

# 雷达微弱目标探测的改进检测前跟踪算法

樊玲<sup>1,2</sup>, 张晓玲<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 乐山师范学院物理与电子工程学院 四川 乐山 614004)

**【摘要】**针对基于Hough变换的检测前跟踪(TBD)算法存在大量虚假航迹,无法有效得到真实目标航迹的缺点,提出了一种基于修正Hough变换和粒子滤波相结合的TBD算法。该算法首先利用修正Hough变换估计目标航迹,得到目标可能存在的范围;再将该范围作为粒子滤波的先验信息,利用粒子滤波计算的权重构造似然比检测目标,进一步剔除虚假航迹,宣布检测结果的同时给出目标真实航迹。仿真实验表明,该算法能实现对雷达微弱目标的精确检测和跟踪。

**关键词** 修正Hough变换; 粒子滤波; 检测前跟踪; 微弱目标检测

中图分类号 TN975.51

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.06.006

## A Modified Track-before-Detect Algorithm for Radar Weak Target

FAN Ling<sup>1,2</sup> and ZHANG Xiao-ling<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology Chengdu 610054;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Leshan Normal University Leshan Sichuan 614004)

**Abstract** A novel track-before-detect (TBD) algorithm based on Modified Hough Transform (MHT) and Particle Filter (PF) is proposed to solve the shortcomings that the real target trajectories cannot be obtained for many false trajectories existing in the TBD algorithm based on Hough Transform. Firstly, possible trajectories are initiated by the MHT to obtain the region of location of the target, then this region as the prior knowledge is provided to the PF and the likelihood function is established for target detection by the weights which are calculated by the PF, at last the false trajectories are eliminated and the real target trajectories are given with detection results. Simulation results show the presented algorithm can implement accurate tracking and detection weak target.

**Key words** modified Hough transform; particle filter; track-before-detect; weak target detect

由于雷达反隐身和远程预警等领域的迫切需求,微弱信号探测技术已经成为学术界研究的一个热点<sup>[1]</sup>。检测前跟踪(TBD)技术是微弱信号探测的一种有效方法,是单次扫描数据时不设门限(或设低门限),不做检测,利用多帧的原始数据进行能量积累,在估计目标航迹的同时宣布检测结果。主要的TBD算法有多级假设检验方法<sup>[2]</sup>、动态规划的能量积累法<sup>[3]</sup>、基于Hough变换的直线航迹积累法<sup>[4]</sup>和粒子滤波算法<sup>[5-6]</sup>。

Hough变换最早应用于对图像进行边缘检测的图像处理领域。由于该算法能检测出被遮挡的直线,可其应用于雷达目标检测<sup>[4]</sup>中;文献[7]分析了Hough变换在航迹起始中的应用,当目标处于强杂波环境(如海面)或当目标远距雷达回波信号较弱时(如远程预警),Hough变换起始航迹会出现很多虚假航迹,所以单纯使用Hough变换很难实现对微弱目标的跟

踪和检测。粒子滤波算法是一种采用蒙特卡罗仿真的迭代贝叶斯滤波方法<sup>[8]</sup>,文献[6]将该算法用于雷达目标检测与跟踪,提出了一种基于粒子滤波的TBD算法,通过对一个二元变量的估计得到目标的出现概率,实现对单目标的跟踪与检测;文献[8]证明了当粒子数趋于无穷时粒子滤波算法得到的状态估计值等于其真实值,因此文献[6]采用30 000个粒子实现对微弱目标(信噪比为6 dB)的检测和跟踪。虽然粒子滤波算法的检测和跟踪效果好,但巨大的计算量导致粒子滤波的应用受到一定的限制。由于粒子滤波算法是基于贝叶斯理论的方法,因此,如果能获得准确的先验信息,就能在不影响算法性能的前提下减小粒子数目,在降低计算量的同时保证精确跟踪和检测。

基于此,本文将修正Hough变换<sup>[9]</sup>和粒子滤波算法相结合,提出了一种基于修正Hough变换和粒子

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-06-03

项目基金: 航空科学基金(20090180001)

