

Distributed Multi-Target Tracking in Wireless Sensor Network*

ZHOU Hongbo, XING Changfeng*, GENG Boying, ZHANG Jianqiang

(College of Electronic Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China.)

Abstract: Due to the limited resources of wireless sensor network, existing centralized algorithms for tracking multi-target are incapable when being used in wireless sensor network. A distributed algorithm based on dynamic clustering is presented to track multi-target in wireless acoustic sensor network, where the sensor data represent measurements of acoustic signals from one or more targets and background noise. The algorithm runs a separate particle filter for each target. When one target is far from the others, it is tracked by its particle filter as single target tracking. However, when some targets are close to each other, the algorithm can track them distributedly by their main nodes exchanging information with each other. The simulation results show that the algorithm can track multi-target distributedly and guarantee tracking precision while saving energy.

Key words: wireless sensor network; multiple target tracking; distributed algorithm; particle filter; acoustic energy

EEACC: 6150P; 7230; 6210

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.02.025

无线传感器网络分布式多目标跟踪算法研究*

周红波, 邢昌风*, 耿伯英, 张建强

(海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 由于无线传感器网络的资源有限, 集中式多目标跟踪算法在无线传感器网络多目标跟踪中受到限制。在无线声学传感器网络下, 基于动态分簇结构, 提出了一种分布式多目标跟踪算法。每个传感器的测量为来自单个目标或多个目标的声音信号和环境噪声的叠加。在跟踪过程中, 每个目标对应于一个粒子滤波, 当目标之间的距离较远时, 进行单目标跟踪。当目标之间距离较近相互影响时, 各个主节点通过信息交换实现对多目标的分布式跟踪。仿真结果表明, 算法能够有效的实现对多目标的分布式跟踪, 在节省能量的同时能够保证跟踪精度。

关键词: 无线传感器网络; 多目标跟踪; 分布式算法; 粒子滤波; 声音能量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)02-0288-06

近年来, 随着无线通信、集成电路、传感器以及微机电系统等技术的发展和日益成熟, 低成本、低功率、多功能的微型传感器的大量生产成为可能。无线传感器网络(WSN; wireless sensor network)就是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点通过无线电通信形成的一个多跳自组织网络系统^[1]。其中WSN的一个重要应用就是目标定位与跟踪^[2]。目前, 国内外学者对WSN单目标跟踪做了大量的研究^[3-5], 但是对于WSN多目标跟踪的研究相对较少, 其中已有的算法主要还是采用传统多目标跟踪的方法, 即用基于关联假设的多目标跟踪算法来解决WSN中的多目标跟踪问题^[6-8]。另外, 一部分学

者则根据WSN节点信号检测能力较弱的特点, 在不考虑数据关联的情况下研究多目标跟踪^[9-10]。

在WSN目标跟踪中, 由于WSN中节点的能量、感知范围、通信能力和计算能力等都有限, 因此传统的集中式算法受到限制。为解决集中式算法的不足, 最近几年国内外提出了大量的分布式算法^[9, 11-12]。分布式算法由于能够减少能量消耗, 延长网络寿命, 因此在无线传感器网络目标跟踪中具有重要的应用价值。因此, 在利用WSN进行多目标跟踪时, 跟踪算法不仅要解决多目标跟踪的问题, 而且还要具有分布式特性。

本文主要以声学传感器组成的WSN为基础, 研

究 WSN 分布式多目标跟踪。对于声学传感器,每个传感器的测量为来自单个目标或多个目标的声音信号和噪声的叠加,与传统的测量与目标一一对应的情况有所不同,无法进行数据关联。在基于动态分簇结构的基础上,我们利用粒子滤波提出了一种分布式多目标跟踪方法。在跟踪的过程中,我们为每个目标运行一个粒子滤波,并根据声音信号强度与传播距离成反比的原理,只在目标的周围选择适当的节点参与观测,并且根据目标距离的远近来决定是否进行多目标联合跟踪。在分布式跟踪过程中,各个主节点通过无线通信方式传递目标状态信息。最后利用计算机进行了 Monte Carlo 仿真,仿真结果验证了本文算法的有效性。

