

文章编号: 1001-0920(2011)07-1014-05

基于非合作博弈的无线传感器网络功率控制研究

郑耿忠^{1a,2}, 刘三阳^{1b,1c}, 齐小刚^{1b,1c}

(1. 西安电子科技大学 a. 计算机学院, b. 理学院, c. 综合业务网国家重点实验室, 西安 710071; 2. 韩山师范学院 数学与信息技术系, 广东 潮州 521041)

摘要: 如何提高能量的有效性是无线传感器网络 (WSNs) 设计的重要问题, 针对 WSNs 在多媒体等业务中的应用, 对基于码分多址 (CDMA) 通信方式的 WSNs 模型, 提出一种基于非合作博弈的 WSNs 功率控制算法, 并证明了该算法纳什均衡的存在性及唯一性. 仿真结果表明, 所提出的算法在设计时充分考虑了节点的剩余能量问题, 因此能够很好地降低网络的总发射功率, 有效地节约节点能量, 延长网络的生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 非合作博弈; 功率控制; 纳什均衡

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Study on power control of wireless sensor networks based on non-cooperative game

ZHENG Geng-zhong^{1a,2}, LIU San-yang^{1b,1c}, QI Xiao-gang^{1b,1c}

(1a. School of Computer Science and Technology, 1b. School of Science, 1c. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Department of Mathematic and Information Technology, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China. Correspondent: ZHENG Geng-zhong, E-mail: zgengz@126.com)

Abstract: How to improve energy efficiency of wireless sensor networks (WSNs) is an important problem in the design of WSNs. For the purpose of the applications of multimedia services, a non-cooperative power control algorithm is proposed based on the WSNs model of code division multiple access (CDMA). The existence and uniqueness of the Nash equilibrium are proved for the proposed algorithm. Simulation results show that the problem of node residual energy is considered in the design of the algorithm. So the algorithm can reduce transmitting power, save node energy and prolong network lifetime efficiently.

Key words: wireless sensor networks; non-cooperative game; power control; Nash equilibrium

1 引言

无线传感器网络 (WSNs) 是集信息采集、信息传输、信息处理于一体的综合智能信息系统, 是当前信息领域研究和开发的热点之一, 可实现数据的采集量化、处理融合和传输应用, 可用于军事侦察、环境监测、医疗监护、空间探索、城市交通管理、仓储管理等军事和民用领域^[1]. 近年来, 随着研究的深入, 传感器网络技术得到了快速发展, 应用领域越来越广泛, 应用针对性也越来越强, 并衍生出了无线传感器/执行器网络 (WSANs), 多媒体传感器网络 (WMSN) 等多种新型传感器网络体系. 新型传感器网络及其应

用需要 WSNs 支持诸如语音、视频等具有更大数据量传输的业务以及适应更恶劣的应用环境, 这就要求所设计的 WSNs 能满足多种业务需求并具备更强的抗干扰能力和更稳定、安全的性能. 基于码分多址 (CDMA) 技术的第 3 代移动通信系统被设计用于支持语音、视频等多媒体无线业务, 具有抗干扰能力强、保密性能好、功率谱密度低、容易实现大容量多址通信以及可以精确定时和测距等优点, 已有越来越多的研究人员开始研究如何将其应用于 WSNs^[2-3].

如何设计能量高效的网络是 WSNs 面临的一个重要挑战, 功率控制是解决这一问题的关键^[4-6]. 功率

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-06-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60974082, 60874085, 60703118); 中央高校基本科研业务费项目 (JY10000970012, JY10000970013, K50510700004).

作者简介: 郑耿忠 (1975—), 男, 副教授, 博士生, 从事网络优化与无线传感器网络的研究; 刘三阳 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事最优化、网络算法等研究.

控制是 WSNs 面向实际应用的核心技术, 对于网络的拓扑连通、能量效率、吞吐量、实时性等性能均有显著影响. 目前关于 WSNs 功率控制的算法比较多, 例如 CPC, COMPOW 和 LEACH 等, 但是专门针对基于 CDMA 通信方式下的 WSNs 功率控制的研究还比较少. 由于 WSNs 的“簇头-成员”结构与 CDMA 的“基站-移动台”结构相似, 从而可以利用 CDMA 采用的功率控制机制对 WSNs 的功率控制进行优化.

