

WSN 中基于多波束转换天线的网络拓扑控制算法^①

朱增玺¹, 魏振春^{1,2}, 韩江洪^{1,2}, 卫星^{1,2}, 赵意¹

¹(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

²(安全关键工业测控技术教育部 工程研究中心, 合肥 230009)

摘要: 针对 WSN 中节点分布不均问题, 提出采用区域划分策略基于多波束转换天线的网络拓扑控制算法 SRADTC. 算法通过关键邻居节点数将网络划分为若干个相互重叠的稀疏区域和稠密区域, 稀疏区域按最小生成树算法进行拓扑控制, 稠密区域按 K 邻居拓扑控制算法进行拓扑控制. 用有边界的 Pareto 分布建模节点分布, 仿真表明: SRADTC 算法在保证网络连通性的同时, 相比传统拓扑控制算法提高了网络的性能.

关键词: 多波束转换天线; 区域划分; 功率控制; 稀疏区域; 稠密区域; 无线传感器网络

Topology Control Algorithm for WSN with Switched-beam Directional Antennas

ZHU Zeng-Xi¹, WEI Zhen-Chun^{1,2}, HAN Jiang-Hong^{1,2}, WEI Xing^{1,2}, ZHAO Yi¹

¹(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230001, China)

²(Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measure Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230001, China)

Abstract: In order to solve the maldistribution problem for wireless sensor network, topology control algorithm based-on regional assignment with switched-beam directional antennas, SRADTC is proposed. Through the number of the key neighbor nodes, the whole network can be divided into several sparse area and dense area. In sparse area, network topology is controlled by the minimum spanning tree algorithm. In dense area, network topology is controlled by the K-Neigh control topology algorithm. Pareto distribution node model will be built to compare the effectiveness between SRADTC and traditional topology control algorithms. Simulation results show that, under the precondition of ensuring the network connectivity, SRADTC improves the performance of network.

Key words: switched-beam directional antennas; regional assignment; power control; sparse area; dense area; wireless sensor networks

随着传感器、无线通信及嵌入式等技术的发展, 无线传感器网络在环境监测、建筑健康监测及农业智能化等领域广泛应用^[1]. 降低节点能耗、减少节点通信干扰及提高网络传输能力是无线传感器网络所研究的关键问题^[2].

天线阵列技术及数字信号处理技术的发展, 为智能天线应用于 WSN 中提供了可能^[3]. 智能天线中多波束转换天线有灵活的波束控制、优良的能量效率、极强的干扰抑制能力及相比全向天线更远的通信半径^[2]. 近年来, 研究者们开始关注智能天线网络拓扑控制方

法的研究^[4], 大多是打开全向天线获取相应信息后选择性打开合适的天线扇区, 实现连通. 方法简易, 但消息交互复杂. 文献[5]提出了基于多波束转换天线的拓扑控制算法 CMPGA-DO. 文献[6]提出了基于多波束转换天线的算法 DABTC, 通过调节发射功率和改变天线朝向对网络进行拓扑控制. 还有学者提出了异构自组织网络的拓扑控制算法^[7], 如 DRNG、DLSS 和 DLMST 等, 主要思想是通过拓扑生成规则构建局部拓扑子图, 达到优化全局拓扑的目的, 其采用定向天线的特性提高异构无线自组网的传输性能. 但以上

① 基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFB10060); 国家物联网发展专项资金计划(工信部科{2012}583号); 安徽省国际科技合作计划(1303063009); 中央高校基本科研业务费专项(2012HGZY0015)

收稿时间: 2014-02-21; 收到修改稿时间: 2014-04-04

这些研究大多基于节点分布均匀的网络,对节点分布不均网络有很大的局限性.

本文针对 WSN 中节点分布不均问题,利用多波束转换天线覆盖距离远、干扰小等特性,提出采用区域划分策略基于多波束转换天线的网络拓扑控制算法(SRADTC: Distributed Topology Control Algorithm based-on Regional Assignment with Switched-beam Directional Antennas),算法保证网络连通性的同时,比传统拓扑控制算法大幅度提高了网络性能.

