

无线传感器网络自适应功率控制策略

赵学健^① 庄毅^① 赵洁^② 薛佟佟^①

^①(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

^②(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 无线传感器网络功率控制技术对于网络的拓扑连通、能量效率、网络容量、吞吐量、实时性等性能均有显著影响, 是其实用化的重要支撑技术。该文提出了一种适用于无线传感器网络的自适应功率控制策略 APCS(Adaptive Power Control Strategy), 该策略是只需要局部信息的分布式算法, 通过调整路径损耗指数和功率控制参数可以获得性能极佳的目标拓扑, 并能满足实时性和容错能力要求较高的应用场景。另外, 该算法还采用了动态功率调整以保持网络的连通性, 延长网络的生命周期。仿真结果证实了所提方法的有效性。

关键词: 无线传感器网络; 功率控制; 拓扑控制; 能量高效

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2231-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01249

Adaptive Power Control Strategy for Wireless Sensor Networks

Zhao Xue-jian^① Zhuang Yi^① Zhao Jie^② Xue Tong-tong^①

^①(Department of Computer Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

^②(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Power control techniques for wireless sensor networks are significant for network connectivity, energy efficiency, network capacity, throughput, real time performance and etc. It is one of the supporting technologies for the deployment of wireless sensor networks. This paper proposes an Adaptive Power Control Strategy (APCS) fitted for wireless sensor networks. It is a distributed algorithm based on local information which can obtain an excellent target topology by adjusting the path loss exponent and the power control parameter. It still can satisfy applications of a higher real-time performance and fault tolerance capacity. In addition, the proposed algorithm adopts a dynamic power control strategy to maintain the network connectivity which prolongs the network life time. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Wireless sensor network; Power control; Topology control; Energy efficient

1 引言

无线传感器网络是由大量微型传感器节点通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统。由于其能量由电池提供并且难以得到补充, 所以能量的高效利用是无线传感器网络的一个重要研究课题。迄今为止, 人们已经在这方面做了大量的研究工作, 拓扑控制便是最有效的策略之一^[1]。

拓扑控制是指构造一个优化的拓扑结构, 使网络具有最优的能耗效率, 并且保持网络对所检测区域的覆盖^[2]以及连通性, 兼顾通信干扰、网络延迟、

鲁棒性等其他性能。目前主要的拓扑控制策略可以分为 3 大类: 基于节点功率控制的拓扑控制策略、层次型拓扑控制策略和基于启发机制的拓扑控制策略^[3]。在功率控制方面, 已经提出了 COMPOW^[4]等统一功率分配算法, RNG^[5]等基于临近图的功率控制算法, LMN/LMA^[6]等基于节点度数的功率控制算法和 XTC^[7]等基于邻节点信息交互的功率控制算法。但是, 目前的功率控制算法或者需要节点的精确位置信息, 或者邻近节点信息交互量大, 或者没有考虑网络的鲁棒性, 大部分算法只是针对网络拓扑的某一方面进行了优化。更为严重的是, 几乎所有的拓扑控制算法都是为了获得一个优化的目标拓扑, 使网络更加稀疏, 节点发射半径更加小, 而没有考虑在网络的运行过程中, 随着网络运行环境

2009-09-22 收到, 2010-02-04 改回

国家部委基金资助课题

通信作者: 赵学健 zhaoxuejian@nuaa.edu.cn

的变化以及节点能量的消耗如何保持网络的连通性,使网络能够长时间正常工作。

基于上述分析,本文提出了一种适用于无线传感器网络的自适应功率控制策略——APCS (Adaptive Power Control Strategy),该策略是分布式的,只需要局部网络信息,通过调整路径损耗指数和功率控制参数可以获得类似 RNG^[5], GG^[8]等性能极佳的目标拓扑,并能满足实时性和容错能力要求较高的应用场景。更重要的是,该算法允许节点在网络运行过程中动态调整功率控制参数以保持网络连通,从而延长网络的生命周期。

