

# 传感器网络非合作博弈功率控制及其仿真

曾加, 慕春棣

(清华大学自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 针对基于 CDMA 通信方式的传感器网络模型, 采用非合作博弈功率控制算法对网络中的节点进行分布式功率控制。在算法中为传感器节点构造包含效用函数和代价函数的支付函数模型, 通过并行迭代的方式获得网络功率控制的纳什均衡策略, 使所有节点的支付函数达到最优化。为了验证算法的有效性, 采用 OPNET 对不同参数组合下的情况进行仿真, 仿真结果表明, 基于博弈论模型的非合作博弈功率控制算法具有很好的收敛性, 当选择效用因子在 1.0~1.1、价格因子在 5.5~5.9 时, 网络具有很好的性能。

**关键词:** 无线传感器网络; 功率控制; 非合作博弈

## Power Control and Simulation on Non-cooperative Game in Wireless Sensor Networks

ZENG Jia, MU Chun-di

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

**【Abstract】** A non-cooperative power control algorithm is proposed based on the model of wireless CDMA sensor networks. A node payoff function which involved of utility function and cost function is modeled in the algorithm and the transmitting power vector is obtained by parallel update. It is proved that the sensor network can reach Nash Equilibrium with this transmitting power vector, and in this situation all the nodes' payoff function is maximized. The OPNET is applied to simulation process of the algorithm, during which simulation has been carried out with different index combinations. Results show that the power control algorithm based on the game theory model has a very good astringency. Performance of the system can be improved through the selection of the utility factor between 1.0~1.1 and price factor between 5.5~5.9.

**【Key words】** wireless sensor networks; power control; non-cooperative game

### 1 概述

无线传感器网络由部署在监测区域内的大量微型传感器节点组成, 它们通过无线通信方式形成一个多跳的、自组织的网络系统。传感器节点具有数据采集、处理、无线通信和自动组网的能力, 通过协作完成大量复杂的监测任务。传感器网络具有监测精度高、容错性高、覆盖区域大等优点, 在军事、环境监测、工业控制和城市交通等方面有着广泛的应用, 特别适合部署在环境恶劣及人类不宜到达的场所。随着研究的深入以及潜在需求的推动, 传感器网络面临着更多的挑战, 更多的应用需要传感器网络传输大量的数据, 具有更强的抗干扰能力以及更稳定、安全等, 这些需求促使其他领域的先进技术与传感器网络的交叉, 例如码分多址(CDMA)通信方式与传感器网络的融合。由于CDMA抗干扰能力强、保密性能好、低功率谱密度、容易实现大容量多址通信、可以精确定时与测距等优点, 已有越来越多的研究人员开始研究它在传感器网络中的应用<sup>[1-2]</sup>。但是由于CDMA存在一些固有的缺陷, 例如多址干扰与远近效应, 使其在能量受限的传感器网络中的应用受到很大的限制, 因此需要对基于CDMA通信的传感器网络进行优化, 其中功率控制是核心内容之一。

功率控制是在保证接收端正常接收的情况下, 发送端调整发射功率并使其最小。由于CDMA系统中任何节点的发射功率对其他节点都是干扰, 因此需要引入功率控制机制, 使密集分布的节点在较小的干扰环境中共享无线信道, 保证服务质量。同时在CDMA通信方式下, 多个节点能同时发送数据, 从而降低节点空闲侦听的能量消耗, 延长电池的平均寿

命进而降低整个网络的能量消耗。目前已有对该问题的一些研究<sup>[3-4]</sup>, 其中文献[4]的算法采用Sink节点计算最优功率控制向量并广播的方式进行功率控制, 但由于忽略了传感器网络分布式的特性, 因此效果并不理想, 甚至出现网络易受入侵节点干扰等问题。因此, 本文采用博弈论模型功率控制算法对网络中的节点进行分布式功率控制。

### 2 非合作博弈功率控制模型

在采用 CDMA 通信方式的传感器网络中, 由于节点共享有限的信道带宽, 因此节点之间存在相互的干扰。节点对信道的使用从博弈论的角度可以抽象为非合作博弈。为了描述这一博弈过程, 引入支付函数的概念。对于某个节点  $i$ , 定义如下支付函数:

$$J_i = U_i - C_i \quad (1)$$

其中,  $U_i$  表示节点  $i$  的效用函数;  $C_i$  表示节点  $i$  的代价函数。根据式(1)可以得到如下功率控制模型:

$$J_i(p_i, p_{-i}) = \mu_i \ln(1 + \gamma_i) - \lambda_i p_i \quad p_i > 0 \quad \forall i \quad (2)$$

其中,  $p_i$  是节点  $i$  的发射功率;  $p_{-i}$  是除去节点  $i$  以外, 其他节点的发射功率向量;  $\mu_i$  和  $\lambda_i$  分别为效用因子和价格因子;  $\gamma_i$  为节点  $i$  所获得的信干比, 定义为