1 问题描述

1.1 WSN 网络模型

无线传感器网络由 S 个声学传感器节点组成,所有节点均匀布设在监测区域内。每个传感器节点位置已知,且可以探测周围的声音强度。同时,传感器节点之间可以进行无线通信,且每个节点都知道其邻居节点(距离小于通信距离)的位置。

1.2 目标运动模型

假设有 K 个目标在监测区域里运动,其中 K 已知且固定不变。各个目标之间的运动相互独立,第 k 个目标在 t 时刻的状态为 $X_{k,t} = [x_{k,t}, y_{k,t}, \dot{x}_{k,t}, \dot{y}_{k,t}]$, $k=1, 2, \dots, K$, 状态方程为:

$$X_{k,t} = f(X_{k,t-1}, w_{k,t-1}) \quad (1)$$

其中 $f(\cdot)$ 为状态转移函数,可以为线性或非线性函数, $w_{k,t-1}$ 为第 k 个目标的状态噪声且其概率分布已知。

1.3 测量模型

我们假设所有的传感器为声学传感器,传感器的观测为来自多个目标的声音信号与环境噪声的叠加,且各个传感器的观测是相互独立的。在时刻 t , 位于 $r_s = [x_s, y_s]$ 的传感器 s 接受到的声音信号能量为^[9]:

$$y_{s,t} = g_s(X_t) + v_{s,t} = \sum_{k=1}^K \frac{\Psi_k}{\|r_s - l_{k,t}\|} + v_{s,t} \quad (2)$$

其中 $g_s(\cdot)$ 表示第 s 个节点测得的来自目标的声音能量函数; $X_t = [X_{1,t}^T, X_{2,t}^T, \dots, X_{K,t}^T]^T$ 为 K 个目标的联合状态; Ψ_k 为单位距离上测得的来自目标 k 的声音能量; $l_{k,t} = [x_{k,t}, y_{k,t}]$ 为 t 时刻目标 k 的位置;

$$\|r_s - l_{k,t}\| = \sqrt{(x_s - x_{k,t})^2 + (y_s - y_{k,t})^2} \quad (3)$$

为 r_s 和 $l_{k,t}$ 之间的欧几里得距离; α 为损耗因子,它由信号的传播介质决定,可以认为它是一直不变的,

并且对于所有传感器是相等的; $v_{s,t}$ 为 t 时刻,传感器 s 接收到的噪声强度,其独立于 $w_{k,t}$, $k=1, 2, \dots, K$, 当用于求平均能量的时间窗长度 T 足够长时,可以认为其服从于均值为 u_v 、方差为 σ_v^2 的正态分布^[9]。

2 分布式多目标跟踪算法

在 WSN 中,节点密度一般较大,如果所有的节点进行观测的话不仅会造成节点资源的浪费,而且容易导致通信冲突,所以节点一般处于休眠状态,只有当收到其它节点的激活消息时才转换为激活状态,开始参与观测。另外,由传感器的观测方程可以看出,当目标距离传感器较远时,传感器收到的来自目标的信号强度将很小,导致信噪比很小,其观测信息对目标状态的更新作用将很小。因此,在跟踪的过程中,每个时刻我们根据各个目标的状态信息在目标周围选择适当的节点参与观测。在 WSN 监测区域有多目标存在时,如果目标之间的距离较远,则目标附近的传感器收到的其他目标的信号很弱,可以忽略不计,因此只用进行单目标跟踪。只有当目标之间的距离较近时,目标附近的传感器收到的其他目标的信号才比较强,才认为其测量是来自多个目标的信号,需要进行多目标的联合跟踪。因此我们要建立一定的规则来判定是否要进行多目标联合跟踪。基于以上的分析,我们进行分布式多目标跟踪算法的基本思路为:每一时刻为每一目标选择一个主节点,主节点运行对应于该目标的粒子滤波,主节点根据一定的规则选择适当的从节点参与观测,同时根据一定的规则判断各个目标之间的距离,如果某一目标与其它目标距离都很远,则只进行单目标跟踪,如果与其他某些目标较近,则目标主节点通过相互交换目标状态预测信息,各个主节点用多个目标的状态信息来计算当前目标的粒子权重,实现分布式多目标跟踪。在多个目标联合跟踪时,对应于各目标的主节点通过无线通信方式交换各自目标的状态信息。下面进行详细介绍。

