

基于航迹检验的雷达检测前跟踪新算法

柳树林, 陈新亮

(北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 针对在低信噪比环境下雷达目标检测的问题, 提出了一种基于航迹检验的检测前跟踪方法. 该方法利用航迹检验和能量积累检测双重检测方法, 在目标运动信息未知的情况下, 在多脉冲回波间估计目标运动参数, 获取目标航迹并沿着目标航迹的进行非相参积累, 有效地积累目标回波能量, 改善了积累后的信噪比, 提高了检测性能. 通过仿真表明, 在目标匀速和匀加速运动时, 该方法都具有较好的检测性能, 与其它检测前跟踪方法相比, 该方法鲁棒性更好.

关键词: 检测前跟踪; 航迹检验; 低信噪比; 非相参积累

中图分类号: TN 957. 51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2012)12-1269-05

A New Track-Before-Detect Algorithm Based on Track Detection

LIU Shu-lin, CHEN Xin-liang

(Department of Information and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the detection problem in the low signal-to-noise environment, a new track-before-detect (TBD) algorithm based on track detection is proposed. It employed both the track detection and energy integration detection methods. In the case of unknown target motion, the non-coherent integration could be accomplished effectively, which improves the signal to noise ratio and makes the detection performance better. Simulation result shows that whether in target constant motion or uniformly accelerated motion, the new method is more robust compared with other detection methods.

Key words: track-before-detect; track detection; low signal-to-noise; non-coherent integration

检测前跟踪(track-before-detect, TBD)技术是一种微弱目标检测的策略. 这类方法包括基于穷举法(I-TBD)、动态规划方法(DP-TBD)和 Hough 变换(H-TBD)方法^[1-5]. 这 3 种方法分别利用不同的航迹搜索方法获取相应的搜索航迹, 并沿着这些航迹进行非相参积累, 选取最大的累积值作为检测量. I-TBD 在数据帧间穷举所有可能的航迹, 可以获取目标的真实航迹, 但在低信噪比情况下, 检测获取的航迹与真实航迹相差很大, 检测性能都较差. DP-TBD 方法在相邻数据帧间进行点迹关联获取所有的搜索航迹. 由于目标运动的不确定性, 不能确定

相邻时刻目标的状态转移情况, 搜索航迹极可能不包含目标的真实航迹, 因此, DP-TBD 方法的跟踪性能较差^[6-8], 同时也影响目标的检测性能. 目前 H-TBD 方法主要是针对匀速直线运动目标的检测. 通过 H-TBD 方法可以获取所有具有匀速直线运动特征的搜索航迹. H-TBD 方法的检测性能和跟踪性能都较好, 但是仅限于单一的目标运动特性.

针对以上问题, 本文中提出了一种基于航迹检验的 TBD 方法(TD-TBD). 该方法利用回归分析的思想^[9], 对穷举法得到的所有搜索航迹进行航迹检验, 获取具有一定运动参数的搜索航迹, 再进行非

相参积累,选取最大的累积值得到检验统计量. TD-TBD 方法改善了检测得到的航迹的准确性,同时提高了检测性能. 该方法对匀加速运动、匀速运动和静止目标均适用.

1 目标模型

设雷达在 TBD 过程中共接收目标 K 个回波脉冲,脉冲重复周期为 T_r ,在 K 个脉冲周期内,目标航迹由点迹矢量 $\mathbf{X}=[\mathbf{X}_1 \ \mathbf{X}_2 \ \cdots \ \mathbf{X}_K]^T$ 确定. 因为存在测量误差, \mathbf{X}_k 可以表示为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{U}_k \boldsymbol{\varepsilon}^T + \mathbf{W}_k. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}_k (k=1, 2, \dots, K)$ 表示目标的距离测量值; $\boldsymbol{\varepsilon}=[R_0 \ v_0 \ a_0]$ 定义为目标参数,分别表示目标的初始距离、速度和加速度; $\mathbf{U}_k=[1 \ kT \ (kT_r)^2]$, 假设在测距过程中,不会发生距离模糊; \mathbf{W}_k 为测量误差,服从高斯分布,有 $\mathbf{W}_k \sim N(0, \sigma_w^2)$,且在各时刻相互独立. 实际中,在每个脉冲的回波采样点中,其中一个采样点的位置对应目标的距离信息. 第 k 个脉冲采样点的位置信息表示为

$$R_k(m) = \frac{c(m-1)}{2} T_s, \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

