

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.05.005

利用极化信息的高频地波雷达 TBD 检测算法

李发宗^{1,2}, 毛兴鹏¹, 常维国¹

(1.哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 150001 哈尔滨; 2.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 621999 四川 绵阳)

摘要:为解决复杂的杂波背景造成高频地波雷达目标检测上的困难,针对高频地波雷达的极化特性,提出了一种将极化信息与传统动态规划算法相结合的 TBD 检测新方法.该方法利用运动目标方向信息和极化信息对算法进行优化,并通过预检测减小计算量.在高斯背景和地波雷达实测数据中的仿真和检测结果表明,存在电离层杂波干扰时,基于极化信息的检测前跟踪新方法比传统动态规划算法性能明显提高.

关键词: 动态规划; 高频地波雷达; 极化信息; 检测前跟踪

中图分类号: TN957

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)05-0036-07

TBD algorithm based on polarization information of high frequency surface wave radar

LI Fazong^{1,2}, MAO Xingpeng¹, CHANG Weiguo¹

(1.School of Electronic Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2.Electronic Engineering Institute, China Academy of Engineering Physics, 621999 Mianyang, Sichuan, China)

Abstract: Complex clutters of High Frequency Surface Wave Radar cause difficulties on target detection. Based on polarization characteristics of HFSWR, a new method by combining polarization information with the traditional dynamic programming algorithm is proposed. Moving target direction information and polarization information are used to improve the performance of the algorithm, and pre-detection technique is adopted to reduce the amount of calculation. The simulation and test results in a Gaussian background and HFSWR measured data show that the new algorithm based on polarization information has significant performance benefits compared to the traditional method based on dynamic programming algorithm in the ionosphere clutter.

Keywords: dynamic programming; HF surface wave radar; polarization; track-before-detect

工作于 3~30 MHz 的高频雷达具有超视距、散射截面大、数据率低等特殊优势,不论在军事还是民用上都有广泛而有效的应用^[1].然而电离层杂波、海杂波、电台干扰等诸多不利因素的存在,增加了高频地波雷达目标检测的困难^[2].

检测前跟踪 TBD (track-before-detect)是在低信噪比情况下对目标进行检测和跟踪的一种技术,本质上是一种时域和空域的非相参方法^[3-4].动态规划算法^[5]是最常用的 TBD 实现算法之一,近年来对动态规划算法的研究主要是针对检测背景的特点做出相关改进和优化.文献[6-7]采用两级门限检测和方向加权方法来增强工程中的应用性;文献[8-9]针对多目标问题提出基于广义似然比检验的 TBD 算法并对目标数目问题进行了讨论;文献[10]增加了航迹检

测与校正方法,提高了跟踪概率.

极化信息是电磁波除幅度、频率、相位以外的一个重要基本参量,在雷达抗干扰、反隐身、目标检测等领域具有重要的应用潜力^[11].本文针对高频地波雷达的极化特性,将极化信息引入 TBD 检测算法,并结合预处理方法和方向加权手段进一步提高 TBD 方法在高频地波雷达中的检测和跟踪性能.

1 雷达检测中的 TBD 算法

1.1 最优化原理

动态规划算法的基本思想是将一个问题进行分解处理,处理过程可以采用状态变量来描述^[12].设 $w_i(x_i, u_i)$ 是在第 i 个阶段在状态 x_i 下运用决策 u_i 得到的阶段指标函数.动态规划算法就是搜索整个过程,找到最优化轨迹使得阶段指标函数的累计值最大.最优性原理是动态规划算法的基本原理,最优性原理满足如下条件^[13]:

收稿日期: 2015-10-04.

作者简介: 李发宗(1988—),男,硕士研究生.