作者简介: 樊玲(1977-),女,博士生,主要从事雷达信号获取与探测方面的研究。

滤波的新TBD算法。在该方法中,首先使用修正Hough变换起始目标航迹,得到目标初始位置范围,以该范围作为粒子滤波算法的先验信息,再采用粒子滤波算法进一步剔除虚假航迹,检测有无目标。

## 1 目标运动模型和测量模型

假设单个目标在  $x$ - $y$  平面内做匀速直线运动,其状态转移方程为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{x}_k = [x_k \ \dot{x}_k \ y_k \ \dot{y}_k]^T$ ;  $[x_k, y_k]$  表示  $k$  时刻目标在  $x$ 、 $y$  方向的坐标位置;  $[\dot{x}_k, \dot{y}_k]$  表示  $k$  时刻目标在  $x$ 、 $y$  方向的速度;  $\mathbf{w}_k$  为过程噪声;  $\mathbf{F}$  为状态转移矩阵, 定义为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $T$  为采样周期。假设过程噪声  $\mathbf{w}_k$  为零均值高斯噪声, 其协方差矩阵为:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_s T^3 / 3 & q_s T^2 / 2 & 0 & 0 \\ q_s T^2 / 2 & q_s T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_s T^3 / 3 & q_s T^2 / 2 \\ 0 & 0 & q_s T^2 / 2 & q_s T \end{bmatrix} \quad (3)$$

本文的雷达测量模型采用文献[10]的模型。雷达对整个监视区域产生一系列的二维图像, 每一帧二维图像表示不同时刻的测量数据, 由  $n \times m$  个分辨单元组成, 每一分辨单元  $(i, j)$  对应一个矩形区域  $\Delta_x \times \Delta_y$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。当  $x=38.6$ ,  $y=42$ ,  $\Delta_x = \Delta_y = 1$ ,  $\Sigma = 0.7$ ,  $\sigma^2 = 1$ , 且目标信噪比为 20 dB 时, 本文使用的仿真数据实例如图1所示。

以  $z_k^{(i,j)}$  表示时刻  $k$  分辨单元  $(i, j)$  的强度测量数据, 有:

$$z_k^{(i,j)} = \begin{cases} n_k^{(i,j)} & \text{没有目标} \\ h^{(i,j)}(\mathbf{x}_k) + n_k^{(i,j)} & \text{有目标} \end{cases} \quad (4)$$

式中,

$$h^{(i,j)}(\mathbf{x}_k) = \frac{\Delta_x \Delta_y I_k}{2\pi \Sigma^2} \times \exp\left(-\frac{(\Delta_x i - x_k)^2 + (\Delta_y j - y_k)^2}{2 \Sigma^2}\right)$$

表示传感器的点扩展函数;  $\Sigma^2$  为已知参数, 表示由传感器引入的模糊程度;  $n_k^{(i,j)}$  为零均值方差  $\sigma^2$  的独立高斯噪声。  $k$  时刻的所有测量数据表示为:

$$z_k = \{z_k^{(i,j)} \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$$

本文信噪比的定义采用目标峰值信噪比,  $\text{SNR} = 20 \lg(I_k / \sigma)$ 。雷达对整个监视区域产生的从 1 时刻到  $k$  时刻的完整测量数据集合表示为:  $Z_k =$

$\{z_l \mid l = 1, 2, \dots, k\}$ 。

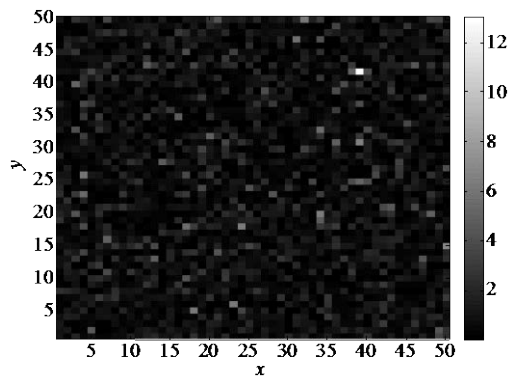


图1 仿真的单帧测量数据

## 2 算法描述

本文提出的基于修正Hough变换和粒子滤波的TBD算法主要包括2个步骤: 1) 采用修正Hough变换在强杂波环境中起始航迹, 估计出目标的大概位置范围; 2) 利用粒子滤波实现精确跟踪和检测。