1 多波束转换天线网络模型

1.1 网络模型的提出

目前研究的 WSN 节点分布大多基于均匀分布,实际应用中,人们更关注兴趣信息多的区域,为此会在该区域撒播更多的节点,如此在网络中就会形成稠密区域及稀疏区域.在稀疏区域中,节点数目少,全向天线最大通信半径较小,如图 1 所示.多波束转换天线通信半径大,采用多波束转换天线的节点在相同场景下能更好地确保网络的连通性,如图 2 所示.

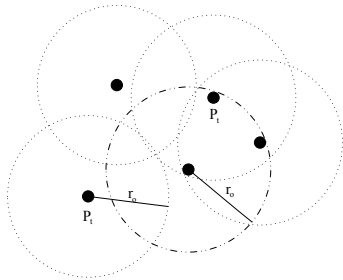


图 1 采用全向天线节点覆盖图

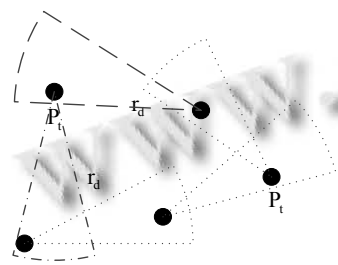


图 2 定向天线节点覆盖图

针对多波束转换天线网络模型作出如下假设:

- ① 所有节点皆为静态同构节点,具有相同的最大发射功率及功率接收阈值^[3];
- ② 节点可独立调节天线的发射功率及方向([0, 2π]的随机值).

③ 无线通信能耗采用自由度空间模型^[7];

1.2 多波束转换天线模型

假设 WSN 中所有传感器节点均分布在二维平面,如图 3 所示为多波束转换天线的模型^[8].

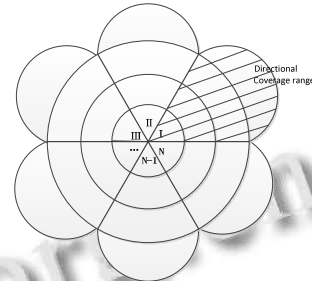


图 3 多波束转换天线模型

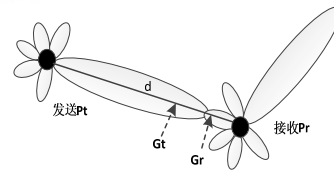


图 4 链路模型

根据文献[8]多波束转换天线具有如下特性:

- ① 全向侦听、接收信号及定向发送信号能力.
- ② 可以感知信号接收的方向.
- ③ 自主控制波束方向及功率.

1.3 天线发送功率及能耗模型

天线发送功率模型,根据文献[9]可知接收方接收到的功率 P_r 与发送方发送功率 P_t 的关系为:

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \frac{G_t G_r P_t}{L} g_m \tag{1}$$

其中, G_t 、 G_r 分别为发送方与接收方天线增益, λ 为波长, L 为系统损耗因子($L \geq 1$), d 为收发双方距离. g_m 为多波束转换天线相对于全向天线的增益^[9].对于波束为 θ 的多波束转换天线.

易知,发送方与接收方通信所需的最小发送功率 $P_{\min-t}$:

$$P_{\min-t} = \frac{P_t}{P_r} P_0 \tag{2}$$

故由已知 P_t 、 P_r 及 P_0 便可计算出 $P_{\min-t}$.

天线能耗模型,文献[10]假定节点发送射频放大模块的能耗为 E_{rf}/bit ,其他电路能耗为 $E_{\text{proc}}/\text{bit}$,发送能耗 $E_{\text{proc}}/\text{bit}$,接收能耗 E_{rx}/bit , d_o 、 d_d 分别为全向天线和定向天线在功率 P_{act} 下的通信距离.

