

## 基于递推质心算法的二元传感器网络分布式目标跟踪

周红波, 万福, 丁敬校  
(海军指挥学院信息战研究系, 南京 211800)

**摘要:** 传感器网络的一个重要应用方向是目标定位与跟踪。为了减少通信消耗,二元传感器是一个很好的选择。在递推质心算法和动态分簇结构的基础上提出了一种分布式递推质心算法,并将其应用到二元传感器网络分布式目标跟踪中。计算机仿真结果表明,该算法能够有效地对目标进行定位跟踪,并能够在节点密度大、节点探测半径大和采样周期小的情况下减少能量消耗和计算量,从而延长网络使用寿命。

**关键词:** 传感器网络; 目标跟踪; 二元传感器; 质心算法; 动态分簇

**中图分类号:** V271.4; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0028-04

## Distributed Target Tracking in Binary Sensor Network Based on Recursive Centroid Algorithm

ZHOU Hong-bo, WAN Fu, DING Jing-xiao

(Department of Information Warfare Research, Navy College of Commanding, Nanjing 211800, China)

**Abstract:** One important application of sensor network is in target locating and tracking. The use of binary sensor is a good choice for decreasing transmission consumption. Based on the recursive centroid algorithm and dynamic clustering structure, a distributed recursive centroid algorithm was proposed and used in distributed target tracking in binary sensor network. Simulations results show that the new algorithm can track target effectively, decrease energy consumption and computing complexity in the case of high density nodes, large detection range and short sampling period, thus can prolong the lifetime of the network.

**Key words:** sensor network; target tracking; binary sensor; centroid algorithm; dynamic clustering

### 0 引言

近年来,无线传感器网络(WSN)因在各个领域具有广泛的应用前景而成为国内外一个研究热点<sup>[1-2]</sup>。WSN的一个重要应用领域就是目标定位与跟踪<sup>[3]</sup>。在WSN目标定位跟踪中,由于传感器网络的通信资源有限,所以经常利用二元传感器节省通信量。国内外对二元WSN目标定位与跟踪算法进行了一定的研究<sup>[4-7]</sup>,其中,主要采用的方法是质心算法以及加权质心算法<sup>[4-5]</sup>。质心算法及加权质心算法在每一采样时刻利用所有探测到目标的传感器节点的位置来计算目标的位置,由于其计算简单,因此得到广泛应用。当传感器密度较高,探测半径较大,采样间隔较小时,质心算法可能会出现以下情况:大部分节点会在前后两个

时刻同时探测到目标,即前后两个时刻探测到目标的节点包含大量的相同节点,而不同的节点相对较少。此时,为了减少通信量和计算量,下一时刻的质心计算可以在上一时刻信息的基础上,仅仅处理与前一时刻不同的节点信息,基于这样的思想,文献[8]推导出了递推质心算法。在此,基于递推质心算法和动态分簇结构<sup>[9]</sup>,提出一种分布式递推质心算法用于二元WSN分布式目标跟踪。在新的分布式目标跟踪算法中,每一采样时刻只有前后两个时刻探测信息不同的节点传递信息给簇首节点,其他节点不发送任何信息,从而在前后两个时刻探测信息不同的节点数目较少的情况下,该算法可以减少通信量和计算量,延长网络使用寿命。最后,通过Monte Carlo仿真验证了本文算法的有效性。

### 1 传感器模型

二元传感器只有两种探测状态,即它只能判断目标是否处于其探测范围内。如图1所示,假设传感器

收稿日期:2013-04-15

修回日期:2013-05-08

基金项目:国家“八六三”计划项目(2007AA01Z309)

作者简介:周红波(1984—),男,山西夏县人,博士,讲师,研究方向为无线传感器网络目标定位与跟踪。

的探测半径为  $R$ , 当目标与传感器节点的距离小于  $R$  时, 传感器的探测值为 1; 当目标与传感器节点的距离大于  $R$  时, 传感器的探测值为 0。另外, 假设传感器节点能够判别到前后两个时刻的探测值是否相同, 并设定一个标识信号, 当传感器节点上一时刻探测值为 0, 当前时刻探测值为 1 时, 标识信号为 1; 当传感器节点上一时刻探测值为 1, 当前时刻探测值为 0 时, 标识信号为 -1; 当上一时刻与当前时刻探测值相同时, 标识信号为 0。