### 2.1 航迹起始

修正Hough变换是对Hough变换的改进算法, 具体算法见文献[9,11]。修正Hough变换充分考虑了目标的运动学信息, 因此运算量较Hough变换小, 航迹起始时使用的帧数较少。该算法主要利用杂波和目标运动特性的不同, 将3~5帧测量数据中满足直线条件的点迹找出, 宣布航迹。修正Hough变换应用于微弱信号探测的TBD技术, 为了保证微弱目标航迹能被检测, 对于每一帧测量数据必须采用低门限以保证微弱信号能通过该门限, 即以牺牲虚警率保证检测概率。采用第1节的目标运动模型和测量模型, 产生4帧数据, 目标分别位于  $(45.2, 40.4)$ 、 $(43.6, 39.5)$ 、 $(42, 38.6)$  和  $(40.5, 37.8)$  处, 信噪比为 6 dB。采用虚警概率  $P_{fa} = 1.0 \times 10^{-3}$  对单帧数据设计门限, 此时杂波点少但目标点迹无法通过门限, 导致后继算法失效, 如图2所示。因此必须降低门限, 采用较大的虚警概率, 如  $P_{fa} = 0.1$ , 以保证目标点迹通过, 如图3所示。此时, 单帧数据中杂波非常密集。

将4帧过门限后点迹叠加, 如图4所示。此时目标航迹完全淹没在杂波中, 用肉眼无法判断。对该4帧过门限后点迹采用修正Hough变换进行航迹起始, 结果如图5所示。从图5可看出, 目标真实航迹在密集杂波环境中被起始, 但由于杂波点的随机性导致杂波点也满足修正Hough变换直线检测的条件, 因此由杂波点产生了3条虚假航迹, 修正Hough变换宣布检测到了4条航迹。要剔除虚假航迹, 保留真实航迹, 需进一步采用其他算法。由于修正Hough

