

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201606015



无线传感器网络中的移动式目标跟踪

王田, 彭臻, 洪晓华, 蔡奕侨, 陈永红, 田晖

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对传统无线传感器网络进行移动目标跟踪时能耗过高的问题,提出一种基于移动节点和固定节点协同工作的移动式目标跟踪算法. 在传统的由固定节点组成的无线传感器网络中加入少量移动节点,对移动目标进行持续性跟踪. 通过移动节点和普通固定节点之间的配合,提高监测质量和容错性,在满足既定监测质量要求的前提下,尽可能地减少参与监测的普通固定活跃节点的数量. 仿真实验结果表明:所提出的跟踪方法可以有效地降低固定节点的能耗,延长网络生存期.

关键词: 无线传感器网络; 移动式监测; 目标跟踪; 节能

中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)06-0737-06

Mobility-Assisted Target Tracking in Wireless Sensor Networks

WANG Tian, PENG Zhen, HONG Xiaohua, CAI Yiqiao,
CHEN Yonghong, TIAN Hui

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to solving the high energy consumption problem for traditional wireless sensor networks to track mobile targets, this paper proposes a novel mobility-assisted target tracking algorithm, in which mobile sensors and fixed sensors can work collaboratively at the same time. A few of mobile sensor nodes are introduced into traditional sensor networks, which consist of fixed sensor nodes, for continuously tracking the targets. Through the cooperation between mobile sensors and fixed sensors, the detection quality and fault tolerance can be improved. When the established threshold of detection quality is guaranteed, the number of active fixed sensor nodes joined in tracking is limited as much as possible. Simulation results show that the proposed method can effectively reduce the energy consumption of fixed sensors and so prolong the lifetime of the networks.

Keywords: wireless sensor networks; mobile tracking; target tracking; energy saving

无线传感器网络(WSN)是由大量无线传感器构成的无线自组织网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内感知对象的信息,并将其传送给需要的用户^[1-2]. 目前,WSN 在军事、工业和环境等领域发挥着重要作用^[3-7]. WSN 中的传感器节点一般由廉价的嵌入式设备构成,通过电池供电,电量有限. 然而,网络一旦部署,节点通常需要自主工作很长时间. 因此,如何降低节点的能量消耗,提高网络的生存周期是 WSN 的关键问题之一^[2]. 目标跟踪是无线传感器网络中的一个重要应用,吸引了大量学者进行研究^[8-9]. 在传统的无线传感器网络中,传感器节点的位置是固定不动的,节点自身没有移动能力. 由于节点无法跟随目标移动,为了能够实时地监测目标,需要众多节点同时保持活跃状态,从而导致大量的能量消耗. 部分研究者通过提前唤醒目标预测位置附近的节点,并让其他不相关的节点切换到休

收稿日期: 2014-11-22

通信作者: 王田(1982-),男,讲师,博士,主要从事无线传感器网络、移动计算的研究. E-mail:wsnman@gmail.com.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202468, 61370007, 61302094, 61305085, 61572206);福建省自然科学基金资助项目(2014J01240)

眠状态来有效地减少节点能耗,提高能量利用率^[10-11].但是,不具有移动能力的固定节点在进行目标跟踪时仍有很大的局限性.近年来,随着可移动传感器节点制造技术的发展,可移动传感器所携能量与普通固定节点相比不受限制^[12],越来越多的学者开始研究将移动节点加入到普通无线传感器网络中的情况^[13-14].本文在传统的无线传感器网络中加入移动节点对目标进行直接跟踪,在保证监测率不低于预设阈值的同时,尽可能地减少固定节点的能量消耗,提高能量利用率.

