的空分复用(SDMA),显著提高整个网络的信道利用率.

**关键词** 移动 Ad Hoc 网络;智能天线;多址接入协议;性能分析  
**中图法分类号** TP391

### Multiple Access Protocol for Mobile Ad Hoc Network with Smart Antennas

YANG Jun LI Jian-Dong ZHOU Ya-Jian

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks and Institute of Information Science, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract** The approach to employ smart antennas in mobile ad hoc network (MANET) nodes is presented, and an adaptive beamforming CSMA/CA protocol (ABF-CSMA/CA) is proposed. In ABF-CSMA/CA, RTS/CTS dialogue is used to distribute channel reservation information. Training sequences are placed in RTS and CTS packets, so the temporal reference beamforming (TRB) can be performed by the source node and the destination node. An improved virtual carrier-sense mechanism is also proposed to enhance collision avoidance (CA) and obtain efficient space division multiple access (SDMA). In this scheme, every node has two kinds of network allocation vector (NAV). An oNAV maintains the interval of ongoing transmission of neighbors whose smart antennas operate in omnidirectional mode, and multiple bNAVs maintain those intervals of neighbors whose smart antennas operate in beamforming mode. Theoretical analysis of channel utilization is presented. Results show that ABF-CSMA/CA protocol combining with smart antennas can provide higher channel utilization.

**Keywords** mobile Ad Hoc networks; smart antennas; multiple access protocol; performance analysis

收稿日期:2002-08-09;修改稿收到日期:2003-03-14. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划重大项目(2001AA123031)、高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划及教育部科学技术研究重点项目资助. 杨 军,男,1975 年生,博士研究生,主要研究兴趣为扩频通信、分组无线网络与通信系统设计. E-mail: jyang@pcn.xidian.edu.cn. 李建东,男,1962 年生,博士,教授,主要研究领域包括分组无线网络、移动 IP 和软件无线电等. 周亚建,男,1971 年生,博士研究生,主要研究兴趣为无线局域网与移动 IP.

## 1 引言

智能天线通常是指具有测向和自适应波束形成能力的天线阵列。以往的文献多数只考虑智能天线在蜂窝网络基站中的应用<sup>[1]</sup>。随着技术的不断进步,智能天线可能应用于移动台。美国在 GloMo<sup>①</sup> 工程中已完成手持机智能天线的原形机。

移动 Ad Hoc 网络(MANET)是一种不需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。通常 MANET 中各节点在分布式多址协议的控制下共享一个无线信道,而隐藏终端和暴露终端的存在将严重影响信道使用效率。

MANET 的移动台通常为车载或背负式,能承受较复杂的通信设备,所以智能天线可能很快应用于其中。在发送或接收数据分组时,智能天线需要获得与目标节点对应的权矢量以进行波束形成,但由于 MANET 中节点的移动性、分组的突发性及多跳分布式的网络结构,仅依靠智能天线本身难以简便、快速、准确地实现上述目标。所以必须提供一种快速、准确的机制以支持智能天线的应用。目前这方面的研究还不充分,文献[3]对智能天线用于中心控制节点的 Slot-Aloha 协议进行了研究,文献[4,5]分别对定向天线与波束切换天线在 MANET 中的应用进行了研究。本文考虑将智能天线应用于 MANET 的移动台中,提出了自适应波束形成 CSMA/CA 协议(ABF-CSMA/CA)并进行了理论分析与仿真。

## 2 网络与智能天线模型

MANET 具有多跳分布式的网络结构,所有节点共享一个物理信道,各节点均配备了智能天线,均使用半双工的收发信机并且传输距离基本相同。假设各节点可通过调整发射功率及纠错方式保持网络拓扑的稳定,不考虑信道传输错误。如果将智能天线用于节点分布密集的网络,主波束内往往有多个节点,这时难以充分实现空分复用<sup>[6]</sup>,所以我们主要考虑将智能天线用于节点分布稀疏(相对于主波束覆盖范围而言)的网络(例如分层网络中高层节点组成的网络)。

在确定智能天线模型前应考虑以下因素:

(1)由于节点移动性、分组的突发性与随机性以及时变信道的影响,在开始发送分组时智能天线系统难以快速、准确地获得与目标节点对应的权矢量,所以在初始阶段采用全向天线是比较合适的。