变换宣布的航迹在目标真实航迹附近, 因此给出了目标航迹的范围, 可将该范围作为粒子滤波TBD算法的先验信息, 实现对微弱信号的跟踪和检测。

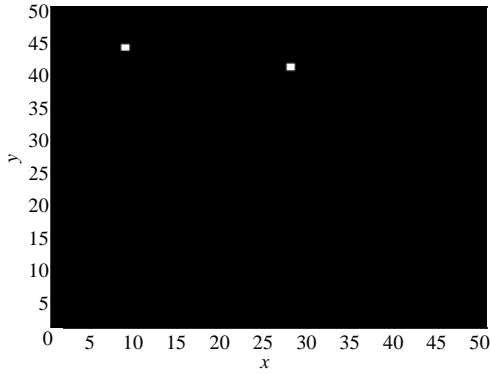


图2  $P_{fa} = 1.0 \times 10^{-3}$ , 第一帧数据过门限后点迹

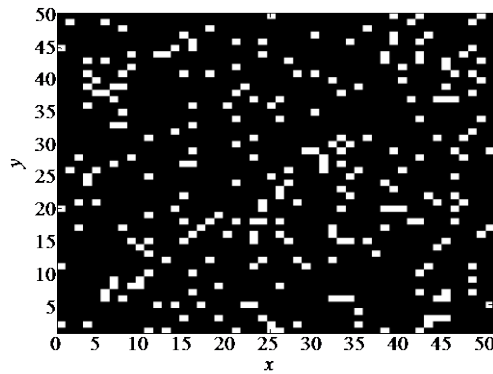


图3  $P_{fa} = 0.1$ , 第一帧数据过门限后点迹

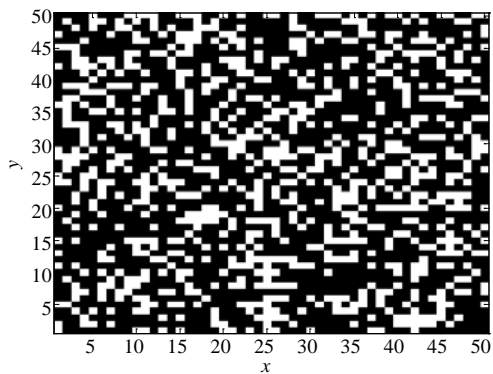


图4  $P_{fa} = 0.1$ , 四帧过门限后点迹叠加图

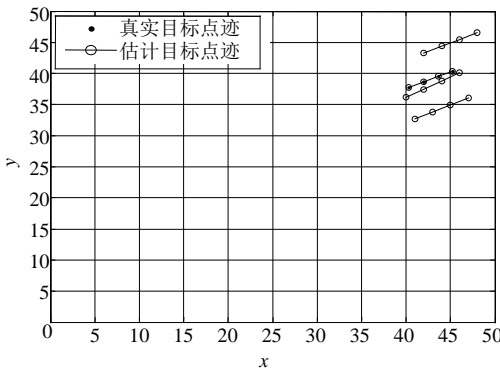


图5 对图4点迹使用修正Hough变换起始的航迹

### 2.2 跟踪和检测

使用修正Hough变换起始目标航迹, 得到目标航迹的范围后, 可利用粒子滤波算法剔除虚假航迹, 实现精确跟踪和检测。

粒子滤波TBD算法包括跟踪和检测两个部分。

跟踪阶段:

1) 初始化:  $k = 0$ , 将修正Hough变换得到的目标航迹范围作为先验信息, 在该范围内均匀分布  $N$  个粒子;

2) 预测: 根据式(1)预测粒子下一时刻的状态;

3) 更新: 对于给定的测量值  $z_k$ , 根据式(4)计算

权重  $\tilde{q}_k^i$ , 并归一化  $q_k^i = \frac{\tilde{q}_k^i}{\sum_{i=1}^N \tilde{q}_k^i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ;

4) 重采样: 根据权重  $q_k^i$  的大小, 对粒子进行重采样, 重采样后所有粒子的权重为  $1/N$ ;

5) 估计目标状态:  $\hat{x}_k = \sum_{i=1}^N N^{-1} x_k^i$ , 得到目标在  $x - y$  平面的精确位置和速度信息;

6)  $k = k + 1$ , 返回步骤2)。

以上的粒子滤波算法采用的是基本的粒子滤波算法。其他一些粒子滤波算法详见文献[8]。

检测阶段:

本文采用似然比检测(LRT)<sup>[12]</sup>:

$$L(z(l), z(l+1), \dots, z(m)) = \frac{p(z(l), z(l+1), \dots, z(m) | H_1)}{p(z(l), z(l+1), \dots, z(m) | H_0)} \approx \frac{\prod_{j=l}^m (\sum_{i=1}^N \tilde{q}^i(j))}{N^{m-l+1} \prod_{j=l}^m p_v(z(j))} \quad (5)$$

令  $k = 1, 2, \dots, k$ , 在  $k$  取整数值的每个时刻都要计算似然比, 第  $k$  时刻的判决准则为

$$L(z(l), z(l+1), \dots, z(m)) \begin{cases} \geq \gamma & H_1 \\ < \gamma & H_0 \end{cases}$$

如果似然比大于阈值, 表示有目标; 如果小于阈值, 表示无目标。阈值  $\gamma$  由给定的虚警概率  $P_{fa}$  计算得到。

粒子滤波TBD算法对目标虚假航迹进一步剔除, 采用似然比检测宣布目标存在的同时精确给出目标的航迹。

### 3 仿真实验

采用MATLAB按照第1节的目标运动模型和测量模型产生30帧仿真数据。雷达监视区域大小为  $50 \times 50$ , 每个分辨单元大小为  $\Delta_x \times \Delta_y = 1 \times 1$ , 雷达位