通信作者: 毛兴鹏, mxp@hit.edu.cn.

$$f_k(x_k) = \max_{|u_i| \in U} \left[\sum_{i=1}^k w_i(x_i, u_i) \right] = \max_{|u_i, u_k| \in U} \left[w_k(x_k, u_k) + \left[\sum_{i=1}^{k-1} w_i(x_i, u_i) \right] \right] = \max_{u_k} \left[w_k(x_k, u_k) + f_{k-1}(x_{k-1}) \right]. \quad (1)$$

式中: k 为阶段数; U 为决策变量 u_i 限制的范围, 称为允许决策集合. 为满足递推关系, 初始条件可以假设为

$$f_1(x_1) = w_1(x_1, u_1).$$

当动态规划算法用于检测前跟踪算法时, 需要对动态规划的基本式变形, 根据式(1)有

$$f_k(x_k) = \max_{u_k} \left[w_k(x_k, u_k) + f_{k-1}(x_{k-1}) \right] = \max_{u_k} \left[w_k(x_k, u_k) + \max_{u_{k-1}} \left[w_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}) + \dots + \max_{u_2} \left[w_2(x_2, u_2) + f_1(x_1) \right] \right] \right] = \max_{u_k} \left[I_k(x_k) \right]$$

其中 $I_k(x_k)$ 表示阶段的价值函数. 值函数的选择直接影响算法对于目标检测的性能, 因此对动态规划算法至关重要. 在具体检测中, 本文运用各阶段检测单元的幅度测量值 $z_{r,d}(k)$ 替代前面的 $w_i(x_i, u_i)$ 作为阶段指标函数^[10], r, d 分别表示距离单元和速度单元的序号. 并得到以下的递推式:

$$I_k(x_k) = z_{r,d}(k) + \max_{u_{k-1}} \left[I_{k-1}(x_{k-1}) \right]. \quad (2)$$

当基于最优性原理的动态规划算法应用于高频雷达在速度距离谱中检测时, 初始条件要求对第一帧中的每个单元进行搜索, 因此, 初始条件为

$$I_1(x_1) = z_{r,d}(1). \quad (3)$$

在高频地波雷达目标检测中, 按照式(2)和式(3)给出的递推关系, 在 K 帧速度距离谱中进行搜

$$U = \left\{ \begin{array}{ccc} Z_{k+1}(r_k, d_k) & Z_{k+1}(r_k - 1, d_k) & Z_{k+1}(r_k - 2, d_k) \\ Z_{k+1}(r_k, d_k - 1) & Z_{k+1}(r_k - 1, d_k - 1) & Z_{k+1}(r_k - 2, d_k - 1) \\ Z_{k+1}(r_k, d_k + 1) & Z_{k+1}(r_k - 1, d_k + 1) & Z_{k+1}(r_k - 2, d_k + 1) \end{array} \right\}.$$

这里 U 是第 $k+1$ 帧时目标的状态可能的范围集合, 也就是第 $k+1$ 帧目标状态可能是 U 中 9 个状态中的 1 个, 这 9 个状态也被称为状态转移区域.

状态转移过程如图 1 所示.

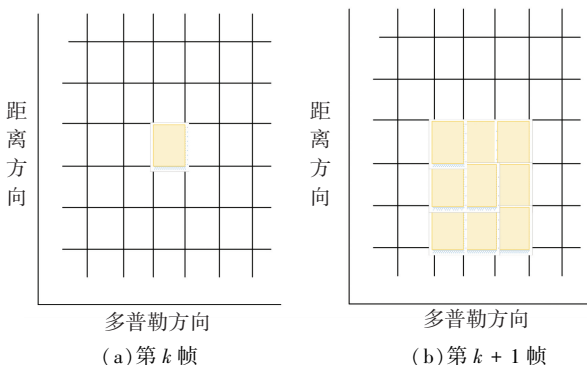


图 1 状态转移过程

索并对值函数累加. 当完成所有搜索后, 利用以下的判决方法判定目标是否存在, 如果目标存在则对其轨迹进行估计:

$$\{\hat{X}_M\} = \{X_M: I_M(x_M) > V_T\}.$$

式中: V_T 是判决门限; $\{\hat{X}_M\} = \{\hat{x}(1), \dots, \hat{x}(M)\}$ 是目标轨迹的估计值, 它在每一个阶段的决策中被记录, 最后形成目标的轨迹.