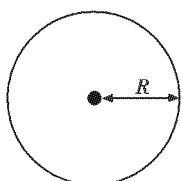


图1 二元传感器模型

Fig. 1 The model of binary sensor

## 2 分布式目标定位算法

### 2.1 递推质心算法

当二元 WSN 中节点密度较高、探测半径较大、采样间隔较小时, 大量的节点会在前后相邻的两个时刻都探测到目标。在这种情况下, 由于前后两个采样时刻探测到目标的节点含有大量的共同节点, 则在处理后一时刻采样数据时, 可以只处理前后两个时刻不同的节点信息, 而相同的部分可以采用前一时刻的处理结果, 基于上述思想的质心算法就是递推质心算法<sup>[9]</sup>。具体算法如下, 假设  $Z_k$  为  $k$  时刻的质心位置, 则  $k+1$  时刻的质心位置  $Z_{k+1}$  可以通过以下递推公式得到<sup>[9]</sup>。

$$Z_{k+1} = \frac{1}{|S_{k+1}|} Z_k - \frac{|S_k - S_{k+1}|}{|S_{k+1}|} f(S_k - S_{k+1}) + \frac{|S_{k+1} - S_k|}{|S_{k+1}|} f(S_{k+1} - S_k) \quad (1)$$

式中:  $S_k$  和  $S_{k+1}$  分别为  $k$  和  $k+1$  时刻探测到目标的传感器节点集合;  $S_k - S_{k+1}$  为  $k$  时刻探测到目标, 而  $k+1$  时刻没有探测到目标的传感器节点集合;  $S_{k+1} - S_k$  为  $k+1$  时刻探测到目标, 而  $k$  时刻没有探测到目标的传感器节点集合;  $|S_k|$  表示集合  $S_k$  中节点的个数;  $f(S)$  表示集合  $S$  中所有节点的质心位置。

### 2.2 分布式递推质心算法

由于传感器资源有限, 为了节省资源, 提高 WSN 的寿命, 基于分布式跟踪的思想, 根据目标的当前位置, 将 WSN 节点动态组织成簇, 并将递推质心算法应用到动态分簇结构中, 实现基于动态分簇结构的分布式递推质心算法。具体思路为: 在每一采样时刻, 根据一定的规则选取一个簇首节点, 然后将距离簇首节点单位通信距离内的所有节点组织成簇, 当前簇内的节

点处于监测状态, 其他节点处于休眠状态以节省能量。同时, 簇内并不是所有的节点都要传送信息给簇首, 只有当前时刻与前一时刻探测值不同的节点才向簇首发送信息, 而前后时刻探测值相同的节点不传送信息。由第 1 节传感器的模型可知, 只有节点的标识信号为 1 和 -1 时, 节点需要传送信息给簇首, 当标识信号为 0, 不需要传送任何信息, 因此可以进一步减少通信量。分布式跟踪的过程可由下列步骤来实现。

1) 当目标进入 WSN 监测区域时, 第一个探测到目标的节点作为簇首节点, 并向周围广播信息, 激活与其在单位通信距离内的节点, 形成一个簇, 同时将自己的位置和标号广播给簇内节点。

2) 簇内节点收到簇首节点的信息后, 进入监测状态, 当传感器节点当前探测状态与上一时刻探测状态不同时, 向簇首发送信息, 信息主要包括节点自身位置和标识信息。根据第 1 节中传感器模型和第 2.1 节中集合的定义可知, 发送标识信息为 1 的节点集合为  $S_{k+1} - S_k$ , 发送标识信息为 -1 的节点集合为  $S_k - S_{k+1}$ 。

3) 簇首节点作为本地数据处理中心, 接收簇内其他节点发送来的信息, 根据其他节点发送的信息和前一时刻的质心位置, 利用递推质心算法式(1)计算目标的当前位置, 并采用相应的滤波算法对目标进行跟踪。

4) 随着目标的运动, 当目标不在簇首节点的探测范围内时进行簇首切换, 此时, 通过目标状态方程预测目标下一时刻的位置。根据与预测位置最近的原则, 选取新的簇首节点。

5) 通过打包通信将目标状态估计和上一时刻的质心从原簇首节点发送到新的簇首节点。同时, 使原簇内节点不在新簇内的节点进入休眠状态。新的簇首节点根据步骤 1) 方法创建新簇。

随着时间的推移, 不断重复上述步骤, 直到目标脱离 WSN 监测区域。

在上述分布式目标跟踪中, 基于唤醒、休眠的动态分簇使 WSN 中各节点的能量消耗更加均衡。同时, 由于采用的是分布式递推质心算法, 所以, 在簇内并不是所有探测到目标的节点都要发送信息给簇首, 只有前后两个时刻探测值不同的节点才发送信息给簇首。因此, 当 WSN 节点密度较高、探测半径较大、采样周期较短时, 当前时刻探测到目标的传感器节点集合与上一时刻相差不大的情况下, 能够进一步减少传感器网络的通信量和计算量, 从而可以延长 WSN 网络寿命。