1 监测模型及跟踪问题

1.1 能量监测模型

当目标出现在监测区域时,会发出一定强度的信号,如声音信号等.传感器能感知这些信号并测量出信号能量的大小.同时,环境中存在背景噪声,这些噪声能量也会被传感器所感知.所以传感器*i*测量得到的总能量值*e_i*由信号能量*e_s(d_i)*和噪声能量*e_n*两部分组成,表示为

$$e_i = e_s(d_i) + e_n.$$
 (1)

式(1)中:信号能量*e_s(d_i)*随着传感器*i*与信号源距离*d_i*的增加而衰减.在二维坐标平面中,假设传感器*i*与目标的距离为*d_i*,则传感器*i*获得的信号能量值可表示为

$$e_s(d_i) = \begin{cases} S_0/(d_i/d_0)^k, & d_i > d_0, \\ S_0, & d_i \leq d_0. \end{cases}$$
 (2)

式(1)中:*d₀*是由目标自身形状等特点决定的一个常数;*S₀*是*d₀*距离内的信号能量值;*k*为衰减因子,通常取2~5;噪声能量*e_n*近似满足均值为μ,方差为σ²的高斯分布.因此,传感器*i*测量得到的总能量值*e_i*将满足

$$e_i \sim N(\mu + e_s(d_i), \sigma^2).$$
 (3)

1.2 决策模型

在决策模型中,每个传感器将自身测量得到的总能量值与某个测量阈值λ_{*i*}进行比较,获得一个局部决策.局部决策值取0或者1,分别表示未监测到目标和已监测到目标.目标周围参与监测的传感器节点将综合所有的局部决策信息,做出一个系统决策^[15].

基于式(2),(3),当目标出现时,传感器*i*的测量值*e_i*满足

$$p(e_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-(e_i - \mu - e_s(d_i))^2/(2\sigma^2)).$$
 (4)

传感器*i*将其测量值与阈值λ_{*i*}比较,如果测量值大于λ_{*i*},其局部决策值取1;否则,取0.因此,单个节点*i*监测到目标的概率*P_Dⁱ*可表示为

$$P_D^i = \int_{\lambda}^{+\infty} p(e_i) de_i.$$
 (5)

显然,传感器离目标越近,得到的监测概率越大.当同时有*n*个传感器对某一目标进行监测时,系统监测概率*P_D*可表示为

$$P_D = \Pr(Y \geq n/2).$$
 (6)

式(6)中:*Y*表示局部决策为1的传感器数量;Pr(·)为概率计算函数.如果用*I_i*表示传感器*i*的决策,则*Y*满足*Y* = ∑_{*i*=1}^{*n*} *I_i*.

1.3 问题定义

文中的网络有以下3点假设.1)传感器节点可以在活跃状态和休眠状态切换,以节省能量^[16],休眠状态所消耗的能量远远小于活跃状态下的能量消耗.2)移动传感器能量远大于固定传感器能量,可视作不受限制^[12],如可移动至充电地点进行充电等.因此,不考虑移动节点的能耗.3)移动目标处于任意节点的监控半径*d₀*内,就可实现对其的跟踪^[10].

在*L*×*L*的二维平面监测区域内,随机部署*n*个位置固定的普通传感器节点,*m*个移动传感器节点以及1个移动目标.其中,*n*≫*m*,固定节点和移动节点的感知半径分别为*r*,*R*,*r*≤*R*.移动节点移动速度为*v_m*.移动目标的最大速度为*v₀*,*v_m*≥*v₀*.目标在区域内随机移动,并有可能静止,其目的是调度合适的

移动节点来实现对目标的跟踪, 尽可能地减少处于活跃状态的固定节点的数量及时间, 从而节省能耗(图 1). 当没有移动节点参与跟踪时, 需要 5 个固定节点保持活跃状态以保证对目标的监测; 当有移动节点可以监测到目标时, 该移动节点可跟随运动以跟踪目标, 而其他固定节点可以转为休眠状态, 从而减少固定节点能耗.

2 移动式目标跟踪算法

移动式目标跟踪算法是为了克服固定节点能量有限的缺点, 通过引入移动传感器节点对移动目标进行移动式跟踪, 减少处于活跃状态的固定传感器的数量和时间, 从而减少耗能. 假设监控区域中随机分布有一些固定节点和移动节点.