2 模型与假设

(1)通信模型 在无线传感器网络中,通常采用对数距离路径损耗模型对接收端信号强度进行预测。该模型是结合理论分析和对实地测量的实验数据进行反向曲线拟合获得的,可看作自由空间传播模型和二径传播模型的推广,公式如下:

$$P_r(d) \propto P_t/d^\alpha \quad (1)$$

式中, d 表示发射节点和接收节点之间的距离, α 表示路径损耗指数, P_t 表示发射功率, $P_r(d)$ 表示距离发射节点距离为 d 时接收到的信号强度。其中 α 的值取决于周围的工作环境,其取值范围介于 1.6~6 之间^[9]。

(2)假设 (a) N 个节点均匀分布在 2 维或者 3 维欧式空间内,节点一经布置后静止不动。(b)所有节点间无线信道符合对数距离路径损耗模型,因此节点发射功率和节点发射半径是等价的两个概念。(c)存在理想 MAC 协议对信道竞争以及信号冲突等进行处理,本文分析算法在理想状态下的性能。

3 APCS 算法

(1)相关定义 无线传感器网络用 $G = (V(G), E(G))$ 表示,其中 $V(G)$ 和 $E(G)$ 分别表示节点集合和边集合。节点 u 到节点 v 之间的有向边用序偶 (u, v) 表示, $\text{dist}(u, v)$ 表示两节点之间的欧式距离,所有节点具有相同的最大发射功率 R_{\max} 。

定义1 边的权重(W_{uv}): W_{uv} 表示节点 u 发送单位字节数据到节点 v 的能量消耗, $W(u, v) \propto \text{dist}(u, v)^\alpha$, 其中 α 为路径损耗指数。

定义2 原始拓扑(G_s):所有节点均使用最大发射功率 R_{\max} 时得到的网络拓扑。

定义3 目标拓扑(G_T):使用某具体拓扑算法得到的拓扑结构,可用所采用的拓扑算法作为下标。

定义4 物理邻居节点集合($\text{PNS}(u)$):节点 u 的物理邻居节点集合 $\text{PNS}(u) = \{v \mid \text{dist}(u, v) \leq r_{\max}, v \in V(G)\}$ 。

定义5 虚拟邻居节点集合($\text{LNS}(u)$):节点 u 的虚拟邻居节点集合 $\text{PNS}(u) = \{v \mid \text{dist}(u, v) \leq r_u, v \in V(G)\}$, 其中 r_u 表示节点 u 的发射半径。

定义6 中继区(D_R):当节点 u 和节点 v 之间的通信需要通过节点 w 进行中转时,称节点 w 为中继节点,满足中继节点 w 位置条件约束的区域称为中继区。

(2)算法描述 APCS 算法是基于相关邻近图思想提出的一种自适应功率控制策略,主要包括以下步骤:

(a)邻居排序:各节点使用最大发射功率 R_{\max} 广播一个 HELLO 消息,消息包含各节点 ID。因此,节点 u 可以收到所有邻居节点的 HELLO 消息,并且将节点 ID 加入到物理邻居节点集合 $\text{PNS}(u)$ 中。然后,节点 u 对其 $\text{PNS}(u)$ 中所有的邻居节点计算一个反映链路质量的偏序 \prec_u 。在 \prec_u 中,如果节点 w 在节点 v 的前面,记作 $w \prec_u v$,则说明节点 u 与 w 之间的链路质量比节点 u 与 v 之间的链路质量好。所谓的链路质量可以指链路的通信代价、通信延迟等,本文指链路的通信能耗。

(b)链路选择:节点 u 向其邻居广播自己的偏序 \prec_u ,同时接收邻居节点建立的 \prec 。节点 u 按链路质量递增的顺序遍历 \prec_u ,对于 u 的邻居节点 v ,如果在 \prec_u 中存在节点 w 满足条件: $w \prec_u v$, $w \prec_v u$,并且使得不等式 $W_{uw} + W_{vw} < \lambda W_{uv}$ ($W \propto d^\alpha$) 成立,其中 α 为路径损耗指数, λ 为功率控制参数,则节点 u 和节点 v 之间不存在链路,即 $v \notin \text{LNS}(u)$;否则在节点 u 和节点 v 之间建立一条链路,即 $v \in \text{LNS}(u)$ 。