## 3 目标跟踪算法

由于二元传感器节点资源有限, 且缺乏相应的先

验统计信息,因此可以采用最小二乘滤波算法<sup>[10]</sup>进行目标跟踪。

假设目标的状态方程为

$$X(k+1) = F(k)X(k) + GU(k) \quad (2)$$

目标的测量方程为

$$Z(k) = H(k)X(k) + W(k) \quad (3)$$

式中, $Z(k)$ 为质心算法或者递推质心算法获得的目标位置。

最小二乘滤波的递推算式为

$$\hat{X}(k+1) = F\hat{X}(k) + K(k+1)[Z(k+1) - H(k+1)(F\hat{X}(k))] \quad (4)$$

$$K(k+1) = P(k)H^T(k+1)[I + H(k+1)P(k)H^T(k+1)]^{-1} \quad (5)$$

$$P(k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k) \quad (6)$$

## 4 计算机仿真

### 4.1 仿真环境设置

假设 500 m × 500 m 的监测区域均匀布置 500 个二元传感器节点,如图 2 所示。传感器的探测半径  $R = 30$  m,通信半径  $C = 2R = 60$  m,采样周期  $T = 1$  s。假设有一个目标从 WSN 覆盖区域的左上角向右下角匀速运动,即目标的初始位置为(0 m, 500 m),速度为(5 m/s, -5 m/s)。

### 4.2 递推质心算法定位有效性仿真

采用 Matlab 在以上假设的仿真环境条件下对质心算法和递推质心算法进行仿真,结果如图 2 所示。

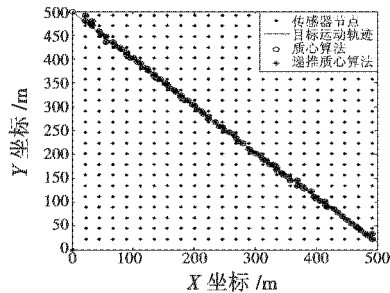


图 2 质心算法和递推质心算法定位比较

Fig. 2 The locating of the centroid algorithm and the recursive centroid algorithm

从图上可以看出,这两种算法计算的质心位置完全重合,从而验证了递推质心算法的有效性。

### 4.3 能量消耗比较

WSN 中能量消耗中大部分用于通信和计算<sup>[11]</sup>,而在质心算法和分布式递推质心算法中,通信能量和计算量的大小都取决于每个采样时刻向簇首节点发送信息的节点数,并与之正相关。因此,为了仿真的简单性,在仿真中,通过比较平均每采样时刻发送信息的传

感器节点数的大小来代替对通信量和计算量的比较,从而实现了对能耗的比较。下面分别仿真了传感器密度、探测半径和采样周期对 WSN 能耗的影响,每一次仿真中 Monte Carlo 仿真次数均为 100 次。

#### 1) 传感器密度的影响。

假设其他仿真条件不变,传感器数目分别为 100 ~ 1000,其中间隔为 100。仿真结果如图 3 所示。

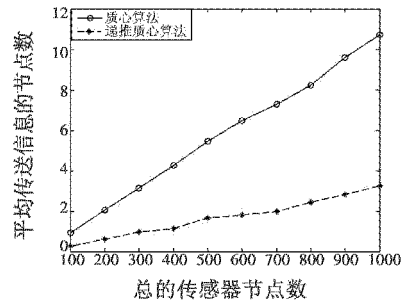


图 3 不同传感器数目下的仿真结果

Fig. 3 The simulation result with different number of sensors

由仿真结果可以看出,当传感器数目增多时,即密度增高时,质心算法每个采样时刻需要发送信息的节点数也急剧增大,而分布式递推质心算法平均每采样时刻需要发送信息的节点数则是缓慢增大,因此,当传感器密度较高时,分布式递推质心算法能够较质心算法节省更多的通信量和计算量,进而节省更多的能耗。

#### 2) 探测半径的影响。

假设其他仿真条件不变,传感器探测半径分别为 20 ~ 50 m,其中间隔为 5 m。不同探测半径下的仿真结果如图 4 所示。

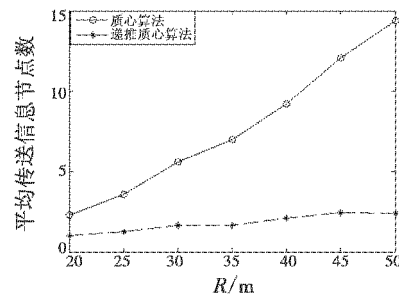


图 4 不同传感器探测半径下的仿真结果

Fig. 4 The simulation result with different detecting radius of sensors

由仿真结果可以看出,传感器探测半径增大时的仿真结果与传感器密度增大时的结果基本一致,这是因为探测半径增大,同一时刻探测到目标的节点数目就增大,相当于增大了传感器密度。因此,当传感器探测半径较大时,分布式递推质心算法同样能够较质心算法节省更多的通信量和计算量,进而节省更多的能量消耗。