于坐标原点处,雷达扫描一帧的时间为1 s。第6帧时目标出现在位置(45.2,40.4)处,以(-1.6,-0.9)速度匀速向着雷达的方向航行。其他条件不变,改变目标信噪比,产生信噪比为0~12 dB的仿真数据。为了验证本文算法的有效性,将本文算法与粒子滤波TBD算法进行比较。在下面的仿真中将本文算法简称为MHT-PF,粒子滤波TBD算法简称为PF。

算法参数设置为:修正Hough变换采用4帧数据起始航迹,虚警概率 $P_{fa}=0.1$ ;粒子滤波采用2 000个粒子,虚警概率设为 $P_{fa}=1.0\times 10^{-3}$ 。采用两种算法进行100次蒙特卡罗仿真,得到的检测概率曲线如图6所示。

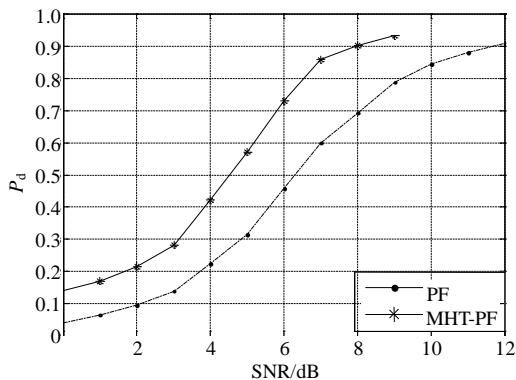


图6 两种方法的检测概率曲线

从图6可看出,采用MHT-PF算法,信噪比为8 dB是,检测概率达到90%;而PF算法当信噪比为12 dB时,检测概率才能达到90%,在该情况下,本文算法与PF算法相差4 dB,优于PF算法。

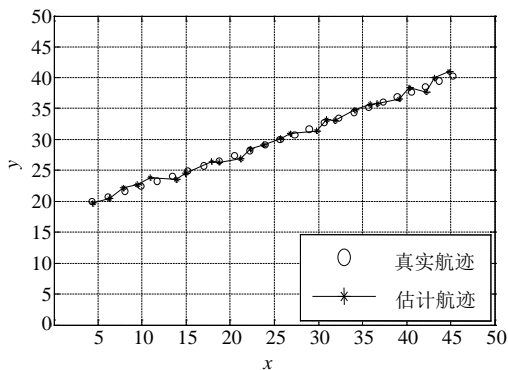


图7 真实的航迹和由MHT-PF估计的航迹

图7为当信噪比为8 dB时,采用MHT-PF算法得到的估计航迹。从图中可以看出,本文算法的跟踪效果更好。为了评价对目标的跟踪效果,定义位置均方根误差:

$$\text{RMSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_k - \hat{x}_k^i)^2 + (y_k - \hat{y}_k^i)^2} \quad (6)$$

式中,  $(x_k, y_k)$  表示目标在第  $k$  帧的真实位置;  $(\hat{x}_k^i, \hat{y}_k^i)$  表示目标在第  $i$  次仿真时第  $k$  帧估计的位置;  $N$  表示蒙特卡罗次数。

3种信噪比条件下采用PF和MHT-PF算法的RMSE分别如图8和图9所示。当信噪比较高时(SNR=9 dB或6 dB),MHT-PF算法的曲线迅速下降,接近目标真实位置,而PF算法的曲线下降速度缓慢。例如,目标信噪比为9 dB,在第10帧时,MHT-PF的RMSE为2.2个分辨单元,而PF的RMSE为7个分辨单元,即MHT-PF算法估计的目标位置离真实目标位置相差2.2个分辨单元,而PF算法估计的目标位置离真实目标位置却相差7个分辨单元。当信噪比较低时(SNR=3 dB),虽然两种算法曲线的下降速度都较慢,但可以看到MHT-PF算法的下降速度仍快于PF算法,在第20帧逐渐收敛到一稳定值。PF算法在信噪比较高时(SNR=9 dB或6 dB),其RMSE在20帧开始收敛,当信噪比低时(SNR=3 dB),在30帧时间内无法达到收敛。在3种信噪比条件下,MHT-PF算法的RMSE均小于相同时刻PF算法的RMSE,因此MHT-PF算法的跟踪性能优于PF算法。

