

引用格式:胡新梅,张世仓.外辐射源无源定位目标航迹批处理算法[J].电光与控制,2018,25(6):7-10,51. HU X M, ZHANG S C. A batch algorithm for passive locating and trajectory processing with external emitter[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):7-10, 51.

## 外辐射源无源定位目标航迹批处理算法

胡新梅, 张世仓

(中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所,江苏 无锡 214063)

**摘要:**针对外辐射源无源定位问题,提出一种多目标定位和航迹处理并行执行的批处理算法。首先根据几何原理对外辐射源测量进行单帧定位;然后利用定位值进行多个定位目标的航迹起始;之后利用改进的多假设算法(AMHT)进行测量点迹与航迹的数据关联;最后利用推导的关于到达角和距离差的扩展卡尔曼滤波(DT-EKF)对航迹进行维持。为了验证所提算法的功能和性能,给出了仿真示例,仿真结果表明,提出的批处理算法能同时实现多目标状态定位和航迹处理的功能,获得比传统算法更高的定位性能。

**关键词:** 目标定位; 航迹处理; 无源定位; 到达角度和时差; 批处理; AMHT; DT-EKF

中图分类号: V279; TP249

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.002

## A Batch Algorithm for Passive Locating and Trajectory Processing with External Emitter

HU Xin-mei, ZHANG Shi-cang

(Leihua Electronic Technology Research Institute, AVIC, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** To solve the problem of passive locating of external emitter, a batched processing algorithm is proposed for the parallel execution of multi-target locating and trajectory processing based on Direction of Arrival (DOA) and Time Difference of Arrival (TDOA). First, initial locating states of the external emitter are evaluated according to the geometry theory. Then, the trajectories are initialized according to the valid locating value. After that, the Advanced Multiple Hypotheses Tracking (AMHT) algorithm is designed for the data association between measurement trace points and trajectories of targets. The Extended Kalman filter is deduced along with the measurements from DOA and TDOA (DT-EKF), which is used for maintaining the trajectory. Simulation results show that the proposed algorithm can perform simultaneously locating and trajectory processing for multiple targets, and acquire higher locating performance than that of the traditional methods.

**Key words:** target locating; trajectory processing; passive locating; DOA and TDOA; batched processing; Advanced Multiple Hypotheses Tracking (AMHT); DT-EKF

### 0 引言

在无源定位算法方面,专家学者们进行了广泛的研究<sup>[1-11]</sup>,提出了多种算法。文献[2]在增加一个距离差方程的基础上提出了一种线性化方程的方法,提高了定位精度的同时降低了计算量;文献[4]考虑了联合角度和时差信息构建测量的概率密度并用牛顿迭代法求得目标位置估计的最大似然解;文献[5]利用距离、速度、角度不同的组合策略来评估带来的不同定

位精度;文献[7]提出了一种 K-means 聚类的方法,有效地消除了虚假交叉点,从而提高了多站交叉定位的性能和鲁棒性;文献[8]提出的算法在保持原有均方误差的前提下能显著降低估计偏差,其定位偏差与最大似然估计器相当;文献[9]提出了在最小二乘基础上加滑窗处理的无源定位算法,证明了对目标状态估计的无偏性;文献[10]提出了一种鲁棒递推最小二乘定位算法,通过降低异常观测数据的权值来提高定位的准确性;文献[11]提出了一种改进的加权最大似然估计法,提高了多站测向交叉定位精度。

以上的定位算法在各自的使用背景下都能很好地解决单个目标的状态定位问题,然而在实际背景下,由于作战需求,经常是多个目标同时飞行,对单个目标的

收稿日期:2017-04-11

修回日期:2017-08-12

基金项目:航空科学基金(2015ZC07004)

作者简介:胡新梅(1977—),女,河南柘城人,硕士,高工,研究方向为搜索监视雷达总体设计及雷达数据处理。

状态定位已不能满足实际需要;另外,在对目标实现空空警戒时需要连续不断地跟踪目标,监视其运动趋势以完成目标的态势评估,这就需要获取被定位目标的航迹信息;进一步地,由于传感器的热噪声和检测门限的原因,外辐射源等测量信息中不可避免地含有虚假测量,这就存在测量点迹和目标航迹间的数据关联问题。因此,在实际使用中,不仅要解决目标的状态定位问题,还需要解决多个被定位目标的运动趋势以及测量点迹和目标航迹间的数据关联问题。

