

一种基于博弈论模型的 Ad Hoc 网络功率控制算法

孙 强^{1),2)} 李腊元²⁾ 陈年生³⁾

¹⁾(上海电机学院 上海 200240)

²⁾(武汉理工大学计算机学院 武汉 430063)

³⁾(湖北师范学院计算机科学系 湖北 黄石 435002)

摘 要 在 Ad hoc 网络中,采用控制数据报文向相邻节点的发射功率的方法来提高能量的使用效率是一种常用的方法,但是采用功率控制也会对网络连通性、延迟和容量带了负面影响.文中对 Ad hoc 网络中能量控制机制进行了讨论,给出了 Ad hoc 网络基于非合作博弈的功率控制问题模型.提出了一种以满足网络连通性、容量最大化、网络半径最小为目标的分布式非合作功率控制博弈算法,并给出了对该算法纳什均衡的存在性和唯一性的证明.实验表明该算法具有较好的综合性能.

关键词 Ad hoc 网络;功率控制;容量;博弈;纳什均衡

中图法分类号 TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2009.00169

A Power Control Algorithm Based on Game Theory in Ad Hoc Networks

SUN Qiang^{1),2)} LI La-Yuan²⁾ CHEN Nian-Sheng³⁾

¹⁾(Shanghai Dianji University, Shanghai 200240)

²⁾(School of Computer Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

³⁾(Department of Computer Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002)

Abstract In mobile Ad hoc networks, power control method is an efficient way to improve the efficiency of energy used to transmit data packets. However, it will also produce negative influence on the network connectivity, delay and capacity. In this paper, proposed related energy control mechanisms for Ad hoc networks are analyzed. A power control model based on non-cooperative game theory is given. And a distributed non-cooperative game algorithm to power control for Ad hoc networks is presented to satisfy the requirement of maximum of network connectivity, maximum of network capacity and minimum network delay. And then the existing and uniqueness of Nash equilibrium for the algorithm is also proved in this paper. Simulation results show that the algorithm is efficient and has a good integrated performance.

Keywords Ad hoc networks; power control; capacity; game; Nash equilibrium

1 引 言

功率控制作为无线 Ad hoc 网络中的一项关键技术,对于有效地使用和管理无线资源起着不可替

代的作用.目前在功率控制方面,已经提出了许多算法和协议^[1-3].在无线 Ad hoc 网络中,由于节点的发射功率的大小决定了网络中那些节点能够收到信号,从而影响到网络的连通性,同时由于隐终端的存在,节点的发射功率的大小还影响到由于隐终端所

收稿日期:2006-09-28;最终修改稿收到日期:2008-08-27.本课题得到国家自然科学基金项目(60672137,60773211)、教育部博士点基金项目(20060497015)、上海市优秀青年教师项目(sdj-07011)、上海市教育委员会科研创新项目(09YZ479)和湖北省教委高校科技创新团队项目(T200806)资助.孙 强,男,1974 年生,博士,讲师,主要研究方向为高性能网络技术与路由算法. E-mail: chyangsun@gmail.com.李腊元,男,1946 年生,教授,博士生导师,研究领域为高速计算机网络、协议工程、图像处理.陈年生,男,1967 年生,博士,教授,研究领域为 Ad hoc 网络、QoS 路由和协议工程.

带来的干扰的大小,因此对节点的发射功率进行调整将会对整个网络的性能产生重要的影响,在设计功率控制算法的同时,必须对由此带来的对网络性能的影响加以考虑.

在 Ad hoc 网络中,功率控制其实质就是如何在节点能量受限、信道存在衰减、信道共享等条件下,利用有限的网络信息,通过调整节点的发射功率,使网络满足连通性、容量最大化、网络半径最小的目标,这是一个 NP 难的问题^[4-5]. 若用 C_i 表示链路 $l_i (l_i \in E')$ 的容量或传输速率,则网络容量或者其瓶颈带宽可以表示为 $C = \min_{l_i \in E'} \{C_{l_i}\}$,若用跳数 h_{ij} 表示节点 i 与节点 j 间的距离,用 H 表示节点间跳数集合, $H = \{h_{ij}\}, i, j \in V$, 则网络半径 R_G 可以表示为 $R_G = \min(H)$, e_i 表示节点 i 的剩余能量,则功率控制问题的数学模型可以描述为

$$\begin{aligned} f_C(P) &= \max_P (\min_{l_i \in E'} \{C_{l_i}\}) \\ f_H(P) &= \min_P (R_G) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} e_i > e_0, i \in V \\ 0 < k \leq 2 \\ 0 \leq p_i \leq p_{\max}, i = 1, 2, \dots, |V| \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, e_0 为节点剩余能量门限,当节点剩余能量小于该值时,节点将关闭其无线接收模块.