博弈论是数学的一个重要分支, 已经成功地应用于计算机、无线通信等领域. 文献 [7] 和 [8] 利用博弈论的思想对基于 CDMA 的认知无线网络功率控制进行了研究, 但研究的对象主要是 Ad-Hoc 网络. 针对基于 CDMA 通信方式的传感器网络模型, [9] 提出一种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, [10] 提出一种基于博弈论的功率控制模型及算法. 但是这两种算法并没有考虑 WSNs 剩余能量的问题. 基于此, 本文针对 CDMA 机制和 WSNs 应用的实际特点, 提出一个类似于文献 [9] 中的功率控制博弈, 不同的是本文设计了一个新的效用函数, 所设计的效用函数特别考虑了传感器节点的剩余能量问题. 在此基础上提出了一个分布式功率控制算法, 并论证了非合作博弈功率控制纳什均衡的存在性和唯一性. 该算法能有效地控制节点发射功率, 以达到 WSNs 最大化能量有效性, 能起到控制功率及激励网络优化的作用.

2 系统模型

在基于 CDMA 通信方式的 WSNs 模型中, 网络中有 N 个节点, 每个节点与 sink 节点的距离为 d_i . p_i 和 γ_i 分别表示第 i 个节点的发送功率和接收信干噪, 网络的背景噪声功率为 δ^2 , h_i 表示节点到 sink 节点的链路增益. WSNs 的功率控制还应考虑到保证网络拓扑结构连通, 因为一个节点的能量若被耗尽, 则网络的拓扑就要改变, 所以从节点剩余能量考虑, 可以认为节点剩余能量越少, 消耗的能量也应相对越少, 这样可延长节点寿命. 从这个角度考虑, 根据文献 [11] 中关于信干噪比 (SIR) 的定义, 并考虑节点剩余能量, 本文采用文献 [12] 中定义的信干噪比公式

$$\text{SIR}_i = \gamma_i = G \frac{h_i p_i \frac{E_{\max}}{E_i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_i} + \delta^2}. \quad (1)$$

其中: 扩频增益 $G = W/R$, E_i 为节点 i 的剩余能量, E_{\max} 为节点 i 的最大能量, $\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j$ 为节点 i 接收数据期间内在其干扰半径内的节点发送数据对节点接收数据所产生的干扰总和.

3 非合作博弈功率控制

3.1 非合作博弈功率控制模型

在采用 CDMA 通信方式的 WSNs 中, 由于节点共享有限的信道带宽, 每个节点都希望获得较高的发送功率, 以提高 SIR. 但是, 发送功率的增加必然会增大对其他节点的干扰, 从而导致节点之间存在相互干扰, 这便需要寻找一个平衡点. 因此, 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.

定义 1 非合作博弈功率控制 (NGPC) 表示为 $G = \langle N, P_i, u_i \rangle$. 其中: $N = 1, 2, \dots, n$ 表示网络中在相同子信道上具有同频干扰的节点集合; $P_i = [0, p_{\max}]$ 表示每个节点的策略空间; u_i 为节点 i 的效用函数, 网络中每个节点根据效用函数确定使自己收益最大的策略, 即 $\max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, p_{-i}), i = 1, 2, \dots, n$.

效用函数的设计对博弈功率控制算法性能的影响很大, 本文采用如下形式的效用函数:

$$u_i(p_i, p_{-i}) = \mu \log_2(1 + \text{SIR}_i) - c(p_i). \quad (2)$$

式中: 右边第 1 项为经典高斯信道容量公式, μ 为收益系数; 第 2 项为代价函数. 为让链路质量好的节点受到的惩罚多一些, 让链路质量差的节点少受些惩罚, 同时考虑到节点剩余能量问题, 本文设计了一个既能适当体现公平, 又切合 WSNs 实际特点, 相对简单有效的代价函数

$$c(p_i) = f(h_i) p_i \frac{E_{\max}}{E_i}, \quad (3)$$

其中 $f(h_i)$ 为以节点 i 链路增益为自变量的函数. 取 $f(h_i) = h_i$, 由此可以得到节点 i 的一个新的收益函数

$$u_i(p_i, p_{-i}) = \mu \log_2(1 + \text{SIR}_i) - \lambda h_i p_i \frac{E_{\max}}{E_i}. \quad (4)$$