2.1 主节点的选择

初始阶段我们可以根据各个目标的先验信息,指定离每个目标最近的节点为其主节点。在跟踪的过程中,当前主节点根据目标的预测状态选择离目标的预测位置最近的节点为下一时刻的主节点。

2.2 从节点的选择

在每一时刻,各个目标的主节点要选择一定的从节点参与观测。在选择从节点时,可以采用不同的规则,常用的规则有:

(1) 邻接点规则

邻接点规则是最简单的规则,即当前主节点选

择自己的所有邻居接点为从节点进行观测。

(2) 基于信息收益函数的规则

基于信息收益函数的规则利用信息收益函数和损失函数建立一个性能综合指标函数,利用性能综合指标函数选取簇内成员^[13]。常用的性能综合指标函数为:

$$f(\varphi_{Utility}, \varphi_{Cost}) = \varphi_{Utility} / \varphi_{Cost} \quad (4)$$

其中 $\varphi_{Utility}$ 表示信息收益函数,它反映节点所包含信息量的大小; φ_{Cost} 表示损失函数,它反映网络的能耗。损失函数一般取

$$\varphi_{Cost} = \exp(Hop(leader, node)) \quad (5)$$

其中 $Hop(leader, node)$ 为簇首到簇内成员的通讯跳数。其中常用的信息收益函数有最近邻(NN)、马氏距离(MD)、信息熵(Entropy)、互信息(MI)和相对熵等。具体计算方法见文献[13]。文献[13]在动态协同自组织算法下对不同的信息收益函数进行了分析与仿真,并给出了详细的性能评价。

2.3 多目标联合跟踪规则

只有当目标间的距离较近、相互影响时,多个目标之间才需要进行联合跟踪。由于是分布式跟踪,每个目标的状态信息是存放在不同的主节点上的,因此不能够直接判断各个目标之间的距离。由前面从节点的选择规则可知,从节点都是在主节点的附近。因此,我们可以利用主节点是否有共同的从节点来判断目标间的距离。具体思路如下:主节点根据上面的规则选择从节点,当一个从节点同时收到两个以上的主节点的消息时,即收到主节点 S_1, S_2, \dots, S_N 的消息,则它要将 $S_j, j=1, 2, \dots, N$ 且 $j \neq i$ 的信息发送给节点 S_i ,从而节点 S_i 知道本主节点上的目标要同其他 $N-1$ 个主节点上的目标进行联合跟踪。如果本主节点没有收到本目标与其他主节点的目标相关的信息,则本主节点对应的目标进行单目标跟踪。下面用一实例来说明。

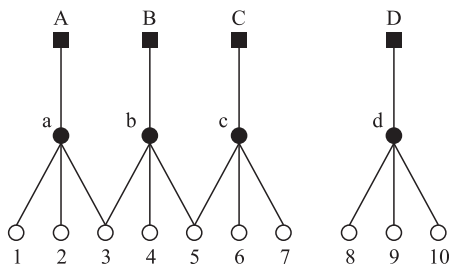


图1 多目标跟踪中节点分簇及多目标联合跟踪实例

如图1中,假设有四个目标分别为A、B、C、D,分别用黑方块表示,其对应的主节点分别为a、b、c、d,用黑圆圈表示。与各个目标主节点相连的空心圆表示相应目标的从节点。从图中可以看出节点3同时为