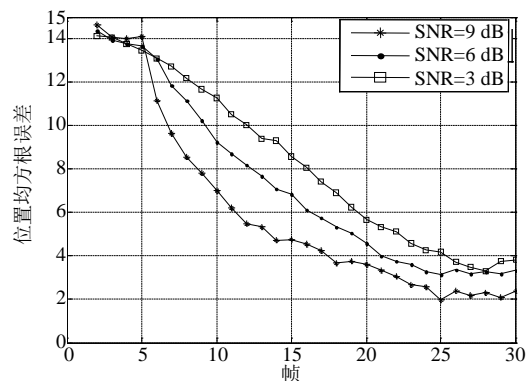


图8 基于PF算法的RMSE

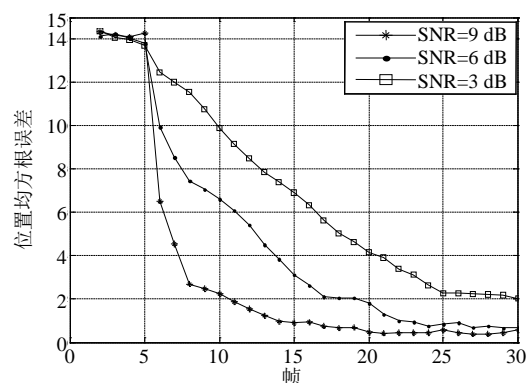


图9 基于MHT-PF算法的RMSE

## 4 结论

TBD算法对强杂波噪声背景下的微弱目标探测

是一种有效的方法。本文提出了一种新的雷达微弱目标TBD算法, 即基于修正Hough变换和粒子滤波的检测前跟踪算法。该算法首先利用修正Hough变换进行航迹起始, 将得到估计的目标航迹范围作为粒子滤波的先验信息, 然后利用粒子滤波对目标进行跟踪和检测。仿真实验表明, 对信噪比小于12 dB的微弱目标, 本文提出的算法在检测性能和跟踪精度方面得到了较大的提高, 适用于对微弱目标的检测和跟踪。

### 参 考 文 献

- [1] 王小谟, 匡永胜, 陈忠先, 等. 监视雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
WANG Xiao-mo, KUANG Yong-sheng, CHEN Zhong-xian, et al. Surveillance radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [2] BLOSTEIN S D, HUANG T S. Detecting small moving objects in image sequence using sequential hypothesis testing[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1991, 39(7): 1611-1629.
- [3] JOHNSTON L A, KRISHNAMURTHY V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 228-242.
- [4] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the hough transform, part I: system concept[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(1): 102-108.
- [5] BOERS Y, DRIESSEN J N. Particle filter based detection for tracking[C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA: [s.n.], 2001.
- [6] SALMOND D J, BIRCH H. A particle filter for track-before-detect[C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA: [s.n.], 2001.
- [7] 王国宏, 苏峰, 毛士艺, 等. 杂波环境下基于Hough变换和逻辑的快速航迹起始算法[J]. 系统仿真学报, 2002, (7): 874-876.  
WANG Guo-hong, SU Feng, MAO Shi-yi, et al. Fast track initiation algorithm in clutter environments based on hough transform and logic[J]. Journal of System Simulation, 2002, (7): 874-876.
- [8] ARULAMPALAM M S, MASKELL S, GORDON N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(2): 174-188.
- [9] CHEN J, LEUNG H, LO T, et al. A modified probabilistic data association filters in real clutter environment[J]. IEEE Trans AES, 1996, (32): 300-314.
- [10] RISTIC B, ARULAMPALAM S, GORDON N J. Beyond the Kalman filter: particle filter for tracking applications [M]. [S.l.]: Artech House, 2004.
- [11] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
HE You, XIU Jian-juan, ZHANG Jing-wei, et al. Radar data processing with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [12] BOERS Y, DRIESSEN J N. A particle-filter-based detection scheme[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(10): 300-302.

编辑 税红