(2)各节点向其所有邻节点发送分组的概率基本相同,因而难以预测哪一个邻节点会向自己发送,所以节点处于空闲状态时使用全向天线监听信道。

使用  $N$  ( $N$  可取 4~10) 个全向性阵元构成天线阵列,阵元间距为  $1/2$  波长,具有全向和波束形成两种工作模式(后者称为 BF 模式)。BF 模式中采用基于训练序列的自适应波束形成,其结构如图 1 所示,这种方法简单实用,并且适合在移动环境中使用。接收训练序列时,通过自适应算法(如 LMS, RLS 等)即可获得与目标节点对应的权矢量  $\mathbf{W}$  (图 1 中  $(W_1, W_2, \dots, W_N)$ )。由于收发节点使用相同的频率,所以在信道基本不变时,  $\mathbf{W}$  也可用于对同一节点的发送过程。对阵列方向图进行加窗处理(如采用切比雪夫窗函数),以抑制旁瓣电平(如低于主瓣 20dB),这时节点不会与主波束覆盖范围之外的节点互相干扰。为降低系统复杂度,我们只考虑单波束形成。

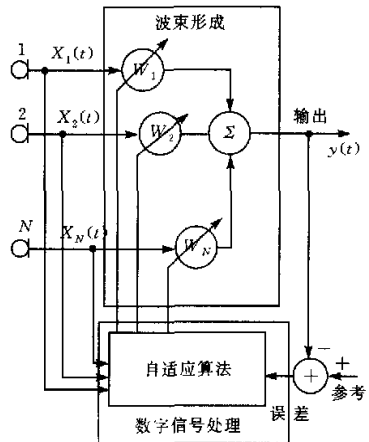


图 1 智能天线结构

该天线系统工作于全向模式时与通常的全向天线性能基本相同。通过调整发射功率使全向模式与 BF 模式具有相同的传输距离,设全向与 BF 模式之间的切换时间为  $t_{ch}$ 。

## 3 支持智能天线应用的多址接入协议

### 3.1 智能天线对多址接入协议性能的影响

MANET 中的隐藏终端问题严重影响了网络性能,而应用智能天线后,即使在相邻节点之间,发送-接收天线的工作模式或方向图的不匹配也会导致隐藏终端问题。例如在图 2(a)中,如果节点 A 与

① <http://www.mprg.org/research/gloMo/index.shtml>, Virginia Tech's GloMo Effort, 2001

C 都以 BF 模式向 B 发送,则发送之前 A 与 C 都无法通过载波监测获知对方正在发送,此时节点 A 与 C 互为隐藏终端,我们称之为 BHT(Beamed Hidden Terminal),

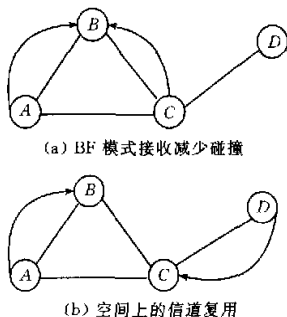


图 2 性能改进的原因

以 BF 模式发射或接收可能导致相邻节点互为隐藏终端,使现有的基于载波监测的多址接入协议难以获得良好的效果,这是应用智能天线后对多址协议最显著的影响,这时每个节点将很难掌握邻节点的工作状态以及信道的占用情况,使得分组的收发处于混乱无序的状态,所以会大大降低网络性能。

值得注意的是,BHT 的存在不一定导致分组的碰撞。例如图 2(a)中,节点 B 如果以 BF 模式对 A 或 C 中的一个节点进行接收,则可以正确接收该节点发送的分组,而不受另一节点的影响,这与通常的隐藏终端必然导致分组碰撞有很大区别。

图 2 给出了应用智能天线后网络性能提高的两个主要原因:一是以 BF 模式发送或接收减小了分组碰撞的概率,二是能够实现空间上的信道复用。然而,由于节点的移动性、分组发送的随机性及多跳分布式的网络环境,仅依靠智能天线本身难以有效实现上述两点,为此需要及时、准确地获取收发节点的方向信息及忙闲状态,这就需要多址接入协议进行改进。