## 1 问题描述

1个发射站称为固定或运动的外辐射源,1个接收站在一段时间内可以测量出外辐射源直达波和多个目标回波的多个时间差以及多个目标回波的多个到达方向,形成多对时差和测向数据,对多组时差值和测向数据通过合适的处理算法解算出多个目标的状态信息及与之对应的航迹信息,用于实现多个目标态势信息的感知。

考虑  $M$  个目标,其中第  $i$  个目标的状态方程为

$$\xi_k^i = F_k^i \xi_{k-1}^i + a^i \omega_{k-1}^i \quad (1)$$

式中:  $\xi_k = [x_k \ y_k \ z_k]^T$  是  $3n_x \times 1$  的目标在  $t_k$  时刻的状态向量,  $n_x$  是在每个笛卡尔坐标轴上的目标状态向量维数,  $x_k = [x_k \ \dot{x}_k \ \ddot{x}_k]^T$ ,  $y_k = [y_k \ \dot{y}_k \ \ddot{y}_k]^T$ ,  $z_k = [z_k \ \dot{z}_k \ \ddot{z}_k]^T$ , 分别代表目标在 3 个坐标轴上的位置、速度和加速度;  $F_k$  是  $3n_x \times 3n_x$  的离散化目标状态转移矩阵;  $a$  是  $3n_x \times 1$  的过程噪声向量;  $\omega_k$  假定是方差为  $E[\omega_k \omega_k^T] = Q_k$  的零均值高斯白噪声。

第  $i$  个目标的测量模型为

$$z_k^i = H_k^i \xi_k^i + b^i v_k^i \quad (2)$$

相似地,  $b$  是  $n_z \times 1$  的测量噪声向量;  $v_k$  是方差为  $E[v_k v_k^T] = R_k$  的零均值高斯白噪声。  $\omega_k$  和  $v_k$  是相互独立的,也就是对所有的  $m$  和  $n$ ,  $E[\omega_m v_n^T] = 0$ 。  $H_k$  是测量矩阵。

由式(1)和式(2)可知,要在每个  $k$  时刻获得目标的状态信息,必然要先获取目标  $k-1$  时刻的状态和  $k$  时刻的测量。当  $k=1$  时,需要对目标的初始状态进行定位估计;在之后的采样周期中,为了获得目标的状态信息需要用测量来更新目标的状态。当无源雷达接收到外辐射源信号和外辐射源经过目标反射到雷达的测量回波后经过信号处理的解算,得到目标的测量信息。雷达接收的热噪声、外部背景噪声和多个目标测量会给无源定位航迹处理带来点迹和航迹间的数据关联问题。

## 2 批处理算法

### 2.1 定位算法

如图 1 所示,利用几何关系来计算目标的坐标信

息。其中,  $T_r$  表示外辐射源,由于外辐射源的经纬度是已知变量,可以计算出它相对于主站的直角坐标向量  $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ ,假设目标离主站的距离为  $R$ ,根据已知目标方位角  $\theta$ ,可以对初始测量进行定位,计算出目标的位置向量为  $[x \ y \ z]^T$ ,则根据外辐射源定位原理可以得出

$$\begin{cases} R + \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} = R_r + \Delta R \\ \theta = \arctan(y/x) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $R_r$  是外辐射源到主站的距离;  $\Delta R$  是外辐射源到目标再从目标到主站与外辐射源到主站的距离差。  $R_r$  和  $\Delta R$  是两个已知变量。在外辐射源实际定位中,由于  $z$  向对距离差  $\Delta R$  的影响很微弱,可以从式(3)中忽略,在初始定位计算过程中直接赋予  $z$  向一个初始值。这样式(3)可以简化为

$$\begin{cases} R + \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} = R_r + \Delta R \\ \theta = \arctan(y/x) \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)变形可得

$$R = \frac{\Delta R^2 + 2R_r \Delta R}{2[R_r + \Delta R - (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)]} \quad (5)$$

根据此式即可算出目标距离  $R$ 。根据目标距离  $R$  和目标方位角  $\theta$  可以计算出目标的位置向量信息  $[R \cos \theta, R \sin \theta, \eta]^T$ ,  $\eta$  可以设定一个初始值。计算出的目标位置向量信息可以作为滤波时目标的初始状态信息。