移动式目标跟踪算法有以下 27 个语句:

- 1) 节点之间交换位置信息, 监测到目标出现;

2) while (目标出现);

3) for (移动节点 i);

4) 计算 i 到目标的距离 $L_{m,i}$;

5) if ($L_{m,i} \leq \min\{L_m\}$);

6) $\min\{L_m\} := L_{m,i}$;

7) $k := i$;

8) end if;

9) end for;

10) if ($\min\{L_m\} \leq R$);

11) 移动节点 k 跟踪目标;

12) 固定节点转为休眠状态;

13) continue;

14) end if;
- 15) sensed := false;

16) for (固定节点 j);

17) 计算 j 到目标的距离 $L_{s,j}$;

18) if ($L_{s,j} \leq r$);

19) 固定节点 j 进行监测;

20) sensed := true;

21) end if;

22) end for;

23) 移动节点 k 向目标靠近;

24) if (sensed is false);

25) 开启所有固定节点进行监测;

26) end if;

27) end while.

如该算法所示, 初始状态下, 所有节点与各自邻居节点交换位置信息, 并监测目标是否出现. 当目标出现时, 若当前没有移动节点能够监测到目标, 则跟踪任务暂时由部分固定节点承担(图 2). 能够监测到目标的固定节点将保持活跃状态以跟踪目标, 其他固定节点则保持休眠状态. 同时, 固定节点将目标当前的位置信息发送给移动节点. 距离目标最近的移动节点 k 向目标方向靠近(语句 16)~23)).

当有移动节点能够监测到目标时, 距离目标最近的移动节点 k 将向目标方向移动以尝试跟随目标, 并对其进行跟踪(图 3). 同时, 固定节点将转换成休眠状态以节省能量(语句 3)~14)). 由于目标的速度

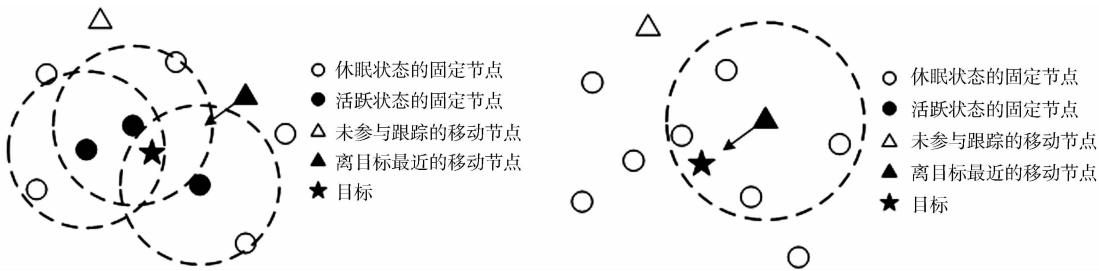


图 2 固定节点对目标进行监测

图 3 移动节点对目标进行跟踪

Fig. 2 Fixed nodes detect target

Fig. 3 Mobile nodes track target

可能大于移动节点的速度, 移动节点在跟踪时可能会出现跟踪丢失的情况. 这时移动节点 k 将通知目标周围位置的固定节点转为激活状态以对目标进行监测. 若任何移动节点和固定节点都不能监测到目标, 则所有固定节点将转为活跃状态以感知目标位置, 判断目标是否消失. 跟踪过程中, 移动目标随机移动, 无线传感器网络根据以上几种情况, 做出跟踪决策, 实现对移动目标的跟踪. 算法流程图如图 4 所示.

该算法通过调度离目标最近的移动节点对目标进行跟踪.当移动节点无法监测目标时,固定节点将接替跟踪任务.只有当所有节点都无法监测目标时,才确定目标的消失.因此,可以有效地保证对目标的监测.由于选出参与跟踪的移动节点和固定节点都需要时间 $O(n)$. 因此,整个算法的时间复杂度为 $O(Tn)$,其中, T 为目标出现的时间片数.

