

目标检测传感器网络参数设计

胡 宁, 张德运

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过理论分析, 给出了目标穿越无线传感器网络防线时的被检测概率与传感器网络设计参数之间的关系, 建立了传感器网络目标检测问题的数学模型. 传感器网络所有节点均采用基于时间片的休眠/唤醒节能策略, 使得节点在每个时间片以一定的激活概率进入活动状态. 推导目标检测概率的计算公式表明, 检测概率与传感器节点的密度以及节点激活概率均成正比. 因此, 在满足所需要的目标检测概率条件下, 可以采用降低节点密度或者减小节点激活概率的方法来减少系统能耗. 此外, 建立了节点工作时间片大小与传感器网络能耗之间的关系式. 由该关系式得出, 在其他参数确定的条件下, 存在一个目标运动速率的临界值. 当目标速率小于此临界值时, 网络能耗随时间片的增加而增大; 当目标速率大于此临界值时, 网络能耗随时间片的增加而减小.

关键词: 无线传感器网络; 目标检测; 节能策略

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)12-1336-04

Parameters Design in Sensor Networks for Target Detection

Hu Ning, Zhang Deyun

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A relation between the detected probability and the design parameters of sensor networks when the target passes through the defense line of sensor networks is given and a mathematical model about target detection in it is established. All sensor nodes of the network employ the sleep/wake up' energy saving policy based on time slice, under which nodes enter active state with certain probability at each time slice. The formula calculating the target detection probability shows that the target detection probability is in proportion to both of the density and activation probability of the nodes, so the energy consumption of the system can be reduced by decreasing the node density or reducing the activation probability of the nodes under the condition that target detection probability needed is satisfied. In addition, the relation between the time slice length and energy consumption is created, which shows that the energy consumption increases with increasing the time slice when the velocity of the target is lower than a critical value; and the energy consumption decreases with increasing the time slice when the velocity is higher than the critical value.

Keywords: *wireless sensor network; target detecting; energy saving policy*

无线传感网络是一项新兴的网络技术^[1], 在国防军事、环境监测、交通管理、医疗卫生等领域有着广泛的应用前景^[2]. 大量密集的、低成本的传感器节点经自组织方式构成网络, 具有很强的容错能力, 非常适合应用于军事侦察、战场监控等恶劣环境.

采用无线传感器网络所构建的目标检测系统, 其主要问题是目标检测区域的覆盖度和传感器网络的能耗. 文献[3, 4]提出了覆盖度的概念, 用于度量目标穿越传感器网络时的可检测性. 文献[5]讨论了达到完全覆盖所需要的临界密度问题. 文献[6]中提

出了一个计算有效检测半径的方法,从而可以计算传感器网络在完全覆盖条件下的临界节点密度. 前述的研究工作主要从几何学的角度讨论传感器网络覆盖问题,没有结合节点能量策略和应用特性给出传感器网络参数设计的建议.

本文在节点采用随机唤醒节能策略条件下,从理论上分析了检测区域的节点密度以及节点唤醒概率等参数与目标检测概率的关系,讨论了其工作周期的选择对整个传感器网络能耗的影响,从节能角度给出了节点工作周期的选择建议.

1 单节点目标检测概率

为节约能量,延长整个传感器网络的生命周期,传感器节点普遍采用休眠/唤醒机制^[7,8]. 其中,一种可行的方式如下所述:将整个传感器节点的生命周期分为若干等长时间片,在每个时间片的开始进行决策,让节点以小概率 α 在此时间片进入活动状态,如果决定激活此节点,则在整个时间片内节点处于激活状态;否则,处于睡眠状态.

设 t 为目标穿越某个传感器节点的传感区域时所经历的时间, T 为节点工作时间的长度,则目标穿越节点传感区域时经历了 $\frac{t}{T}$ ($\frac{t}{T}$ 可能为非整数) 个时间片. 令 $k = \lfloor \frac{t}{T} \rfloor$, 表示其中包含的完整时间片的个数,则一定有 $k \leq \frac{t}{T} < k+1$. 如图 1 所示,阴影部分表示 k 个完整的时间片, o 点表示某一个时间片的开始,穿越时间 $t_1 = t_2 = t$. 如果目标在 o 点之后进入节点传感范围,它将在 $k+1$ 个时间片中出现,概率为 $P_{k+1} = k+1 - \frac{t}{T}$,而当其在 o 点之前进入节点传感范围,它必然在 $k+2$ 个时间片中出现,概率为 $P_{k+2} = \frac{t}{T} - k$.