1.2 目标转移模型

在高频地波雷达的速度距离谱中, 目标的状态可以表示为 $x_k = Z_k(r_k, d_k)$, 其中 Z_k 表示第 k 个速度距离谱, r, d 分别表示距离单元和速度单元的序号. 在高频地波雷达背景下舰船目标认为是点目标, 普通的军舰速度大概在 20~30 节之间. 假设船速为最大速度 30 节, 高频地波雷达载频 8 MHz, 积累时间为 100 s, 距离分辨力为 1.5 km, 则可知相邻两帧数据之间舰船的最大距离位移为 2.3 km, 即距离位移不超过 2 个距离单元. 常规的高频雷达目标模型都是假设目标是匀速运动, 然而在积累时间里, 目标很有可能由于洋流、自身机动等原因, 径向速度发生改变. 假设目标在雷达探测期间在一个积累周期内, 多普勒方向也最多移动一个多普勒单元^[12], 则高频地波雷达速度距离谱中不同积累周期之间状态转移过程存在一定联系.

假设第 k 帧数据目标状态为

$$x_k = Z_k(r_k, d_k),$$

则第 $k+1$ 帧数据目标状态可能为

$$x_{k+1} \in U,$$

1.3 目标测量模型

设 K 时刻每个距离多普勒单元的目标功率强度为 $z_{(r,d)}(k)$, 则第 k 帧总的测量集合为

$$Z_k = \{z_{(r,d)}(k), r = 1, 2 \dots N_r, d = 1, 2 \dots N_d\}.$$

每个速度距离单元中又分为有无目标两种情况, 即

$$z(k) = \begin{cases} A_{(r,d)}(k) + w_{(r,d)}(k), & \text{有目标;} \\ w_{(r,d)}(k), & \text{无目标.} \end{cases}$$

式中: $A_{(r,d)}$ 表示目标的幅值; $w_{(r,d)}$ 表示背景噪声, 并假设噪声服从某种分布且是独立的.

2 高频地波雷达极化特性

2.1 极化特性分析

高频地波雷达的检测背景包含了电离层杂波、

海杂波以及其他干扰和噪声. 经典的恒虚警方法往往无法获得满意的检测性能, 而使用 TBD 方法在复杂杂波环境下针对微弱目标的检测跟踪性能会大幅下降. 因此, 利用高频地波雷达电离层杂波和目标在极化特性上的差异, 并结合高频雷达回波特性对算法进行改进是提高检测性能的重要方式. 图 2 给出高频地波雷达实测数据垂直通道和水平通道的速度距离谱.

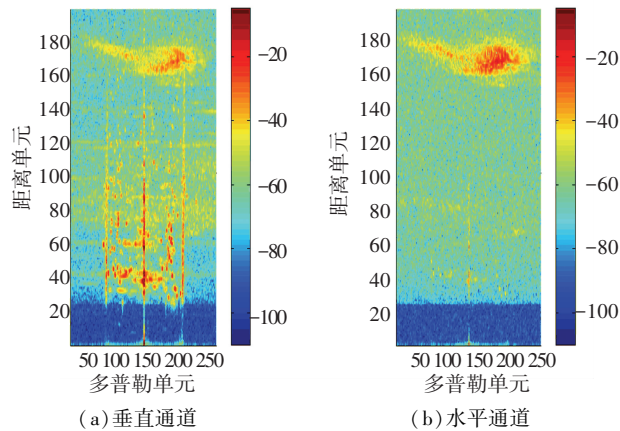


图 2 速度距离谱

由图 2 可以看出, 高频地波雷达回波数据中出现大量杂波, 其中电离层杂波几乎占据垂直通道和水平通道的整个距离单元^[14]. 垂直通道有 3 条明显的竖线, 中间的能量很强部分是地物杂波, 59 和 200 附近的多普勒单元处主要是受 Bragg 峰影响. 水平通道中目标和海杂波很少, 但电离层杂波强烈, 根据文献^[15]可知这是因为电离层杂波的极化特性为椭圆极化, 有部分分量进入水平通道, 而目标和海杂波为线极化, 主要进入垂直通道, 被水平通道接收的很少.