多波束转换天线发送 n bit 的数据的能耗 E_d :

$$E_d = E_{tx}(n, d_d) + E_{rx}(n) = 2nE_{proc} + nE_{rf}d_d^2 \quad (3)$$

全向天线发送 n bit 数据的能耗 E_o 为:

$$E_o = 2nE_{proc} + nE_{rf}d_d^2 g_m = 2nE_{proc} + \frac{2nE_{rf}d_d^2}{1 - \cos(\theta/2)} \quad (4)$$

可见, 全向天线发送相同大小的数据到同一个接收节点所消耗的能量远远大于多波束转换天线。

2 基于多波束转换天线的拓扑控制算法

2.1 多波束转换天线网络的连通性

文献[11] 假设多波束转换天线的有效通信区为扇形区域, 面积为 S , 易知, $S = \theta r_d^2 / 2$. 在有效通信区概念的基础上, 根据文献[12]下文讨论保证随机波束网络连通的关键邻居数问题。

假设区域 R 中的节点数服从参数为 λS_R 的泊松分布 (S_R 为 R 的面积, λ 为泊松过程的密度), 假设某稠密区域 M 中均匀分布了 n 个节点, 则节点密度 $\rho = n / S_M$. 令节点有效通信区域 S 作为样本, 则 S 中节点数变量 K 服从均值为 ρS_S 的泊松分布, 则随机变量 K 的密度函数为:

$$P(K) = \frac{e^{-\rho S_S} (\rho S_S)^k}{k!} \quad (5)$$

故节点 u 有效通信区内没有任何节点的概率为:

$$P(K=0) = e^{-\rho S_S} \quad (6)$$

由有关点的覆盖问题概念知^[13], 某节点没有处在其他任何节点的有效通信区(记为事件 B)的概率为 $(1 - S_s / S_M)^n$. 当 $S_M \rightarrow \infty$ 时:

$$P(B) = E[(1 - \frac{S_s}{S_M})^n] = e^{-\frac{S_s E(n)}{S_M}} = e^{-\rho S_S} \quad (7)$$

由式(5)与(7)可得, 节点的度大于 0(记为事件 C)的概率为:

$$P(C) = 1 - P(K=0) * P(B) = 1 - 2e^{-\rho S_S} \quad (8)$$

综上所述, 在一个足够大的区域 M 中均匀分布 n 个点构成图 G , 则图 G 没有孤立节点(记为事件 D)的概率为:

$$P(D) = C_n^n [P(d(u) > 0)]^n [P(d(u) = 0)] = (1 - e^{-2\rho S_S})^n \quad (9)$$

当 $n \gg 1$ 时, 图 G 连通的概率近似等于图 G 没有孤立节点的概率^[14].

结论 1: 假设将 $n(n \gg 1)$ 个节点均匀分布在区域 M 中, 其密度为 ρ . 若要保证网络至少连通的概率为 P , 则天线的发射功率必须使得其有效通信区 S 满足如下公式:

$$S_S \geq \frac{-\ln(1 - P^{1/n})}{2\rho} \quad (10)$$

令式(8)中, 天线有效通信区 S_S 为图 G 连通概率为 P 的临界覆盖范围。

结论 2: 假设将 $n(n \gg 1)$ 个节点均匀分布在区域 M 中, 其密度为 ρ . 图 G 中所有节点的最大覆盖节点数 $K \leq k_0$ 的概率 P 满足如下公式:

$$P(K \leq k_0) = (\sum_{k=0}^{k_0} \frac{e^{-\rho S_S} (\rho S_S)^k}{k!})^n \quad (11)$$

用不同节点数 n , 用式(10)求出图以 99% 的概率连通时的有效通信区 S_S , 代入式(11)求出满足 $P(K \leq k_0) > 99\%$ 时的 k_0 的最小值, 该值即为保证网络拓扑图高概率连通的临界邻居节点数 K .

2.2 区域划分策略

基于 2.1 节的讨论, 利用 K 将网络划分为两类子区域, 稠密区域或稀疏区域. 区域划分策略描述如下:

① 节点 u 初始化发送功率 $P(u) = P_{act-max}$, 随机选择打开天线波束 X . 以最大发送功率 $P_{act-max}$ 周期性通告 HELLO 消息(自身 ID、能量状态及 $P_{act-max}(u)$).