**基金项目:** 国际科技合作计划基金资助重点项目(2005DFA10920)

**作者简介:** 曾加(1981-), 男, 博士研究生, 主研方向: 传感器网络能量控制; 慕春棣, 教授

**收稿日期:** 2007-05-30 **E-mail:** muchd@mail.tsinghua.edu.cn

$$\gamma_i = \frac{W}{R} \frac{h_i p_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2} \quad (3)$$

其中,  $W/R$  为 CDMA 通信的处理增益;  $W$  是码片速率;  $R$  是扩频后信号的传输速率; 参数  $h_i$  代表节点  $i$  到 Sink 节点的链路增益;  $\sigma^2$  为背景噪声方差。

由式(3)可见, 传感器网络中节点  $i$  的功率控制问题可以转变为在给定其他节点功率总和  $\sum_{j \neq i} h_j p_j$  及噪声干扰  $\sigma^2$  的情况下, 最大化支付函数式(2)的问题。由于支付函数  $J_i$  是  $p_i$  的非增函数, 因此对  $p_i$  的偏微分满足:

$$\frac{\partial J_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} = \frac{L\mu_i h_i}{\sum_{j \neq i} h_j p_j + Lh_i p_i + \sigma^2} - \lambda_i = 0 \quad (4)$$

另外, 由支付函数  $J_i$  对  $p_i$  的二阶偏微分:

$$\frac{\partial^2 J_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i^2} = \frac{-L^2 \mu_i h_i^2}{(\sum_{j \neq i} h_j p_j + Lh_i p_i + \sigma^2)^2} < 0 \quad (5)$$

可知支付函数  $J_i$  是  $p_i$  上的连续拟凹函数, 且可以证明  $p_i$  是欧式空间非空的紧致凸集。由此可见在采用CDMA通信方式的传感器网络中存在纳什均衡<sup>[5]</sup>。因此, 由最优功率解向量存在的必要条件式(4)可推出的最优功率向量, 即满足信干比最低要求的发射功率。由式(4)导出的功率控制策略为

$$p_i(p_{-i}, \mu_i, \lambda_i) = \begin{cases} \frac{\mu_i}{\lambda_i} - \frac{1}{Lh_i} (\sum_{j \neq i} h_j p_j + \sigma^2) & \sum_{j \neq i} h_j p_j \geq \frac{L\mu_i h_i}{\lambda_i} - \sigma^2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可知, 功率向量不仅依赖于表征节点的参数  $\mu_i$ ,  $\lambda_i$  以及  $h_i$ , 还依赖于 CDMA 通信方式的一些参数, 如处理增益  $L$ , Sink 节点所计算的所有节点的总接收功率  $\sum_{i=1}^M h_i p_i$ 。

### 3 OPNET 仿真模型

对无线传感器网络非合作博弈功率控制算法进行仿真, 仿真环境设定为: 在长宽均为 100 m 的区域随机部署 9 个传感器节点, 将 Sink 节点部署于坐标为 (50, 50) 的位置, 节点的通信半径为 80 m。模型中其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	描述	取值
$W$	信道带宽	0.1 MHz
$R$	数据速率	1 Kb/s
$L$	处理增益	100
$\sigma^2$	背景噪声	$5 \times 10^{-15}$ W
$h$	链路增益	$7.75 \times 10^{-3} / d_i^{3.6}$

#### 3.1 Sink 节点模型的建立

在 OPNET 中建立 Sink 节点 Process Model<sup>[6]</sup>。并在 Process Model 的进程状态中, 写入相应的入口代码及出口代码。在 OPNET 中, Process Model 的状态分为非强制(unforced)状态和强制(forced)状态, 当 Process 转移到非强制状态时, 执行完入口执行代码后, 模块将程序的控制权转回仿真中心, 模块在此停留, 等待下一个事件到达激活模块, 而当转移到强制状态时, 则依次执行入口执行代码和出口执行代码, 然后立即转移到其他状态。这些状态之间通过转移线相连, 这些转移线中包括由前一个状态直接转移到下一个状态的无条件转移线, 以及当条件满足时才能由前一个状态转移到下一个状态的条件转移线<sup>[6]</sup>。设计 Sink 节点 Process Model 中 Sink 节点在有包到达时才有 idle 状态转移到 receive 状态。Sink 节点在功率控制模型中的作用主要是计算  $\sum_{i=1}^M h_i p_i$ , 并将其广播给监测区域中的所有节点。然后在 OPNET 中建立 Sink 节点 Node Model<sup>[6]</sup>。

Node Model 在层次上高于 Process Model。前一步建立的

Process Model 只是 Node Model 中应用层模块的进程模型。Node Model 中发射模块使用 OPNET 提供的 wireless 介质访问层模型实现, 并由其控制的底层结构(无线接收机与发送机)与其他节点进行通信。

