

一种基于功率控制的无线 传感器网络跨层通信协议

纪 鹏, 吴成东, 张云洲, 贾子熙
(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 提出一种新的跨层通信协议——基于功率控制的定向生成树(PCDST)。本协议采用定向生成树算法以解决数据传输过程中的无效能耗问题,并控制节点的传输功率以降低网络通信竞争强度。为了更好地控制传输功率这一关键因素,构建了一个网络效用最大化模型,并基于原始-对偶算法设计拉格朗日对偶函数,推导出传输功率的最优解集。这些跨层策略的应用能够使无线传感器网络在节能的同时保持良好的通信状态。仿真实验结果表明,本协议在节约能量和提高通信吞吐量方面具有很好的表现。

关 键 词: 无线传感器网络;通信协议;功率控制;跨层;生成树

中图分类号: TP 242

文献标识码: A

文章编号: 1005-3026(2009)12-1686-04

A Power Controlled Cross-Layer Communication Protocol for Wireless Sensor Network

Ji Peng, Wu Cheng-dong, Zhang Yun-zhou, Jia Zi-xi

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China.
Correspondent: Ji Peng, E-mail: jieagle@163.com)

Abstract: A novel cross-layer communication protocol is proposed and named power controlled directed spanning tree (PCDST), where a directed spanning tree routing algorithm is introduced to solve the problem of unnecessary energy consumption during data transmission and control the transmission power of node so as to moderate the competition intensity in communication network. A network utility maximum (NUM) model is developed to control further the transmission power that is regarded as a key factor. Based on the Prim-dual algorithm, a Lagrange dual function is designed to deduce the optimal solution set of transmission power. Taking advantage of such cross-layer strategies, WSN is enable to keep up smooth communication with energy saving. The simulation results showed that the performance of the proposed protocol is much better in both energy efficiency and improvement of communication throughput.

Key words: wireless sensor network (WSN); communication protocol; power control; cross-layer; spanning tree

无线传感器网络(WSN)是一种典型的无基础设施无线通讯网络,它由大量具有计算处理、无线通信和传感能力的低能量节点构成,各节点通过传感或控制参数实现与环境的交互^[1]。与传统网络概念不同,WSN具有以数据为中心、无需有线支持和网络自组织等特点,因而被认为是最适于实现环境智能化的信息处理手段,具有良好的理论发展前景和应用价值^[2]。

作为一种先进的信息获取手段,WSN需要有可靠的通信协议以满足数据可靠传输的需要,而WSN能量结构都给通信协议研究提出了新的问题^[3]。现有的分层协议栈难以对WSN的整体服务质量(QoS)进行合理优化,而跨层设计思想能够协调网络协议层间的工作进程,建立网络全局约束条件和优化指标,实现网络整体优化,因而成为WSN领域的一个新的研究方向^[4]。Low等在

收稿日期: 2009-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874103); 建设部科学技术基金资助项目(2007-K3-04)。

作者简介: 纪 鹏(1980-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生; 吴成东(1960-),男,辽宁大连人,东北大学教授,博士生导师。

1999 年就提出了建立网络分布式优化函数实现网络流量控制的方法^[5]。Zawodniok 等在 2004 年针对无线自组织网络的通信资源分配不确定性提出了一种基于功率控制的分布式 MAC 协议^[6]。Chiang 等在 2005 年提出了将物理层功率控制和传输层网络拥塞控制进行平衡来提升网络吞吐量和节能性^[7]，并在 2007 年对无线网络的跨层优化分解数学问题进行了详细而系统的分析与讨论^[8]。

本文针对无线传感器网络的通信质量需求，提出了一种基于功率控制的定向生成树 (power controlled directed spanning tree, PC DST) 跨层通信协议，它能够有效平衡网络通信的能耗和可靠性，满足无线传感器网络长时间高鲁棒性工作的要求。