② 对于接收到其他节点 v 的 HELLO 消息, 获取接收信号的功率, 根据式(2)计算节点 u 与节点 v 通信的最小发送功率 $P_{min}(u, v)$, 并将节点 v 的 ID、能量状态及 $P_{act-min}(u, v)$ 保存至 $N_r(u)$, 按 $P_{act-min}(u, v)$ 递增排序。

③ 邻居节点探测完毕后, 计算 $N_r(u)$ 的长度 Neigh_Length, 若 $Neigh_Length \geq (K-3)$, 则该节点处于稠密区域 DenseArea, 否则即自身处于稀疏区域 ThinArea, 设置区域类型。

④ 若 ThinArea 的节点 u 是其 $N_r(u)$ 中能量最大的节点, 则周期性以 $P_{act-max}$ 通告 AREAHEAD 消息(自身 ID、能量信息及发送功率), 宣布自身为区域头结点。

⑤ 节点 v 收到的 AREAHEAD 消息, 若其区域类型为 ThinArea, 且未属于其他任何区域, 则修改天线方向对准节点 u , 并周期性以 $P_{act-max}$ 回复 ACK 消

息(节点 ID、能量状态及发送功率), 宣布自身加入该区域. 若为区域类型为 DenseArea, 则以 $P_{act-max}$ 回复 DenseNode 消息(节点 ID、能量状态及发送功率).

⑥ 节点 u 接收到其他节点 v 发送的 AREAMEMBER/DenseNode 消息, 根据式(2)计算节点 u 与节点 v 通信的 $P_{min}(u, v)$, 并将邻居节点 v 的 ID(若为 DenseNode 消息, 则标记 v 为关联节点)、能量状态及并 $P_{act-min}(u, v)$ 保存至本地发送邻居节点集 $N_1(u)$, 按 $P_{act-min}(u, v)$ 递增排序.

⑦ 若节点 v 再次收到 AREAHEAD 消息, 则说明节点 v 处于多个区域的通信重叠范围, 为域间关联节点, 回复 CONNECTNODE 消息给区域头节点.

区域头节点 u 接收到节点 v 的 CONNECTNODE 消息, 将消息内容保存到域间关联节点集 $ConnectNode(u, v)$ 中.

2.3 基于多波束转换天线的拓扑控制算法

基于区域划分策略, SRADTC 算法依据区域划分策略将网络划分为若干个稀疏区域和稠密区域, 在不同区域采用不同的拓扑控制算法. 分为区域划分、邻居选择及功率设定三个阶段. 对于所有节点 u , 在不同时刻启动 C 算法, 启动时刻之误差要小于 Δt .

算法描述(对于网络中任意节点 u 及节点 v):

① 节点 u 在 $[\Delta t, \Delta t + \varepsilon]$ 时刻竞争到信道启动区域划分策略.

② 最多经过 $2\Delta t + \varepsilon + \delta$ 时间, 区域划分算法结束后 (δ 为区域划分算法最长执行时间), 判断 AREATPYE 属性, 若为 DenseArea, 则开始执行邻居选择过程, 节点 u 在其本地 $N_r(u)$ 中选取前 K 个节点 ID 加入到标志信息中(若 $N(u)$ 中节点数小于 K , 亦加入标志信息中), 并周期性通告 NEIGHTABLE 消息(节点 ID 及 $N_r(u)$); 稀疏区域内, 域内成员收集一跳发送邻居节点集 $N_1(u)$, 所有节点邻居节点集确定后, 运行区域内 MST 算法, 节点 u 选择最优邻居节点构建拓扑, 并将其标识 $N_1(u)$ 中, 节点 u 选择与 $N_1(u)$ 中所节点通信所需最小发射功率的最大值作为其最优发射功率 $P_{act-opt}(u)$.

③ 节点 u 对于接收到其他节点 v 的 NEIGHTABLE 信息中若含有 u 的 ID, 则将本地邻居节点集 $N_r(u)$ 中邻居节点 v 的 ID 标志为对称邻居节点.