通过垂直通道和水平通道可以计算对应的极化角谱, 如图 3 所示.

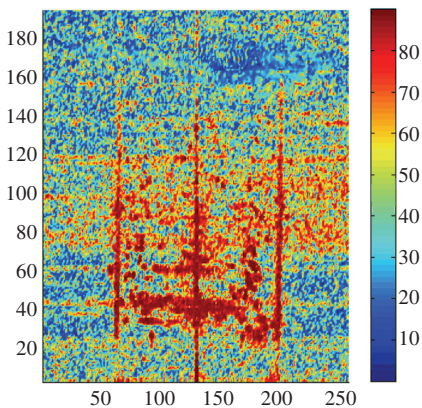


图 3 极化角

从图 3 给出的极化角谱中可以直观地看到, 高频地波雷达的目标和电离层背景杂波之间有明显差异. 目标极化角往往分布在 70° 以上, 而电离层杂波

极化角在 0~90° 之间都有分布, 且随距离单元变化有一定规律性.

综合图 2 中垂直通道的功率信息和图 3 中极化角信息, 对不同区域电离层杂波和目标的极化角及功率进行统计可以得到如图 4 所示的极化角功率分布谱.

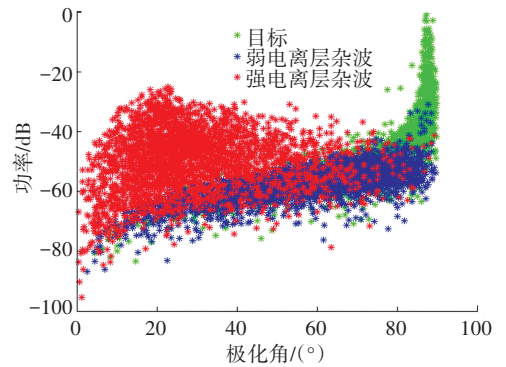


图 4 极化角功率分布谱

图 4 中强电离层杂波是指分布在 151~194 距离单元的电离层杂波, 该区域杂波能量较强但杂波极化角远小于目标极化角. 弱电离层杂波是指分布在 1~150 距离单元上的电离层杂波, 该区域杂波功率总体小于目标, 但部分杂波极化角较大.

图 5 给出部分距离单元上目标和杂波极化角统计结果. 由图 5 可以看出, 目标的极化角和电离层杂波极化角存在差异, 这为高频地波雷达的极化信息检测提供了基础.

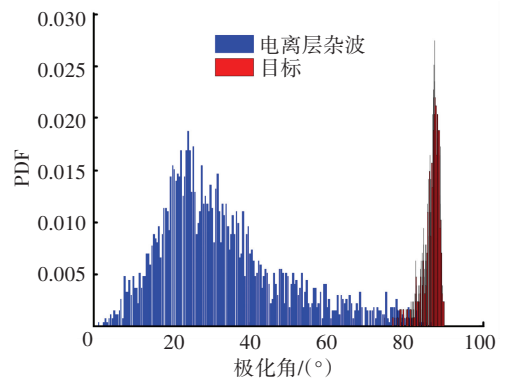


图 5 目标和杂波极化角统计

2.2 海杂波影响

低速运动的舰船目标, 其多普勒谱往往会落入强烈的一阶和二阶 Bragg 散射当中, 因此海杂波将构成对目标信号最大的干扰. 由于海杂波的强度要高于或接近目标的散射强度, 当目标的径向速度引起的多普勒频移接近或处于一阶谱的位置时, 目标回波信号就会完全被一阶谱所掩盖, 导致无法对目标有效检测. 目前对于落在一阶谱区内的舰船目标检测, 还没有特别行之有效的办法, 只能根据一阶谱的位置, 避开它对检测的干扰.

在 TBD 检测算法中,海杂波会使目标航迹发生偏移,从而失去对目标的追踪.一阶谱尽管能量很大,但是谱宽较窄,因此高频地波雷达在实际目标检测时,先通过人工方法剔除海杂波,再进行相关检测^[13].