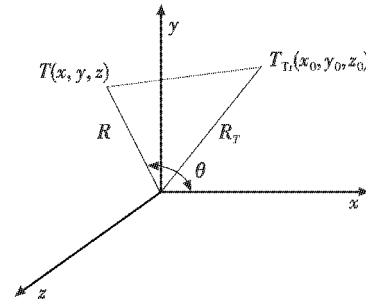


图 1 外辐射源定位几何原理图

Fig. 1 Geometric principle of external emitter positioning

### 2.2 DT-EKF 算法

由图 1 可知,  $k$  时刻第  $i$  个外辐射源测量值  $z_k^i = [\Delta R_{L,k}^i \ \theta_k^i]^T$ , 分别表示  $k$  时刻第  $i$  个距离差和目标到达角,目标的状态向量为  $\xi_k^i$ 。基于到达角和距离差的扩展卡尔曼滤波 DT-EKF 为目标状态向量的预测值在测量处的偏导。第  $i$  个目标航迹的测量转换矩阵为

$$h(\xi_k^i) = \begin{bmatrix} h_{\Delta r}(\xi_k^i) \\ h_{\theta}(\xi_k^i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R_{L,k}^i \\ \theta_k^i \end{bmatrix} \quad (6)$$

那么外辐射源定位测量方程的 Jacobin 矩阵为

$$H_k^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{\Delta r}(\xi_k^i)}{\partial X_k} \\ \frac{\partial h_{\theta}(\xi_k^i)}{\partial X_k} \end{bmatrix}_{X_k = X_{k-1}} = \begin{bmatrix} H_{lk}^i \\ H_{rk}^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,

$$\mathbf{H}_{lk} = \begin{bmatrix} \frac{x_{\text{Tar}}}{R_{\text{TarMain}}} + \frac{x_{\text{Tar}} - x_{\text{SrcMain}}}{R_{\text{SrcMain}}} & 0 & 0 & \frac{y_{\text{Tar}}}{R_{\text{TarMain}}} + \frac{y_{\text{Tar}} - y_{\text{SrcMain}}}{R_{\text{SrcMain}}} & 0 & 0 & \frac{z_{\text{Tar}}}{R_{\text{TarMain}}} + \frac{z_{\text{Tar}} - z_{\text{SrcMain}}}{R_{\text{SrcMain}}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_{rk} = \begin{bmatrix} -\frac{y_{\text{Tar}}}{\sqrt{(x_{\text{Tar}})^2 + (y_{\text{Tar}})^2}} & 0 & 0 & \frac{x_{\text{Tar}}}{\sqrt{(x_{\text{Tar}})^2 + (y_{\text{Tar}})^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $[x_{\text{SrcMain}} \ y_{\text{SrcMain}}]$  表示辐射源相对于主站的位置信息。

### 2.3 改进的 MHT 数据关联算法

MHT 的关键点在于延迟决策和假设分枝<sup>[12]</sup>, 传统 MHT 仅根据“统计距离”值  $d^2$ <sup>[13]</sup> 的大小进行假设分枝, 根据值的大小进行不同的假设分枝。然而, 在实际系统中, 目标雷达横截面积 (RCS) 的闪烁易导致目标测量回波信号的连续性降低, 当连续多个采样周期没有目标的回波测量时, 采用常规 MHT 跟踪算法的目标航迹易被虚假测量拉偏, 这是因为目标状态转移方程会随着外推时间的增加而增加, 从而预测协方差矩阵增加, 同样信息协方差矩阵会成指数型增加, 当残差向量中元素的绝对值很大时, 也会得到一个较小的  $d^2$ 。在传统的多假设中, 当  $d^2$  小于一个阈值门限时不会产生多假设分枝, 却会出现判定测量属于航迹的候选回波这种“病态”情况。

为了杜绝这种“病态”的情况, 提出了多维度假设分枝的方法, 从多个测量维度上来判断是否需要分枝而不纯依靠这个“统计距离”值。具体到外辐射源无源定位上就是除了根据“统计距离”值的大小之外, 还根据距离差、到达角的输入向量与航迹预测的距离差和到达角的状态向量的差值大小进行航迹的假设分枝, 从而形成多个维度信息的多假设数据关联算法来解决外辐射源无源定位航迹和测量点迹之间的数据关联问题。