(c)功率选择:节点 u 选择合适的发射功率使其发射半径恰好能够覆盖 $\text{LNS}(u)$ 中所有节点,即节点 u 发射半径为 $r_u \geq \text{dist}(u, w)$, $w \in \text{LNS}(u)$,并且对于 $\forall v \in \text{LNS}(u)$,有 $\text{dist}(u, v) \leq \text{dist}(u, w)$ 。

(d)动态功率调整:为网络中所有节点设定定时器 T ,当定时器触发时,判断节点度(逻辑邻居节点集合中元素个数)是否减小,如果减小进行功率动态调整,否则继续正常工作。功率动态调整策略如下:节点进入退避状态,启动一个退避计时器,退避时间 $t \ll T$,当计时达到退避时间后结束退避状态。在节点处于退避状态时,如果收到其它节点的 CONNECT 消息,则将该节点加入 $\text{LNS}(u)$,否则该节点将按步长 0.1 减小功率控制参数,从而调整节点发射功率,直到节点逻辑邻居节点集合增大或者 λ 达到最小值为止。最后,节点向新加入邻居节点发送 CONNECT 消息。

(3)拓扑性质分析

定理1 连通性: G_{APCS} 连通当且仅当原始拓扑结构图 G_S 为连通图。

证明 对于连通性, 使用反证法容易得证, 不再赘述。

定理2 对称性: $G_{M\text{-XTC}}$ 满足对称性, 即节点 u 在节点 v 的逻辑邻居节点集 LNS_v 中, 当且仅当节点 v 也在节点 u 的逻辑邻居节点集 LNS_u 中时。

证明 首先利用反证法证明充分性, 假设1: $v \in \text{LNS}_u$; 假设2: $u \notin \text{LNS}_v$ 。由假设2, 根据 APCS 算法可知存在节点 w 满足条件: $w \prec_v u, w \prec_u v$, 且 $W_{uw} + W_{vw} < \lambda W_{uv}$ 。由该条件, 根据 APCS 算法, 可得结论: $v \in \text{LNS}_u$, 这与假设1矛盾, 充分性得证。必要性同理可证。

定理3 平面性: 当 $\lambda = 1$ 时, G_{APCS} 满足平面性, 即 G_{APCS} 中不含有两条相交的边。

证明 利用反证法证明, 假设 G_{APCS} 中有两条边 (u, v) 和 (w, x) 相交, 则在矩形 $uwvx$ 中至少有一个角大于等于 $\pi/2$, 不妨设顶点为 u 的角 $\angle wux \geq \pi/2$, 则有 $\text{dist}(uw) < \text{dist}(wx)$, $\text{dist}(ux) < \text{dist}(wx)$ 并且 $W_{uw} + W_{ux} \leq W_{wx}$, 根据 APCS 算法有 $x \in \text{LNS}_w$, 与假设边 (w, x) 在图 G_{APCS} 中矛盾, 定理3得证。

定理4 还原性: 如果网络中没有3个节点在同一条长为 R_{max} 的线段上, 则当 $\lambda = 0.5$ 时, G_{APCS} 即为 G_S 。

证明 根据前面分析可知, 如果 $W_{uw} + W_{vw} = 0.5W_{uv}$, 则节点 w 必然位于边 (u, v) 的中点。由于网络中没有3个节点在同一条长为 R_{max} 的线段上, 所以对于网络中任意节点对 (u, v) , 不存在节点 w 满足 $W_{uw} + W_{vw} \leq 0.5W_{uv}$ 。因此, 对于网络中任意节点 u , $\text{LNS}(u) = \emptyset$, 即 $G_{\text{APCS}} = G_S$, 定理4得证。