主节点a和b的从节点,所以在从节点的激活过程中节点3会同时收到主节点a和b的激活消息,则节点3将主节点a的信息发给主节点b,将主节点b的信息发给主节点a。同理,节点5将主节点b的信息发给主节点c,将主节点c的信息发给主节点b。则主节点a知道目标A要与目标B进行联合跟踪;主节点b知道目标B要和目标A、C联合跟踪;主节点c知道目标C要和目标B联合跟踪。主节点d同其它主节点没有共同从节点,从而目标D只需进行单目标跟踪。

2.4 主节点间的交互

当两个目标需要联合跟踪时,两个目标的主节点相互发送各自目标的状态预测信息给对方。在图1的情况下,主节点a要将目标A的状态预测信息发送给主节点b,主节点b要将目标B的状态预测信息发送给主节点a和c,主节点c要将目标C的状态预测信息发送给主节点b。

2.5 分布式多目标跟踪过程

由于观测方程高度非线性,因此,我们选择粒子滤波进行跟踪。整个分布式多目标跟踪过程如下:

(1) 初始化

在跟踪过程刚刚开始时,根据每个目标的先验信息选择离目标最近的节点作为各自目标的主节点,并根据各个目标的先验信息,在其对应的主节点上进行各自目标的初始化。

在主节点k上,其中 $k=1, 2, \dots, K$

For $m=1, 2, \dots, M$

$$X_{k,0}^m \sim p(X_{k,0}) \quad (6)$$

$$w_{k,0}^m = \frac{1}{M} \quad (7)$$

$$\hat{X}_{k,0} = \sum_{m=1}^M w_{k,0}^m X_{k,0}^m \quad (8)$$

For $t=1:T$

(2) 粒子集的产生

如果当前时刻对应于第k个目标的主节点 S_k 与上一时刻主节点相同,则直接获取新的粒子:

$$X_{k,t}^m \sim p(X_{k,t} | X_{k,t-1}^m) \quad (9)$$

否则,接受其上一时刻主节点传来的目标状态信息,即粒子集 $X_{k,t-1}^m, k=1, 2, \dots, M$,然后根据式(9)获取新的粒子。

(3) 选择从节点

各个目标的主节点根据从节点选择规则选择从节点参与观测,并将激活消息连同本身信息一起发送给从节点。

(4) 确定联合跟踪目标

当从节点收到主节点的消息后,将依据上文定

义的规则,向相应的主节点发送消息。各个主节点根据从节点反馈的信息确定与本节点上的目标进行联合跟踪的目标的主节点。

(5) 主节点交互

如果本地目标需要同其它目标联合跟踪,则将本地目标的状态预测信息发送给需联合跟踪的目标的主节点,同时接收对应的主节点的目标的状态预测信息。

(6) 权重更新

a) 多目标跟踪更新

假设当前第 k 个目标需要跟其它 N 个目标同时进行联合跟踪,则其他 N 个目标对应的主节点将其目标的状态预测信息发送给第 k 个目标的主节点,同时第 k 个目标的主节点将第 k 个目标的状态预测信息发送给其它 N 个目标对应的主节点。然后第 k 个目标的主节点进行以下运算:

将第 k 个目标的粒子与其它 N 个目标的粒子合成多目标联合状态粒子

$$\theta_{k,t}^m = [X_{k,t}^m, X_{1,t}^m, X_{2,t}^m, \dots, X_{N,t}^m]^T \quad (10)$$