3 仿真结果及分析

3.1 实验场景设置

通过仿真实验验证文中的移动式跟踪算法,并与传统的固定节点跟踪算法进行比较.整个仿真过程进行多次实验,每次实验运行 100 个时间片,每个时间片长度为 1 s.每一种情况做 10 次实验,实验结果取 10 次实验的平均值.除了评估文中的移动式跟踪算法,仿真中还实现了传统的基于固定节点监测的一类固定式跟踪算法.作为对比,固定式跟踪算法中的网络全部由固定节点组成.

整个仿真由两部分实验组成,变化量分别为“移动节点数量”和“固定节点数量”,所使用的结果度量标准为“能量消耗”和“有效跟踪率”.其中,固定节点在活跃状态和休眠状态下的功率分别为 $1,0\text{ mJ}\cdot\text{s}^{-1}$. 因此,总的能量消耗为每个时间片内处于活跃状态的固定节点数量之和.而“有效跟踪率”表示整个实验过程中目标能被有效监测的时间与总时间的比率,它反映了网络对移动目标跟踪质量的好坏,即该比率越高,说明对目标的跟踪越有效.

3.2 移动节点数量的影响

实验中二维区域内部署的固定传感器节点数量是不变的.同时,在移动式目标跟踪算法中,改变移动传感器节点的数量,观察在不同的移动节点数量下,移动式目标跟踪算法中的固定节点能耗和有效跟踪率的变化.

移动节点数量(n_1)对能量消耗(E)的影响,如图 5 所示.由图 5 可知:在移动节点数量从 10 个逐步增加到 40 个的过程中,固定节点的总能耗有明显下降.这是因为当移动节点数量增多时,直接由移动节点跟踪目标的情况将增多.这种情况下所有的固定节点转换至休眠状态,从而节省能量.

移动节点数量(n_1)对有效跟踪率(η)的影响,如图 6 所示.由图 6 可知:在移动节点数量从 10 个逐步增加到 40 个的过程中,移动式目标跟踪算法的有效跟踪率不断上升,即随着移动节点数量的增多,移动式目标跟踪算法中出现移动目标跟丢的情况将减少.这是因为移动节点的数量越多,其分布于二维区

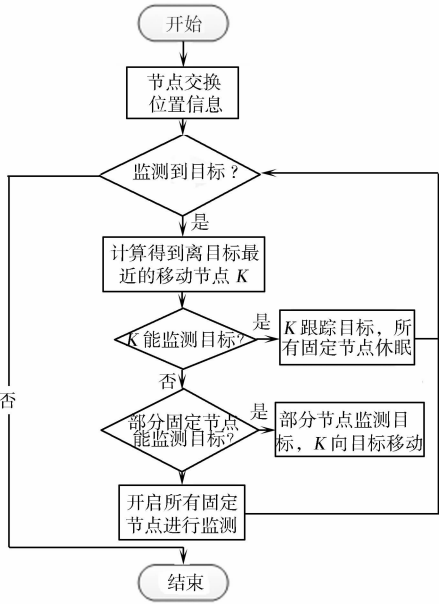


图 4 移动式跟踪算法流程图
Fig. 4 Flowchart of mobile tracking algorithm

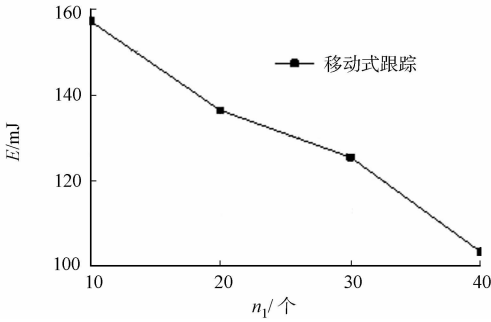


图 5 移动节点数量对能量消耗的影响
Fig. 5 Number of mobile nodes vs energy consumption

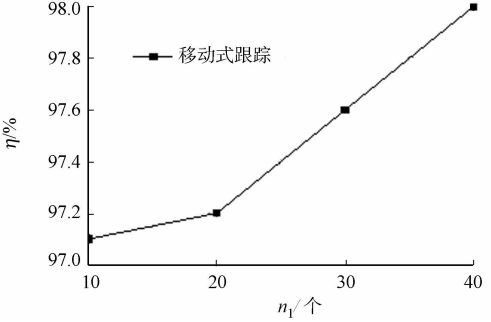


图 6 移动节点数量对有效跟踪率的影响
Fig. 6 Number of mobile nodes vs effective tracking ratio

域中的密度将越大.当出现当前移动节点和固定节点都无法感应到移动目标的情况时,移动节点的分布

越密集,下一个时间片有移动节点能够感知到移动目标的几率就越大,所以有效跟踪率将上升.