式中: m 表示第 m 个采样点; M 为每个脉冲距离采样点总数; T_s 为采样周期; c 为光速. 所以 \mathbf{X}_k 与 $R_k(m)$ 的关系为

$$\mathbf{X}_k \in \{R_k(m), m=1, 2, \dots, M\}.$$

根据目标运动特性建立目标回波幅度测量模型^[4-5],第 k 个脉冲对应的采样点幅度可表示为

$$Z_k(m) = \begin{cases} A_k H_k(m) + V_k(m) & \text{有目标} \\ V_k(m) & \text{无目标} \end{cases}. \quad (3)$$

式中: $A_k H_k(m)$ 表示目标在第 k 个脉冲第 m 个距离采样点上的幅度信息; A_k 表示目标在第 k 个脉冲的幅度; $H_k(m)$ 表示目标在第 k 个脉冲中的距离分布; $V_k(m)$ 为噪声,假设服从高斯分布,满足 $V_k(m) \sim N(0, \sigma_v^2)$.

2 方法原理

文中采用如下方法进行检测,即

$$\{\hat{\mathbf{X}}\} = \{\mathbf{X}: \arg \max_{\mathbf{R}_K \in \Phi_R} G(\mathbf{Z}_K | \mathbf{R}_K) > \eta_1\},$$

$$G(\mathbf{Z}_K | \mathbf{R}_K) = \sum_{k=1}^K |Z_k(m_k)|^2. \quad (4)$$

式中: $G(\mathbf{Z}_K | \mathbf{R}_K)$ 表示在多脉冲间目标回波的能量积累函数; \mathbf{Z}_K 表示 \mathbf{R}_K 中各点迹的幅度值,即 $[Z_1(m_1) \ Z_2(m_2) \ \cdots \ Z_K(m_K)]^T$; \mathbf{R}_K 由 K 个时

刻的点迹位置组成,即

$$[\mathbf{R}_1(m_1) \ \mathbf{R}_2(m_2) \ \cdots \ \mathbf{R}_K(m_K)]^T;$$

η_1 表示门限值; Φ_R 表示满足一定条件的 \mathbf{R}_K 组成的集合,即

$$\Phi_R = \{\mathbf{R}_K : f(\mathbf{R}_K) > \eta_2\}. \quad (5)$$

式(5)表示航迹检验过程,与式(1)表示的运动模型有关. η_2 表示门限值,与设定的虚警概率有关.

为了得到 Φ_R ,最简单的方法是在 K 次回波进行穷尽式搜索,获取所有 \mathbf{R}_K ,并进行式(7)中的判断. 对于搜索得到的每个 \mathbf{R}_K ,称为搜索航迹. 传统的 TBD 方法处理框图如图 1 所示.



图 1 传统 TBD 方法处理框图
Fig. 1 Process program of typical TBD

因为目标的真实航迹满足一定的运动规律,所以当搜索航迹为目标的真实航迹或者接近目标的真实航迹,搜索航迹应满足式(3)中的关系. 为了使 Φ_R 中包含这类航迹,根据回归分析的方法,对搜索航迹进行航迹检验,得到所有具有运动规律的搜索航迹. 航迹检验分为两部分:①估计运动参数 $\boldsymbol{\varepsilon}$;②利用 $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 对该航迹进行检验,并校正参数 $\boldsymbol{\varepsilon}$. 基于航迹检验的 TBD 方法处理框图如图 2 所示.