3 基于极化信息的高频雷达 TBD 检测方法

3.1 TBD 方法在高频地波雷达中的改进措施

3.1.1 极化信息的应用

通过前面统计分析可知,高频地波雷达目标和杂波在极化特性上有着明显差异^[16],在进行 TBD 检测时有效利用高频地波雷达的极化特性将大大改善检测性能.假设利用动态规划算法 TBD 检测时每次扫描时的状态为 X_k ,阶段指标函数为 $z(X_k)$,利用目标和杂波的极化信息对价值函数进行修正,即令

$$z'(X_k) = z(X_k) \alpha \left(\frac{P_t}{P_c} \right)^\beta.$$

式中: P_t 是对应检测位置的极化角, P_c 是对周围杂波极化角的估计值, α 是一个加权因子, β 是指数因子.经过大量数据验证,当 $\alpha = 1, \beta = 1$ 时相对合理.由检测因子表达式可以直观看出,若待检测单元为目标,则其极化角 P_t 要大于杂波极化角估计值 P_c ,此时阶段指标函数 $z'(X_k)$ 大于常规 TBD 算法的阶段指标函数 $z(X_k)$,有助于提高检测概率.若待检测单元为杂波,则其极化角小于或近似等于杂波极化角估计值,此时阶段指标函数近似等于或小于常规 TBD 检测算法的阶段指标函数,可以在一定程度上减小虚警率.

3.1.2 数据预处理

庞大的雷达回波数据给 TBD 算法进行实时性检测提出了更高的要求,同时引入极化信息在改善检测性能的同时也会增加计算量.为了降低 TBD 的运算量,提高处理速度,在第一级采用低门限的单元平均选大恒虚警率处理方法.对第 m 个多普勒单元上的第 n 个距离单元,分别对前后参考窗内 L 个噪声距离单元进行平均处理,得到两个独立的噪声功率的估计值,记为 $\hat{\beta}_1^2$ 和 $\hat{\beta}_2^2$,然后选取两个估计值中最大的那个值作为噪声功率的估计值,则可得到第一级低门限值 $th_1 = \alpha(\hat{\beta}_1^2, \hat{\beta}_2^2)$,其中 α 为尺度因子.采用两级门限检测的方法,在第一级设置低门限除去多普勒-距离序列上的弱小点,消除一些伪目标,降低运算量,提高处理速度,第二级用 TBD 算法优化处理,设置最终门限判决,检测目标运动轨迹.两级门限既保证了检测的准确度,又使处理的

运算量减少.

3.1.3 方向加权

由前面高频地波雷达的状态转移分析过程可知,对于高频地波雷达的速度距离谱中可检测的舰船目标,在正常情况下,或朝雷达方向前进,或远离雷达方向运动,且在相邻积累时间内目标速度不会发生很大变化.如图 6 所示,假设 $k-2$ 帧中目标位置为 $x_{k-2}(r_{k-2}, d_{k-2})$, $k-1$ 帧中目标位置为 $x_{k-1}(r_{k-1}, d_{k-1})$,第 k 帧目标可能所处位置为 $x_k(r_k, d_k)$,那么第 k 帧中目标在直线周围出现的可能性很大.

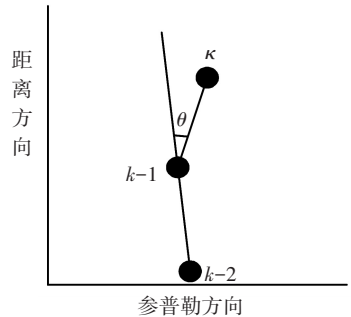


图 6 方向加权示意

因此一旦利用前面几帧确定目标运动方向,则可以利用运动规律对下一帧内不同搜索区域的方向加权.即给可能性较大的区域中的点给予较大的方向权重,而对远离前进方向区域中的点给予很小或为零的权重,以降低某些方向上噪声或干扰的影响,因此目标函数递推式可以改写为

$$I_{(r,d)}(k) = I_{(r',d')}(k-1) + \max_{U_{(r',d')}(k-1/k)} \omega(\theta_k) z_{(r,d)}(k).$$

$$\omega(\theta_k) = \begin{cases} 0, & 90^\circ < |\theta_k| \leq 180^\circ; \\ -\cos \theta_k, & |\theta_k| \leq 90^\circ. \end{cases}$$