3.3 固定节点数量的影响

当固定节点数量变化时,考察移动式与固定式跟踪算法的实验结果. 移动式目标跟踪算法中的移动节点数量始终为 30,而固定式和移动式目标跟踪算法中的固定节点数量将由 50 个增加到 200 个.

固定节点数量(n_2)对能量消耗(E)的影响,如图 7 所示. 由图 7 可知:两种算法中,随着固定节点数量的增多,开始时固定节点的能耗不断下降,之后出现轻微上升. 这是因为在节点分布稀疏的情况下,固定节点数量增多意味着网络中的传感器节点密度增大,使所有节点均无法感知到目标的情况将有所减少,所以固定节点的能耗将下降. 当固定节点增多到一定的数量时,发生所有节点均无法感知到移动目标的情况非常少. 固定节点的能量消耗主要发生在在跟踪过程中,移动节点无法感知移动目标,而由部分固定节点对移动目标进行监控时所带来的能耗. 这种情况下,区域中的固定传感器节点密度越大,感知半径内能感应到移动目标的固定节点就越多,所以固定节点的能耗将增大. 比较在相同固定节点数量下的两种算法,可以发现:移动式目标跟踪算法的固定节点的总能耗始终低于固定式目标跟踪算法的固定节点总能耗,且二者之间相差 1 J 左右,体现出移动式目标跟踪算法的优越性.

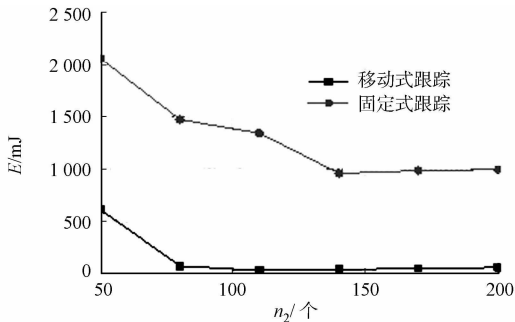


图 7 固定节点数量对能量消耗的影响
Fig. 7 Influence of fixed nodes number on energy consumption

固定节点数量(n_2)对丢失时间(t)和有效跟踪率(η)的影响分别如图 8,9 所示. 在对移动目标进行跟踪时,由于其移动速率和方向随机,整个网络对目标的跟踪可能出现丢失情况,即所有节点均无法监测到目标的情况. 在实验中,每次仿真 100 个时间片,无法感应到目标的时间片数为跟丢时间片数.

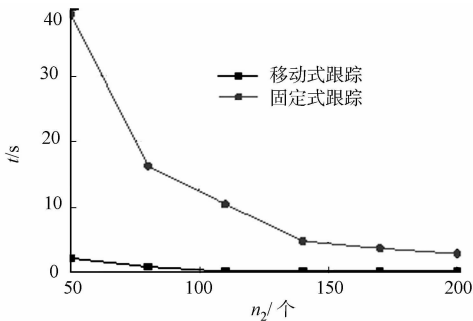


图 8 固定节点数量对丢失时间的影响
Fig. 8 Influence of fixed nodes number on missing time

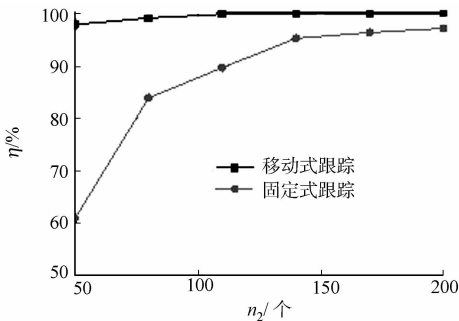


图 9 固定节点数量对有效跟踪率的影响
Fig. 9 Influence of fixed nodes number on effective tracking ratio

