

# 无线传感器网络中移动目标跟踪的预测模型<sup>①</sup>

张美金, 崔 健

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘 要:** 动态目标的实时监测是无线传感器网络覆盖的必备技术和发展趋势, 针对由于目标运动带来的网络动态拓扑变化和耗能高等问题, 提出了一个预测模型. 该模型通过综合分析目标在当前时刻前的信息如移动速度、移动方向的基础上, 基于二维高斯分布, 预测目标未来可能出现的区域, 从而激活相应的传感器, 减轻无线传感器网络的工作压力. 并且设计相应的通讯协议, 以保证基站与传感器节点之间数据稳定、实时的传输. 基于仿真实验表明了该方法的有效性和可行性.

**关键词:** 移动目标; 唤醒区域; 概率预测模型; 通讯协议

## Prediction Model of Moving Target Tracking in Wireless Sensor Networks

ZHANG Mei-Jin, CUI Jian

(Liaoning Technical University, Faculty of Electrical and Engineering, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Real time monitoring of dynamic target is the essential technology and the development trend of wireless sensor network coverage. Aiming at the problem of target motion brings the dynamic network topology change and heavy energy consumption, this paper proposes a prediction algorithm. Through a comprehensive analysis of the target's information such as velocity, moving direction in the current moment, based on the two-dimensional Gauss distribution, it predicts possible future areas, which leads to activation of the corresponding sensor, alleviate the work pressure of wireless sensor network. It designs the communication protocol, to ensure the stable transmission, data between base station and sensor nodes in real time. The experiments based on simulation show the algorithm is not only valuable but also feasible.

**Key words:** informoving target; awake zone; probability prediction model; communication protocol

在无线传感器网络的应用当中, 需要对所监控区域中一些移动的目标给予有效的跟踪覆盖, 例如现实生活中生活环境的监控, 入侵者跟踪, 井下人员定位预测等<sup>[1-3]</sup>, 然而大量的研究<sup>[4-6]</sup>仅仅把研究的方向放在了对所需监测目标的定位精度上, 并没有对网络的能耗问题进行关注.

国内外已经有很多人研究了这个问题并提出解决办法, 文献<sup>[7-8]</sup>利用控制簇群范围大小来降低能耗, 却没有对移动目标进行预测, 所以仍有大量能耗浪费在保持节点唤醒以防止丢失目标上; 文献<sup>[9]</sup>针对分簇的传

感器网络运用后验概率算法来推测目标节点在网格某个点的可能性; 文献<sup>[10]</sup>提出的 WDTT(Distributed Target Tracking for WMSN<sup>[11]</sup>)算法采用平均 consensus 滤波器对传统分布式数据融合结构进行优化, 有效的完成了运动趋势的预测, 却没有对节点状态作出很好的优化, 仍然浪费了一定的能耗; 文献<sup>[12]</sup>提出的自适应动态簇目标跟踪策略 DCTT(Target tracking of dynamic clusters), 定位精度准确, 通讯开销也有所降低, 但是并未达到令人满意的程度.

因此, 本文以降低能耗为目标, 在保证定位精度

<sup>①</sup> 收稿时间:2013-11-11;收到修改稿时间:2013-11-27

的前提下,提出了一个移动目标跟踪策略: TLS(target location strategy). 对目标以往运动轨迹的分析,通过概率的方式得到它下一刻可能出现的位置,从而建立目标移动轨迹预测模型,根据预测信息,基站将从所有可能的节点中,选取最优的一部分来唤醒,这样既能够得到目标轨迹,也能够有效的降低能耗. 同时为了有效的保证基站与节点交互信息,也建立了相应的通讯协议,由于需要的控制报文较少,长度也很短,有效的降低了通信开销. 基于仿真数据的实验,证明了本文方法的有效性和可行性.