其中 $X_{i,t}^m, i=1, 2, \dots, N$ 为与目标 k 联合跟踪的第 i 个目标的第 m 个粒子。

然后用多目标联合状态粒子进行权重的计算

$$\tilde{w}_{k,t}^m = p(y_{k,t} | \theta_{k,t}^m) \quad (11)$$

其中 $y_{k,t} = (y_{k,t}^1, y_{k,t}^2, \dots, y_{k,t}^{L_k})$ 为第 k 个目标的所有从节点观测信息的集合,其中 L_k 为目标 k 的从节点个数。则由传感器的观测模型可得

$$p(y_{k,t} | \theta_{k,t}^m) = \prod_{l=1}^{L_k} p(y_{k,t}^l | \theta_{k,t}^m) = \prod_{l=1}^{L_k} \varphi\left(\frac{y_{k,t}^l - g(\theta_{k,t}^m) - u_v}{\sigma_v}\right) \quad (12)$$

其中 $\varphi(\cdot)$ 为标准正态概率密度函数。

b) 单目标跟踪更新

如果第 k 个目标与其他目标相距较远,则只进行单目标跟踪。权重为

$$\tilde{w}_{k,t}^m = p(y_{k,t} | X_{k,t}^m) = \prod_{l=1}^{L_k} p(y_{k,t}^l | X_{k,t}^m) = \prod_{l=1}^{L_k} \varphi\left(\frac{y_{k,t}^l - g(X_{k,t}^m) - u_v}{\sigma_v}\right) \quad (13)$$

(7) 权重归一化

$$w_{k,t}^m = \frac{\tilde{w}_{k,t}^m}{K_t} = \frac{\tilde{w}_{k,t}^m}{\sum_{m=1}^{K_t} \tilde{w}_{k,t}^m} \quad (14)$$

(8) 状态估计

用求得的粒子权重和第 k 个目标的分状态粒子对第 k 个目标进行状态估计

$$\hat{X}_{k,t} = \sum_{m=1}^M w_{k,t}^m X_{k,t}^m \quad (15)$$

(9) 重采样

为防止退化现象的发生,采用重采样过程减少具有较低权值的粒子数目,增加具有较高权值的粒子数目。即根据当前粒子集和权重进行重采样,获得新的粒子集

$$\{X_{k,t}^m, w_{k,t}^m\} \rightarrow \{X_{k,t}^m, 1/M\} \quad (16)$$

(10) 下一时刻主节点选择

各个目标的主节点根据对应目标的状态预测信息选择下一时刻的主节点,如果下一时刻的主节点不是当前的主节点,则进行主节点切换,并将当前目标的状态信息传送给下一个主节点。否则,在本节点上循环。

当主节点需要进行切换时,当前目标的主节点需要将目标的当前状态信息发送给下一时刻主节点。当两个目标要进行联合跟踪时,两个目标的主节点要相互发送目标的预测状态信息。由于目标的状态信息和状态预测信息都是以粒子集的形式表示的,如果直接发送粒子集的话将会需要很大的通信量,为了减少通信量,我们可以采用高斯混合模型(GMM)对粒子集进行近似^[9],然后将 GMM 参数发送给另一个主节点,另一个主节点根据 GMM 参数重建粒子集。

3 计算机仿真

为了验证本文算法的有效性,我们利用 Matlab 进行了 Monte Carlo 仿真。我们假设 $S=100$ 个声学传感器均匀布设在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的区域内,坐标原点设在无线传感器网络覆盖区域的左下角(如图 2 所示),所有传感器的采样周期 $T_{\text{period}}=1 \text{ s}$,单位距离上测得的来自目标的信号强度 $\Psi=500$,损耗因子 $\alpha=2$,观测噪声为 $\delta_v=0.01$ 。节点的通信距离为 $C=30 \text{ m}$ 。监测区域有三个匀速运动目标。目标 1 的初始位置为 $(40 \text{ m}, 160 \text{ m})$,速度为 $(2 \text{ m/s}, -2 \text{ m/s})$;目标 2 的初始位置为 $(40 \text{ m}, 120 \text{ m})$,速度为 $(2 \text{ m/s}, 0)$;目标 3 的初始位置为 $(40 \text{ m}, 20 \text{ m})$,速度为 $(2 \text{ m/s}, 1 \text{ m/s})$ 。三个目标的系统状态噪声都为 $Q_w = \text{diag}\{[0.01, 0.01]\}$ 。