### 3.2 节点移动的影响

相干时间是信道冲激响应维持不变的时间间隔的平均值,描述了小尺度内信道的时变特性<sup>[7]</sup>,它通常定义为

$$T_c = \sqrt{9/16\pi f_m^2} = 0.423/f_m \quad (1)$$

其中  $f_m$  为最大多普勒频移。假设收发节点的移动速度分别为  $v_1, v_2$ , 两节点的最大相对速度为  $v_1 + v_2$ , 如果  $v_1 = v_2 = 60\text{km/h}$ , 载波频率为  $1\text{GHz}$ , 则相干时间  $T_c \approx 3.8\text{ms}$ , 时间间隔小于  $T_c$  时信道基本保持不变,这种估计方法与文献[8]是一致的,并且更严格。如果信道速率为  $4.096\text{Mbps}$ , 数据分组长度为

$1.3\text{ms}(5500\text{bit})$ , 在发送数据分组前  $0.5\text{ms}$  内得到的权矢量可用于该数据分组与 ACK 的发送与接收,这时节点移动对以 BF 模式发送或接收数据分组的影响很小。

### 3.3 多址接入协议

基于上述分析,我们提出了自适应波束形成 CSMA/CA 协议 (ABF-CSMA/CA), 该协议的基本原理如图 3 所示(图中未考虑传输时延)。

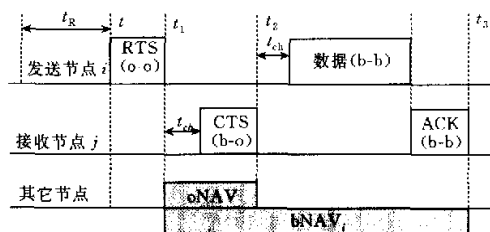


图 3 ABF-CSMA/CA 协议的原理

ABF-CSMA/CA 协议中,使用 BF 模式传输数据分组之前,首先进行 RTS/CTS 短分组对话,RTS 与 CTS 短分组中均包含训练序列 (Tra)。采用 RTS/CTS 短分组对话机制能有效减少隐藏终端引起的碰撞,在重负载时具有良好的性能。发送节点  $i$  发送 RTS 短分组时采用非坚持型 CSMA,即如果信道空闲时间超过  $t_R$ ,就以全向模式发送 RTS 短分组。如果接收节点  $j$  成功接收该 RTS 短分组,则节点  $j$  计算出与节点  $i$  对应的权矢量,之后节点  $j$  以 BF 模式向节点  $i$  发送 CTS 短分组。在多跳分布式网络中,当业务负载较重时,这将明显降低对话短分组碰撞的概率。节点  $i$  则以全向模式接收节点  $j$  的 CTS 短分组。RTS/CTS 对话完成后,即开始以 BF 模式传输数据分组与 ACK。其他成功接收 RTS 或 CTS 短分组的节点则根据其中的信息更新网络分配矢量(在下文详述)。图 3 中 (o-o), (b-b), (b-o), (o-b) 表示发送与接收节点的工作模式, o 为全向模式, b 为 BF 模式。

通过 RTS/CTS 短分组对话能够实现信道预约功能,但为了充分实现信道的空分复用,信道预约的范围与时间不能太大,为此我们提出一种改进的“虚拟载波监测”机制。网络中每个节点均设置了网络分配矢量<sup>[9]</sup> (NAV, 记录了信道占用时间), 每收到一个 RTS 或 CTS 短分组就对 NAV 进行更新。各节点中有两类 NAV, 其中 oNAV 对应于全向模式, bNAV 对应于 BF 模式。

在图 3 中,发送节点  $i$  在  $(t_1, t_2)$  时间内处于全向接收状态,所以收到其 RTS 短分组的非目的节点在  $(t_1, t_2)$  时间内不能全向发送 RTS 短分组(包括向  $i$  或其他邻节点发送),据此这些节点将对各自的 oNAV

进行更新.同时这些节点在 $(t_1, t_3)$ 时间内也不能与 $i$ 通信,所以它们还要更新与节点 $i$ 对应的 bNAV (图3中的 bNAV <sub>$i$</sub> ).由此可见,每个节点需设置多个 bNAV 分别与各邻节点对应.如果节点 $i$ 要向 $j$ 发送分组,节点 $i$ 先检查 oNAV 计时器是否超时,如超时,则检查 bNAV <sub>$i$</sub> ,如果也超时,节点 $i$ 才能开始发送过程(先进行载波监测).