## 1 系统模型

### 1.1 概率预测模型

节点位置的概率预测模型主要的功能在于提供给基站一个未来目标可能出现的区域,如果目标的移动速度小于一定的阈值,可以证明在这个模型提供的区域内只有一个节点能发现目标(也就是说同时证明了这个阈值在现实世界中的应用也是足够高的).

表 1 本节出现的符号

$I_i(x_i, y_i)$	目标在 $i$ 时刻的位置
$k$	网络密度
$(x_{pre-i}, y_{pre-i})$	目标在 $i$ 时刻的预测位置
$R \geq  \sigma  \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-H}}$	唤醒区域半径
$r_s$	传感半径

为了简化分析,假定传感器节点静止而且能量有限,只负责采集与传输数据,网络中有  $N$  个节点密度为  $\frac{k}{\pi r_s^2}$ ,  $k \geq 1$ ,  $k \in \mathbb{Z}^+$ ,  $r_s$  为节点的感知半径. 基站负责计算工作并且无需考虑能量问题,在正常情况下基站与节点间保持通讯.

设目标运动轨迹  $\vec{I}$ .  $I_i(x_i, y_i)$  表示  $i$  时刻目标的位置坐标,则有:

$$\vec{I} = (I_0(x_0, y_0), \dots, I_i(x_i, y_i), \dots) \quad (1)$$

把  $i$  时刻目标的位置建模为二维高斯分布,中心点即预测点  $(x_{pre_i}, y_{pre_i})$ , 均值  $\mu$  为  $(x_{pre_i}, y_{pre_i})$ , 得出目标在  $i$  时刻概率分布函数:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_{pre_i})^2 + (y-y_{pre_i})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中  $\sigma$  为标准方差. 假定所有时刻的  $\sigma$  是一致的. 预测点由历史目标轨迹决定,代表了在  $i$  时刻目标最可

能出现的位置.

### 1.2 预测点

根据实际情况,用两种方法获得预测点:

1) 假定目标运动轨迹为直线:

$$y = y_{i-1} + (x - x_{i-1}) \tan \theta$$

可定义预测点为  $x_{pre_i} = x_{i-1} + V_{i-1} \Delta t \cos \theta$ ,

$$y_{pre_i} = y_{i-1} + V_{i-1} \Delta t \sin \theta$$

其中  $i \geq 2$ , 且  $\theta = \arctan\left(\frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{x_{i-1} - x_{i-2}}\right)$ ,  $\Delta t$  是时刻  $i$  与  $i-1$  间的时间间隔,  $V_{i-1}$  表示目标在时刻  $i-1$  的瞬时速度:

$$V_{i-1} = \frac{\|I_{i-1} - I_{i-2}\|}{\Delta t}, \quad i \geq 2. \quad (3)$$

2) 没有目标的  $i-1$  时刻以前的信息,使用目标在  $i-1$  时刻的位置作为预测点:

$$x_{pre_i} = x_{i-1}, \quad y_{pre_i} = y_{i-1}, \quad i \geq 1 \quad (4)$$

由于计算目标的精确位置非常困难,这里不要求预测点与实际目标的位置尽可能接近,而是找出一个能确保目标一定出现的较大的预测区域. 由概率分布式及以下定理可知,若已知目标轨迹  $\vec{I}$ , 则目标出现在以  $(x_{pre_i}, y_{pre_i})$  为圆心,  $R$  为半径的圆内的概率比一个阈值  $H$ , ( $0 \leq H \leq 1$ ) 要大. 即,能找到一个区域,使在时刻  $i$  目标出现在该区域的概率要大于  $H$ .

即给定阈值  $H$ , ( $0 \leq H \leq 1$ ), 存在  $R \geq |\sigma| \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-H}}$  目标出现在以  $(x_{pre_i}, y_{pre_i})$  为圆心  $R$  为半径的圆内的概率一定比阈值  $H$  要大.