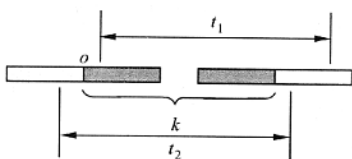


图 1 目标跨越节点时间片个数示意图

令节点检测到目标的事件为 D ,未检测到目标的事件为 \bar{D} ,则在目标穿越某传感器节点 i 的传感区域过程中,被检测到的概率

$$\begin{aligned}
 P\{D\} &= P_{k+1}[1 - (1 - \alpha)^{k+1}] + \\
 &P_{k+2}[1 - (1 - \alpha)^{k+2}] = \\
 &(k + 1 - \frac{t}{T})[1 - (1 - \alpha)^{k+1}] + \\
 &(\frac{t}{T} - k)[1 - (1 - \alpha)^{k+2}] = \\
 &1 - (1 - \alpha)^{k+1} \left[1 - \alpha \left(\frac{t}{T} - k \right) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

如图 2 所示,假定传感器节点的探测范围为盘状,且目标沿直线穿越传感器节点的传感区域轨迹线与节点距离为 x ,传感器的传感半径为 R ,目标运动速度为 v ,则穿越时间

$$t = \frac{2(R^2 - x^2)^{1/2}}{v} \tag{2}$$

将式 (2) 代入式 (1), 并利用 Taylor 展开式 $(1 - \alpha)^x \approx 1 - \alpha x$ (α 很小), 可得

$$\begin{aligned}
 P_i\{D\} &= 1 - (1 - \alpha)^{k+1} (1 - \alpha)^{\frac{t}{T} - k} = \\
 &1 - (1 - \alpha)^{\frac{t}{T} + 1} = 1 - (1 - \alpha)^{\frac{2(R^2 - x^2)^{1/2}}{vT} + 1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

这是一个与目标到传感器节点的距离有关的量,以下计算单个节点检测到目标概率的均值

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_i\{D\} &= E\{1 - (1 - \alpha)^{\frac{2(R^2 - x^2)^{1/2}}{vT} + 1}\} = \\
 &= 1 - \int_{-R}^R (1 - \alpha)^{\frac{2(R^2 - x^2)^{1/2}}{vT} + 1} \frac{1}{R} dx
 \end{aligned} \tag{4}$$

为便于积分,再次应用 Taylor 公式

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_i\{D\} &\approx 1 - \int_{-R}^R \left[1 - \alpha \left(\frac{2(R^2 - x^2)^{1/2}}{v} + 1 \right) \right] \frac{1}{R} dx = \\
 &1 - \left[1 - \alpha \left(1 + \frac{\pi R}{vT} \right) \right] \approx 1 - (1 - \alpha)^{\frac{\pi R}{vT} + 1}
 \end{aligned} \tag{5}$$

可见,单个传感器节点检测到目标的概率与目标运动速度、时间片长度以及节点唤醒概率均有关系.

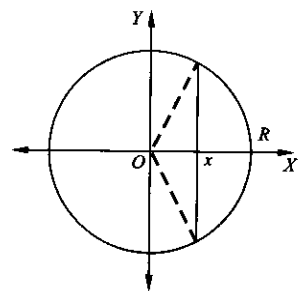


图 2 传感器节点检测范围

2 传感器网络目标检测概率

目标穿越传感器网络构成的探测防线时,将通过若干传感器节点的探测范围.为讨论方便,给出一些合理假设:①传感器网络防线呈带状;②传感器在防线内均匀分布.考察目标垂直穿越防线,以最短路径经过传感器网络检测区域的情况,显然此时被检测到的概率最小,因此计算较为保守.

