

传感网中面向连通性的无参数功率控制算法

何 以¹, 彭月橙², 齐建东¹, 张强宇¹

(1 北京林业大学 信息学院, 北京 100083; 2 北京林业大学 艺术设计学院, 北京 100083)

摘 要: 针对现有基于节点度的功率控制算法一般采用调节参数进行功率调整而导致的收敛速度慢和高能耗问题, 通过引入网络节点分布密度 ρ , 结合无线传播模型和邻居数量估计模型, 提出一种无参数影响的功率调整方案 NPPC. 仿真实验表明, NPPC 使节点更快地达到期望邻居数量, 有效地形成了连通网络, 同时收敛速度和能量效率有显著提高, 且在不同部署密度、规模的网络模型中均具有良好的稳定性.

关键词: 功率控制; 无线传感器网络; 无参数; 连通性; 节点度

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0076-04

A No-Parameters Power Control Algorithm Oriented Connectivity in Sensor Networks

HE Yi¹, PENG Yue-cheng², QI Jian-dong¹, ZHANG Qiang-yu¹

(1 School of Information, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Art and Design College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the view of current node-degree power control scheme based on parameters leading to slow convergence speed and high energy consumption, Node distribution density ρ is introduced, combining with wireless propagation model and the number of neighbors estimation model, proposed a no-parameters power control algorithm (NPPC) is given out. Simulation results demonstrate NPPC contributes nodes to reach the desired number of neighbors quickly and improves the convergence speed and energy efficiency. NPPC has excellent stability performance in different deployment densities network.

Key words: power control; wireless sensor networks; no-parameters; connectivity; node degree

1 引言

传感器节点能耗问题已成为无线传感器网络 (WSN) 首要考虑因素. 功率控制技术在保证网络连通性的前提下, 策略性地降低节点发射功率, 有效地减少了通信中的能量消耗, 是节能设计的重要途径. 同时, 它对覆盖质量、吞吐量、通信干扰、实时性等网络性能也具有显著的影响^[1].

典型的功率控制有以下几个研究方向: 与路由协议结合、基于节点度、基于方向、基于邻近图的功率控制方案^[2]. 本文仅对基于节点度的功率控制算法展开讨论. 节点度即节点单跳可达邻居的数目, 基

于节点度的功率控制核心思想是动态地调整节点发射功率, 使节点度保持在预设的度数上限与下限之间. 这类算法利用局部信息来均衡节点的邻居数量以优化网络拓扑结构, 不仅满足了网络的连通性, 还保证节点间的链路具有一定的可扩展性和冗余性.

文献^[3]提出两种具有代表性的基于节点度的算法 LMA 和 LMN. 这两种算法均可保证网络的连通性和收敛性, 但缺乏严格的理论推导. 文献^[4]提出一种改进 LMA 算法的新方案 ILMA. 该算法降低了全网平均节点度, 并提高了网络的收敛速度和能量有效性. 但在功率调整阶段仍使用同 LMA 相同的调整参数, 并没有排除参数对功率调整性能的

收稿日期: 2015-02-20; 修回日期: 2015-04-10

基金项目: 国家林业局局重点项目(2013-05, 林业科研项目过程管理研发)

影响.文献[5]基于 LMA 分布式功率调整策略,通过 PID 控制器克服了单一比例功率调整所导致的高能耗和收敛较慢等缺点.但算法的实现依赖于 PID 控制器三个参数的设定,以适应不同的应用场景.鉴于此,本文提出优化方案 NPPC(No-Parameters Power Control).

2 网络模型

2.1 无线传播模型

文献[6]定义了两种无线传播模型:自由空间模型和双径地面反射模型.自由空间模型定义了接收端和发送端距离很近且完全无障碍时的传输损耗,此模型下发送端节点发射功率 P_t 为

$$P_t = \frac{P_r (4\pi)^2 d^2 L}{G_t G_r \lambda^2}$$

式中, P_r 为接收端节点接收功率, d 为发送端与接收端间的距离, G_t 和 G_r 分别为发送、接收天线增益, λ 为电磁波波长, L 为调整参数.双径地面反射模型考虑无线信号在障碍路径中传播时地面反射因素的影响,更适用于远距离传输场景.此模型下节点发射功率 P_t 为

$$P_t = \frac{P_r d^4 L}{G_t G_r h_t^2 h_r^2} \quad (1)$$

h_t 和 h_r 分别为发送、接收天线的高度.计算可得两种模型临界距离 d_{cross} :