仿真中 Monte Carlo 仿真次数为 100 次,粒子数目 $N=1000$,目标初始状态服从正态分布,目标 1 的初始状态信息为 $\bar{x}_{1,0} = [40, 160, 2, -2]^T$, $\Xi_{1,0} = \text{diag}\{[1, 1, 0.01, 0.01]\}$;目标 2 的初始状态信息为 $\bar{x}_{2,0} = [40, 120, 2, 0]^T$, $\Xi_{2,0} = \text{diag}\{[1, 1, 0.01, 0.01]\}$;目标 3 的初始状态信息为 $\bar{x}_{3,0} = [40, 20, 2,$

$1]^T$, $\Xi_{3,0} = \text{diag}\{[1, 1, 0.01, 0.01]\}$ 。另外,在仿真中,因为我们主要是验证算法分布式结构的可行性,所以在仿真过程中,我们在选择从节点时,利用邻节点规则,以减少计算量。仿真结果如图2~5所示。

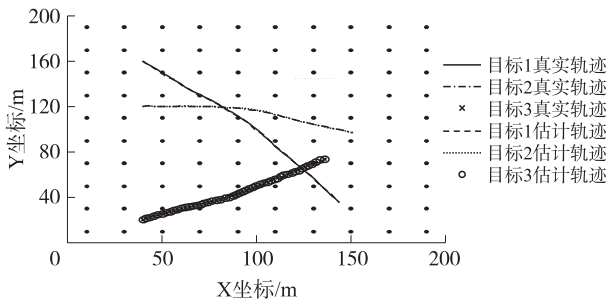


图2 目标真实轨迹和估计轨迹比较

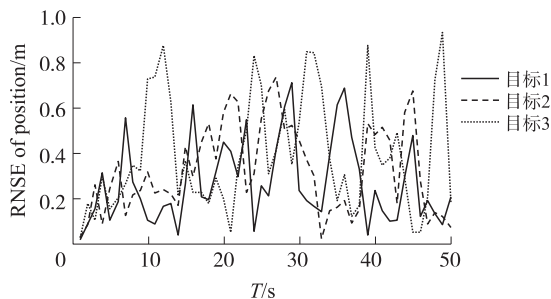


图3 目标位置估计均方根误差

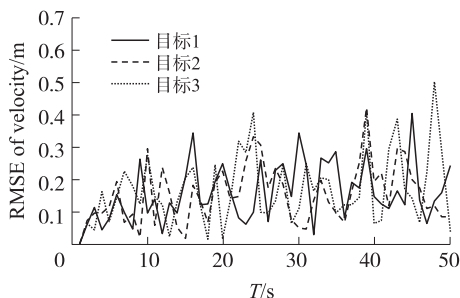


图4 目标速度估计均方根误差

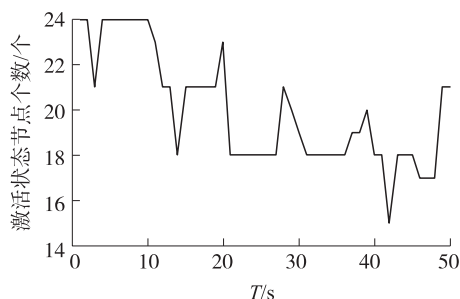


图5 激活节点个数

从图2~图4的仿真结果可以看出,我们的分布式多目标跟踪算法能够有效的对3个目标进行跟踪,具有较高的跟踪精度。

图5显示了在仿真过程中,每一时刻处于激活状态的节点个数情况,从仿真结果可以看出,由于采

用动态分簇结构,每一时刻只激活目标周围的节点,相对集中式算法要求所有节点处于激活状态,激活节点数目大大减少,节省了能量消耗,从而可以延长网络寿命。

另外,从仿真结果可知,当时间 $1 \leq t \leq 28$ 时,目标1和目标2联合跟踪,目标3进行单目标跟踪,当 $29 \leq t \leq 39$ 时,目标1要同目标2和目标3进行联合跟踪,目标2要同目标1联合跟踪,目标3也要同目标1进行联合跟踪。当 $40 \leq t \leq 45$ 时,目标1要同目标2和3联合跟踪,目标2要同目标1和3跟踪,目标3要和目标1和2联合跟踪。当 $46 \leq t \leq 50$ 时,目标1要同目标3联合跟踪,目标2要同目标3联合跟踪,目标3要同目标1和2联合跟踪。可见,在算法的执行过程中,算法能够自动根据目标间的距离远近决定目标是否需要联合跟踪,从而实现了真正的分布式多目标跟踪。

4 结论

由于无线传感器网络的资源有限,传统的集中式多目标跟踪算法在无线传感器网络多目标跟踪中受到限制。本文在声学传感器网络下,基于动态分簇的结构,提出了一种分布式多目标跟踪算法。算法利用声音信号强度与传播距离成反比的原理,只在目标的周围选择适当的节点参与观测,并且根据目标距离的远近来决定是否进行多目标联合跟踪。在跟踪的过程中,每个目标对应于一个粒子滤波,当目标之间的距离较远时,进行单目标跟踪,当目标之间距离较近相互影响时,各个主节点通过信息交换实现对多目标的分布式跟踪。仿真结果表明,本文算法能够有效的实现对多目标的分布式跟踪,在节省能量的同时能够保证跟踪精度。

参考文献:

- [1] Chee-Yee Chong, Kumar S P. Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges [J]. Proc. of the IEEE, 2003, 91(8):1247-1256.
- [2] Li D, Wong K D, Hu Y H, et al. Detection Classification and Tracking of Targets [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 3:17-29.