由于信道的空分复用, $(t, t_1)$ 内节点 $i$ 的一些邻节点可能正在以 BF 模式进行通信,无法获知节点 $i$ 的状态,因而可能在 $t_1$ 之后全向 RTS 分组,使 $i$ 不能正确接收节点 $j$ 发送的 CTS 分组.为避免这种情况,需要使 $t_R$ 至少大于 $t_{ch}$ 与 CTS 分组时间之和,这时可以认为节点 $i$ 接收 CTS 分组的过程不会受到干扰.从上述分析可以看出,ABF-CSMA/CA 协议中充分考虑了隐藏终端与暴露终端问题并采取了相应的措施.本文附录给出了协议的详细描述.

ABF-CSMA/CA 协议中,在每个数据分组传输前很短时间内(本文中该时间间隔小于 0.3ms),收发节点都要发送训练序列以便对方进行波束形成.虽然这样会浪费少量的信道资源,但根据 3.1 节的分析,这将充分保证以 BF 模式正确收发数据分组与 ACK,并能显著降低节点移动的影响,所以这部分开销是值得的.当然,数据分组长度与节点移动速度必须受到限制,如果需要传送的消息(message)很长,则必须分割为多个较短的数据分组再进行传输.

#### 4 ABF-CSMA/CD 协议的性能分析

对于节点分布稀疏的网络,假设主波束覆盖范围内只有一个节点.图4中 $d$ 为节点 $i, j$ 之间的距离, $R$ 为节点的有效传输距离, $\rho$ 为节点分布密度, $S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}$ 分别为图中三部分的面积.设 $t_{data}$ 为数据分组的时间, $t_{RTS}, t_{CTS}$ 和 $t_{ACK}$ 分别为 RTS, CTS 和 ACK 的时间,传输时延 $\tau$ 包括信号传播时延 $t_p$ 、收发转换时间 $t_{rt}$ 和载波监测时间 $t_d$ (即 $\tau = t_{rt} + t_p + t_d$ ),所有时间按信道速率进行归一化.数据分组成功传输的概率为

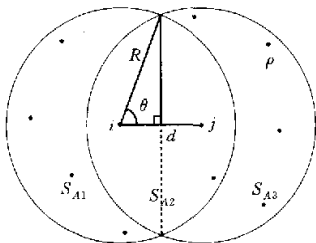


图4 性能分析

$$Pr\{\text{数据分组成功}\} = Pr\{\text{RTS 成功传输}\} \cdot$$

$$Pr\{\text{CTS 成功传输} | \text{RTS 成功传输}\} \cdot$$

$$Pr\{\text{数据分组及 ACK 成功传输} | \text{CTS 成功传输}\}.$$

成功交换 RTS 与 CTS 之后,数据分组与 ACK 的传输以 BF 模式进行,所以

$$Pr\{\text{数据分组及 ACK 成功传输} | \text{CTS 成功传输}\} = 1.$$

根据 3.3 节中对协议的分析,着重考虑 RTS 与 CTS 分组的收发节点分别采用(o-o)与(b-o)模式,以及 $t_R$ 计时器、NAV 与载波监测的作用,可以得到节点 $i$ 在 $t$ 时刻开始向节点 $j$ 发送并且 $j$ 处于空闲状态情况下,成功交换 RTS 与 CTS 分组的条件为:

1. 区域 $S_{A3}$ 中没有节点在时间 $(t - t_{RTS}, t + t_{RTS})$ 内发送 RTS 分组.

2. 区域 $S_{A2}$ 中没有节点在时间 $(t - \tau, t + \tau)$ 内发送 RTS 分组.

条件 1 保证节点 $j$ 在全向接收 RTS 分组时不会受到节点 $i$ 的隐藏终端的干扰,条件 2 保证不会由于载波监测时延造成与 $i, j$ 都相邻的节点干扰节点 $j$ 接收 RTS 分组.通过计算可以得到

$$S_{A2}(d) = 2R^2\theta - Rd \cdot \sin\theta \quad (2)$$

$$S_{A3}(d) = \pi R^2 + Rd \cdot \sin\theta - 2R^2\theta \quad (3)$$

其中 $\theta$ 如图4所示.对于条件 1, 2, 我们只需考虑 $t$ 时刻之后的情况<sup>[10]</sup>( $t$ 时刻前的情况相当于其它节点的通信被干扰).假设各节点以独立同分布的泊松过程(到达率为 $\lambda$ )向信道发送数据分组,则条件 1 为