$$d_{\text{cross}} = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (2)$$

即传输距离 d 满足 $d < d_{\text{cross}}$ 时采用自由空间模型; $d > d_{\text{cross}}$ 时采用双径地面反射模型.接收端节点依据接收信号门限 R_t 决定能否正确接收该信息, R_t 由节点射频芯片决定.因此自由空间模型下,传输距离为 d 的最小发射功率 P_{min} 为

$$P_{\text{min}} = \frac{R_t (4\pi)^2 L}{G_t G_r \lambda^2} d^2 = \zeta d^2.$$

双径地面反射模型下 P_{min} 为

$$P_{\text{min}} = \frac{R_t L}{G_t G_r h_t^2 h_r^2} d^4 = \zeta d^4.$$

统一自由空间模型和双径地面反射模型,可确定最小发射功率 P_{min} 与传输距离 d 的关系为

$$P_{\text{min}} = \zeta d^{\alpha} \begin{cases} \alpha = 2, d < d_{\text{cross}} \\ \alpha = 4, d > d_{\text{cross}} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 邻居数量估计模型

假设节点在二维平面内随机均匀部署,可对指定传输距离的节点邻居数量进行估计.式(4)表示以节点 S 为中心,通信距离 d 为半径的圆形区域内

邻居节点数量.

$$\text{NodeCount} = \rho \cdot \pi d^2 + \epsilon \quad (4)$$

式中, ρ 为网络中节点分布密度.因节点随机部署,具有相同通信半径的节点其邻居数量并不一定相等,据此引入数量调节因子 ϵ .

3 NPPC 功率控制算法

3.1 功率调整模型

NPPC 算法以保证网络连通性为前提进行拓扑优化.文献[7]中从理论上证明了全网平均节点度为 5.89 时可保证网络形成可靠的连接,因此本文采用 6 作为节点期望邻居数量,表示为 NodeThresh.意味着各节点邻居数量满足 NodeThresh,即可满足连通性需求.

为粗略估计满足期望邻居数量 NodeThresh 的发射功率,令式(4)中 $\epsilon = 0$,根据式(3)、式(4)可获得节点初始发射功率 P_{ori} :

$$P_{\text{ori}} = \zeta \left(\frac{\text{NodeThresh}}{\rho \pi} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

考虑数量调节因子 ϵ 的影响,采用发射功率 P_{ori} 实际回应的邻居数量为 NodeResp.为使邻居数量达到 NodeThresh,下一步功率调整的理想发射功率 P_{opt} 应满足:

$$\begin{cases} \text{NodeThresh} = \rho \cdot \pi \left(\frac{P_{\text{opt}}}{\zeta} \right)^{\frac{\alpha}{2}} + \epsilon \\ \text{NodeResp} = \rho \cdot \pi \left(\frac{P_{\text{ori}}}{\zeta} \right)^{\frac{\alpha}{2}} + \epsilon \end{cases}$$

两式相减,方可排除 ϵ 干扰, P_{opt} 为

$$\begin{aligned} P_{\text{opt}} &= \zeta \left[\frac{\text{NodeThresh} - \text{NodeResp}}{\rho \pi} + \left(\frac{P_{\text{ori}}}{\zeta} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \right]^{\frac{2}{\alpha}} \\ &= \zeta \left(\frac{2\text{NodeThresh} - \text{NodeResp}}{\rho \pi} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \end{aligned} \quad (6)$$

模型中初始部署密度 ρ 已知, α, ζ 均为可确定的常数.式(5)确定初始功率值 P_{ori} ,加快了功率调整步幅;根据邻居节点反馈信息 NodeResp 以及式(6)可确定满足 NodeThresh 的理想发射功率 P_{opt} .上述功率调整模型通过引入节点分布密度 ρ ,实现了无调节参数的功率控制策略,且适用于不同密度的网络模型.