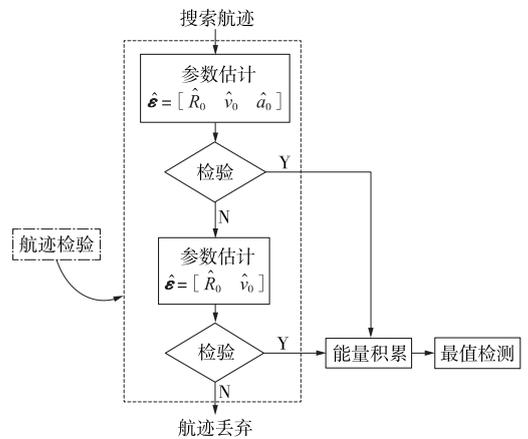


图 2 基于航迹检验的 TBD 处理框图
Fig. 2 Process program of TBD based on track test

2.1 参数估计

为了检验搜索航迹 \mathbf{R}_K 是否具有某种运动规律,首先假设目标满足式(1)中的关系,则 $\mathbf{r}_k(m_k)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 的联合概率密度为

$$L = \prod_{k=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left[-\frac{(\mathbf{R}_k(m_k) - \mathbf{U}_k \boldsymbol{\varepsilon}^T)^2}{2\sigma_w^2}\right]. \quad (6)$$

式中 σ_w 为描述 $\mathbf{R}_k(m_k)$ 中的测量误差的方差.

利用极大似然估计法 $\partial \ln L / (\partial \boldsymbol{\varepsilon}) = 0$, 并且当 $(\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1}$ 存在时, 参数 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的估计值为

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \hat{R}_0 \\ \hat{v}_0 \\ \hat{a}_0 \end{bmatrix} = (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{R}_K, \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & T_r & T_r^2 \\ 1 & 2T_r & (2T_r)^2 \\ 1 & \cdots & \cdots \\ 1 & KT_r & (KT_r)^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}^T \mathbf{T} = \begin{bmatrix} K & T_r \sum_{k=1}^K k & T_r^2 \sum_{k=1}^K k^2 \\ T_r \sum_{k=1}^K k & T_r^2 \sum_{k=1}^K k^2 & T_r^3 \sum_{k=1}^K k^3 \\ T_r^2 \sum_{k=1}^K k^2 & T_r^3 \sum_{k=1}^K k^3 & T_r^4 \sum_{k=1}^K k^4 \end{bmatrix}.$$

因为

$$E(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}) = E[(\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{X}] =$$

$$E[(\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{T} \boldsymbol{\varepsilon} + (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{W}] = \boldsymbol{\varepsilon},$$

所以 $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的无偏估计, 且 \hat{v}_0 和 \hat{a}_0 服从如下分布

$$\hat{v}_0 \sim N(v_0, \sigma_w^2 t_{22}), \quad \hat{a}_0 \sim N(a_0, \sigma_w^2 t_{33}). \quad (8)$$

式中 t_{22} 和 t_{33} 分别为 $(\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1}$ 对角线上第 2 和 3 个元素.

2.2 航迹检验方法

航迹检验方法根据估计值 $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 判断搜索航迹是否具有某种运动规律, 若搜索航迹满足匀加速运动规律, 搜索航迹应满足式(1)中存在的线性关系, 包括 v_0 和 a_0 的整体线性关系和独立线性关系; 当满足匀速运动时, 搜索航迹不符合式(1)的线性关系, 需要校正运动参数 $\boldsymbol{\varepsilon} = [R_0 \quad v_0]$, 对 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 重新进行估计与检验, 这种情况下只需要考虑单个参数的独立线性关系.

判断搜索航迹是否满足匀加速运动规律分为两部分, 首先对 v_0 和 a_0 进行联合检验, 若检验合理, 再分别对 v_0 和 a_0 进行独立检验.

v_0 和 a_0 的联合假设检验表示为

$$\begin{cases} H_0: v_0 = a_0 = 0 \\ H_1: v_0, a_0 \text{ 不全为 } 0 \end{cases} \quad (9)$$

在计算检验假设量之前, 需要计算一些其它的数量. 总离差平方和 Q (total sum of squares, TSS) 为

$$Q = \sum_{k=1}^K [R_k(m_k) - \bar{R}_k(m_k)]^2 = \sum_{k=1}^K [R_k(m_k) - \hat{R}_k(m_k)]^2 + \sum_{k=1}^K [\hat{R}_k(m_k) - \bar{R}_k(m_k)]^2 = Q_{\text{RSS}} + Q_{\text{ESS}}. \quad (10)$$

式中: Q_{RSS} 表示残差平方和; Q_{ESS} 表示回归平方和;

$\bar{R}_k(m_k) = \sum_{k=1}^K R_k(m_k) / K$ 表示搜索航迹对应的均值; $\{\hat{R}_k(m_k) \hat{R}_k(m_k) \cdots \hat{R}_k(m_k)\} = \mathbf{T} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 表示 K 个时刻位置估计值, 由这些估计值组成的航迹称为搜索航迹的估计值.