由图 8 可知:随着固定节点数量的增多,两种算法的跟丢时间片数不断减少. 由图 9 可知:两者的有效跟踪率不断上升. 这是因为无论是移动式还是固定式目标跟踪算法,当固定节点个数增加时,整个无线传感器网络中的传感器节点变得更加密集. 在目标跟踪的过程中,整个网络能够监测到目标的几率也就更大,即有效跟踪率越高. 而比较相同固定节点数量下的两种算法,可以发现:移动式目标跟踪算法的跟丢时间片数和有效跟踪率均低于固定式目标跟踪算法. 当固定节点数量较少时,移动式跟踪算法的优势更加明显. 具体来说,当固定节点数量为 50 个时,移动式跟踪算法的有效跟踪率相比固定式跟踪算法提高了 62%. 这说明少量移动节点可以完成原本需要许多固定节点才能完成的任务,提高了跟踪质量,体现出移动式跟踪算法的优势.

4 结束语

在传统的无线传感器网络中,引入可移动的传感器节点对目标实施近距离跟踪. 设计的移动式目标跟踪算法在保证一定的监控质量的情况下,尽量使用移动节点完成目标跟踪任务,有效减少了固定节点的能量消耗,延长了网络生命期. 通过大量仿真结果验证了移动式目标跟踪方法的有效性. 该方法可应

用于大规模无线传感器网络中. 未来工作中, 考虑移动节点本身的能耗将是一个重要的研究内容. 另外, 算法还将针对多目标的场景进行改进.

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] AKYILDIZ I F, SU Weilian, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [3] 韩红彦, 张西红, 王卫国, 等. WSN 的关键问题及军事应用[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(7): 65-67.
- [4] 刘文军, 樊建席, 李春胜, 等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的智能交通系统设计[J]. 传感技术学报, 2013, 26(12): 1747-1751.
- [5] 徐晓英, 徐宁. 改变未来世界的“智能尘埃”[J]. 现代军事, 2003(12): 59-61.
- [6] 李春林, 程健. 工业自动化领域中的无线技术[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007(1): 15-17.
- [7] CULLER D E, MULDER H. Smart sensors to network the world[J]. Scientific American, 2004, 290(6): 84-91.
- [8] NADERAN M, DEHGHAN M, PEDRAM H, et al. Survey of mobile object tracking protocols in wireless sensor networks: A network-centric perspective[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2012, 11(1): 34-63.
- [9] DEMIGHA O, HIDOUCI W K, AHMED T. On energy efficiency in collaborative target tracking in wireless sensor network: A review[J]. Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(3): 1210-1222.
- [10] BHUIYAN M Z A. Prediction-based energy-efficient target tracking protocol in wireless sensor networks[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(2): 340-348.
- [11] JIANG Bo, RAVINDRAN B, CHO H. Probability-based prediction and sleep scheduling for energy-efficient target tracking in sensor networks[J]. Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(4): 735-747.
- [12] LEMBKE K, KIETLINSKI L, GOLANSKI M, et al. RoboMote: Mobile autonomous hardware platform for wireless ad-hoc sensor networks[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Gdansk: IEEE Press, 2011: 940-944.
- [13] TAN Rui, XING Guoliang, WANG Jianping, et al. Exploiting reactive mobility for collaborative target detection in wireless sensor networks[J]. Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(3): 317-332.
- [14] 王章权, 陈友荣, 尉理哲, 等. 优化网络生存时间的 Sink 节点移动路径选择算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(3): 409-415.
- [15] CLOUQUEUR T, SALIJA K K, RAMANATHAN P. Fault tolerance in collaborative sensor networks for target detection[J]. Transactions on Computers, 2004, 53(3): 320-333.
- [16] FUEMMELE J A, VEERAVALLI V V. Smart sleeping policies for energy efficient tracking in sensor networks [J]. Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 2091-2101.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)