随着网络节点能量耗尽或故障,造成节点分布密度发生变化.全局算法 DTP^[3] 经验值表明:全网连通时大多数节点的邻居数为区间^[4].据此当节点实际邻居数 NodeResp 小于 4 时,节点再次进行功率调整:密度变化前为 ρ_{old} ,节点使用功率 P_{old} 所对应的邻居数为 NodeThresh;而当密度变化后使用相同

功率 P_{old} , 邻居数变为 NodeResp, 据此可估计当前节点分布密度 ρ_{cur} :

$$\begin{cases} \text{NodeThresh} = \rho_{old} \cdot \pi \left(\frac{P_{old}}{\zeta} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + \epsilon \\ \text{NodeResp} = \rho_{cur} \cdot \pi \left(\frac{P_{old}}{\zeta} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + \epsilon \end{cases}$$

计算可得 ρ_{cur} :

$$\rho_{cur} = \rho_{old} - \frac{\text{NodeThresh} - \text{NodeResp}}{\pi} \times \left(\frac{\zeta}{P_{old}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (7)$$

在 ρ_{cur} 分布密度下, 为使邻居数量再次达到 NodeThresh, 对调整的新功率 P_{new} 进行最初的预估: 将 ρ_{cur} 代入式(5), P_{new} 为

$$P_{new} = \zeta \left(\frac{\text{NodeThresh}}{\rho_{cur} \pi} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \quad (8)$$

通过式(7)、式(8)可知, 当网络分布密度发生变化时, 节点根据变化前的密度、功率方可推算当前密度和应调整的新功率。

3.2 算法描述

NPPC 算法假设: (1) 节点均匀分布于二维平面, 且初始分布密度 ρ 已知; (2) 节点均为静止状态, 且不可移动; (3) 节点初始能量相同, 且不可再补充。基于 3.1 节的功率调整模型, NPPC 算法由两个阶段构成, 具体步骤如下所示。

Step 1 网络连通阶段: 网络启动后, 各节点依次以式(5)所确定的初始功率 P_{ori} 发送 Hello 消息, 并根据邻居实际回复的 Ack 消息数量作为 NodeResp, 依照式(6)计算理想发射功率 P_{opt} , P_{opt} 可保证节点期望的邻居数量。当所有节点邻居数量达到 NodeThresh, 即形成连通的优化拓扑结构。各节点以此阶段获得的发射功率进行稳定工作时的数据传输。

Step 2 拓扑维护阶段: 当节点死亡或故障导致邻居关系发生变化时, 即实际邻居数 NodeResp 小于 4。节点根据式(7)、式(8)进行后续自适应的功率调整, 直到节点度再次满足 NodeThresh, 保证网络拓扑的连通性。

图 1 为 NPPC 节点功率调整示意图。NPPC 首先简化邻居数量估计模型, 对节点功率进行粗略地调整, P_{ori} 基本能够满足网络连通性, 提高了网络拓扑构建速度; 然后根据邻居节点反馈信息对节点功率进行细调, P_{opt} 使邻居数量进一步达到 NodeThresh; 拓扑维护阶段在网络分布密度变化的情况下通过自适应的功率调整, 快速地恢复网络拓扑。

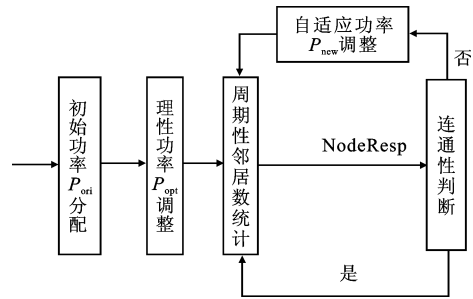


图 1 NPPC 节点功率调整示意图

4 仿真结果及性能分析

本文采用 Matlab 作为仿真平台, 将 NPPC 与 LMA、LMN 以及基于全局信息的功率控制方案 ETP 进行比较。仿真实验中设定节点数量为 250 个和 500 个, 节点随机分布于 100×100 平方单位的二维平面区域。实验中节点首先采用不同功率控制算法调整发射功率, 完成网络连接后便使用计算的发射功率进行数据传输。若拓扑发生变化, 根据不同策略调整功率以恢复网络拓扑。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数设置	参数值
节点初始能量/J	100
数据传输速率/(kb/s)	10
天线增益/dBi	5
拓扑控制包长度/位	200
射频发送时能耗/mW	50
射频接收时能耗/mW	50
射频空闲时能耗/mW	6
无线模型的报文丢包率/%	5

图 2 所示为 NPPC 算法与 LMA、LMN 在不同节点部署密度下, 网络连通阶段的节点功率调整次数分布情况。图 2(a)和(b)中分别将 250 个、500 个节点均匀分布于相同大小区域内。横坐标为节点达到期望邻居数量需进行功率调整的次数, 纵坐标代表不同调整次数在实验中出现的频次。容易发现: 在不同节点分布密度下, NPPC 的功率调整次数均主要集中于 1 次或 2 次, 即初始功率 P_{ori} 调整和理想功率 P_{opt} 调整后便趋于稳定, 网络收敛效率显著优于 LMA、LMN。随着网络节点规模变大, LMA 和 LMN 算法中节点功率调整次数明显

增加,这是采用单一比例功率调整策略的缺陷.