定理5 稀疏性: 当 APCS 算法采用相同的路径损耗指数 α 时, 如果功率控制参数 $\lambda_1 < \lambda_2$, 则 $E(G_{\text{APCS}-\lambda_2}) \subseteq E(G_{\text{APCS}-\lambda_1})$ 。

证明 采用反证法进行证明, 假设存在边 (u, v) 在 $G_{\text{APCS}-\lambda_2}$ 中但是不在 $G_{\text{APCS}-\lambda_1}$ 中。根据 APCS 算法可知, 必然存在节点 w 满足: $w \prec_v u \wedge w \prec_u v \wedge W_{uw} + W_{vw} \leq \lambda_1 W_{uv}$ 并且 $w \prec_v u \wedge w \prec_u v \wedge W_{uw} + W_{vw} > \lambda_2 W_{uv}$, 可得 $\lambda_1 > \lambda_2$, 与定理中条件 $\lambda_1 < \lambda_2$ 矛盾, 定理5得证。

推论1 $E(G_{\text{RNG}}) \subseteq E(G_{\text{APCS}})$ 。

证明 由 RNG 算法和 APCS 算法可知, $D_{R\text{-APCS}} < D_{R\text{-RNG}}$, 因此如果边 $(u, v) \in E(G_{\text{RNG}})$, 必有 $(u, v) \in E(G_{\text{APCS}})$, 推论1得证。

推论2 当 $\lambda = 1$, $\alpha > 2$ 时, 有 $E(G_{\text{APCS}}) \subseteq E(G_{\text{GG}})$; 当 $\lambda = 1$, $\alpha = 2$ 时, 有 $E(G_{\text{APCS}}) = E(G_{\text{GG}})$; 当 $\lambda = 1$, $\alpha < 2$ 时, 有 $E(G_{\text{APCS}}) \supseteq E(G_{\text{GG}})$ 。

证明 由 GG 算法和 APCS 算法可知, 当 $\lambda = 1$, $\alpha = 2$ 时, $D_{R\text{-APCS}} = D_{R\text{-GG}}$, 因此 $E(G_{\text{APCS}}) = E(G_{\text{GG}})$; 当 $\lambda = 1$, $\alpha > 2$ 时, $D_{R\text{-APCS}} > D_{R\text{-GG}}$, 有 $E(G_{\text{APCS}}) \subseteq E(G_{\text{GG}})$; 当 $\lambda = 1$, $\alpha < 2$ 时, $D_{R\text{-APCS}} < D_{R\text{-GG}}$, 有 $E(G_{\text{APCS}}) \supseteq E(G_{\text{GG}})$ 。推论2得证。

推论3 当 $\alpha = 2$ 时, 有 $E(G_{\text{APCS}}) \supseteq E(G_{\text{GG}})$ 。

证明 由前面分析可知, 功率控制参数 $\lambda \in [2^{1-\alpha}, 1)$ 。由 GG 算法和 APCS 算法可知, 当 $\alpha = 2$, $\lambda < 1$ 时, $D_{R\text{-APCS}} < D_{R\text{-GG}}$, 同理 $E(G_{\text{APCS}}) \supseteq E(G_{\text{GG}})$ 得证。

4 实验分析

本文使用仿真工具 OMNET++ 实现了 RNG 算法、GG 算法以及 APCS 算法, 进而分析了路径损耗指数 α 以及功率控制参数 λ 对 APCS 算法所构造网络拓扑性能的影响, 并与 RNG 算法与 GG 算法所得网络拓扑的性能进行了比较。仿真中将 70 个节点 (ID 编号: 0~69) 随机散布在 $800 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的矩形区域中, 设节点最大发射功率为 0.32 W , 对应最大发射半径 R_{max} 为 200 m 。对于相同的仿真参数设置, 运行仿真实验 20 次, 以下分析数据均为 20 次实验数据平均值。