将式 (1) 代入 (4), 得如下效用函数:

$$u_i(p_i, p_{-i}) = \mu \log_2 \left(1 + G \frac{h_i p_i \frac{E_{\max}}{E_i}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_i} + \delta^2} \right) - \lambda h_i p_i \frac{E_{\max}}{E_i}, \quad (5)$$

式中 λ 为定价因子, 表示单位价格的价格.

3.2 纳什均衡的存在性和唯一性

定义 2 如果对于每个 $i \in N$, 任意 $p'_i \in P_i$, 有

$$u_i(p_i, p_{-i}) \geq u_i(p'_i, p_{-i}),$$

则功率矢量 P 为非合作博弈功率控制 $G = \langle N, P_i, u_i \rangle$ 的纳什均衡.

在纳什均衡点, 给定网络中每个节点的功率, 任何用户都不能靠改变自己的功率水平来提高其效用. 纳什均衡点是通过博弈得到的每个参与博弈的节点

都不愿背离的平衡点.

定理 1 NGPC 存在纳什均衡.

证明 由于每个节点的策略空间定义在区间 $[0, p_{\max}]$ 上, 策略空间 P_i 为欧几里得空间中非空、闭的、有界凸集. $u_i(p)$ 在 P 上连续, 则由式 (5) 有

$$\frac{\partial u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i} = \frac{\mu G h_i \frac{E_{\max}}{E_i}}{\ln 2 \left[\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_j} + \sigma^2 \right) + G h_i p_i \frac{E_{\max}}{E_i} \right]} - \lambda h_i \frac{E_{\max}}{E_i}. \quad (6)$$

由

$$\frac{\partial^2 u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i^2} = - \frac{\mu (G h_i)^2 \left(\frac{E_{\max}}{E_i} \right)^2}{\ln 2 \left[\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_j} + \sigma^2 \right) + h_i p_i \frac{E_{\max}}{E_i} \right]^2},$$

可知

$$\frac{\partial^2 u_i(p_i, p_{-i})}{\partial p_i^2} < 0,$$

因此 $u_i(p_i, p_{-i})$ 在 p_i 上是凹的, 因为一个凹函数也是拟凹函数. 效用函数 $u_i(p_i, p_{-i})$ 在 p_i 拟凹, 所以 NGPC 存在纳什均衡. \square

NGPC 的最优解为 $\arg \max_{p_i \in P_i} u_i(p_i, p_{-i})$, 根据极大值定理, 由式 (6) 得

$$p_i = \frac{\mu \frac{E_i}{\lambda \ln 2 h_i E_{\max}} - \frac{E_i \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_j} + \sigma^2 \right)}{G h_i E_{\max}}}{1}. \quad (7)$$

在实际中, 要求 $p_i \geq 0$, 由此得 λ 的取值范围为

$$\lambda \leq \frac{\mu G}{\ln 2 \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_j} + \sigma^2 \right)}, \quad (8)$$

即如果单位功率价格超出此范围, 则任何节点将不能从中获益.

定理 2 NGPC 的纳什均衡是唯一的.

证明 根据定理 1, NGPC 存在纳什均衡. 设函数

$$f(p_i) = \frac{\mu \frac{E_i}{\lambda \ln 2 h_i E_{\max}} - \frac{E_i \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_j} + \sigma^2 \right)}{G h_i E_{\max}}}{1},$$

如果 $f(p_i)$ 是一个标准函数, 即满足正性、单调性和可扩展性, 则纳什均衡是唯一的.

1) 正性: 当满足式 (8) 的条件时, 函数 $f(p_i) > 0$,

此性质成立.

2) 单调性: 对于任意 $i \in N$, 设 $p' \geq p$, 有

$$f(p') - f(p) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j (p_j - p'_j)}{G h_i} \leq 0,$$

则 $f(p_i)$ 单调递减.