已有的大多数的功率控制算法或协议研究的热点都集中在通过减小节点发射报文功率的方法来达到节能的目的,并且认为通过减少节点发射功率可以降低节点间相互干扰并增大网络容量的目的. 但近年的研究表明并非如此. 文献[6]中, Behzad 和 Rubin 对 Ad hoc 网络中功率控制对网络最大吞吐量的影响进行了研究,并得出源节点与目的节点间的吞吐量与节点分布、业务负荷和业务模式无关,通过增加节点发射功率可以使源节点与目的节点间获得最大的吞吐量. 文献[7]中分析了节点发射报文所产生的干扰对网络容量的影响. 结果显示增加节点的发射功率不仅可以减小节点干扰而且可以提高网络容量.

由于 Ad hoc 网络没有基站的支持,通信方式采用多跳的方法,而且网络拓扑结构动态变化,节点很难获得网络中其它节点的相关信息,因此,很自然的每个节点将采用能使其收益最大化的策略^[8]. 近来,一些学者开始尝试应用非合作博弈理论来解决 Ad hoc 网络中的功率控制问题^[8-13]. 他们或针对特定的信道模型(如正交 CDMA 或正交 FDMA 信道)或实现过程中需要获得网络全局信息的支持. 考虑到 Ad hoc 网络全分布式结构的特点,并且为不失一般性,本文给出了一种基于共享信道的分布式博弈功

率控制实现方法. 该算法是以网络连通性、容量最大化、网络半径最小为目标,节点根据局部信息计算各自的收益函数,确定自己发射功率的一种分布式功率控制算法. 为了提高算法的性能,算法采用了跨层设计的方法. 本文在第 2 节给出系统模型和相关假设;第 3 节给出功率控制的非合作博弈模型及其纳什均衡存在性和唯一性证明;第 4 节给出非合作 Ad hoc 网络功率控制博弈优化算法描述及其跨层结构模型;第 5 节给出算法的仿真结果;最后在第 6 节对全文进行总结.

2 系统模型

在无线网络中,网络中每个节点的接收功率因传送路径损失造成的信号衰减而减小,当发送端与接收端的距离越远其接收功率就越小. 本文采用文献[14]中的信道模型表示如下:

$$p_R^y(t) = (1 + d_{xy})^{-\alpha} p_T^x(t) \quad (2)$$

式中, $p_R^y(t)$ 表示节点 y 处的接收功率, d_{xy} 表示发送节点 x 和接收节点 y 间的距离, $p_T^x(t)$ 表示节点 x 的发射功率, α 表示路径衰减系数. 根据空间环境的不同 α 的取值可以在 1.6~6 之间选择^[15].

在无线移动环境中,接收端能否成功接收到发送端的报文,受接收端的信号接收功率与干扰功率的影响,两者的比值称为信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR). 若 SNR 大于某一设定值,则报文被成功接收. 若节点 k 为接收节点,节点 i 为发送节点,则节点 k 接收节点 i 报文信噪比为

$$SNR_{ki}(t) = \frac{h_{ik}(t) p_i(t)}{\sigma(t)^2 + \sum_{j \in N_i} h_{jk}(t) p_j(t) + \sum_{j \in N_i} h_{jk}(t) p_j(t)} \quad (3)$$

其中 $\sigma(t)^2$ 为 AWGN 信道噪声, $h_{ik}(t)$ 为节点 i, k 间的链路增益,由式(2)可知 $h_{ik}(t) = (1 + d_{ik})^{-\alpha}$, d_{ik} 为节点 i 到节点 k 的距离. $p_i(t)$ 表示节点 i 的发射功率, $\sum_{j \in N_i} h_{jk}(t) p_j(t)$ 表示由于发生报文碰撞而产生的噪声, N_i 表示节点 i 的邻居节点集合, $\sum_{k \in N_i} h_{jk}(t) p_j(t)$

为在节点 i 接收报文期间内,在其干扰半径内的节点发送报文而对节点 i 接收报文所产生的干扰总和^[7].

若将有用信号与干扰信号的比值称为信干比 (Signal Interference Ratio, SIR),对于共享信道而言,在节点接收报文期间,没有发生报文碰撞的情况,此时节点才有可能正确接收到报文. 则有

$$SNR_{ki}(t) = SIR_{ki}(t) = \frac{h_{ik}(t) p_i(t)}{\sigma(t)^2 + p_{\text{infer}}^k(t)},$$

式中, $p_{\text{infer}}^k(t) = \sum_{k \in N_i} h_{jk}(t) p_j(t)$.

为了不失一般性, 本文假设网络中所有节点均匀分布在一个平面中, 所有节点均共享信道, 采用半双工通信, 节点可自行调整自己的发射功率, 网络中不存在单向链路.

3 功率控制模型

Ad hoc 网络中节点的功率控制问题可看作非合作博弈问题, 采用博弈基本式表示为 $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$. 根据上节给出的网络模型可知, 在功率控制问题中, 每个节点的策略空间 $A_i = [0, p_{\text{max}}]$. $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示网络中的所有节点. 网络中每个节点根据收益函数确定使自己收益最大的策略, 即

$$\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

p_i 表示节点 i 选择的发射功率, \mathbf{p}_{-i} 表示除 i 之外的其他节点的选择的发射功率.