原始拓扑 G_S 以及各拓扑算法所得目标拓扑如图 1 所示, 该图直观地描述并验证了 APCS 算法的相关拓扑性质, 如连通性、对称性、还原性、平面性与稀疏性及其 3 个推论都在上图中得到了很好的体现。

图2描述了 RNG 算法, GG 算法以及 APCS 算法在取不同的路径衰减指数和功率控制参数情况下, 网络中节点的平均发射半径。由于较小的发射半径能够降低节点的能耗, 减少网络中的信号冲突, 增大网络容量, 因此减小节点的发射半径是拓扑算法追求的一个主要目标之一。由图2可以看出, APCS 算法在路径衰减指数为 6, 功率控制参数为 1 时, 可以得到跟 RNG 算法近似的平均发射半径。

图3描述了 RNG 算法, GG 算法以及 APCS 算法在取不同的路径衰减指数和功率控制参数情况下, 网络中节点到汇聚节点的平均跳数。由于网络中数据的发送延迟通常跟节点至汇聚节点路径上的跳数成正比, 因此减小平均最小跳数有利于降低延迟。由图3可以看出, 当路径衰减指数和功率控制参数减小时, 节点平均最小跳数也在减小。也就是说, APCS 算法可以通过调整路径衰减指数和功率控制参数来满足对数据实时性要求较高的应用场景。