3) 可扩展性: $\forall \alpha > 1$, 有

$$\alpha f(p) - f(\alpha p) = (\alpha - 1) \frac{E_i}{E_{\max} h_i} \left(\frac{\mu}{\lambda \ln 2} - \frac{\sigma^2}{G} \right),$$

对于上式, 只需证明 $\frac{\mu}{\lambda \ln 2} > \delta^2$, 即 $\lambda < \frac{\mu G}{\delta^2 \ln 2}$,

由式 (8) 可得

$$\lambda \leq \frac{\mu G}{\ln 2 \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \frac{E_{\max}}{E_j} + \sigma^2 \right)} < \frac{\mu G}{\delta^2 \ln 2}.$$

所以 $\alpha f(p) - f(\alpha p) > 0$, 满足扩展性.

综上, $f(p_i)$ 是一个标准函数. 文献 [13] 指出, 对于一个标准函数, 不动点唯一, 所以 NGPC 具有唯一纳什均衡. \square

4 非合作博弈功率控制优化算法

在 NGPC 算法中, 节点 i 一方面接收 sink 节点广播的当前监测区域各节点干扰功率的总和 $\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j$; 另一方面, 以广播的方式向相邻节点及 sink 节点转发数据报文, 转发的数据报文包括节点到相邻各节点间的距离、节点 i 到 sink 节点的距离、节点 i 的剩余能量及节点采用某功率发送数据所产生的收益.

当节点收到相邻节点及 sink 节点广播的数据时, 根据式 (5) 计算收益并更新邻居节点信息表. 当节点要发送数据时, 则查询相邻节点信息表, 同时根据式 (7) 计算所需发射功率, 并将这一功率值报告给 sink 节点. 如此迭代, 直到纳什均衡. 此时区域内的所有节点均以最优发射功率进行通信. 算法描述如下:

Initial Info_table

{while $t = 0$

do

$p_i = P_{\max}$

$\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j = 0$

Initialize(Info_table)

end while }

Receive Message(data)

{while node $_i$ receives data

do

calculate $u_i(p_i, p_{-i})$ //according to equation (5)

update(Neighbour Info_table)

```

end while }
Transmit Message(data)
{while nodei transmit data
do
search (Neighbour Info _table)
calculate pi //according to equation (7)
pi → nodesink
end while}
    
```

5 算法仿真及性能分析

对于 NGPC 算法仿真, 首先讨论效用函数中效用因子和代价因子对节点发射功率的影响; 然后对比分析几种算法的性能比较. 采用与文献 [9] 相同的仿真参数, 考虑在一个长宽均为 100 m 的区域内随机部署传感器节点, sink 节点部署在 (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

描述	取值	
W	信道带宽 / MHz	1
R	数据速率 / kbps	10
G	扩频增益	100
δ^2	背景噪声 / W	5×10^{-15}
h_i	路径增益	$\frac{7.75 \times 10^{-13}}{d_i^{3.6}}$
E_{\max}	节点最大能量 / J	50

图 1 为固定价格因子 $\lambda=1.5$, 调整效用因子 μ , 节点均衡发射功率随 sink 节点距离变化的情况. 为仿真简单, 假设网络中节点数 $n=2$, 实际中 n 可为大于零的任意整数. 假设 2 个节点的剩余能量分别为 30 J 和 40 J. 在价格因子 $\lambda=1.5$ 时, 图 1 中: 上面 2 条曲线代表效用因子 $\mu=15$, 节点剩余能量分别为 30 J 和 40 J 时节点的均衡发射功率; 下面 2 条曲线代表效用因子 $\mu=5$, 节点剩余能量分别为 30 J 和 40 J 时节点的均衡发射功率. 4 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. 可以看出, 效用因子比较小时, 各节点发射功率都较小, 而当效用因子增大时, 各节点都会提高自身发射功率. 在同样效用因子情况下, 剩余能量较低节点的发射功率相对较小, 这在一定程度上节约了节点能量, 延长了网络生命周期.