无线网络的质量往往受到节点采用的信号调制方法、编码方式等因素的影响, 不同类型的调制方法和编码方式都会对信道产生不同的影响. 为了简化收益函数的设计, 在满足网络容量最大化和网络半径最小的前提下使收益函数不依赖节点采用何种信号处理方式, 本文采用如下定义收益函数定义形式.

$$u_i = \mu \log_2(1 + \text{SIR}_i) - c(p_i) \quad (5)$$

式中右边第 1 项为经典高斯信道容量公式, μ 为收益系数, $c(p_i)$ 为发送功率的线性代价函数. 引入代价函数可以改善系统的性能, 代价函数通常定义为用户发射功率的增函数, 代价函数通常分为线性成本函数和非线性成本函数两大类. 线性成本函数有形式简单, 计算复杂度低, 可以采用分布式算法实现等优点, 但通常不能达到全局最优. 非线性成本函数能够实现全局最优, 但其运算比较复杂, 且只能采用集中式解法实现, 因而并不适合 Ad hoc 网络. 考虑到最小网络半径的要求, 本文采用如下形式的成本函数:

$$c(p_i) = \frac{1}{h_i} p_i \quad (6)$$

其中, h_i 为节点以功率 p_i 发射时路径增益.

定理 1. 非合作 Ad hoc 网络功率控制博弈存在纳什均衡.

证明. 由于每个节点的策略空间定义在区间 $[0, p_{\text{max}}]$ 上, 因此, 策略空间 A 为欧几里德空间中非空的、闭的、有界的凸集. $u_i(\mathbf{p})$ 在 \mathbf{p} 上连续, 且由式(5)、(6)有

$$\frac{\partial u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i} = \frac{\mu h_{ik}(t)}{\ln 2 (\sigma(t)^2 + p_{\text{infer}}^k(t) + h_{ik}(t) p_i(t))} - \frac{1}{h_{ik}}.$$

根据极大值定理得

$$p_i = \frac{\mu h_{ik}}{\ln 2} - \frac{\sigma(t)^2 + p_{\text{infer}}^k(t)}{h_{ik}(t)} \quad (7)$$

由于

$$\frac{\partial^2 u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} = -\frac{h_{ik}(t)}{\ln 2 (\sigma(t)^2 + p_{\text{infer}}^k(t) + h_{ik}(t) p_i(t))^2},$$

知 $\partial^2 u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) / \partial p_i^2 < 0$, 因此 $u_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})$ 在 p_i 上是凹的. 根据文献[16-17]给出的结论可知, 非合作 Ad hoc 网络功率控制博弈存在纳什均衡. 证毕.

定理 2. 非合作 Ad hoc 网络功率控制博弈的纳什均衡是唯一的.

证明. 由定理 1 知非合作 Ad hoc 网络功率控制博弈存在纳什均衡. 设 \mathbf{p} 为 Ad hoc 网络功率控制博弈的纳什均衡. 由式(7)得

$$p_i = -\frac{\sum_{j \in N_i} h_{jk}(t) p_j(t)}{h_{ik}(t)} + \frac{\mu h_{ik}}{\ln 2} - \frac{\sigma(t)^2}{h_{ik}(t)}.$$

功率向量 \mathbf{p} 表示为矩阵形式为

$$F(\mathbf{p}) = \mathbf{k}\bar{\mathbf{p}} + \mathbf{c},$$

式中, F 为从空间 R^n 到 R^n 的映射. \mathbf{k} 为 $n \times n$ 阶矩阵, 表示如下:

$$\mathbf{k} = \mathbf{I} - \begin{bmatrix} \frac{1}{h_{1k}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{h_{nk}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1k} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & h_{nk} \end{bmatrix}.$$

\mathbf{c} 为 n 阶矩阵, 有

$$c_i = \frac{\mu h_{ik}}{\ln 2} - \frac{\sigma(t)^2}{h_{ik}(t)}.$$

可知映射 F 有如下性质^[17]:

- (1) 若 $x \leq y$, 则 $F(x) \leq F(y)$;
- (2) $F(x+y) \leq F(x) + F(y)$;
- (3) $F(x) - F(y) \leq F(x-y)$.

由于网络中每个节点都可以调整功率来获得一定的收益, 即 $F(\mathbf{p}) > 0$. 所以 $F(p_i)$ 是一个标准函数, 文献[18]指出对于一个标准函数, 不动点是唯一的, 因此, 纳什均衡 \mathbf{p} 是唯一的. 证毕.

4 非合作 Ad hoc 网络功率控制博弈优化算法

本节给出针对信道容量、网络半径和节点发射功率优化的分布式非合作功率控制博弈算法 (Distributed Non-cooperative Game Algorithm to Power Control, DNGAPC) 及其实现.