其中

$$\cos \theta_k = \frac{|x_k - x_{k-1}|^2 + |x_{k-1} - x_{k-2}|^2 - |x_k - x_{k-2}|^2}{2|x_k - x_{k-1}| |x_{k-1} - x_{k-2}|}.$$

3.2 算法流程

3.2.1 初始化

首先对每一帧回波数据中海杂波进行剔除, $k=1$ 时第一帧数据的所有数据单元进行恒虚警检测处理,将超过恒虚警门限的数据单元的相关信息记录为 $I_{(r,d)}(1)$,即

$$I_{(r,d)}(1) = z_{(r,d)}(1), \{ \text{当 } z_{(r,d)}(1) > V_{\text{cfar}} \}.$$

其中 $1 \leq r \leq M, 1 \leq d \leq N, V_{\text{cfar}}$ 是恒虚警检测门限. $k=2$ 时有

$$I_{(r,d)}(2) = I_{(r,d)}(1) + \max_{U_{(r',d')}(2/1)} z_{(r,d)}.$$

3.2.2 各帧能量积累

当 $k=3, \dots, K$ 时,对前一帧中每一个积累量 $I_{(r,d)}(k-1)$ 所对应的 RD 单元 (r, d) ,确定其在当

前帧(即第 k 帧)中的参考空间搜索范围,并对该区域内的数据单元进行恒虚警处理. 对于超过恒虚警门限的数据单元,先在对应的极化角谱里计算其极化角,再估计周围参考单元的极化角,利用价值函数

$$z'_{(r,d)}(k) = z_{(r,d)}(k) \cdot \frac{P_t}{P_c}$$

进行最大化操作,并进行如下

$$I_{(r,d)}(k) = I_{(r',d)}(k-1) + \max_{U_{(r',d)}(k-1/k)} \omega(\theta_k) z'_{(r,d)}(k).$$

式中 $U_{(r',d)}(k-1/k)$ 是以第 $k-1$ 帧中的 $I_{(r',d)}(k-1)$ 对应的数据单元为中心,在第 K 帧数据中的搜索范围,即参考空间. 如果上述参考空间中

3.2.3 轨迹判决

$k=K$ 将最后一帧所有扫描完成后剩余的累积量记为 I_K , 如果 I_K 中某个元素 $I_{(r,d)}(K)$ 超过门限,则判定该 (r,d) 数据单元中存在目标,再根据 $I_{(r,d)}(K)$ 中记录的数据单元坐标信息进行归集回溯,即可同时得到目标的航迹.

3.3 性能分析

此处检测概率定义为至少存在一个与真实目标的位置、速度在允许误差范围内的 x_K 使得最后状态的值函数超过检测门限的概率,即

$$P_d = \Pr(\max_{x_K} I(x_K) > V_T, x_K \in \{\text{目标} + \text{噪声}\}).$$

虚警概率定义为最大噪声状态的值函数超过检测门限的概率,即

$$P_f = \Pr(\max_{x_K} I(x_K) > V_T, x_K \in \{\text{噪声}\}).$$

式中 V_T 表示检测门限,可以通过计算得到. 由文献[13]可知

$$V_T = -b(n) \ln(-\ln(1 - P_d)) + a(n),$$

其中

$$a(n) = \mu + \sigma \left[(2 \log n)^{1/2} - \frac{1}{2} \frac{(\log \log n + \log 4\pi)}{(2 \log n)^{1/2}} \right],$$

$$b(n) = \frac{(2 \log n)^{1/2}}{\sigma}.$$

式中: $n = N^2 \times M^2$, N 为距离单元数, M 为速度单元数; μ 和 σ 分别为积累 K 帧时沿着目标积累得到的值函数的均值和标准差.