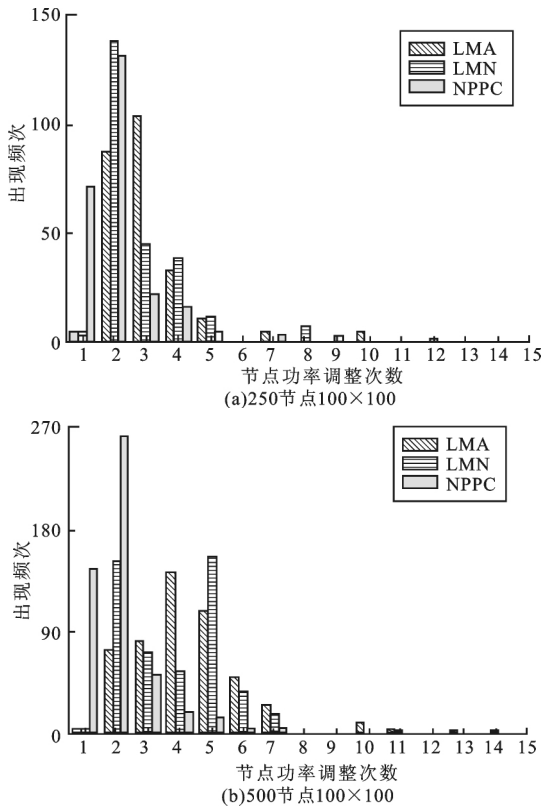


图2 不同节点部署密度下功率调整次数对比

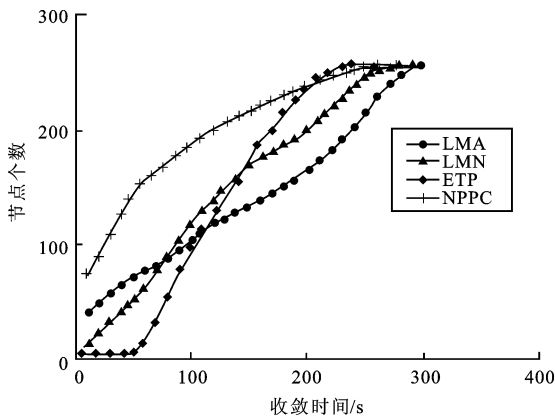


图3 算法收敛速度对比

图3所示为250个节点分布于 100×100 平方单位区域内,NPPC、LMA、LMN和ETP算法的收敛速度对比.横坐标代表节点收敛时间,纵坐标代表不同时间收敛的节点个数.ETP选择网络中未连接的节点对,将所有节点功率调整为使该对节点可相互通信的最小值.依赖全局信息,ETP节点快速入网,其收敛速度明显优于LMA、LMN. NPPC的功率调整公式去除了各项调节参数对功率调整性能的影响,通过初始功率分配和理想功率调整,使节点快

速达到了期望邻居数量,其算法收敛速度在四种功率控制方案中最优.

图4所示为使用不同功率控制算法,节点能量随时间的变化.横坐标代表网络运行时间,纵坐标代表不同时刻,全网节点剩余能量与初始能量百分比.ETP为保证网络连通性,为所有节点分配统一的发射功率值,较大的发射功率消耗了大量能量,其节点能量值急剧下降;LMA、LMN基于邻居节点信息进行局部功率控制,其能量效率略高于ETP算法,但是基于参数的功率调整策略增加了节点功率调整次数,导致功率调整消耗了部分能量. NPPC算法在网络连通阶段和拓扑维护阶段均快速收敛,具有能量高效性,其能耗曲线相对平滑.