4.1 功率控制算法

为了实现功率控制算法, 网络中每个节点需要

通过周期发送 HELLO 报文建立本地相邻节点信息表,用于记录发送报文节点 ID、相邻节点干扰功率值和其与本节点间的距离及采用此发射功率发送报文的收益. 相邻节点信息表如表 1 所示. 为了获得相邻节点干扰功率值,在每个 HELLO 报文中加入了一个保存节点干扰功率值的域.

表 1 相邻节点信息表

节点 ID	距离	干扰功率	收益
ID1	d_{i1}	p_{infer}^1	u_{i1}
ID2	d_{i2}	p_{infer}^2	u_{i2}
ID3	d_{i3}	p_{infer}^3	u_{i3}
...

算法工作如下:每个节点把本地干扰功率值放入 HELLO 报文,并向其邻居节点进行广播,当节点收到 HELLO 报文,则根据式(5)计算收益并更新其相邻节点信息表. 当节点需要发送报文时,则搜索相邻节点信息表并根据式(7)计算所需发射功率值. 算法描述如下:

```
PROCEDURE Init
while  $t=0$ 
do
```

```
 $p_i = P_{\max}$ 
 $p_{infer}^i = 0$ 
Initialize(local_table)
end while
PROCEDURE HandleMessage(HELLO)
while  $i$  receives HELLO
do
refresh(local_table)
end while
PROCEDURE Send(M)
while  $i$  sends  $M$ 
do
 $u \leftarrow find\_payoff(local\_table)$ 
 $p_i \leftarrow compute\_trans\_power(u)$ 
if  $M=HELLO$ 
then add_infer_field( $p_{infer}^i$ )
end if
end while
```

4.2 算法跨层设计模型

DNGAPC 算法采用跨层设计方法. 功率控制模块在物理层实现,它从网络层建立的相邻节点信息表中获得相关的干扰信息,计算节点应采用的发射功率. 算法实现框图如图 1 所示. 功率控制模块包括