4 实验仿真

4.1 高斯杂波背景仿真

为简化仿真过程,设杂波背景为高斯白噪声,为了同时能够应用到极化信息,假设仿真目标极化角为 88° ,背景杂波极化角即为图 3 所示的极化角谱. 非起伏的单目标匀速运动,每帧分别向 x, y 方向运

动一个单元,起始位置为 $(30, 30)$,其中扫描 15 帧,图 7 给出当信噪比为 12 dB 时的航迹图.

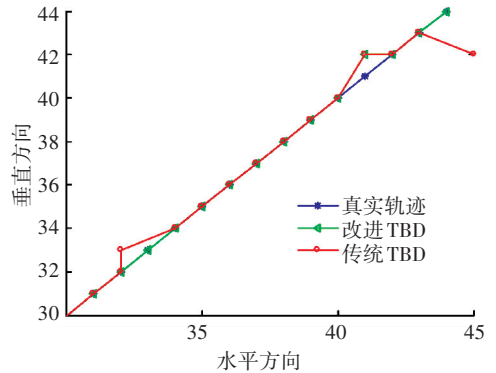


图 7 高斯背景下航迹

由图 7 可以看出,传统 TBD 检测算法有 3 个点的跟踪误差,而基于极化信息的 TBD 改进算法能准确跟踪绝大多数仿真目标,说明改进后算法的检测和跟踪性能较传统算法有所提高.

图 8 给出不同 TBD 检测策略的检测概率,检测门限 $V_T = 26.6$. 图中加权 TBD 是指在传统 TBD 基础上采用方向加权的方法,极化 TBD 指传统 TBD 基础上引入极化信息(具体来说极化角信息)后的改进算法, TBD 新算法是指综合应用方向加权、极化信息和预处理方法的检测算法.

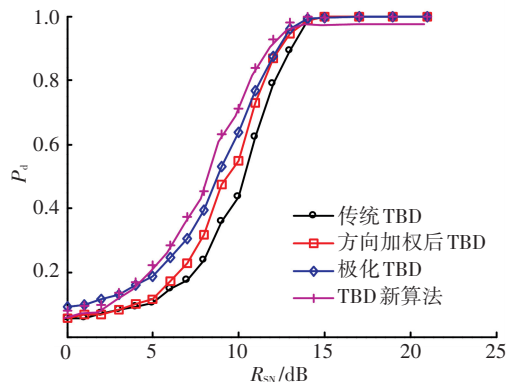


图 8 高斯背景下检测性能

从图 8 中可知,在高斯背景下,方向加权使 TBD 算法性能提高约 1 dB,极化信息的加入使改进后的算法信噪比改善约 2 dB,而既有方向加权又利用极化信息的 TBD 新算法相对传统算法性能明显改善. 说明基于极化信息的 TBD 新算法在高斯背景中有着更优异的检测性能.

4.2 TBD 检测新算法在高频地波雷达实测数据中的应用

事实上,高频地波雷达实测数据相比高斯背景检测环境更为复杂,不仅有大量杂波存在,检测时真实目标之间也有可能相互干扰. 为了进一步验证基于极化信息的 TBD 检测算法在高频地波雷达实测数据中的检测性能,在距离单元为 194,多普勒单元

为 256 的速度距离谱中加入仿真目标进行检测. 设仿真目标起始位置为 (130, 130), 选择该区域的主要原因是该区域中杂波主要是电离层杂波, 可以避免海杂波影响, 同时该区域很少存在真实目标, 因此可以减小真实舰船目标对仿真目标的影响. 为方便起见并不失一般性, 假设仿真目标每帧以一单元的速度分别向距离向和多普勒向运动, 扫描 10 帧. 图 9 给出在信噪比为 20dB 时传统 TBD 算法和改进后 TBD 检测算法的航迹跟踪结果.