#### 3.2 节点模型的建立

在 OPNET 中建立节点 Process Model。在功率控制模型中节点  $i$  接收 Sink 节点广播的当前监测区域各节点的发射总功率  $\sum_{i=1}^M h_i p_i$ , 计算  $\sum_{j \neq i} h_j p_j$ , 并根据式(6)计算下一轮通信的发射功率, 最后将这一功率值报告给 Sink 节点, 如此迭代, 直到达到纳什均衡, 此时区域内的所有节点均以最优发射功率进行通信。接着建立节点 Node Model 与 3.1 节类似。

#### 3.3 系统仿真模型

在 OPNET 中建立一个仿真环境, 配置一些必要的参数, 包括地图的尺度等。建立的系统仿真模型如图 1 所示。

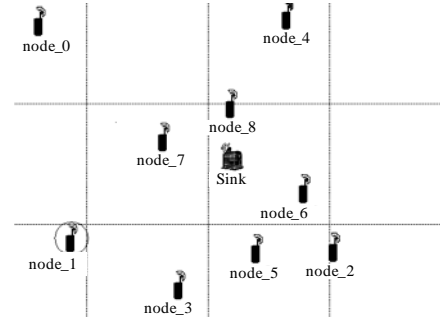


图 1 系统仿真模型

### 4 系统仿真

对非合作博弈的功率控制进行仿真, 时间设定为 60 s。在仿真开始时, Sink 节点获取监测区域内的节点数目, 各个节点设定功率初值  $p_i(0) = 1$  以及效用因子  $\mu_i$  与价格因子  $\lambda_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, 8$ , 且  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_8$ ;  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_8$ 。

对每次仿真采用不同的效用因子与价格因子组合, 首先考虑  $\mu_i = 1$ ,  $\lambda_i = 1.5$  的情况, 仿真得到如图 2、图 3 所示的节点发射功率及支付函数随时间的变化。

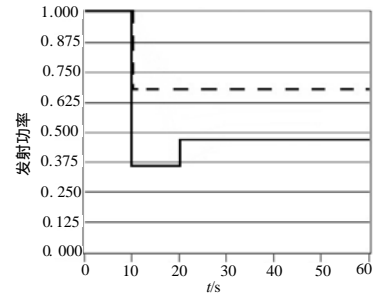


图 2 节点发射功率随时间的变化

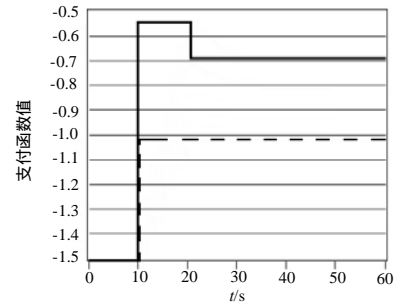


图 3 节点支付函数随时间的变化

在图 2、图 3 中实线和虚线分别代表距离 Sink 节点最近

和最远的节点,而其他节点的数据都介于这两条图线之间。由图 2 看出所有节点的发射功率都迅速收敛,且随 Sink 节点距离的增大,收敛于越高的功率值,这样的功率分配对网络规避远近效应是有利的;由图 3 看出通过非合作博弈过程,所有节点的支付函数都得到了优化,且随 Sink 节点距离的增大,达到均衡后节点的支付函数值越低,这是因为距离越远的节点,均衡发射功率越高,所以代价越大。由图 2、图 3 可知,当所有节点的发射功率收敛后,节点的支付函数达到最大,这时任何节点单独改变发射功率,并不能提高其支付函数值,这样任何节点都没有改变策略的积极性,可见所有节点的发射功率向量即策略组合达到纳什均衡。对不同效用因子及价格因子组合下的系统进行仿真得到如图 4~图 7 的仿真图像。为了方便观察特性,设定各节点距离 Sink 节点的径向距离按固定长度递增。图中横坐标为节点距离 Sink 节点的距离,纵坐标为发射功率或支付函数的数值,且图线的数值均为系统达到纳什均衡时的均衡值。

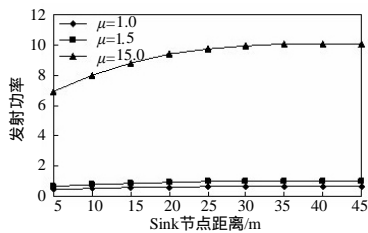


图 4 节点均衡发射功率( $\lambda=1.5$ )

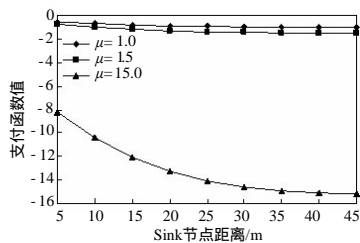


图 5 节点均衡支付函数值( $\lambda=1.5$ )