$$P_1(d) = e^{-\lambda t_{RTS} \rho S_{A3}(d)} \quad (4)$$

它是节点间距离 $d$ 的函数.条件 2 为

$$P_2(d) = e^{-\lambda \tau \rho S_{A2}(d)} \quad (5)$$

所以这时成功交换 RTS 与 CTS 分组的概率为

$$P_{RC}(d) = P_1(d) \cdot P_2(d) \quad (6)$$

由于多跳分布式的网络结构以及 BF 模式与 NAV 的使用,很难精确分析 ABF-CSMA/CA 协议的信道利用率,为此我们采取一些合理的近似方法. ABF-CSMA/CA 协议中分组传输有两个阶段:首先是短分组对话阶段,这时仍存在竞争与碰撞;短分组对话成功后即完全以 BF 模式进行传输,这时基本能避免分组碰撞的发生.这一过程可等效为在“公共信道”上进行短分组对话,而在“专用业务信道”上传输数据分组与 ACK. “公共信道”上传输的时间为

$$t_p = t_R + t_{RTS} + t_{CTS} + 2\tau + t_{ch} \quad (7)$$

假设各节点具有相同的发送机会,则从平均意义上考虑,节点 $i$ 准备发送时节点 $j$ 的发送队列也不为空,而节点 $j$ 未发送的原因可认为是在竞争接入过程中失败或处于退避状态,在各节点业务量不变的条件下,邻节点数越多,竞争失败的概率越大,

所以我们将节点  $j$  未进行发送的概率近似为  $[1 - 1/(\rho\pi R^2)]$ , 这一近似在业务量比较大时是合理的. 假设各节点以相等概率向所有邻节点发送分组, 则  $j$  的每个邻节点向  $j$  发送的业务强度为  $\lambda/(\rho\pi R^2 - 1)$ , 所以向  $j$  发送的总业务量近似服从到达率为  $\lambda$  的泊松分布. 在时间  $t_p$  内节点  $j$  未进入接收状态的原因有两个: (1)  $j$  的邻节点均未向  $j$  发送; (2) 虽然有节点向  $j$  发送, 但均未成功交换 RTS 与 CTS 分组. 综合以上分析, 可将节点  $j$  处于空闲状态的概率近似为

$$P_i \approx \left(1 - \frac{1}{\rho\pi R^2}\right) \left( e^{-\lambda t_p} + e^{-\lambda t_p} \sum_{k=1}^{N_0} \left[ \frac{(\lambda t_p)^k}{k!} (1 - P_{av})^k \right] \right) \quad (8)$$

其中,  $N_0 = \lfloor \rho\pi R^2 - 1 \rfloor$ ,  $\lfloor x \rfloor$  表示大于  $x$  的最小整数.

$$P_{iv} = \frac{1}{\rho\pi R^2} \int_0^R P_{RC}(l) \cdot \rho \cdot 2\pi l dl = \frac{2}{R^2} \int_0^R P_{RC}(l) \cdot l dl \quad (9)$$

它是节点间成功交换 RTS 与 CTS 分组的概率. “公共信道”上的时间可以划分为忙碌期和空闲期两部分,  $B$  与  $I$  分别是它们的统计平均值,  $U$  是在一个忙碌期中用于成功传输数据的平均时间. 在系统稳态条件下, “公共信道”上的利用率为

$$S_P(d) = \frac{U}{B + I} \quad (10)$$

由于成功交换 RTS 与 CTS 分组就能保证数据分组与 ACK 传输成功, 所以

$$U = P_{RC}(d) P_i \cdot t_{data} \quad (11)$$

$I$  是到达率为  $\lambda\rho\pi R^2$  的泊松数据流的平均间隔, 即

$$I = \frac{1}{\lambda\rho\pi R^2} \quad (12)$$

为了求出  $B$ , 我们定义两个随机变量  $Y$  和  $Z$ , 它们分别等于在一个不成功忙碌期开始的  $(0, \tau)$  或  $(0, t_{RTS})$  时间内第一个不成功传输分组的出现到最后一个是成功传输分组出现的时间间隔. 不成功传输分组的平均时间分别为

$$T_Y = Y_{av} + t_R + t_{RTS} + \tau \quad (13)$$

$$T_Z = Z_{av} + t_R + t_{RTS} + \tau \quad (14)$$

其中  $Y_{av}$  和  $Z_{av}$  分别为  $Y$  和  $Z$  的平均值,  $Y$  的分布函数:

$$F_Y(y) = \Pr[\text{在}(\tau - y) \text{ 期间无分组到达}] = \begin{cases} 0, & y < 0 \\ \exp[-(\tau - y)G_y], & 0 \leq y \leq \tau \\ 1, & y > \tau \end{cases} \quad (15)$$