#### 3) 采样周期的影响。

假设其他仿真条件不变,采样周期分别为 1 ~ 10 s,

其中间隔为 1 s。不同采样周期下的仿真结果如图 5 所示。

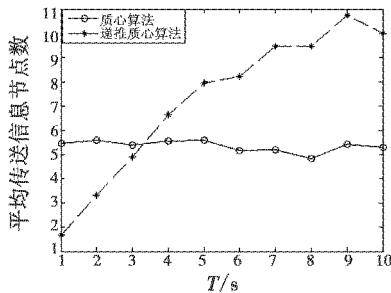


图 5 不同采样周期下的仿真结果

Fig. 5 The simulation result with different sampling period of sensors

由仿真结果可以看出,当采样周期逐渐变长时,质心算法每个采样时刻需要发送信息的节点数目基本不变,而分布式递推质心算法每个采样时刻需要发送信息的节点数目急剧增大。这是因为采样周期越长,前后两个时刻探测信息不同的节点数急剧增大,所以需要发送信息的节点数急剧增大。因此,分布式递推质心算法只适用于采样周期较短的时刻,采样周期较长时反而会增大通信量和计算量,进而增加能量消耗。

## 5 结论

基于二元传感器信息量较小的特点,在递推质心算法和动态分簇结构的基础上提出了一种分布式递推质心算法用于二元 WSN 的分布式目标跟踪。在新的分布式算法中,由于在每一采样时刻,只有当前后两个时刻探测值不同的传感器节点才传送信息给簇首节点,因此,在前后两个时刻探测值不同的节点数较少的情况下,可以减少通信量和计算量,进而减少能量消耗,延长网络寿命。Monte Carlo 仿真结果验证了本文算法的有效性。仿真结果表明,当 WSN 的节点密度较大、节点探测半径较大、采样周期较短时,分布式递推质心算法较质心算法需要发送信息的节点数大大减少,从而减少了通信量和计算量,进而减少能量消耗,因此可以延长 WSN 的寿命。当传感器节点的采样周期较长时,分布式递推质心算法并不适用。

## 参考文献

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.  
SUN L M, LI J Z, CHEN Y, et al. Wireless sensor networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [2] 赵晓震,田庆战,孙牧. 基于虚拟力驱动力的传感器网络节点定位[J]. 指挥控制与仿真,2012, 34(6): 110-113.
- [3] ZHAO X Z, TIAN Q Z, SUN M. Location method for sensor networks nodes based on virtual force driving[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(6): 110-113.
- [4] LI D, WONG K D, HU Y H, et al. Detection, classification, and tracking of targets[J]. IEEE Signal Processing Magazine (S1053-5888), 2002, 19(2): 17-29.
- [5] KIM W, MECHITOV K, CHOI J Y, et al. On target tracking with binary proximity sensors[C]//Proceedings of 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2005: 301-308.
- [6] MECHITOV K, SUNDRESH S, KWON Y, et al. Cooperative tracking with binary detection sensor networks[C]//Proceedings of 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, USA, 2003: 332-333.
- [7] ASLAM J, BUTLER Z, CONSTANTIN F, et al. Tracking a moving object with a binary sensor network[C]//Proceedings of the 1st international conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, USA, 2003: 150-161.
- [8] DJURIC P M, VEMULA M, BUGALLO M F. Target tracking by particle filtering in binary sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2229-2238.
- [9] 李煜,程远国,杨露菁. 二元探测传感器网络的递推加权质心目标定位算法[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(5): 42-45, 70.  
LI Y, CHENG Y G, YANG L J. A recursive weighted-centroid algorithm for object location in binary sensor network[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(5): 42-45, 70.
- [10] 周红波,邢昌风,万福. 面向目标跟踪的无线传感器网络动态分簇[J]. 电光与控制, 2013, 20(1): 14-18.  
ZHOU H B, XING C F, WAN F. Dynamic clustering of wireless sensor network for target tracking[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(1): 14-18.
- [11] 徐瑜,杨绍清,孙牧. 最小二乘滤波在目标跟踪中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(4): 41-42.  
XU Y, YANG S Q, SUN M. Application of least square filtering for target tracking[J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(4): 41-42.
- [12] MALHOTRA B S, ARAVIND A A. Energy efficient on-site tracking of mobile target in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2004: 43-48.