如图3所示,目标箭头方向穿越防线,其轨迹两侧 R 范围内的活动传感器节点均可检测到此目标.设防线宽度为 H ,传感器节点密度为 ρ ,可感知目标的区域包含传感节点的个数 $n=2RH\rho$,则防线内节点均未检测到目标的概率

$$\begin{aligned} P\{\bar{D}\} &= \prod_{i=1}^n \bar{P}_i\{\bar{D}\} = \bar{P}_i\{\bar{D}\}^n = \\ &= [1 - \bar{P}_i\{D\}]^n = \\ &= (1 - \alpha)^{2RH\rho\left(\frac{\pi R}{vT} + 1\right)} \approx \\ &= 1 - 2RH\rho\left(\frac{\pi R}{vT} + 1\right)\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

目标穿越防线时,节点检测到目标的概率为

$$P\{D\} = 1 - P\{\bar{D}\} = 2RH\rho\left(\frac{\pi R}{vT} + 1\right)\alpha \quad (7)$$

由式(7)可以看出,目标检测概率与传感器节点密度 ρ 以及节点激活概率 α 成正比,在节点探测范围、时间片长度以及目标运动速率确定的情况下,增加节点密度,提高激活概率均可增加检测到目标的可能性.

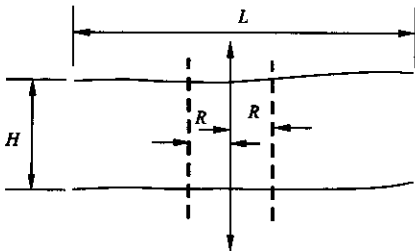


图3 目标穿越传感器网络防线

3 节点工作周期的选择

节点工作时间片 T 也是一个很重要的参数,和节点激活概率 α 一样都将影响整个传感器网络的生命期.从节点的自身特性考虑,节点从睡眠态转换到工作态需要一定的启动时间 T_{st} ,以及消耗一定的能量 E_{st} ,并且 $E_{st} > W_{on} T_{st}$ (W_{on} 为节点正常工作时的平均功率).因此,从能耗角度,并非 T 越小越好.

假设节点一直工作可以维持的时间为 T_{max} ,存在 $T_{st} \leq T \leq T_{max}$.传感器节点 i 在一个时间片内消耗的平均能量 E_T 由两部分构成:①节点平稳工作时消耗的能量;②节点从睡眠态转换到工作态需要消耗的启动能量(仅当节点在上一个时间片处于睡眠态(概率为 $(1-\alpha)$),而当前时间片需要转换到工作态(概率为 α)时,才需要消耗启动能量).因此, $E_T = \alpha T W_{on} + (1-\alpha)\alpha E_{st}$,其平均功率为

$$W_i = \frac{E_T}{T} = \alpha W_{on} + \frac{(1-\alpha)\alpha E_{st}}{T} \quad (8)$$

假设防线长度为 L ,防线内所有传感器的个数 $N = HL\rho$,则传感器防线的功率

$$W_{bar} = \sum_{i=1}^N W_i = HL\rho \left[\alpha W_{on} + \frac{(1-\alpha)\alpha E_{st}}{T} \right] \quad (9)$$

由式(7)得

$$H = \frac{P\{D\}}{2R\rho\alpha\left(\frac{\pi R}{vT} + 1\right)} = \frac{P\{D\}}{2R\rho\alpha} \frac{vT}{\pi R + vT} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),得

$$\begin{aligned} W_{bar} &= \frac{P\{D\}vTL}{2R(\pi R + vT)} \left[W_{on} + \frac{(1-\alpha)E_{st}}{T} \right] = \\ &= \frac{P\{D\}vL}{2R} \left[\frac{TW_{on} + (1-\alpha)E_{st}}{\pi R + vT} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

令 $A = \frac{E_{st}}{W_{on}}$,则

$$W_{bar} = \frac{P\{D\}vL}{2R} \left[\frac{T + (1-\alpha)A}{\pi R + vT} \right] W_{on} \quad (12)$$