其中  $G_y = \lambda\rho S_{A2}(d)$ ,  $Y$  的概率密度函数为

$$f_Y(y) = G_y \cdot \exp[-(\tau - y)G_y], \quad 0 \leq y \leq \tau \quad (16)$$

由上式可得

$$Y_{av} = \tau - [1 - \exp(-\tau G_y)]/G_y \quad (17)$$

同理可得

$$Z_{av} = t_{RTS} - [1 - \exp(-t_{RTS} G_z)]/G_z \quad (18)$$

其中  $G_z = \lambda\rho S_{A3}(d)$ ,  $B$  可由下式获得

$$B = P_{RC}(d) P_i t_p + \frac{G_y}{G_y + G_z} [1 - P_{RC}(d) P_i] \cdot$$

$$T_Y + \frac{G_z}{G_y + G_z} [1 - P_{RC}(d) P_i] \cdot T_Z \quad (19)$$

可以认为“专用信道”上没有碰撞发生, 所以其信道利用率近似为

$$S_T(d) \approx \frac{P_{RC}(d) P_i t_{data}}{P_{RC}(d) P_i T_1 + [1 - P_{RC}(d) P_i] T_2 + I} \quad (20)$$

其中  $T_1 = t_p + t_{data} + t_{ACK} + 2\tau$ ,  $T_2 = t_R + \tau + t_{RTS}$ . 图 4 所示区域的信道利用率为

$$S_i(d) = S_P(d) \cdot S_T(d) \quad (21)$$

可以看出, 式(21)是在节点  $i, j$  间距离  $d$  取某一固定值时得到的, 所以要对它在  $d$  的取值区间  $(0, R)$  上取平均, 类似于式(9), 可以用积分来完成<sup>[2]</sup>:

$$S_{av} = \frac{1}{\rho\pi R^2} \int_0^R S_i(l) \cdot \rho \cdot 2\pi l dl = \frac{2}{R^2} \int_0^R S_i(l) \cdot l dl \quad (22)$$

计算整个网络的信道利用率时还应考虑由于节点覆盖范围有限而形成的信道复用, 但很难对此进行精确计算, 我们采用一种常用的近似方法<sup>[2]</sup>. 定义  $M$  为由此产生的网络中的最大并发数, 如果用边长为  $R$  的正六边形对整个区域进行无缝覆盖, 则有  $M = S_{net}/(2\sqrt{3}R'^2)$ , 其中  $R' = [R + (\sqrt{3}/2)R]/2$ ,  $S_{net}$  是网络面积. 整个网络的信道利用率为

$$S \approx M \times S_{av} \quad (23)$$

当  $M$  的数值不是很大时, 上式的计算结果比较准确.

## 5 ABF-CSMA/CA 协议的性能评估

利用仿真与数值计算的方法, 我们对 ABF-CSMA/CA 协议的性能进行评估, 并与使用全向天线时 IEEE802.11 的 DCF 协议(使用 RTS/CTS, 以下简称 DCF 协议)的性能进行了比较. 本文中网络负载指单位时间内(一个数据分组时间)整个网络需要传输的数据分组总数, 信道利用率为整个网络在单位时间内成功传输的平均数据分组数, 这与式(23)一致(并非端到端的信道利用率). 以 100 个节点随机分布网络的信道利用率的平均值作为仿真结果.

各节点数据分组的到达服从泊松分布,并以相同概率发往各邻节点.其他仿真参数见表 1.