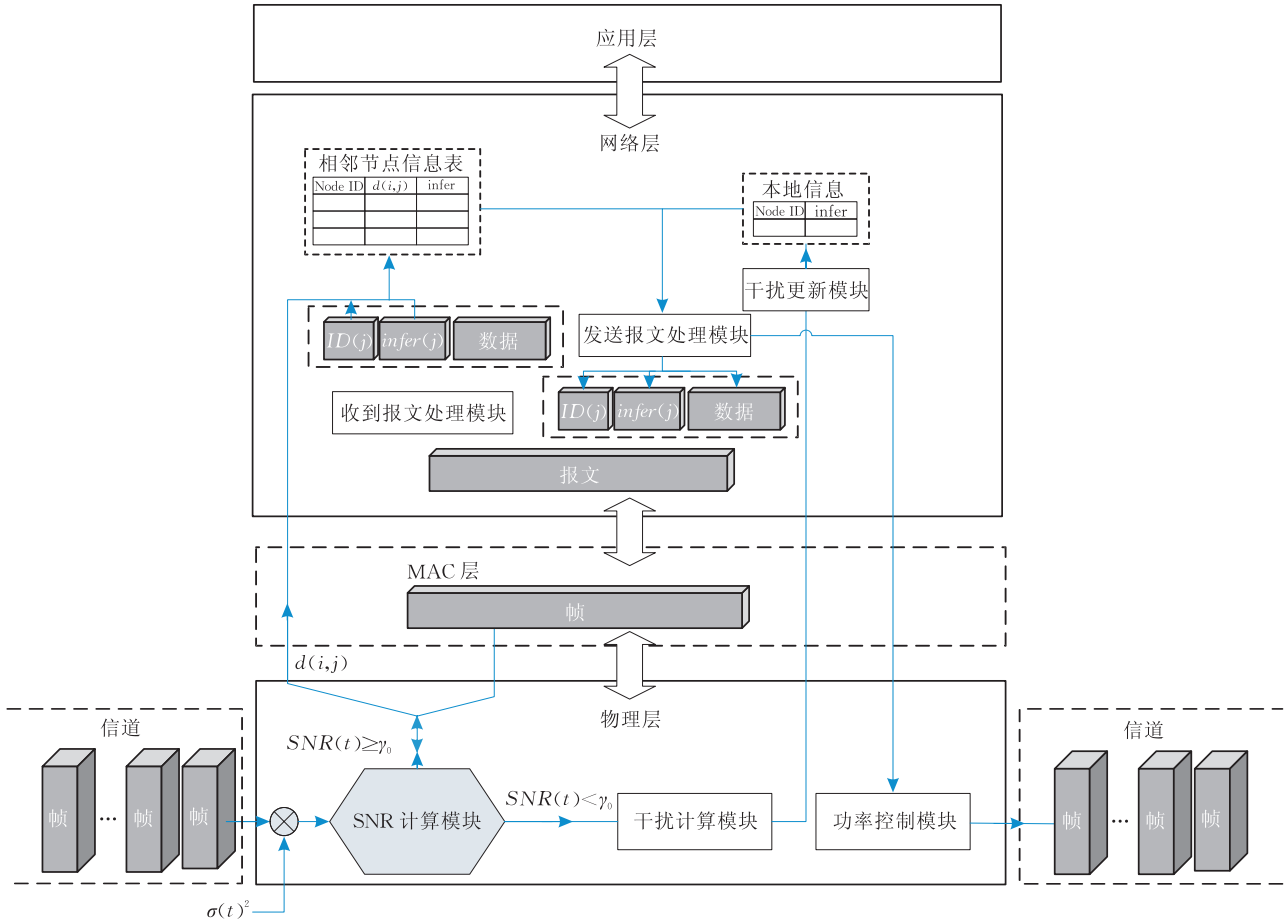


图 1 DNGAPC 跨层设计模型

SNR 计算模块、干扰计算模块和功率控制模块组成. 当节点收到报文帧时, SNR 计算模块通过计算接收信号的信噪比完成判断该报文是否为有效报文的工作. 若为有效报文, 则将报文帧送至上层处理, 并计算出本节点与报文发送节点的距离, 将其送至网络层. 否则, 为干扰信号, 节点将报文帧丢弃, 并运行干扰计算模块, 同时将更新网络层的节点干扰信息. 当节点需要发送报文时, 则根据相邻节点信息表, 获得目的节点的干扰值, 并将该值送至功率控制模块计算应采用多大的发射功率发送该报文, 从而完成对节点发射功率的控制.

5 仿真结果

为了评价该算法的性能, 本文采用了实验仿真的方法. 仿真参数如表 2 所示, 节点均匀分布在场景中. 在物理层设计了专门的能量控制模块, 它可以实现节点功率在 $[0, 2.5]\text{mW}$ 范围内任意调节. 洪泛协议以其简单有效, 已成为 Ad hoc 网络中运用最广泛的协议. 许多路由协议都依赖它完成路由发现和维护的工作. 但是洪泛协议会带来广播风暴问题, 对整个网络造成的负担和资源消耗是非常严重的. 因而采用洪泛协议有助于在最恶劣的网络环境中, 考察 DNGAPC 算法的有效性, 并且有助于发现节点发射功率与网络容量之间的关系. 因此网络层采用了洪泛协议. 为了减少报文碰撞, 在网络层采用了随机评估时延(Random Assessment Delay, RAD)^[19]. 仿真试验中采用两种场景来测试算法性能. 静态场景和动态场景. 通过静态场景的试验, 可以得到算法性能的最大值. 在动态场景中, 节点以“random waypoint”方式移动, 平均移动速度分别取 0.001m/s , 0.1m/s 和 1m/s . 当节点的平均移动速度为 0.001m/s 时, 可以模拟室内处于坐着状态的人组成的 Ad hoc 网络场景. 当节点的平均移动速度为 0.1m/s 时, 可以较好的模拟低速 Ad hoc 网络场景. 当节点的平均移动速度为 1m/s 时, 用于模拟人们在步行中相互间通过 Ad hoc 网络进行通信的情况. 对于每种场景, 随机生成 100 个连通的网络拓扑结构, 然后测试算法在这些网络中的性能并求其平均值.

在仿真试验中, 采用了 3 种不同的功率控制方法进行对比试验. 如下所示:

(1) 最大发射功率(Maximum Energy Power Control Algorithm, MAXPCA), 即所有节点均采用最大发射功率进行报文的发送, 即 $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_n]$, $p_1=p_2=\dots=p_n=p_{\max}$.

(2) 最小发射功率(Minimum Energy Power Control Algorithm, MINPCA)^[20-21], 在保证网络连通的条件下, 所有节点采用相同的最小功率发送报文, 即 $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_n]$, $p_1=p_2=\dots=p_n=p_{\min}$.

(3) 分布式非合作功率控制博弈算法.

仿真试验参数如表 2 所示.

表 2 仿真参数

参数	值
场景大小/ m^2	500×500
节点个数	50
MAC 协议	CSMA/CA
路由协议	Flooding
带宽/ Mbps	2
节点最大发射功率/ mW	2.5
节点最大覆盖半径/ m	230
SNR/ dB	13
环境噪声/ dBm	-120
业务负荷/ (s/packet)	0.01—2

为了测试路由算法的性能, 在仿真试验中, 我们考察如下性能参数:

(1) 广播成功率(Reachability). 接收到的正确报文个数与实际应接收的报文个数之比;

(2) 广播平均延迟(Average Latency). 从源节点开始发送广播报文到网络中所有节点都收到报文所经历的时间;

(3) 容量(Capacity). 指网络中处理能力最低的链路所能达到的最大的数据传输速率;

(4) 能效(Energy Efficiency). 为单位时间内, 收到广播报文总数与广播所消耗的能量之比.