1 协议模型描述

1.1 基于地理位置信息的定向生成树模型建立

生成树 (spanning tree) 算法是一种典型的多跳通信方法，其目的是基于汇聚节点 (Sink) 查询内容将网络中所有节点连接成为通向汇聚节点的通信树。其优点为结构简易、分布式特点明显，适于网络自构重组和数据融合；缺点是结构相对松散，对网络能量消耗和连通性问题侧重于局部解决，难以对整个网络实施管理^[9]。针对生成树算法的缺点，本文提出了建立基于地理位置信息的定向生成树模型，建立了单个节点与网络全局的联系，从整体上减少网络能量损耗，提高通信可靠性。

与其他生成树协议不同，定向生成树模型考虑的是如何节约网络总能耗，因而节点在选择父节点时，要加以方向控制以使数据发送更趋向于汇聚节点。由于以数据为中心的 WSN 以汇聚节点接收数据为有效，因而这种方向性通信能够避免数据向其他方向发送造成的无效能耗，而且还有助于增强数据的实时性。建立模型需要基于以下两项假设：在网络初始化阶段，通过定位计算每个节点掌握自身及汇聚节点位置信息；在网络初始化阶段，所有节点具有正常发送、接收数据包的能量，并采用多跳形式向汇聚节点发送信息。

基于拓扑学建立一个连通无向加权图 $G = (V, E, W)$ 以表示无线传感器网络，其中， $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 是节点集合，对应每个无线传感器节点； $E = \{e_{ij} | d(i, j) \leq R_{i\max}\}$ 是边集，即任意两个节点间的无向连接，其中 $d(i, j)$ 为节点 v_i 与 v_j 之间的欧式距离， $R_{i\max}$ 为节点 v_i 的最大通信半

径，它与 i 的发送功率成正比， $d(i, j) \leq R_{i\max}$ 即表示节点 v_j 在 v_i 的通信范围内，彼此可以正常传送数据； $W = \{w(i, j)\}$ 为网络图内各边的权值集合，而 $w(i, j)$ 即为节点 v_i 和 v_j 间通信路由的权值，可以通过定义 $w(i, j)$ 来为每个节点选择合理的邻居节点作为数据中继节点，从而建立可靠路由。决定权值的要素有很多，为了构建具有方向性的路由协议，这里定义

$$w(i, j) = \frac{d(i, S) - d(j, S)}{P_i} \tag{1}$$

式中： $d(i, S)$ 与 $d(j, S)$ 分别为节点 v_i 和 v_j 到汇聚节点的欧式距离，其值可以通过节点位置求得； P_i 为节点 v_i 的数据传输功率。由式 (1) 可知权值 $w(i, j)$ 只与节点到汇聚节点的距离差 $d(i, S) - d(j, S)$ 以及发送节点 v_i 的功率 P_i 有关。如图 1 所示， $d(i, S) - d(j, S)$ 的大小在本质上决定了数据发送的方向性。 $d(i, S) - d(j, S)$ 为正数且较大，其对应的中继节点 v_j 在方向上更趋近于汇聚节点，节点 v_i 向其发送数据的无效能量代价和通信时延较小。所以，当节点 v_i 的数据传输功率 P_i 确定时，节点 v_i 完全可以依据权值 $w(i, j)$ 整个 WSN 可以依据此选择原则建立路由协议。为了使 WSN 内的任意节点 v_i 都能选择最优的传输功率，需要建立跨层的节点传输功率控制模型，并求解出最优的节点传输功率解集 $P_{\text{opt}} = \{P_{\text{iopt}} | i = 1, \dots, n\}$ 。

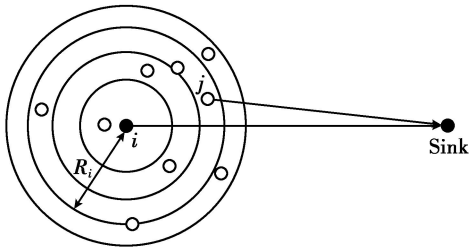


图 1 定向生成树算法中父节点方的选择机制
Fig. 1 Selection mechanism of father node in directed spanning tree algorithm