④ 经过 $4\Delta t + \varepsilon + \delta$ 所有节点邻居选择处理结束, 每个节点 u 以其本地邻居节点集 $N_r(u)$ 中到距离

最大的对称节点所需的功率作为其实际最优发射功率 $P_{act-opt}(u)$.

算法的时间复杂度:

在区域划分阶段, 每个节点只需发送两次通告信息, 故时间复杂度为 $O(n)$, 此过程中, 节点需要将 $N_r(u)$ 中信息以 $P_{act-min}(u, v)$ 递增排序, 采用直接插入排序算法, 因而算法复杂度为 $O(n^2)$. 故此时间复杂度为 $O(n) + O(n^2)$.

拓扑优化阶段, 邻居节点选择及最优实际功率设置阶段, 稀疏区域内运行 Kruskal 算法, 时间复杂度为 $O(e \log e)$ (e 为图的边), 最优实际功率设置, 皆为线性运算, 时间复杂度为 $O(n)$.

综上所述, SRADTC 算法的时间复杂度为 $O(n) + O(n^2) + O(e \log e)$.

3 算法仿真与性能分析

本文采用文献[11]的有边界帕雷托(Pareto)分布描绘节点分布模型. 用 OPNET 进行仿真, 仿真参数如表 1.

表 1 场景设定及参数初始值表

参数	值	参数	值
场景区域大小	1000m*1000m	节点总数	100~300 个
最大传输半径	100m	测试路由	AODV
MAC 协议	802.11	控制包大小	25byte
数据包大小	128byte	P_{max}	7.5mW
P_0	-70dBm	E_0	0.5J
E_{proc}	50pJ/bit	E_{rf}	10nJ / bit · m ⁻²
E_{dead}	0.1J	β	1
θ	60°		

针对不同节点数: 100,150,200,250,300, 对 SRADTC、K-Neigh、UDG-K-Neigh 算法构建初始拓扑图时节点平均能耗进行对比如图 8 所示.

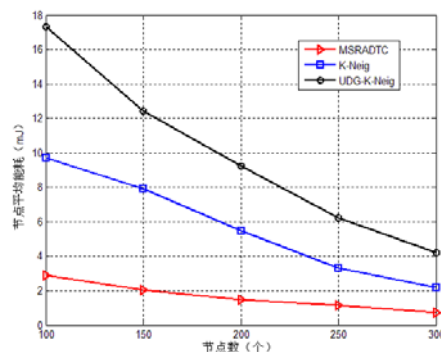


图 8 节点平均能耗对比

UDG-K-Neigh, 当节点数较小时, 稀疏区域节点数更少, 故节点要以最大发射功率通信以覆盖足够多的节点确保网络连通, 故能耗最大, 随着节点数增多, 节点平均能耗缓慢减小. K-Neigh 算法, 随着网络节点数目增加, 节点平均能耗逐渐减小. 而 SRADTC 算法, 对不同的区域采用不同的算法, 故可以兼容两种算法的优势, 故而节点平均能耗最小. 再者对于 UDG-K-Neigh 及 K-Neigh 而言, 当稀疏区域内节点数目足够小时, 算法已不能保证全网连通.

节点数目为 200, 运行仿真 600 秒, 辅助测试路由协议为 DSR, 源节点与目的节点皆随机选取, SRADTC、K-Neigh、UDG-K-Neigh 拓扑控制算法网络分组交付率仿真结果如图 9 所示.