图4描述了 RNG 算法, GG 算法以及 APCS 算法在取不同的路径衰减指数和功率控制参数情况

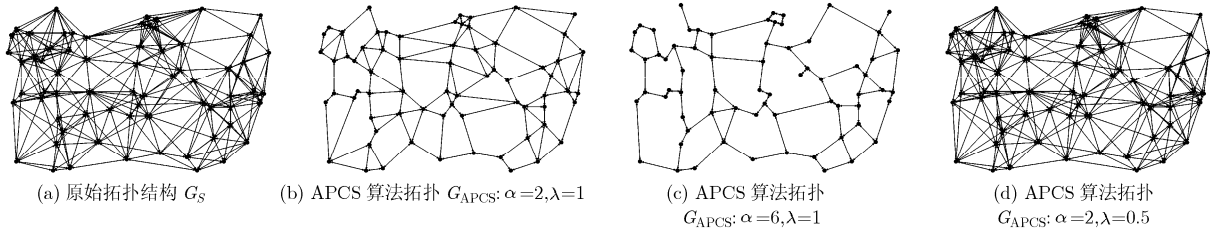


图1 拓扑结构图

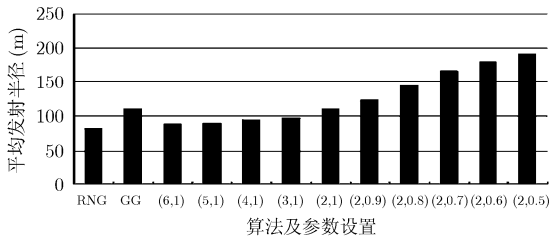


图2 平均发射半径分析图

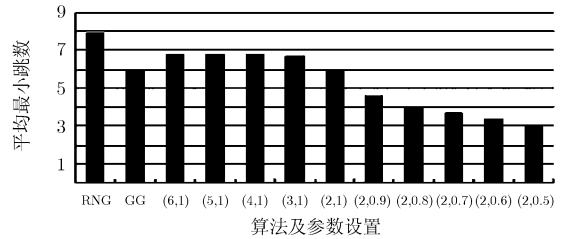


图3 平均最小跳数分析图

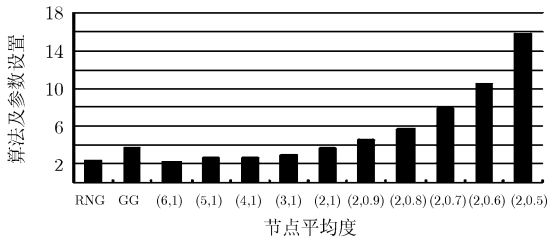


图4 节点平均度分析图

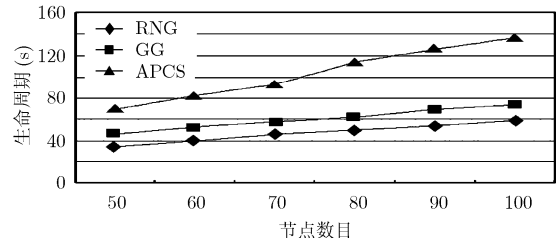


图5 网络生命周期分析图

下，网络中节点的平均度。我们知道在一个 k -顶点连通的网络中，任意 $k-1$ 个节点失效网络仍能保持连通并发送数据，该网络的容错能力为 $k-1$ 。 k -顶点连通指网络中节点的最小度为 k ，节点的平均度为 k 不能保证网络是 k -连通的。但是，节点的平均度在一定程度上也能反映网络的容错能力。由图4可以看出，当路径衰减指数和功率控制参数取值分别为6，1和2，1时，APCS 算法节点的平均度分别与 RNG 算法和 GG 算法节点的平均度相当，并且当路径衰减指数和功率控制参数逐渐减小时，节点平均度逐渐增大，即网络具有更好的容错能力和鲁棒性。

仿真图5描述了 RNG 算法，GG 算法和 APCS 算法($\alpha = 2, \lambda = 1$)网络生命周期的变化情况。由图5可以看出，APCS 算法由于采用了动态功率调整策略大大延长了网络的生命周期，并且当网络节点密度越大时，效果越明显。

5 结束语

本文提出了一种适用于无线传感器网络的自适应功率控制策略 APCS，该策略通过调整路径损耗指数和功率控制参数来对网络的拓扑结构进行控

制，使网络拓扑更好地适应网络的工作环境并满足不同的应用需求。另外，APCS 算法通过对局部节点进行动态功率调整，保证网络的连通性，延长网络的生命周期。本文证明了该算法的相关拓扑性质，并通过仿真实验数据的分析得出：(1)APCS 算法路径衰减指数为6，功率控制参数为1时可以获得与 RNG 算法近似的目标拓扑，该拓扑中节点具有极小的发射半径，网络特别稀疏，减少了网络中的信号冲突，增大了网络容量；(2)APCS 算法可以调整路径衰减指数和功率控制参数来满足对数据实时性和网络容错能力要求较高的应用场景。(3)APCS 算法在和 RNG、GG 算法具有相同的目标拓扑情况下，由于采用了动态功率调整策略，大大延长了网络的生命周期，增强了网络的鲁棒性。

参考文献

[1] Anastasi G, Conti M, Francesco M D, and Passarella A. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.

[2] Ghosh A and Das S K. Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey. *Pervasive and Mobile*

- Computing*, 2008, 4(3): 303-334.
- [3] Younis M and Akkaya K. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey. *Ad hoc Networks*, 2008, 6(4): 621-655.
- [4] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, and Kumar P R. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. Proc. of the European Wireless Conf. Florence, 2002: 156-162.
- [5] Li N and Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions. Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM). New York: IEEE Press, 2004: 232-243.
- [6] Kubisch M, Karl H, Wolisz A, Zhong L C, and Rabaey J. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). New York: IEEE Press, 2003: 16-20.
- [7] Wattenhofer R and Zollinger A. XTC: A practical topology control algorithm for ad-hoc networks. Proc. of the Int'l Parallel and Distributed Processing Symp (IPDPS), New Mexico: IEEE Press, 2004: 216-223.
- [8] Gabriel K R and Sokal R R. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology*, 1969, 18(3): 259-278.
- [9] Santi, P. Topology Control in Wireless Ad hoc and Sensor Networks. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 2005: 15-16.
- 赵学健: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、分布式算法。
- 庄毅: 女, 1957 年生, 博士生导师, 研究方向为分布式算法、网络安全等。
- 赵洁: 女, 1984 年生, 硕士生, 研究方向网络安全、无线传感器网络。
- 薛佟佟: 男, 1985 年生, 硕士生, 研究方向网络安全、无线传感器网络。