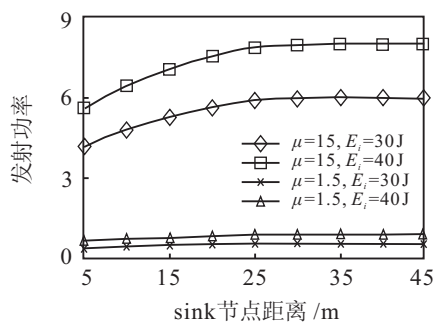


图 1 节点均衡发射功率 ($\lambda=1.5$)

与上述仿真类似, 考虑 2 个节点在剩余能量分别为 30 J 和 40 J, 固定效用因子 $\mu=1$, 调整价格因子 λ , 节点均衡发射功率随 sink 节点距离变化的情况如图 2 所示. 图 2 中: 上面 2 条曲线代表价格因子 $\lambda=1.5$, 节点剩余能量分别为 30 J 和 40 J 时节点的均衡发射功率; 下面 2 条曲线代表价格因子 $\lambda=6$, 节点剩余能量分别为 30 J 和 40 J 时节点的均衡发射功率. 由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. 在同样价格因子的情况下, 剩余能量较低节点的发射功率相对较小, 这在一定程度上节约了节点能量, 延长了网络生命周期.

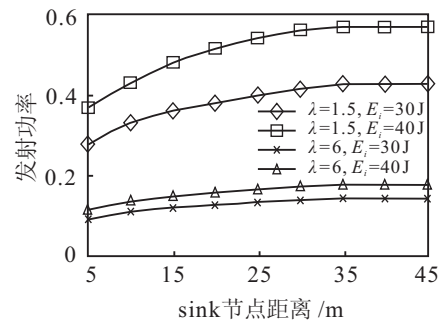
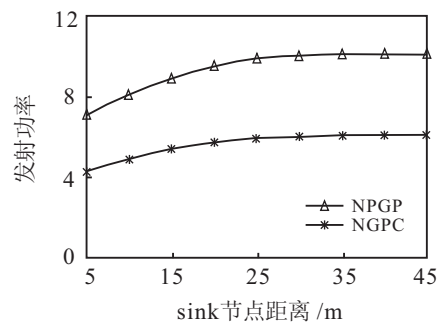


图 2 节点均衡发射功率 ($\mu=1$)

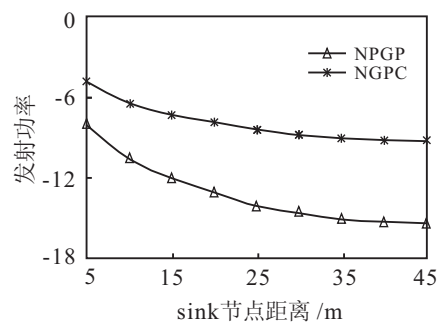
为了验证 NGPC 算法的性能, 将 NGPC 算法与文献 [9] 的 NPGP 算法进行比较. NPGP 算法的功率控制策略为

$$p_i = \frac{\mu}{\lambda} - \frac{1}{Gh_i} \left(\sum_{j=1, j \neq i} h_j p_j + \sigma^2 \right). \quad (9)$$

图 3 为 NGPC 和 NPGP 两种博弈算法的发射功率性能比较和支付函数性能比较.



(a) 发射功率性能比较



(b) 代价函数性能比较

图 3 NPGP 和 NGPC 的性能比较

从图3可以看出, NGPC算法在效用函数的设计上考虑了节点剩余能量问题, 在代价函数的设计上同时考虑了节点剩余能量、路径增益及不同节点的发射功率问题, 因而 NGPC 博弈模型在发射功率和代价函数方面的性能均得到明显改善, 节点的发射功率更加符合实际情况, 并能够有效地降低节点的总发射功率.

图4为利用 Matlab 模糊工具箱仿真得到的网络节点在不同剩余能量、不同效用因子及价格因子组合情况下, 节点发射功率变化过程的例子. 例如, 当效用因子等于 7.77, 价格因子等于 8.13, 剩余能量等于 14.8 时, 节点发射功率为 12.3. 仿真结果表明, 在节点剩余能量一定的情况下, 选择合适的效用因子及价格因子组合能有效地优化网络中各节点的发射功率, 从而降低网络总发射功率.