由于存在隐终端问题, 随着节点的业务负荷增大造成报文碰撞加剧, 导致广播成功率降低. 由表 3 可以看出, 采用最小发射功率控制方法的广播成功率可以降低节点的功耗, 但并不能减少由于隐终端带来的干扰, 而且由于单纯的采用较小的功率发射, 也导致信号的接收信噪比较小, 因而其抗干扰能力也较弱, 平均成功接受报文数要小于其他两种算法, 当业务负荷较大时, 其广播成功率较其它两种方法差, 采用非合作功率控制博弈算法与采用最大功率发射算法的广播成功率基本相同. 图 2 显示了 3 种算法的成功率. 图 3~图 5 分别显示了 3 种算法的干扰分布情况, 从图中可以看出, MAXPCA 产生的干扰最大; MINPCA 由于采用较小的发射功率, 因而其产生的干扰也比较小; DNGAPC 算法产生的干扰最小, 反映出算法能够根据信道情况动态的调整发射功率, 从而使其产生的干扰远低于其它两种算法.

表 3 算法平均成功接受报文数

业务负荷/(packets · s ⁻¹)	MAXPCA 算法单位时间(s)内 平均成功接受报文数	DNGAPC 算法单位时间(s)内 平均成功接受报文数	MINPCA 算法单位时间(s)内 平均成功接受报文数
100	18521.23	17099.79	14582.11
50	23019.76	22693.27	20004.04
34	26888.89	26573.79	19192.84
25	21078.25	20505.26	12365.07
20	16891.68	16462.47	10921.1
17	14114.03	13728.13	9737.36
15	12094.9	11760.88	8717.33
13	10575.78	10290.26	7850.96
11	9402.22	9174.83	7157.29
10	8443.6	8255.2	6513.05

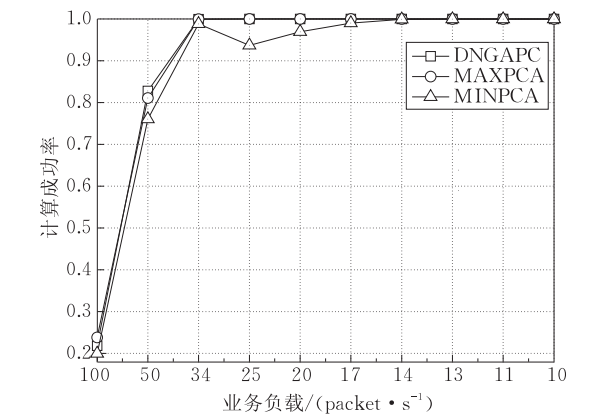


图 2 算法广播成功率比较

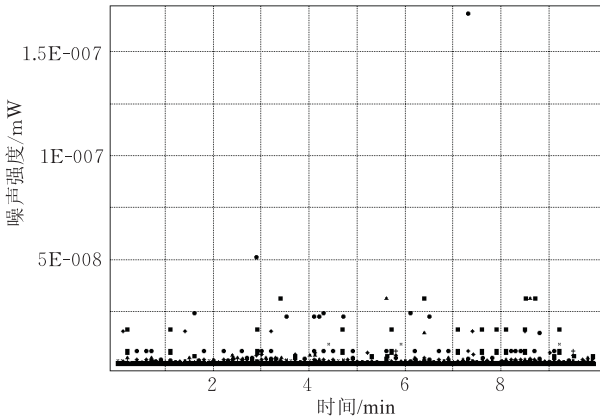


图 3 MAXPCA 算法干扰分布 (50 个节点)

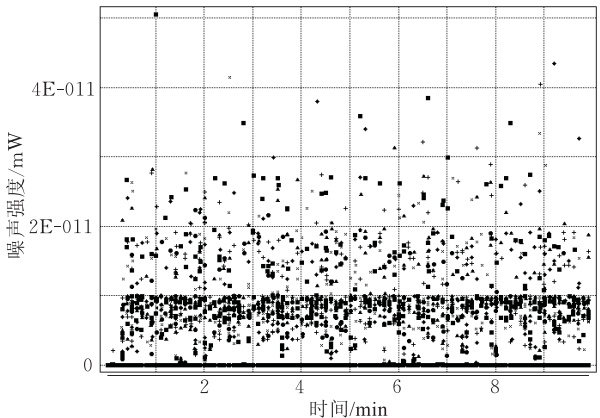


图 4 DNGAPC 算法干扰分布 (50 个节点)

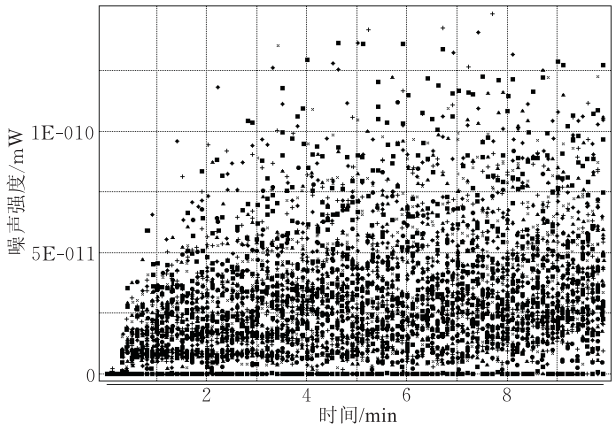


图 5 MINPCA 算法干扰分布 (50 个节点)