表 1 仿真参数

网络面积 (km <sup>2</sup> )	数据分组 (bit)	ACK (bit)	$t_{ch}$ ( $\mu$ s)	传输距离 (km)	RTS (bit)	信道速率 (Mbps)	$t_R$ ( $\mu$ s)	节点数	CTS (bit)	$\tau$ ( $\mu$ s)
5 $\times$ 5	5500	80	30,60	1,1.3,1.6	160,192	4.096	200,230	35	160	40

图 5 给出了  $t_{ch}$  为  $30\mu$ s, RTS 分组为 160bit 时,不同传输距离条件下的信道利用率(DCF 协议仿真中  $DIFS=150\mu$ s,  $SIFS=30\mu$ s).可以看出,相同条件下 ABF-CSMA/CA 协议的性能明显优于基于全向天线的 DCF 协议,并且该协议发生性能饱和时的网络负载比 DCF 协议要大,说明 ABF-CSMA/CA 协议能够有效利用智能天线实现信道的空分复用.随着传输距离的增大,两种协议的性能都有所下降,但 ABF-CSMA/CA 协议下降的程度要小一些.这是因为传输距离的增大使得更多的节点可以直接通信,便于利用智能天线实现空分复用(当然对话分组碰撞的概率也会增加).

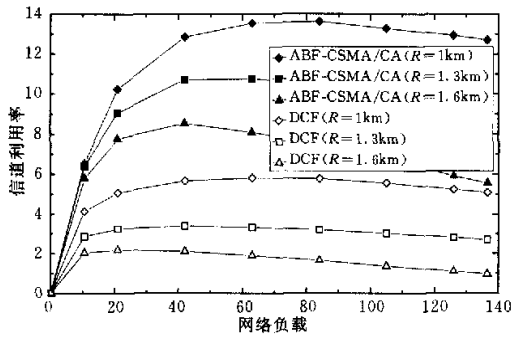


图 5 信道利用率与传输距离

图 6 给出了  $t_{ch}$  为  $30\mu$ s 时,不同传输距离与 RTS 分组长度条件下的信道利用率.可以看出,RTS 分组长度对信道利用率有明显影响,这是因为 RTS 分组采用全向发射-全向接收状态,所以发生

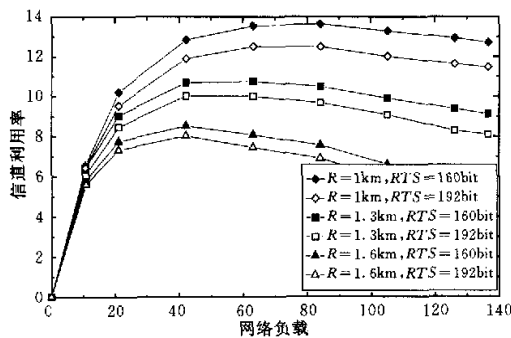


图 6 信道利用率与 RTS 分组长度

碰撞的概率相对大一些,因此要尽量缩短 RTS 分组长度.图 7 给出了 RTS 分组长度为 160bit 时,不同传输距离与  $t_{ch}$  条件下的信道利用率.  $t_{ch}$  的增大将不仅直接使短分组对话时间增大,而且要求将  $t_R$  增大,所以使网络性能降低.

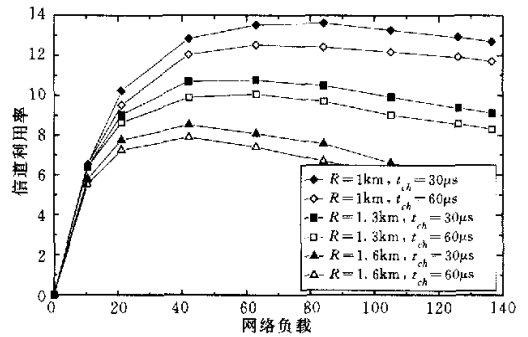


图 7 信道利用率与模式切换时间

图 8 给出了  $t_{ch}$  为  $30\mu$ s, RTS 分组长度为 160bit 时的理论分析结果与仿真结果.可以看出,理论分析结果与仿真结果是比较接近的.在业务量较小时,理论值略高于仿真值.这是由于理论分析中没有考虑退避算法的影响,而仿真中则采用了类似于 IEEE802.11 的退避算法,当业务量不大时,这将浪费少量的信道资源.在业务量较大时,仿真值高于理论值.这是因为理论分析时我们假设某区域外的节点对该区域内的传输没有影响,但实际上该区域外节点的发送将使区域内的一些节点处于退避状态,从而增大短分组对话成功的概率,使网络性能提高.