- [3] Zhao F, Liu J. Information-Driven Dynamic Sensor Collaboration for Tracking Applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2):61-72.
- [4] 周红波,邢昌凤,耿伯英,等.基于粒子滤波的二元无线传感器网络分布式目标跟踪研究[J].传感技术学报,2010,23(2):274-278.
- [5] 魏雅川,梁彦,陈延军,等.无线传感器网络自适应声音目标定位算法[J].传感技术学报,2010,23(3):418-422.

- [6] Chu M, Mitter S, Zhao F. Distributed multiple target tracking and data association in ad hoc sensor networks[C]//Proceedings of the 6th International Conference of Information Fusion, 2003:447-454.
- [7] Lei Chen, Cetin M, Willsky A S. Distributed Data Association for Multi-Target Tracking in Sensor Networks[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion, 2005:9-16.
- [8] Songhai Oh, Sastry S, Schenato L. A Hierarchical Multiple-Target Tracking Algorithm for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:2197-2202.
- [9] Sheng Xiaohong, Hu Yu-Hen. Distributed Particle Filter with GMM Approximation for Multiple Targets Localization and Tracking in Wireless Sensor Network [C]//Proceedings of 4th International Symposium on information Processing in Sensor Networks, 2005: 181-188.
- [10] Hu Yu Hen, Sheng Xiaohong. Dynamic Sensor Self-Organization for Distributive Moving Target Tracking [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2008, 51:161-171.
- [11] Vercauteren T, Wang X D. Decentralized Sigma-Point Information Filters for Target Tracking in Collaborative Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8):2997-3009.
- [12] Coates M. Distributed Particle Filters for Sensor Networks [C]//Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2004, (4):99-107.
- [13] 王睿. 面向目标感知的无线传感器网络自组织技术 [D]. 西北工业大学, 2007.



周红波(1984-),男,山西运城人,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络目标定位与跟踪方面的研究, hbzhou01@163.com;



邢昌凤(1957-),男,安徽芜湖人,教授,博士生导师,主要研究方向为舰载作战系统效能与运用研究。