由于 DNGAPC 算法对干扰进行了抑制,因此其报文碰撞与信道争用个数均小于 MAXPCA 算法,因而由于报文碰撞与信道争用导致的延迟时间均要小于 MAXPCA 算法,如图 6 所示。

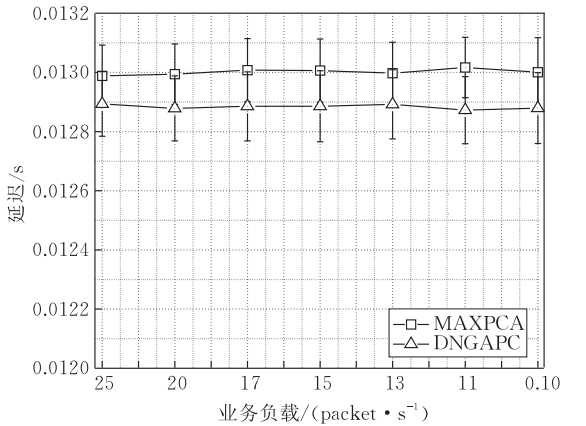


图 6 算法平均延迟比较

图 7 比较了 3 种算法不同业务负荷下网络容量. 从图 7 中可以看出随着业务负荷的增加,3 种算法的容量均呈线性增加,在负荷达到 0.04(s/packet) 时,算法容量达到最大.当负荷继续增大,3 种算法的容量均呈下降趋势,这是由于当业务负荷大于 0.04(s/packet) 后,广播带来的广播风暴问题导致

3 种算法的广播成功率均不能保证为 1. 从图 7 的结果显示 MINPCA 的容量最小. 这是由于 MINPCA 采用最小的发射功率发射报文, 导致接收端接收报文的信号强度也随之减小, 从而其抗干扰能力减弱, 导致大量的报文不能被正确接收, 因此导致其容量小于 MAXPCA 算法与 DNGAPC 算法. 而 DNGAPC 算法由于利用信道容量作为功率控制的收益函数, 通过节点间的博弈使得信道的容量达到最大.

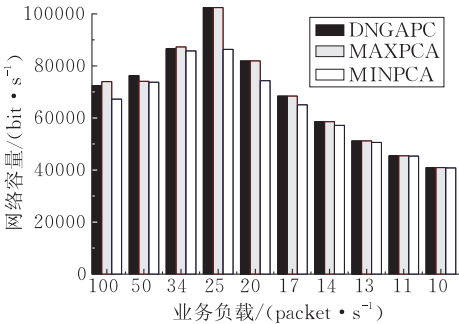


图 7 不同业务负荷下算法的容量比较

图 8 显示了 3 种算法的能效情况. 由于采用了最小的发射功率发送报文, 因此 MINPCA 算法的能效最好, MAXPCA 算法的能效最差, DNGAPC 算法能效介于两者之间.

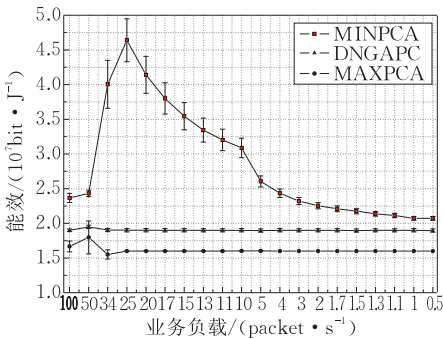


图 8 算法能效比较

6 小 结

在 Ad hoc 网络中功率控制是一个非常复杂的问题, 单纯的降低节点的发射功率并不能降低由于隐终端存在造成的干扰并且获得期望的网络容量. 本文给出一种针对信道容量、网络半径和节点发射功率优化的分布式非合作功率控制博弈算法, 该算法采用非合作博弈功率控制模型, 对其纳什均衡存在性和唯一性进行了证明. 算法采用了跨层设计结构以期获得较好的性能. 仿真试验结果表明, 正如文献[6-7]所表明的, 采用最大发射功率发射报文获得

了最大的网络容量和最差的能效, 而 MINPCA 算法虽然取得了最好的能效, 但同时其网络容量和平均延时也是最差的. DNGAPC 算法由于可以根据网络信道干扰情况动态的调整节点的发射功率, 从而获得了与采用最大功率发送报文相同的网络容量和广播成功率, 最小的广播延迟和干扰分布, 且报文发送能效也取得了较大的提高.