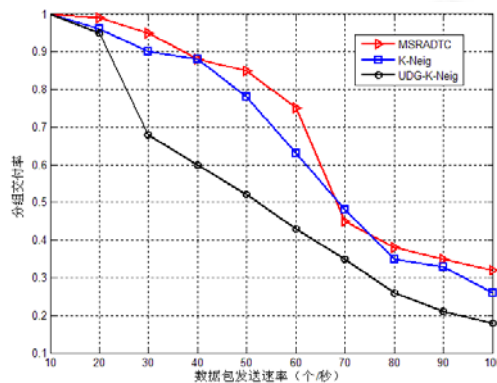


图 9 分组交付率对比

分组交付率可以反映网络传输能力. 当负载较低时, 数据通信碰撞概率小, 路由开销小且稳定, 各个拓扑控制算法对网络性能影响较小, 故分组交付率都接近 100%. 当网络负载逐渐增大, 竞争信道概率变大, 链路失效概率变大, 所有拓扑控制对应分组交付率都呈下降趋势. 通过实验发现, 多波束转换天线的方向性特性, 干扰节点相比全向天线而言少, 在同等网络负载下, SRADTC 及 K-Neigh 算法相比 UDG-K-Neigh 算法而言, 其分组干扰概率较小, 链路失败的概率较小, 从而减少了路由发现开销, 保证了较高的网络分组交付率.

4 结论

SRADTC 算法有效利用了多波束转换天线增益高, 降低了节点发射功率, 减少了信号干扰, 提高了网络传输能力. 不同的区域采用不同的拓扑控制算法也比较合理, 对问题分而治之, 仿真发现, SRADTC 算

法明显提高了网络性能. 但同时算法也存在一定的缺陷, 由于区域头结点任务量大、节点移动、节点死亡等客观因素造成的拓扑结构变化, 故 SRADTC 算法的动态适应能力有待进一步研究.

参考文献

- Shen XF, Wang Z, Sun YX. Wireless sensor networks for industry applications. Sun YX, ed. Proc. Of the WCICA 2004, 4. Hangzhou: IEEE Press. 2004. 3636–3640.
- Jakllari G, Luo W, Krishnamurthy SV. An integrated neighbor discovery and MAC protocol for Ad Hoc networks using directional antennas. Proc of the IEEE WoW-MoM. LosAlamitos, CA: IEEE Computer Society. 2005. 11–21.
- Rzymowski M, Kulas L. Design, Realization and Measurements of Enhanced Performance 2.4 Ghz Espar Antenna for Localization in Wireless Sensor Networks. Eurocon, 2013 IEEE. 2013. 207–211.
- Subramanian A, Lundgren H, Salonidis T, Towsley D. Topology control protocol using sectorized antennas in dense 802.11 wireless networks. ICNP, Princeton:IEEE Communications Society. 2009. 1–10.
- Namboodiri V, Gao LX, Wamy J. Power efficient topology control for wireless networks with switched beam directional antennas. MIEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor System. Washington DC. 2005. 3–11.
- 贺鹏, 李建东, 陈彦辉, 等. Ad Hoc 网络中基于方向性天线的分布式拓扑控制算法. 软件学报, 2007, 18(6): 1308–1318.
- Li N, Hou JC. Localized topology control algorithms for heterogeneous wireless networks. IEEE/ACM Trans. on Network, 2005, 13(6): 1313–1324.
- Kucuk K, Kavak A. Connectivity Analysis for Wireless Sensor Networks with Antenna Array Integrated Central Node. Wireless Personal Communications, 2013, 72(2): 1361–1371.
- Rout RR, Ghosh S, Ghosh SK. Efficient Data Collection with Directional Antenna and Network Coding in Wireless Sensor Networks. Advanced Networks and Telecommunications Systems (ants), 2012 Ieee International Conference on. 2012. 81–86.
- Hu QS, Zhang S, Chen Y, et al. An energy balanced clustering routing based on voronoi-graph. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(3): 457–461.
- Mottola L, Voigt T, Picco GP. Electronically-switched Directional Antennas for Wireless Sensor Networks: a Full-stack Evaluation. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2013 10th Annual IEEE Communications Society Conference on. 2013. 176–184.
- Nayebi A, Sarbazi-Azad H. Analysis of K-Neigh topology control protocol for mobile wireless networks. Computer Networks, 2009, 53(5): 613–633.
- Hall P. Introduction to the Theory of Coverage Processes. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- Penrose MD. On k-connectivity for a geometric random graph. Random Structure and Algorithms, 1999, 15(2): 145–164.