1.2 面向网络全局优化的功率控制模型建立与求解

1.2.1 基于功率控制的网络优化模型建立

节点的传输功率是 WSN 的一个重要参数指标，它直接影响着网络的通信服务质量 (QoS)。传输功率过低，则会使部分节点无法建立通信连接，造成网络的割裂；而功率过大，虽然保证了网络连通，但过多节点参与通信会导致网络的竞争强度增大，从而使节点消耗过多能量，通信数据易于丢包或误传，网络整体性能下降。对于生成树算法来说，竞争强度问题更为重要。这是因为树状通信路

由中网络内层节点(位置距离 Sink 近的节点)有更大机会成为某些节点的父节点,承担更为繁重的通信任务.因此,如何优化 WSN 每个节点传输功率的大小,从而合理控制通信中继节点(父节点)周围与之通信的邻居节点个数,有效降低网络竞争强度和能量消耗成为改善生成树路由算法性能的关键.

基于上述思想,可以设定 WSN 中每个节点的最大通信竞争强度为 N_j , N_j 取值与节点自身位置有关,越接近 Sink 取值越大.这样便能得到 WSN 所有节点的最大通信节点数集 $N = \{N_j | j = 1, 2, \dots, n\}$.同时,建立参数矩阵 $K = (k_{ji})$, k_{ji} 为节点 v_i 与 v_j 间的通信代价参数,由发送节点距离汇聚节点 Sink 的跳数决定,表征 v_i 与 v_j 通信可能性.根据网络连通性规定, k_{ji} 满足:

$$k_{ji} = \begin{cases} k_p, & d(i, j) \leq R_{i\max} \text{ and } i \neq j; \\ 0, & d(i, j) > R_{i\max}; \\ 0, & i = j. \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_p 依据发送节点距离汇聚节点的跳数取值 $[0, 1]$ 之间,而 $k_p P_i$ 可以体现某发送节点对其邻居节点的通信竞争强度.对于生成树中的任一父节点来说,其承受的来自子节点的竞争强度之和必须小于设定的自身最大通信竞争强度.基于网络效用最大化(network utility maximum, NUM)思想,为每个节点设定一个与数据传输功率相关的可测效用函数 $U_T(P_i)$,该函数是根据应用用户技术需求设定的,理想状态中它单调递增且为凹函数,上限为 1,可以建立下面的网络全局优化约束模型.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^n U_T(P_i), \\ \text{s. t.} \quad & KP \leq N, \\ & P_i \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)中的约束模型进行求解,便可以满足网络全局技术需求的节点最优传输功率,从而实现对网络节点传输功率的控制.

1.2.2 基于拉格朗日松弛变换的优化模型求解

为满足 WSN 整体技术需求,可以利用拉格朗日松弛变换原则将式(3)中的优化问题转化为

$$\begin{aligned} D(\lambda) = \max_{P_i \geq 0} \left\{ \sum_{i=1}^n U_T(P_i) - \lambda (KP - N) \right\} = \\ \max_{P_i \geq 0} \left\{ \sum_{i=1}^n U_T(P_i) - P_i \sum_{j=1}^n k_{ji} \right\} + \lambda N. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\lambda = (\lambda_j)$ 为拉格朗日乘子向量,而 $\sum_{j=1}^n k_{ji}$

表征的物理意义为网络路由中继节点所需的功耗.基于中继节点的功耗 $\sum_{j=1}^n k_{ji}$,系统可以对其可能子节点 v_i 的功率大小 P_i 进行有效评估,并根据式(4)推出 P_i 的求解方程,如式(5)所示.