为考察时间片长度 T 的选择对传感器网络功率的影响,式(12)两边对时间片 T 求导

$$\frac{dW_{bar}}{dT} = \frac{P\{D\}vL}{2R} \left[\frac{\pi R - (1-\alpha)vA}{(\pi R + vT)^2} \right] W_{on} \quad (13)$$

当 $v > \frac{\pi R}{(1-\alpha)A}$ 时, W_{bar} 单调减,故取 $T \rightarrow T_{max}$,使得

W_{bar} 较小;当 $v < \frac{\pi R}{(1-\alpha)A}$ 时, W_{bar} 单调增,故取 $T \rightarrow T_{st}$,使得 W_{bar} 较小.

图4展示了不同目标运动速率条件下,时间片长度 T 对传感器网络能耗的影响.其中,参数 $P\{D\} = 0.99$, $A = 3$ s, $L = 100$ m, $\alpha = 0.01$, $R = 5$ m.可以看到:当速率小于5 m/s时,能耗随时间片的增加而增大;当速率大于5 m/s时,能耗随时间片的增加而减小.

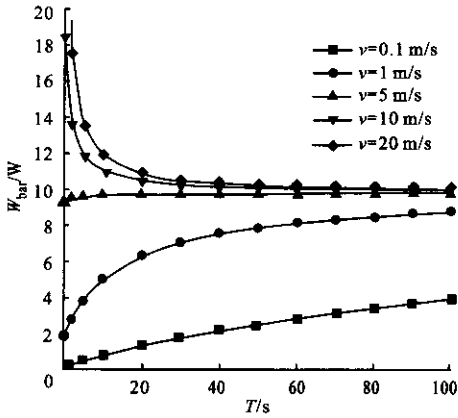


图 4 时间片对传感器网络能耗的影响

4 结束语

本文通过理论分析给出了无线传感器网络目标检测概率与传感器网络设计参数之间的关系,建立了计算整个传感器网络目标检测概率的数学模型.讨论了传感器节点工作周期的选择对整个传感器网络能耗的影响,从节能角度给出了节点工作周期的选择建议,可在不降低目标检测概率的条件下,减少网络能耗.本文的分析结果能够为应用于目标检测领域的传感器网络设计提供理论指导.

参考文献:

- [1] Editors. 10 emerging technologies that will change the world [J]. Technology Review, 2003, 106(1):33-49.

- [2] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102-114.
- [3] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, et al. Coverage problems in wireless sensor Ad-hoc networks [A]. INFOCOM'01, Anchorage, USA, 2001.
- [4] Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, et al. Exposure in wireless ad-hoc sensor networks [A]. The 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), Rome, Italy, 2001.
- [5] Liu B, Towsley D. On the coverage and detectability of wireless sensor networks [A]. WiOpt'03: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, Sophia-Antipolis, France, 2003.
- [6] Adlakha S, Srivastava M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks [A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03), New Orleans, USA, 2003.
- [7] Schurgers C, Tsiatsis V, Srivastava M. STEM: topology management for energy efficient sensor networks [A]. The 2002 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2002.
- [8] Ye F, Zhong G, Cheng J, et al. PEAS: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks [A]. The Twenty Third International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'03), Providence, Rhode Island, USA, 2003.

(编辑 刘 杨 苗 凌)

[文摘预登]

安全多播中可靠的密钥传送协议

李保红¹, 侯义斌², 陈旭辉¹

(1. 西安交通大学计算机科学与技术系, 710049, 西安; 2. 北京工业大学软件学院, 100022, 北京)

针对安全多播中的密钥传送问题,提出了一种可以满足可靠性、实时性和可扩展性要求的传送协议,该协议充分利用逻辑密钥分层结构的特点.在传送密钥时,根据接收者的数量赋予密钥不同的权重,并由此确定了不同的前向差错控制编码冗余度,从而使接收者数量较多的密钥具有更高的可靠性.协议的性能分别通过独立丢包模型和突发丢包模型进行了分析和模拟,结果表明利用该协议不仅可以减少延迟,而且也显著降低了通信开销,在不同丢包概率下可平均降低通信开销约 30%。