以点  $(x_{pre_i}, y_{pre_i})$  为圆心,  $|\sigma| \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-H}}$  为半径的圆被称为唤醒区域 AZ(Awake Zone). 基站在时刻  $i$  通过唤醒该圆内的节点来保持对目标的监控.

假设则目标的移动速度不能高于  $V_H$ , 在节点密度为  $\frac{k}{\pi r_s^2}$  时, 如果  $V_i \leq V_H$ , 那么肯定有一个在 AZ 中的节点可以在时刻  $i$  观测目标.

证明: 如果节点可以观察到目标,那么它必然处于阴影  $S$  中,

$$S = r_s^2(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) + R^2(\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2) \quad (5)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r_s^2 + (V_H \Delta t)^2 - R^2}{2r_s(V_H \Delta t)}\right) \quad (6)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{r_s^2 + (V_H \Delta t)^2 - r_s^2}{2R(V_H \Delta t)}\right) \quad (7)$$

如果  $\pi r_s^2$  的面积里有  $k$  个节点, 那么容易知道

$\frac{Sk}{\pi r_s^2} \geq 1$ , 也就以为这至少有一个节点可以观测到目标.

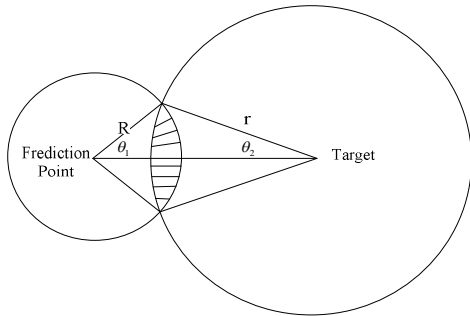


图 1 AZ 与目标示

## 2 目标跟踪策略(target location strategy, TLS)

由于目标跟踪策略提供的是分布式的算法, 所以时钟的问题就显得尤为的重要; 当一个事件发生的时候, 或许有多个不同的节点能够观测到这一事件, 为了节能, 目标跟踪策略采用了一个查询策略来确定从哪些节点中取得信息.

表 2 本节出现的符号

$k(i)$	不使用 TLS, 在 $i$ 时刻发现目标的节点个数
$k_q(i)$	时刻 $i$ 被基站查询的节点个数
$d$	目标与节点距离
$\alpha$	比例变量
$E_r$	剩余能量
$F$	是否需要被基站查询的变量
$\Delta t$	时刻 $i-1$ 与 $i$ 之间的长度

### 2.1 报文与协议时钟

本小节中有四种报文数据结构及两个协议时钟.

**AWK(awake):** 当一个节点收到了一个很短的 AWK 报文时, 它会从空闲状态转为侦听状态, 设定自己的 KEEPALIVE 时钟, 同时在  $\Delta t$  时间内保持侦听状态. 若它已经处在侦听状态, 则重置 KEEPALIVE 时钟.

**RPT(report):** 当某个节点观测到目标时, 它会给基站发出一个 RPT 报文, 说明自己的剩余能量及它与

目标的距离.

**QUY(query):** 该报文由基站发出, 用以告诉节点其所要获得的数据. 接着基站等待节点的回复.

**DAT(data):** 节点在收到 QUY 报文后, 向基站发送一个 DAT 报文, 把对目标的观测数据回复给基站.

**KEEPALIVE 时钟:** 节点自设定或重置 KEEPALIVE 时钟后, 会一直侦听直到 KEEPALIVE 时钟超时.

**WAIT 时钟:** 基站于时刻  $i$  收到第一个 RPT 报文后, 会自动设定一个 WAIT 时钟, 表示基站在多长时间会等待接下来的 RPT 报文. 若 WAIT 时钟超时, 基站就执行查询机制, 选择某一部分节点查询其详细信息. 一般设定 WAIT 时钟为  $\frac{3}{4}\Delta t$ .