### 2.4 批处理算法步骤

提出的批处理算法, 从功能上来说就是同时完成多个外辐射源目标的状态定位和航迹维持, 从而及时上报多个目标的批号和定位结果。从前面的分析来看, 所提批处理算法的步骤如下。

1) 起始定位航迹。采用几何定位算法对测量值进行目标定位值的解算, 然后根据结果起始定位目标航迹。

2) 关联判断。当有新的外辐射源测量时, 根据改进的 MHT 判断是否进入了已建立航迹的波门; 当没有进入波门时, 则进行步骤 1) 的操作, 否则进行航迹假设分枝操作。

3) 改进的假设分枝。根据改进的 MHT 的操作步骤进行假设分枝处理、聚类生成、假设生成、主要航迹选择、帧剪枝等操作。

4) 对已有测量更新的航迹根据 DT-EKF 算法进行航迹的状态更新, 否则进行航迹状态的外推。

5) 航迹输出。通过主要航迹和输出航迹之间的关联关系确定外辐射源定位航迹的输出。

当进入下一个时间周期时, 回到步骤 1) 进行循环操作。

## 3 仿真分析与讨论

### 3.1 仿真场景

为了评估所提算法的批处理性能, 构建了仿真场景。在这个仿真场景中, 既有交叉飞行的目标又有分离飞行的目标, 既有匀速运动的目标又有机动运动的目标, 如图 2 所示。假定无源定位系统中的外辐射源和主站固定不变, 首先根据目标运动轨迹、外辐射源位置和主站位置计算出目标相对于主站的到达角以及外辐射源到达目标再到主站和外辐射源到达主站的距离差作为定位测量的真值, 然后在真值的基础上加上高斯白噪声, 距离差和到达角测量噪声标准差分别为 200 m 和 0.01 rad。航迹波门为 11.34、帧剪枝数目设为 6、距离差和到达角上多维分枝的初门限分别为 2000 m 和 0.1 rad。

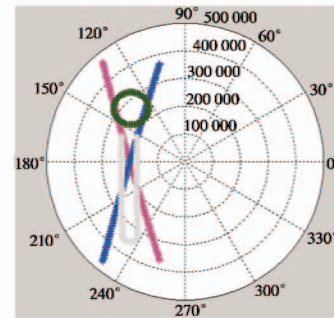


图2 目标运动的极坐标图

Fig.2 Polar coordinates of target motion

外辐射源位置  $[-46\ 214, -53\ 359, 820]$ , 目标 1 到目标 4 的初始向量分别为  $[-298\ 620, 361\ 750, 9850]$ ,  $[-298\ 590, -362\ 750, 9850]$ ,  $[-257\ 340, 199\ 720, 9850]$ ,  $[-174\ 160, 95\ 230, 9850]$ 。目标 1 和目标 2 在初始时刻就进入外辐射源无源雷达的探测视野直到仿真结束时的第 3000 s, 目标 1 的  $x$  向速度  $V_x^1 = 69\ \text{m/s}$ ,  $y$  向速度  $V_y^1 = -240\ \text{m/s}$ , 目标 2 的  $x$  向速度  $V_x^2 = 69\ \text{m/s}$ ,  $y$  向速度  $V_y^2 = 240\ \text{m/s}$ ; 目标 3 在第 200 s 开始进入探测视野, 第 3000 s 退出探测视野, 水平转弯角速率为 0.008

rad/s;目标4在第500 s开始进入探测视野,在第2500 s退出外辐射源雷达系统的探测视野,目标4在第1400 s之前的 $x$ 向速度 $V_x^4=2.5$  m/s, $y$ 向速度 $V_y^4=-413.9$  m/s,1401~1600 s进行角度为0.008 rad/s的水平转弯运动,1601~2500 s $x$ 向速度 $V_x^4=-2.5$  m/s, $y$ 向速度 $V_y^4=415.3$  m/s。单次探测概率 $p_D=0.5$ ,采样周期 $T_s=1$  s。