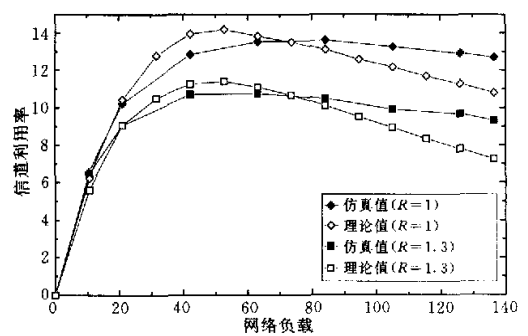


图 8 理论分析与仿真结果的比较

由于上述两点的影响,理论曲线与仿真曲线在某一点交叉.当然,由于分析与仿真中认为主波束内只有一个节点,所以上述结果优于实际应用的结果,在实际应用时还需采取一些适当措施以保持系统性能<sup>[6]</sup>.

## 6 结 论

本文考虑将智能天线应用于 MANET 的移动台,提出了自适应波束形成 CSMA/CA (ABF-CSMA/CA) 协议.该协议中,RTS/CTS 对话可以解决部分隐藏终端问题,充分利用 BF 模式接收或发送能有效减少隐藏终端的干扰;并且该协议将以全向模式占用信道的预约时间缩短,将以 BF 模式占用信道的预约范围缩小,所以能有效减小暴露终端的影响.研究表明,ABF-CSMA/CA 协议与智能天线的结合能有效实现信道的空分复用(SDMA),从而显著提高网络的信道利用率.

## 参 考 文 献

- 1 Reudink M. Smart antenna for cellular systems: An overview. In: Proceedings of IEEE RAWCON (Invited), Denver, USA, 1999
- 2 Wu S L, Tseng Y C, Sheu J P. Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18 (9): 1647~1657
- 3 Ward J, Compton R T, Jr. High throughput slotted ALOHA packet radio networks with adaptive arrays. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41 (3): 460~470
- 4 Ko Y, Shankarkumar V, Vaidya N H. Medium access control protocols using directional antennas in Ad Hoc networks. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, 2000, 1: 13~21
- 5 Nasipuri A, Ye Sheng-Chun, Hiromoto R E. A MAC protocol for mobile Ad Hoc networks using directional antennas. In: Proceedings of IEEE WCNC 2000, Chicago, 2000, 3 (3): 1214~1219
- 6 Adrian B. System aspects of smart antennas technology in cellular wireless communications. In: Proceedings of IEEE RAWCON, Denver, 1999, 17~22
- 7 Rappaport T S. Wireless Communications Principles and Practice. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1996
- 8 Acampora A S *et al.* A new adaptive MAC layer protocol for broadband packet wireless networks in harsh fading and interference environments. In: Proceedings of IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8:
- 9 IEEE 802.11. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, 1999
- 10 Chhaya H S, Gupta S. Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol. Wireless Networks, 1997, 3 (3): 217~234

## 附 录

ABF-CSMA/CA 协议的详细描述如下:

1. 节点空闲时以全向模式监听信道.

2. 为了防止在空闲时隙开始时重复碰撞,提高网络重载时的性能,采用非坚持型 CSMA 发送 RTS 分组.发送节点先以全向模式监测信道,若信道在时间  $t_R$  内一直空闲,则以全向模式发送 RTS 分组,之后以全向模式等待 CTS 分组.如果在时间  $t_{wc}$  内收到正确的 CTS 分组,则立即以 BF 模式发送数据分组,发送完毕以 BF 模式接收应答分组.

3. 发送节点如果在  $t_{wc}$  内没有收到正确的 CTS 分组则执行退避算法(与 IEEE802.11 增强型 DCF 协议中的退避算

法类似)后重发 RTS 分组.如果重发次数超过最大重传次数则丢弃该分组.

4. 目的节点收到 RTS 分组后立即以 BF 模式发送 CTS 分组,发送完毕以后以 BF 模式等待数据分组.如果在  $t_{u,s}$  内没有收到数据分组则返回空闲状态.

5. 采用主动应答.数据分组接收完毕之后立即以 BF 模式发送 ACK.

6. 接收到 RTS 或 CTS 分组的其它节点依据其中包含的信息更新相应的 NAV.



**YANG Jun**, born in 1975, Ph. D. candidate. His research interests include spread spectrum communications and wireless network protocol.

**LI Jian-Dong**, born in 1962, Ph. D., professor. His research interests include wireless networks, packet radio network, software radio and broadband wireless Internet access etc.

**ZHOU Ya-Jian**, born in 1971, Ph. D. candidate. His research interests include wireless LAN and mobile IP.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>





## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>