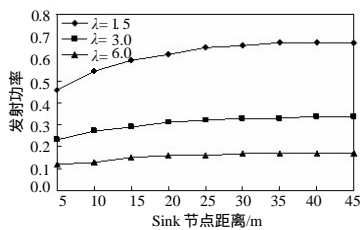


图 6 节点均衡发射功率( $\mu=1$ )

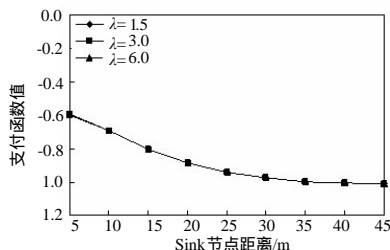


图 7 节点均衡支付函数值( $\mu=1$ )

图 4、图 5 所示为固定价格因子  $\lambda=1.5$ , 调整效用因子  $\mu$  所进行的仿真。图 4 中由下而上 3 条曲线分别代表效用因子为 1.0、1.5 和 15.0 时的均衡发射功率, 3 条曲线均反映了节点发射功率随其距离 Sink 节点的距离增大而提高的趋势。由 3 条曲线的关系可以看出, 在效用因子取值比较小时, 各节

点的发射功率都比较小, 而当效用因子取值增大时, 各节点都会提高自身的发射功率。当  $\mu \gg \lambda$  时, 各个节点的均衡发射功率都很高, 此时网络中的干扰很大, 这种情况近似于无功功率控制时的情况。这一状况由图 5 可以看出, 网络中各节点提高发射功率并没有提高自身的支付函数值, 反而起到相反的效果, 降低了通信信干比。通过对图 5 的分析可知各节点随效用因子取值的增加, 其支付函数值将会整体下降, 相反减小效用因子, 支付函数值会增大, 但当  $\mu \ll \lambda$  时, 各个节点相当于仅从节能的角度优化自己的支付函数, 而不考虑获得的效用, 这样造成所有节点都不会参与通信, 从而无法发挥网络的作用。另外从价格因子的角度来看, 图 6、图 7 所示为固定效用因子  $\mu=1$ , 调整价格因子  $\lambda$  所进行的仿真。图 6 中由上而下 3 条曲线分别代表价格因子为 1.5、3.0 和 6.0 时的均衡发射功率。由 3 条曲线的关系可以看出, 提高价格因子, 会使网络中的节点趋向于以较小的发射功率通信。由图 7 可以看出, 在一定范围内调整价格因子, 各节点降低自身发射功率, 其支付函数并没有明显的降低。

由仿真结果可见, 在基于 CDMA 通信方式的传感器网络中, 节点的效用与通信代价是一对相互制约的因素, 需要根据实际情况选择一组合适的效用因子与价格因子组合, 从而最大限度地发挥网络的效能。例如在本文所述的仿真环境下, 通过多次实验, 当效用因子取值在 1.0~1.1 之间, 价格因子取值在 5.5~5.9 之间时, 网络的各方面表现最优。

## 5 结束语

本文针对基于 CDMA 通信方式的传感器网络模型, 将功率控制抽象为一个  $n$  人非合作博弈过程, 采用非合作博弈功率控制算法对网络中的节点进行分布式功率控制。在算法中为传感器节点构造包含效用函数和代价函数的支付函数模型, 通过并行迭代的方式获得网络功率控制的纳什均衡策略, 使所有节点的支付函数达到最优化。为验证算法的有效性, 本文采用 OPNET 进行仿真, 在算法仿真前构造了符合传感器网络节点的 Process Model 及 Node Model, 在此基础上建立基于 CDMA 通信方式的传感器网络仿真环境。最后对不同参数组合的情况进行大量仿真, 仿真结果表明, 基于博弈论模型的非合作博弈功率控制算法具有很好的收敛性, 选择合适的效用因子及价格因子组合能使网络具有很好的性能。

## 参考文献

- [1] Georgios E, Athanassios M. Multi-carrier CDMA MIMO in Arrayed Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 2nd International Symposium on Wireless Communications Systems. Siena, Italy: [s. n.], 2005.
- [2] Swades D, Qiao Chunming, Dimitris P. An Integrated Cross-layer Study of Wireless CDMA Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(7): 1271-1285.
- [3] Shah V, Mandayam N B, Goodman D J. Power Control for Wireless Data Based on Utility and Pricing[C]//Proc. of the 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Boston, USA: [s. n.], 1998.
- [4] Feng Nan. Utility Maximization for Wireless Data Users Based in Power and Rate Control[D]. New Jersey: Rutgers University, 1999.
- [5] 侯定丕. 博弈论导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.
- [6] 曾加. 基于博弈论的无线数据网络功率控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.