$$P_i = \arg \max_{P_i \geq 0} \left\{ \sum_{i=1}^n U_T(P_i) - P_i \sum_{j=1}^n k_{ji} \right\}. \quad (5)$$

而根据式(4),也可以很容易求出式(3)中原问题的对偶模型,即

$$\begin{aligned} \min \quad & D(\lambda), \\ \text{s. t.} \quad & \lambda_j \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

系统可以借助投影梯度法对式(6)中的模型进行最优求解:

$$\lambda_j(t+1) = [\lambda_j(t) - \lambda_j(N_j - \sum_{i=1}^n k_{ji} P_i)]^+. \quad (7)$$

式中: λ_j 为系统设定的梯度求解步长,而 $[\cdot]^+$ 表征公式的求解过程是在正实数集 \mathbf{R}^+ 上进行投影的.建立原始-对偶模型后,根据原始-对偶算法,对式(5)和式(7)进行反复迭代,可以得到能够实现网络效用最大化的节点数据传输功率 P_i .

WSN 的节点最优传输功率确定后,可以根据式(1)求出与邻居节点连通边的权值,并选取权值最大边对应的邻居节点作为通信父节点,从而将整个网络构建成为完整的通信生成树.

2 仿真实验与结果分析

仿真实验的目的是要验证基于功率控制的定向生成树路由协议(PCDST)保证 WSN 可靠通信,提高服务质量(QoS)的有效性.仿真实验的 WSN 结构如下:在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的方形区域内随机布放 10~240 个传感器节点,网络拓扑生成后节点静止不动, Sink 节点位于坐标(50,50),能源不受限制,而其余节点初始能量为 0.5 J,节点能量耗尽即认为节点死亡.节点发送和接收的数据包大小为 1.2 kb/s,节点最大传输功率所能达到的通信距离为 20 m.

仿真实验就本文算法的性能表现与相关算法进行了比较.被比较的算法有两种,一是在生成树基础上改进的 MEST(minimum energy spanning tree)协议,二是典型的基于地理位置路由协议 GeRaF(geographic random forwarding).实验主要对两项网络服务质量(QoS)性能指标进行仿真,分别为网络生命周期和汇聚节点接收数据包的数量随数据包产生周期的变化情况,如图 2~图 3 所示.

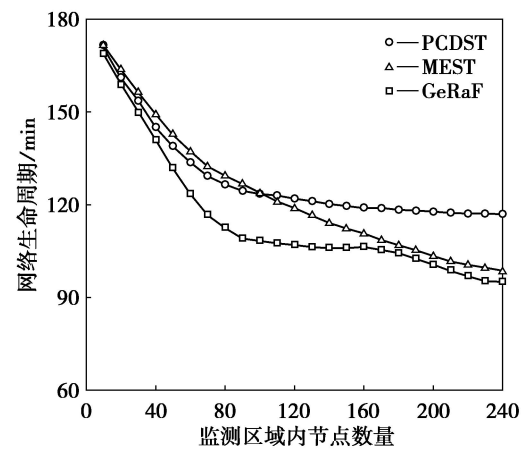


图 2 PCDST 与其他算法的网络生命周期性能比较
Fig. 2 Comparison of network lifetime performance between PCDST and other algorithms

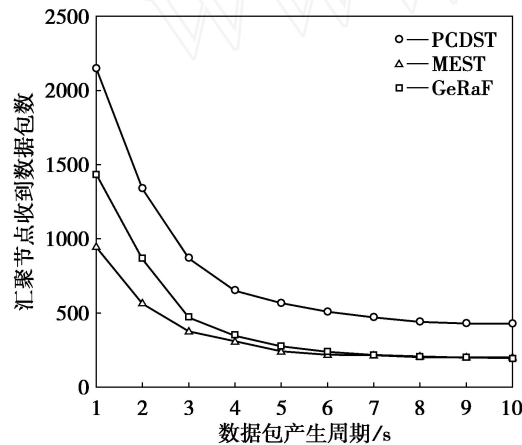


图 3 在 200 个节点情况下,PCDST 与其他算法接收数据包数量的比较
Fig. 3 Comparison of received packets between PCDST and other algorithms when N=200 nodes