### 3.2 仿真结果及讨论

进行了100次蒙特卡罗仿真,为了节省篇幅,仿真结果仅画出被定位目标的极坐标航迹曲线,如图3所示。

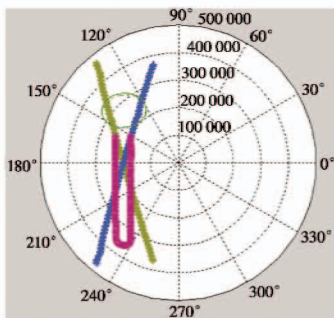


图3 定位目标航迹极坐标图

Fig. 3 Located trajectories of targets

在每个采样周期,仿真产生的含有噪声的距离差和到达角作为批处理算法的输入。按照批处理算法的流程对输入测量进行关联判断、假设分枝、主要航迹选择、状态更新和航迹输出;在航迹输出端进行目标状态的坐标变换,由直角坐标系转到极坐标系。目标定位信息与航迹信息是同一帧获得。航迹仅在起始时进行定位,航迹起始后不再通过定位获得目标的状态信息,而是通过批处理技术实现目标状态向量的计算和目标航迹的获取。目标定位性能采用距离定位误差绝对值的百分比进行衡量,也就是对所提算法与传统外辐射源无源定位算法获得的定位距离与仿真距离真值误差百分比进行统计。限于篇幅,仅画出目标1的定位性能对比结果,如图4所示。

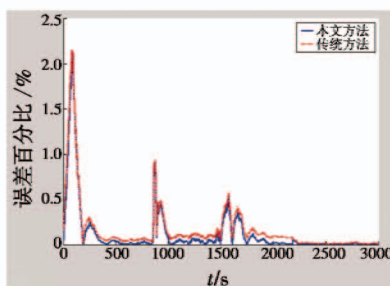


图4 目标1航迹定位误差百分比对比图

Fig. 4 Error percentage of target 1

本文所提批处理算法和传统算法的目标运动学模型皆为匀速运动模型,策动和测量噪声皆相同。

由图4可知,批处理算法对目标定位误差百分比

低于传统的外辐射源无源定位算法。这是因为批处理算法在航迹起始后通过改进的MHT数据关联算法可以实现外辐射源测量和目标航迹的直接数据关联,然后通过DT-EKF算法进行滤波输出;直接关联后再进行滤波,避免了定位过程带来的误差;改进的MHT可以从多个维度进行分枝假设,这样定位航迹关联概率会提高,定位航迹获得测量更新的次数会有效地增加,信息利用更加充分;DT-EKF可以有效地对非线性测量进行滤波和状态估计;而传统外辐射源无源定位算法在定位过程中已经引入了定位误差,而且还需要额外地引入方法来形成定位目标航迹;批处理算法可以在同一个采样周期内完成目标状态的定位和目标航迹的形成,综合起来批处理算法的性能要优于传统方法。

在工程实践中,由于外辐射源和主站的信息通常是用经纬高来表征的,而目标状态向量的定位估计通常是在直角坐标系下进行描述的,因此还需要进行相应的坐标变换操作;为了增加多目标状态定位的精度,可以采用以DT-EKF为滤波器的交互式多模估计器完成对定位目标状态的估计,同时,为了有效地管理定位目标的航迹,需要添加航迹终结机制实现多个定位航迹长时间外推时的删除。

## 4 结论

针对外辐射源无源定位问题,提出了一种定位和航迹并行处理的批处理算法。首先,给出了几何定位方法,接着设计了针对外辐射源的DT-EKF滤波算法,最后提出了改进的MHT数据关联算法。仿真结果表明,提出的批处理算法对外辐射源无源多目标能够同时实现状态定位和航迹的维持;与传统定位算法相比,所提算法能够获得更高的目标定位性能。

## 参考文献

- [1] ZHONG Y, WU X Y, HUANG C S. Geometric dilution of precision for bearing-only passive location in three-dimensional space [J]. Electronics Letters, 2015, 51 (6): 518-519.
- [2] 刘爱东,杜亚杰. 基于TDOA的舰载机空间定位算法研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(9): 59-62.
- [3] WU P L, LI X X, ZHANG L Z, et al. Passive location using TDOA measurements from compass satellite illuminators [J]. Asian Journal of Control, 2015, 17 (2): 722-728.
- [4] 李晶,李冬海,赵拥军. 利用角度和时差的单站外辐射源定位方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2015, 40 (2): 227-232.
- [5] GABER A, OMAR A. A study of wireless indoor positioning