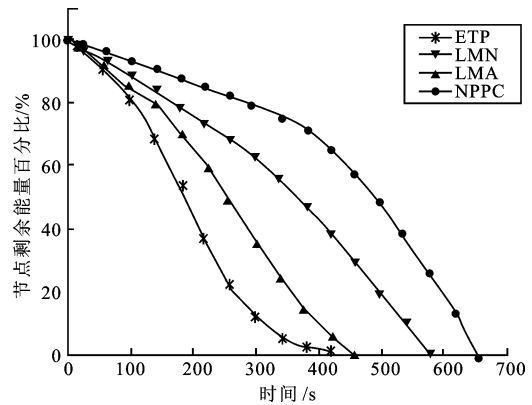


图4 算法能量消耗对比

5 结束语

本文提出优化的功率控制方案 NPPC. 该算法在网络连接、拓扑维护阶段采用不同的功率调整模型,在保证网络连通性的同时提高了算法收敛速度和能量有效性.在节点故障或死亡的情况下,可快速恢复拓扑以维护网络的连通性.考虑功率控制必将引起路由信息的更新,提出功率控制与路由协议相结合的跨层设计方案将是下一阶段研究重点.

参考文献:

[1] Aziz A A, Sekercioglu Y A, Fitzpatrick P, et al. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013, 15(1): 121-144.
 [2] 张学, 陆桑璐, 陈贵海, 等. 无线传感器网络的拓扑控制[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 943-954.

(下转第84页)

从表中可以看出,高性能的体系结构设计、基于宏流水总线的数据传输路径,以及优化的存储结构使本系统在大多实验情况下优于同类网络安全处理器。

4 结束语

本文提出了一种面向终端设备的高性能网络安全处理器体系结构,该处理器采用基于宏流水的数据传输通路,提高了总线通信速率。基于流存储机制的层次化存储结构更加适合网络安全处理特点,大幅提高了处理单元的并行处理能力。同时设计了安全防护电路,保证了整个系统的安全性。通过与同类处理器相比可以看出,本文设计的网络安全处理器具有较高的性能,可以应用于各种终端设备。

参考文献:

- [1] 周昔平.多线程网络处理器分布式内核结构研究[D].西安:西北工业大学,2005.
- [2] 王海欣,白国强,陈弘毅.高性能网络安全处理器设计[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(1):13-17.
- [3] Wang Chenhsing, Lo Chihyen. A network security

processor design based on an integrated SoC design and test platform [C] // IEEE/ACM Design Automation Conf. (DAC 06). USA, San Francisco, IEEE Press. 2006:490-495.

- [4] Freescale Company. MPC 190 security processor fact sheet[EB/OL]. [2015-03-11]. http://www.freescale.com/files/netcomm/doc/fact_sheet/MPC_190_FACT.pdf.
- [5] Allen J R, Bass R M. IBM PowerNP network processor: hardware, software, and applications[J]. IBM J. Res. & Dev., 2003,47(2/3):177-193.
- [6] Intel Company. IXP2800[EB/OL]. [2015-04-14]. <http://www.Intel.com/design/network/products/npfamily/ixp2800.htm>.
- [7] 袁博.面向深度处理的网络处理器体系结构[D].北京:清华大学,2013.
- [8] 刘祯,刘斌,郑凯,等.网络处理器中的高速缓冲机制及其有效性分析[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(1):113-116.

作者简介:

朱宁龙 男,(1991-),硕士.研究方向为专用集成电路设计. E-mail:860554485@qq.com.

(上接第 79 页)

- [3] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks [C] // Wireless Communications and Networking, WCNC 2003. USA, New Orleans, IEEE, 2003(1): 558-563.
- [4] 吴雪,马兴凯.连通性覆盖约束的 WSN 拓扑控制算法[J].微计算机信息,2009,25(13):118-120.
- [5] 张建辉,申兴发,陈积明,等.基于 PID 算法的无线传感器网络传输功率控制研究[J].传感技术学报,2007,20(1):177-182.
- [6] Ibric J, Mahgoub I. Cluster-based routing in wireless sensor networks: issues and challenges [C] // Proceedings of the 2004 symposium on performance evaluation of computer telecommunication systems, Croatia, 2004: 759-766.
- [7] Kleinrock L, Silvester J. Optimum transmission radii

for packet radio networks or why six is a magic number [C] // Proceedings of the IEEE National Telecommunications Conference. Alabama, Birmingham, 1978(4): 1-4.

作者简介:

何以女,(1990-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络.

彭月橙 男,(1976-),硕士,讲师.研究方向为智能信息处理.

齐建东(通讯作者) 男,(1976-),博士,副教授.研究方向为物联网及无线传感器网络、智能信息处理. E-mail:qijiandong@gmail.com.

张强宇 男,(1991-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络.