因为测量误差服从高斯分布, 有

$$Q_{\text{RSS}} / \sigma_w^2 \sim \chi^2(K-3). \quad (11)$$

在 H_0 的假设下, 可以得到

$$Q_{\text{ESS}} / \sigma_w^2 \sim \chi^2(2).$$

所以由 F 分布的定义, 在 H_0 的假设下有

$$F = \frac{Q_{\text{ESS}} / 2}{Q_{\text{RSS}} / (K-3)} \sim F(2, K-3). \quad (12)$$

假设第一类错误概率最大为 α , 根据 F 分布计算得到门限值为 $\eta_F = F_\alpha(2, K-3)$, 因此, 当

$$F \geq \eta_F, \quad (13)$$

表示 H_0 假设错误则拒绝 H_0 , 反之则接受 H_0 . 若拒绝 H_0 , 根据回归分析, 必须对 v_0 和 a_0 分别进行检验, 以决定其是否被保留在 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中. 在接受 H_0 的情况下, 表示该搜索航迹不满足式(1)中假设的运动模型, 即需要校正运动参数 $\boldsymbol{\varepsilon} = [R_0 \quad v_0]$, 对 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 重新进行估计与检验, 在这种情况下只需要对 v_0 进行检验即可, 检验方法与拒绝 H_0 情况下 v_0 和 a_0 的独立线性关系检验相同.

根据实际目标的运动情况, 这里先分析 a_0 的独立线性关系检验可以表示为

$$\begin{cases} H_0: a_0 = 0 \\ H_1: a_0 \neq 0 \end{cases}$$

因为 \hat{a}_0 与 Q_{RSS} 独立, 由式(8)与式(11)得到

$$(\hat{a}_0 - a_0) / \left(\frac{Q_{\text{RSS}}}{K-3} t_{33} \right)^{1/2} \sim t(K-3). \quad (14)$$

与联合假设检验类似, 在 H_0 假设下, 根据第一类错误概率 β , 计算得到门限值为 $V_{Tt} = t_\beta(K-3)$, 所以当

$$|t| = |\hat{a}_0| / \left(\frac{Q_{\text{RSS}}}{K-3} t_{33} \right)^{1/2} \geq V_{Tt} \quad (15)$$

时拒绝 H_0 , 反之则接受 H_0 . 对 v_0 的假设检验类似于 a_0 的检验. 若 v_0 和 a_0 的线性关系都是成立的, 则该搜索航迹被判为可能的目标航迹, 若 v_0 或

a_0 的线性关系不成立,需要更改目标参数即删掉 v_0 或 a_0 , 设定新的运动参数

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [R_0 \quad a_0] \text{ 或者 } \boldsymbol{\varepsilon} = [R_0 \quad v_0],$$

重复上述目标参数估计和航迹检验的过程. 若搜索航迹仍不满足上述检验,那么该搜索航迹被丢弃.

根据回波脉冲的采样点数,将有 M 条可能的静止目标对应的航迹,即

$$\mathbf{R}_{K,i} = [R_k(m), k=1, 2, \dots, K], (i=1, 2, \dots, M).$$

2.3 能量积累检测

一般情况下,经过航迹检验后,将获取多条可能的目标航迹. 但当沿着目标的真实航迹或者近似目标的真实航迹进行非相参积累时,能量积累值都较大. 因此,可以利用能量积累的差异选择近似于目标真实运动的航迹和相应的检测量.