(下转第51页)

## 5 结论

本文在 D-S 证据理论框架下,提出了基于 Deng 熵理论的加权信度熵以度量信息不确定度。新的信度熵不仅包含了传统信度熵中 mass 函数所涉及的不确定信息,还建模了辨识框架的规模信息。据此,通过处理信息源中的更多信息,使得信息处理过程中的信息损失减少。随后,基于新的加权信度熵,提出了一种传感器冲突数据融合与目标识别方法。通过算例分析与实验结果比较,验证了本文方法的合理性和有效性。

### 参考文献

- [1] 张堃,周德云,王谦,等. 基于模糊决策树的机载多传感器智能管理方法[J]. 计算机应用,2011,31(12):3255-3257.
- [2] 王越,周德云,杨维,等. 多种异类传感器联合跟踪的异步航迹融合算法[J]. 弹箭与制导学报,2014,34(2):153-156.
- [3] 柳毅,高晓光,卢广山,等. 基于加权证据组合的多传感器目标识别[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(12):1475-1477.
- [4] 宋建辉,张俊,刘砚菊,等. 基于 LBP-PCA 的多传感器目标识别算法[J]. 火力与指挥控制,2017,42(2):60-63.
- [5] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2):325-339.
- [6] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton:Princeton University Press, 1976.
- [7] YANG Y, HAN D. A new distance-based total uncertainty measure in the theory of belief functions[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 94:114-123.
- [8] SONG Y, WANG X, LEI L, et al. Uncertainty measure for interval-valued belief structures[J]. Measurement, 2016, 80:241-250.
- [9] DENG Y. Deng entropy[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2016, 91:549-553.
- [10] DENG Y, SHI W, ZHU Z, et al. Combining belief functions based on distance of evidence[J]. Decision Support Systems, 2004, 38(3):489-493.
- [11] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1):1-9.
- (上接第 10 页)
- based on joint TDOA and DOA estimation using 2-D matrix pencil algorithms and IEEE 802. 11ac[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5):2440-2454.
- [6] WANG H, WANG J, ZHONG L, et al. Mismatched filter for analogue TV-based passive bistatic radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(5):573-581.
- [7] 孙鹏,熊伟. 测向交叉定位系统中的 K-means 聚类融合算法[J]. 电光与控制,2016,23(10):36-40.
- [8] 张杰,蒋建中,郭军利. 基于两步最小二乘定位的偏差改进算法[J]. 航空学报,2016,37(2):695-705.
- [9] 关欣,陶李,衣晓. 滑窗式无偏多平台无源定位算法[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(9):1981-1986.
- [10] 莫成坤,陈树新,吴昊,等. 基于抗差估计的三维测向无源定位算法[J]. 电光与控制,2015,22(2):22-26.
- [11] 宗军君,崔逊学. 多站测向交叉定位的加权最大似然估计算法及其精度分析[J]. 电光与控制,2015,22(11):11-13.
- [12] WERTHMANN J. A step-by-step description of a computational efficient version of multiple hypothesis tracking[C]//SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, 1992:288-300.
- [13] BLACKMAN S, POPOLI R. Design and analysis of modern tracking systems[M]. London:Artech House Publishers, 1999.
- (上接第 38 页)
- [6] CHOI I H, PAK J M, AHN C K, et al. New preceding vehicle tracking algorithm based on optimal unbiased finite memory filter[J]. Measurement, 2015, 73:262-274.
- [7] PAK J M, AHN C K, SHMALIY Y S, et al. Switching extensible FIR filter bank for adaptive horizon state estimation with applications[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3):1052-1058.
- [8] SHMALIY Y S, SIMON D. Iterative unbiased FIR state estimation;a review of algorithms[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 113(1):1-16.
- [9] SHMALIY Y S. An iterative Kalman-like algorithm ignoring noise and initial conditions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(6):2465-2473.
- [10] KIM P S, LEE M E. A new FIR filter for state estimation and its applications[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2007, 22(5):779-784.
- [11] SHMALIY Y S, KHAN S, ZHAO S Y. Ultimate iterative UFIR filtering algorithm[J]. Measurement, 2016, 92:236-242.