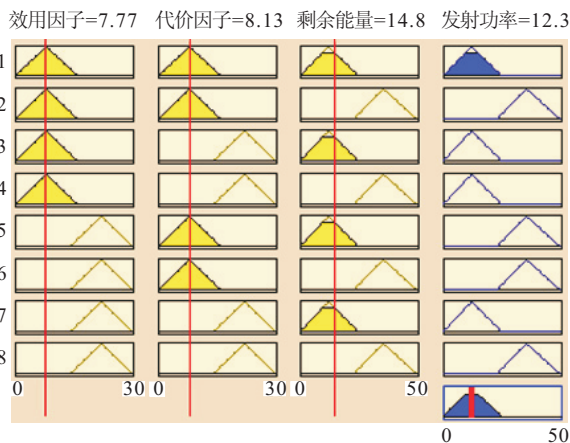


图4 不同剩余能量、效用及价格因子组合下节点发射功率

6 结 论

最大限度地提高 WSNs 能量的利用率是 WSNs 设计的重要目标. 本文针对基于 CDMA 通信方式的 WSNs, 将 WSNs 中节点的功率控制抽象为一个多人的非合作博弈过程, 提出了一种新的分布式博弈功率控制算法, 求出了纳什均衡点, 并证明了纳什均衡的唯一性. 该算法在设计时特别针对 WSNs 的特点, 充分考虑了节点剩余能量的问题, 使得算法更加符合实际应用. 仿真结果表明, 该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有效地优化网络中各节点的发射功率, 降低网络的总发射功率, 从而节约节点能量, 延长网络的生命周期. 本文将博弈论的思想引入 WSNs 的功率控制, 为博弈论在 WSNs 中的性能优化提供了一种新的研究思路.

参考文献(References)

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks, 2002,

38(4): 393-422.

[2] Georgios E, Athanassios M. Multi-carrier CDMA MIMO in arrayed wireless sensor networks[C]. Proc of the 2nd Int Symposium on Wireless Communications Systems. Siena, 2005: 483-487.

[3] Swades D, Qiao Chunming, Dimitris P. An integrated cross-layer study of wireless CDMA sensor networks[J]. IEEE J of Selected Areas in Communications, 2004, 22(7): 1271-1285.

[4] Prasad R, Mohr W, Konhauer W. Third generation mobile communication systems[M]. New York: Artech House, 2000.

[5] Holma H, Toskala A. WCDMA for UMTS[M]. New York: John Wiley, 2000.

[6] Zander J, Kim S. Radio resource management for wireless networks[M]. New York: Artech House, 2001.

[7] 殷志明, 谢剑英. 无线数据网络中基于博弈论方法的功率控制[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(6): 909-915. (Yin Z M, Xie J Y. Power control based on game theory in wireless data network[J]. J of Computer Research and Development, 2004, 41(6): 909-915.)

[8] 孙强, 李腊元. 一种基于博弈论模型的 Ad Hoc 网络功率控制算法[J]. 计算机学报, 2009, 32(1): 169-175. (Sun Q, Li L Y. A power control algorithm based on game theory in Ad Hoc networks[J]. J of Computers, 2009, 32(1): 169-175.)

[9] 曾加, 慕春棣. 传感器网络非合作博弈功率控制及其仿真[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 1-3. (Zeng J, Mu C D. Power control and simulation on non-cooperative game in wireless sensor networks[J]. J of Computer Engineer, 2008, 34(10): 1-3.)

[10] Sun Qiang, Zeng Xianwen. A non-cooperative power control algorithm for wireless Ad Hoc & sensor networks[C]. 2nd Int Conf on Genetic and Evolutionary Computing. Wuhan: IEEE Press, 2008: 181-184.

[11] Wang Jui Teng. Power adjustment and allocation for multimedia CDMA wireless networks[J]. Electronics Letters, 2002, 28(1): 54-55.

[12] 王琳, 陈涤. 无线传感器网络中基于对策论的功率控制[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 145-147. (Wang L, Chen D. Power control based on game theory in wireless sensor network[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(19): 145-147.)

[13] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. IEEE J of Selected Area in Communications, 1995, 13(9): 1341-1347.