通过比较分析可知,PCDST 在延长网络生命和提高网络通信吞吐量方面具有良好的表现.当节点数量增加时,网络生命周期势必会减小.但相比 MEST 和 GeRaF,PCDST 能够有效延长网络生命周期,使网络能够更好地工作.这种良好表现归功于 PCDST 采用的定向策略和功率控制算法,它们能够合理调节通信能量,减少无用能耗.当然,在节点数量较少时,这种相对复杂的算法对能耗节约方面会产生一定的反作用,这也是 PCDST 在节点较少时效能低于 MEST 的原因;但随着节点数量的递增,PCDST 的节能特性也逐渐凸显出来.

WSN 以数据为中心,所以,汇聚节点单位时间内收到的数据包数量为特征的网络吞吐量代表了网络的工作状态,如果吞吐量太小,会造成网络通信瓶颈,给整个网络的传输效率带来负面影响.相比于 MEST 和 GeRaF,PCDST 能够有效保障汇聚节点接收数据包的数量.因而,应用 PCDST

的 WSN 具有更大的网络吞吐量,这也意味着其工作和通信状态良好.这证明了 PCDST 的功率控制算法和网络全局优化机制,有效地降低了网络通信竞争强度,避免了相对集中的父节点规划,从而保障了网络通信的可靠性.

3 结 论

本文针对无线传感器网络对数据通信服务质量(QoS)的需求,提出了一种跨层路由协议算法——基于功率控制的定向生成树(PCDST).算法基于节点地理位置信息定义了新的权值公式,建立了定向父节点选择模型,以减少网络通信的无效能耗.为了降低网络通信竞争强度,提高网络吞吐量,协议建立了面向网络全局优化的功率控制模型.基于原始-对偶算法对模型进行优化求解,从而为网络节点定制了最优数据传输功率.仿真实验结果证明,PCDST 能够在降低网络整体能耗,延长网络生命周期的同时,有效提升网络通信吞吐量,满足网络高效、稳定工作的需要.

参考文献:

[1] Gehrke J, Liu L. Guest editors' introduction: sensor network applications[J]. *IEEE Internet Computing*, 2006, 10(2): 16 - 17.

[2] Zhou Z, Zhou S, Cui S, et al. Energy-efficient cooperative communication in a clustered wireless sensor network [J]. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3618 - 3628.

[3] 赵海,程大伟,孙佩刚,等.基于矩法估计量的无线传感器网络路由度量[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2008, 29(3): 320 - 323.

(Zhao Hai, Cheng Da-wei, Sun Pei-gang, et al. Routing metrics based on moments estimates for wireless sensor networks[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2008, 29(3): 320 - 323.)

[4] Safwat A M. A novel framework for cross-layer design in wireless ad-hoc and sensor networks[C]. 2004 IEEE Global Telecommunications Conference Workshops. Dallas, 2004: 130 - 135.

[5] Low S H, Lapsley D E. Optimal flow control, : basic algorithm and convergence[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1999, 7(6): 861 - 874.

[6] Zawodniok M, Jagannathan S. A distributed power control MAC protocol for wireless ad hoc network [C]. *Wireless Communications and Networking Conference*. Atlanta, 2004: 1915 - 1920.

[7] Chiang M. Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: jointly optimal congestion control and power control [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(1): 104 - 116.

[8] Chiang M, Low S H, Calderbank A R. Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 255 - 312.

[9] Ji P, Wu C D, Zhang Y Z, et al. DAST: a QoS-aware routing protocol for wireless sensor networks [C]. *International Conference on Embedded Software and Systems (ICES2008)*. Chongqing, 2008: 259 - 264.