### 2.2 分布式目标定位算法

分别针对节点和基站提出算法. 传感器节点在跟踪策略中主要的职责是数据的采集工作, 由于基站相对节点来讲能量无限, 所以, 它将担负起计算 AZ 和唤醒节点的工作.

对传感器节点的算法如下:

1) 某时刻节点接收到一个 AWK 报文, 自设定或重置 KEEPALIVE 时钟, 开始侦听.

2) 在 KEEPALIVE 时钟未超时的情况下, 若在  $i$  时刻侦听到某目标, 则产生一个 RPT 报文发送给基站, 否则继续侦听直到 KEEPALIVE 时钟超时.

3) 若节点在传送完 RPT 报文后收到 QUY 报文, 就再产生一个 DAT 报文发给基站, 准备下一轮算法执行.

对基站的算法如下:

1) 某时刻基站第一次收到某一个节点送来的 RPT 报文, 设定一个 WAIT 时钟, 并继续接收 RPT 报文.

2) 若 WAIT 时钟超时, 则使用查询机制选择个节点, 并产生 QUY 报文发送给这  $k_q(i)$  个节点,  $k_q(i)$  接下来就等待 DAT 报文.

3) 若基站接收到所有的 DAT 报文, 则产生唤醒区域 AZ 并把 AWK 报文发送给 AZ 中的节点.

4) 计算目标的位置, 准备下一轮算法执行.

### 2.3 查询机制

具体的查询机制: 考虑到节能, 在时刻  $i$ , 只查询  $k_q(i)$  个节点. 当基站在时刻  $i$  第一次收到 RPT 报文, 基站设定 WAIT 时钟. 如果时钟超时, 那么基站会从所有在  $i$  时刻发现目标的节点中选择部分去查询. 假定在时刻  $i$  有  $k_q(i), (k_q(i) \leq k(i))$  个节点报告发现目标, 因为

能量限制, 需查询  $E_r$  值较大的节点; 又考虑到数据的准确性, 需查询离目标较近的节点, 故建立公式:

$$F = \alpha \frac{E_r}{E} + (1-\alpha) \frac{d}{r_s}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8)$$

根据计算结果, 基站选择 F 值较大的节点来查询.

### 3 能耗分析

数据这里将对跟踪同一个目标时, 将不使用 TLS 策略与使用 TLS 策略两种不同的跟踪策略的能耗进行分析比较. 为简化, 假定节点只有三种状态: 侦听、活跃、空闲.

若某一节点发现了目标, 它就传输 RPT 报文  $\langle d, E_r \rangle$  给基站. 设  $T_r$  为传输此报文的时间, 且假定  $T_r$  为一定值.

当一个节点收到 QUY 报文, 它需要给基站发送 DAT 报文. 假设  $T_s$  为节点传输 DAT 报文的时间与基站接收 DAT 报文的时间之和.

表 3 本节出现的符号

$\varphi_a, \varphi_s, \varphi_i$	传感器处于侦听, 活跃, 空闲状态节点能耗
$k'(i)$	使用 TLS 时在 $i$ 时刻发现目标节点数
$E_i$	不使用 TLS, $\Delta t$ 时间内的能耗
$E'_i$	使用 TLS, $\Delta t$ 时间内的能耗

#### 3.1 跟踪一个目标不使用 TLS 策略的能耗

在不使用 TLS 的情况下, 没有预测信息, 需要使全部节点处于侦听状态从而确保监控到目标. 假设  $i$  时刻有  $k(i)$  个节点可监控到目标, 并且只需要  $k_q(i)$  个节点向基站报告. 即在  $\Delta t$  时间内, 保持在侦听状态的节点数为  $N$ , 需要产生 RPT 报文和 DAT 报文的节点数分别为  $k(i)$  和  $k_q(i)$ , 则能耗为:

$$E_i = N\varphi_s\Delta t + k_q(i)\varphi_a T_s + k(i)\varphi_a T_r \quad (9)$$

$$E = \sum_{i=0}^{t_{end}} E_i \quad (10)$$

#### 3.2 跟踪同一个目标使用 TLS 策略的能耗

在使用了 TLS 时, 已经充分的了解了目标移动的历史信息并且对目标未来可能出现的区域有所预测,

只需让  $k\left(\frac{\sigma}{r_s}\right)^2 \ln \frac{1}{1-H}$  个节点处于侦听状态. 同样, 假设  $i$  时刻有  $k'(i)$  ( $k'(i) \leq k(i)$ ) 个节点可监控到目标, 且只需  $k_q(i)$  个节点向基站报告. 这样一来, 处于空闲状态的节点数为  $N - k\left(\frac{\sigma}{r_s}\right)^2 \ln \frac{1}{1-H}$ , 需产生 RPT 报文和 DAT 报文的节点数分别为  $k'(i)$  和  $k_q(i)$ , 此时能耗为:

$$E'_i = k\left(\frac{\sigma}{r_s}\right)^2 \ln \frac{1}{1-H} \varphi_s \Delta t + k_q(i) \varphi_a T_s + \quad (11)$$

$$k'(i) \varphi_a T_r + \left( N - k\left(\frac{\sigma}{r_s}\right)^2 \ln \frac{1}{1-H} \right) \varphi_i \Delta t$$

$$E' = \sum_{i=0}^{t_{end}} E'_i \quad (12)$$

#### 3.3 对比分析

使用 TLS 与不使用 TLS 的能耗差为:

$$\Delta E_i = \left( N - k\left(\frac{\sigma}{r_s}\right)^2 \ln \frac{1}{1-H} \right) (\varphi_s - \varphi_i) \Delta t + \quad (13)$$

$$(k(i) - k'(i)) \varphi_a T_r$$

$$\Delta E = \sum_{i=0}^{t_{end}} \Delta E_i \quad (14)$$

因  $\varphi_s \leq \varphi_i$ ,  $k(i) \geq k'(i)$ , 故使用 TLS 的情况下耗能比不使用 TLS 的情况要小得多.

### 4 实验仿真

搭建 Matlab7.0 及 C++ 仿真平台验证算法的效果. 并且与文献[10]和文献[11]中的算法进行比较.

把 20 个节点随机布撒于 100m\*100m 的区域内并设定预测模型的参数为:  $\sigma = 10$ ,  $\Delta t = 0.3s$ ,  $H = 90\%$ ,  $r_s = 15m$ , 能量消耗参数为:  $\varphi_s = 1000nj/s$ ,  $\varphi_a = 400nj/s$ ,  $\varphi_i = 100nj/s$ .  $T_r = 10ms$ ,  $T_s = 100ms$ .

如图 2 所示, 目标从坐标(0,0)出发, 沿着图示轨迹运动. 为分析方便, 忽略时间的同步问题, 令  $k_q(i) = 1$ .

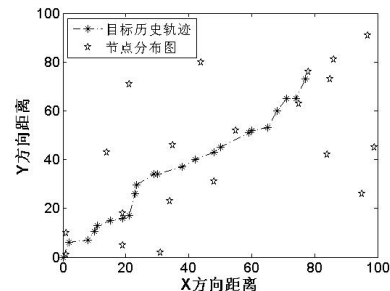


图 2 节点分布及目标运动历史轨迹图

如图 3 所示,使用本文的方法通讯开销要远远低于参考文献中的方法,这是由于本文所用的方法对目标下一时刻所在位置进行预测,只有在预测位置附近的节点向基站发报文数据,而且报文很短,几比特就能达到目的,这样就大大减少了通讯字节数,从而降低了通讯开销。