参 考 文 献

[1] Li Ning, Niu Xiao-Hong. Power control mechanisms in Ad hoc networks. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Sciences Edition), 2004, (6): 26-31(in Chinese)
(黎宁, 牛晓红. Ad hoc 网络中的功率控制机制. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2004, (6): 26-31)

[2] Bao L, Garcia-Luna-Aceves J J. Topology management in Ad hoc networks//Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2003). Annapolis, Maryland, 2003: 129-140

[3] Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multi-hop wireless networks using transmit power adjustments//Proceedings of the IEEE INFOCOM. Tel Aviv, Israel, 2000: 404-413

[4] Amis A D, Prakash R, Vuong T H P, Huynh D T. Max-Min D-cluster formation in wireless Ad hoc networks//Proceedings of the IEEE Conference on Computers Communications (INFOCOM). New York, NY, USA, 1999: 32-41

[5] Garey M R, Johnson D S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York: WH Freeman and Company, 1979

[6] Behzad A, Rubin I. Impact of power control on the performance of Ad hoc wireless networks//Proceedings of the INFOCOM 2005. Miami, FL, USA, 2005: 102-113

[7] Sun Qiang, Li La-Yuan, Chen Nian-Sheng, Aziz Sadia. Impact of power control on wireless Ad hoc network capacity//Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 07). Santa Fe, New Mexico, USA, 2007: 73-82

[8] Kucera Stepan, Yamamoto Koji, Yoshida Susumu. A game-theoretic framework for distributed power control in wireless Ad hoc networks//Proceedings of the IEEE PIMRC 2006. Helsinki, Finland, 2006: 1-5

[9] Altman E, Altman Z. S-modular games and power control in wireless networks. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(5): 839-842

[10] Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 291-303

[11] Alpcan T, Basar T, Dey S. A power control game based on outage probabilities for multicell wireless data networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(4): 890-899

- [12] Goodman D, Mandayam N. Power control for wireless data. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2000, 7(2): 48-54
- [13] Long Cheng-Nian, Zhang Qian, Li Bo, Yang Hui-Long, Guan Xin-Ping. Non-cooperative power control for wireless Ad hoc networks with repeated games. *Selected Areas in Communications*, 2007, 25(6): 1101-1112
- [14] Arpaciglu O, Haas Z J. On the scalability and capacity of wireless networks with omnidirectional antennas//*Proceedings of the Information Processing in Sensor Networks*. Berkeley, CA, USA, 2004: 169-177
- [15] Rappaport T S. *Wireless Communications, Principles and Practice*. NJ: Prentice Hall, 1996, 104: 276-278
- [16] Yao Guo-Qing. *Game Theory*. Tianjing: Nankai University Press, 2002(in Chinese)
(姚国庆. 博弈论. 天津: 南开大学出版社, 2002)
- [17] Zhang Wei-Ying. *Game Theory and Information Economics*. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1996(in Chinese)
- [18] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 1995, 13(9): 1341-1347
- [19] Williams B, Tracy C. Comparison of broadcasting techniques for mobile Ad hoc networks//*Proceedings of the ACM MOBIHOC*. Lausanne, Switzerland, 2002: 194-205
- [20] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, Kumar P R. Power control in Ad hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol//*Proceedings of the European Wireless Conference*. Florence, Italy, 2002: 156-162
- [21] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404



SUN Qiang, born in 1974, Ph. D., lecturer. His research interests include mobile ad hoc networks, protocol engineering, distributed computing and routing technologies.

LI La-Yuan, born in 1946, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include high speed computer networks, protocol engineering and image processing.

CHEN Nian-Sheng, born in 1967, Ph. D., professor. His research interests are in Ad hoc networks, QoS routing, and protocol engineering.

Background

Power control is an efficient way to save energy of nodes in ad hoc networks. However, power control will affect many aspects of the operation of the networks such as network throughput, the connectivity of the networks and so on. One of the major factors affecting the performance of the networks is the interference area cause by hidden nodes. Using a smaller nodal transmit power can conserve the energy of the nodes, but at the same time there will be much interference caused by hidden nodes in ad hoc networks. As the size of networks grows, the losing from using smaller nodal transmit power may exceed the benefit from it. How to adjust transmit power to get maximum network throughput, minimum network radius and guaranteed network connectivity is the essential of power control in ad hoc networks.

Recently, an alternative approach to the power control problem has been applied in wireless networks based on non-cooperative game theory. However, many works were presented and typically designed for wireless networks with cellular architecture or need a certain degree of cooperation or information exchange among nodes. This paper proposed a dis-

tributed non-cooperative game algorithm to power control for ad hoc networks. A new utility function is given which is to satisfy the requirement of maximum of network connectivity, maximum of network capacity, minimum network delay. The existing and uniqueness of Nash equilibrium for the algorithm is proved and the effectiveness of proposed algorithm is tested by simulation.

This work is proudly supported by the National Natural Science Foundation of China under grant Nos.60672137, 60773211, the Doctoral Program Foundation of Ministry of Education of China under grant No.20060497015, the Shanghai Scientific Research Funds for Selection and Training of Outstanding Young Teachers in Institute of High Learning under grant No. sdj-07011, the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission under grant No.09YZ479, and the Plan for Scientific and Technological Innovation Team of Excellent Young and Middle-aged in Institute of High Learning of Hubei province under grant No. T200806.