假设得到的航迹集合 $\Phi_R = \{R_{K,1} \quad R_{K,2} \quad \dots \quad R_{K,I}\}$, I 为最大可能航迹数. 第 i 条航迹中的各时刻距离分别为

$$\mathbf{R}_{K,i} = [R_{1,i}(m_1) \quad R_{2,i}(m_2) \quad \dots \quad R_{K,i}(m_K)],$$

对应的回波幅度值为

$$\mathbf{Z}_{K,i} = [Z_{1,i}(m_1) \quad Z_{2,i}(m_2) \quad \dots \quad Z_{K,i}(m_K)]^T.$$

根据式(4),检测可以表示成

$$\begin{cases} \max_{i=1,2,\dots,I} (\Delta_i) > \eta_1, & \text{判为有目标;} \\ \max_{i=1,2,\dots,I} (\Delta_i) < \eta_1, & \text{判为无目标.} \end{cases}$$

其中 $\Delta_i = G(\mathbf{Z}_{K,i} | \mathbf{R}_{K,i}) = \sum_{k=1}^K |Z_{K,i}(m_k)|^2$. 如果检测量大于门限,可以确定目标航迹.

3 仿真结果

为了验证 TD-TBD 方法的有效性,将该方法的检测性能与 I-TBD、DP-TBD 和 H-TBD 进行比较分析. 假设回波帧数 $K=11$, 距离波门采样点数 $M=60$. 图 3 为在部分点迹范围内搜索得到所有可

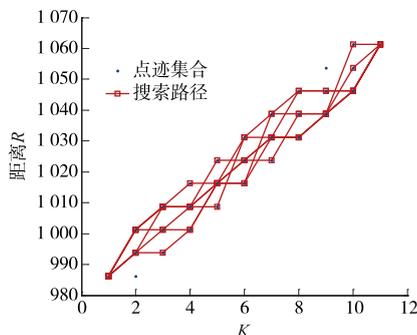


图 3 在部分点迹集合范围内的搜索航迹
Fig. 3 Search tracks in the scope of partial point set

能航迹. 根据航迹检验方法对搜索航迹进行检验,得到的检验航迹如图 4 所示. 从图 3~图 4 中可以看出,通过门限检验,可以滤除大量的搜索航迹,获取较少的符合运动规律的检验航迹. 仿真中回波幅度值 $A=2$, 噪声功率 $\sigma_n^2=2$. 当目标匀速运动时,目标参数为 $\boldsymbol{\varepsilon} = [1\ 000 \quad 300]$, 各种 TBD 方法的 ROC 曲线如图 5 所示. 当目标匀加速运动时,目标参数为 $\boldsymbol{\varepsilon} = [1\ 000 \quad 50 \quad 1\ 000]$, 各 TBD 方法的 ROC 曲线如图 6 所示.

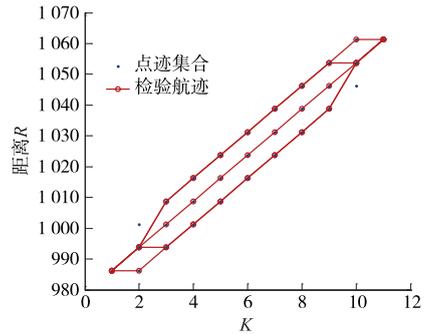


图 4 经过航迹检验后获取的检验航迹
Fig. 4 Tracks obtained by track detection

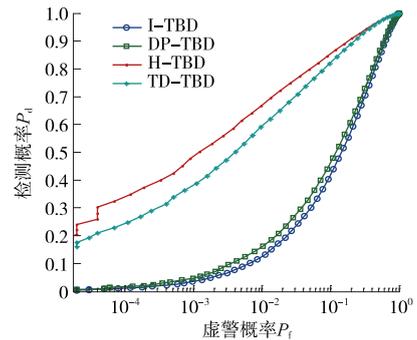


图 5 目标参数为 $\boldsymbol{\varepsilon} = [1\ 000 \quad 300]$ 时各 TBD 方法的 ROC 曲线 ($R_{SN0} = 3\text{ dB}$)
Fig. 5 ROC curves when $\boldsymbol{\varepsilon} = [1\ 000 \quad 300]$ obtained from various TBD methods