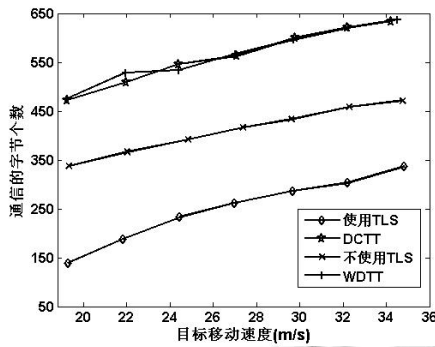


图 3 节点通信开销的比较

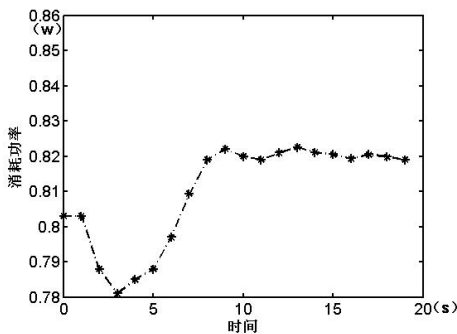


图 4 节点功率图

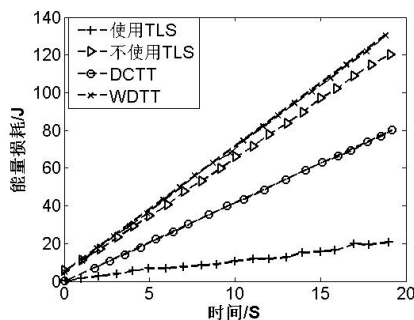


图 5 能耗比较

图 4 表示出了使用 TLS 的情况下,节点的功率消耗;从图 5 中可以看出使用 TLS 后节能的效果非常明显.本文的方法通过目标的预测模型,判断下一时刻目标的位置,选择最优区域进行唤醒,既能得到目标轨迹,也避免了不适合的节点参与跟踪任务,从而节约了大量的能耗。

## 5 结语

文中提出了基于移动目标预测模型的目标节能跟踪策略: TLS. 移动目标预测模型利用了目标的历史移动数据,对目标在下一时刻可能出现的位置进行预测.模拟实验证实使用 TLS 可以有效地降低能耗.由于 TLS 需要的控制报文很少且长度很短,可以推测短小的报文,从而减少了可能产生的通讯碰撞,降低了通讯开销。

## 参考文献

- 1 Cerpa A, Elson J, Estrin D, et al. Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology. Proc. of ACM SIGCOMM workshop on Data Communications, 2001.
- 2 Li D, Wong K, Hu YH, Sayeed A. Detection classification and tracking of targets in distributed sensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 51-60.
- 3 杨楚.基于 ZigBee 的无线火灾定位报警系统.华中科技大学,2009.
- 4 孙利民,李建中,陈渝等.无线传感器网络.北京:清华大学出版社,2008.
- 5 张宏武.无线传感器网络中覆盖算法研究.武汉华中科技大学,2009.
- 6 许伟村,赵清洁.一种基于粒子滤波的多目标跟踪算法.中南大学学报(自然科学版),2011,42(1):805-810.
- 7 Brooks RR, Ramannthan P, Syeed AM. Distributed target classification and tracking in sensor networks. Proc. of the IEEE. 2003, 91(8): 1163-1171.
- 8 Clouqueur T, Phipatanasuphorn V, et al. Sensor deployment strategy for target detection. Proc. of 1st ASM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. 2002. 42-48.
- 9 Yi Z, Chakrabarty K. Energy-aware target localization in wireless sensor networks. Proc. of IEEE Inter. Conf. on Pervasive Computing and Communications.2003. 60-67.
- 10 韩屏.无线移动传感器网络的分布式目标跟踪算法研究[学位论文].武汉:武汉理工大学.
- 11 李莹莹,张衡阳,刘云辉.基于移动传感器网络的节能目标跟踪.自动化学报,2007,11(33),1156-1162.
- 12 刘军,刘晖,叶宁,等.无线传感器网络自适应动态簇目标跟踪策略.东北大学学报(自然科学版),2011,32(8):1080-1083.