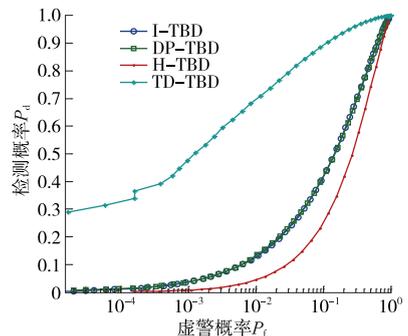


图 6 目标参数为 $\boldsymbol{\varepsilon} = [1\ 000 \quad 50 \quad 1\ 000]$ 时各 TBD 方法的 ROC 曲线 ($R_{SN0} = 3\text{ dB}$)
Fig. 6 ROC curves when $\boldsymbol{\varepsilon} = [1\ 000 \quad 50 \quad 1\ 000]$ obtained from various TBD methods

- Sang Hongshi, Zhao Hui, Sang She. Architecture design of ASIC used for connected components labeling of multi-value image[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008,29(1):1-4. (in Chinese)
- [9] Wang Hongtao, Luo Changzhou, Wang Yu. New algorithm for binary connected-component labeling based on run-length encoding and union-find sets[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010,19(1):71-75.
- [10] Xu Changyong, Ping Xijian, Liu Cuiqing. Steganography algorithm on binary images based on run-length encoding[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009,6(6):727-733.
- [11] Buch H, Sharghi E, Guilas C, et al. Enhanced ship detection from overhead imagery[C]// Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Orlando, FL, USA: SPIE, 2008:1-12.
- [12] 雷琳. 多源遥感图像舰船目标特征提取与融合技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.
- Lei Lin. Ship feature extraction and fusion in multiple remote sensing images [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- (责任编辑:刘芳)

(上接第 1272 页)

从图 5~图 6 中可以看出,当目标匀速运动时, H-TBD 方法的检测性能最优,TD-TBD 方法近似等于 H-TBD 方法的检测性能;但当目标匀加速运动时,H-TBD 方法的检测性能下降,TD-TBD 方法远远优于其它 3 种 TBD 检测方法. 因此从仿真结果可以看出,TD-TBD 方法利用航迹检验提高了能量积累的有效性,从而改善了 TBD 方法的检测性能.

4 结 论

以往 TBD 方法由于难以得到目标较准确的航迹,使能量积累不能达到最优,影响了检测性能. 针对这一问题,提出了基于航迹检验的 TBD 方法. 该方法通过航迹检验检测出具有匀速和匀加速运动规律的搜索航迹,再利用能量积累检测的方法得到目标的航迹. 这种双重检测的方法,最终可确定较准确的目标航迹,从而改善了检测性能.

参考文献:

- [1] Mohanty N C. Computer tracking of moving point targets in space [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1981, PAMI-3(9): 606-611.
- [3] 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 System, 1994, 30(1): 102-108.
- [4] David R J, Kramer J R, Reid W S. Track-before-detect processing for an airborne type radar[C]// Proceedings of IEEE International Radar Conference. Arlington: IEEE Conference Publications, 1990:422-427.
- [5] Buzzi S, Lops M, Venturino L. Track-before-detect procedures for early detection of moving target from airborne radars [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005,41(3):937-954.
- [6] 强勇,焦李成,保铮. 一种有效的用于雷达弱目标检测的算法[J]. 电子学报,2003,31(3):440-443.
- Qiang Yong, Jiao Licheng, Bao Zheng. An effective track-before-detect algorithm for dim target detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2003,31(3):440-443. (in Chinese)
- [7] 李涛,吴嗣亮,曾海彬,等. 基于动态规划的雷达检测前跟踪新算法[J]. 电子学报,2008,36(9):1824-1828.
- Li Tao, Wu Siliang, Zeng Haibin, et al. A new radar track-before-detect algorithm based on dynamic programming [J]. Acta Electronica Sinica, 2008,36(9): 1824-1828. (in Chinese)
- [8] Johnston L A. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002,38(1):228-242.
- [9] Gong Guanglu. Probability and mathematical statistic [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 277-282.

(责任编辑:刘芳)