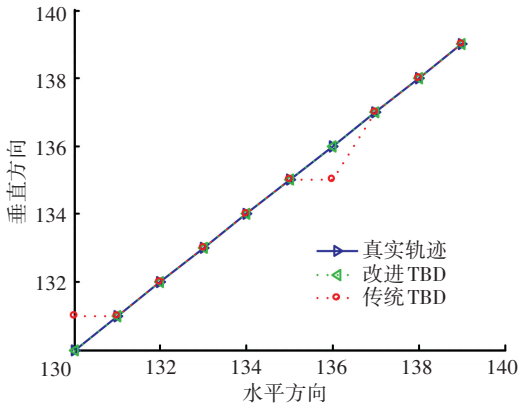


图 9 实测数据中仿真目标航迹

从图 9 可以看出, 传统 TBD 算法虽然能够恢复大部分目标的航迹, 但对部分点航迹恢复结果与真实航迹存在偏差, 而基于极化信息的 TBD 检测新方法可以准确地恢复航迹.

为了分析不同的改进措施对 TBD 算法性能提升程度, 图 10 给出高频地波雷达实测数据中加入仿真目标后分别使用传统 TBD 方法、方向加权 TBD 方法、极化加权 TBD 方法和综合利用方向及极化信息进行优化的 TBD 新方法的检测性能曲线, 由于高频地波雷达回波数据幅值很小, 因此经过计算得到的检测门限 $V_T = 0.054$.

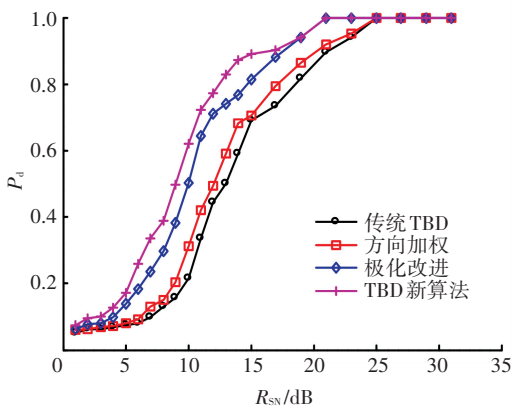


图 10 不同算法实测数据中检测性能

从图 10 不难看出, 在高频雷达实测数据中传统 TBD 检测算法性能最差, 利用方向加权的优化算法可以获得大约 1dB 的性能改善, 采用极化信息的

TBD 改进方法性能进一步提高, 而综合利用方向信息和极化信息的 TBD 新方法检测具有更优的效果.

为了验证 TBD 检测算法在高频地波雷达系统工程应用中的检测性能, 在实测数据中进行真实舰船目标的检测. 由于实测数据中的目标众多, 为了便于分析, 选择速度距离谱中的 2 个典型区域进行验证: 区域 1 (125-175 距离单元, 120-200 速度单元) 主要验证强电离层杂波背景中的真实目标检测; 区域 2 (25-60 距离单元, 50-170 速度单元) 验证弱电离层杂波中的真实目标检测. 图 11 给出其中剔除海杂波和地物杂波后第一帧数据的速度距离谱.

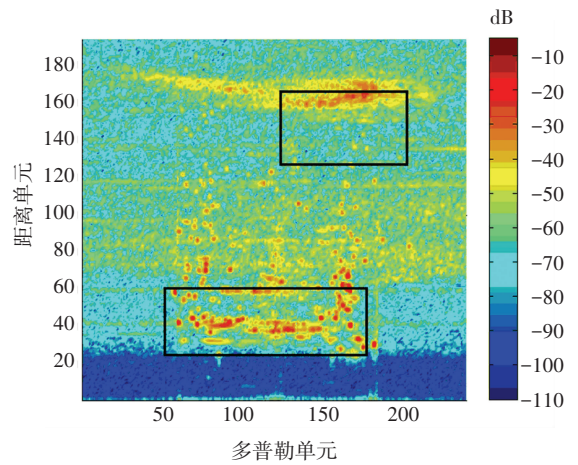


图 11 剔除海杂波后检测背景

图 12 给出使用传统 TBD 算法检测和航迹恢复的结果. 在图 12 中, (130, 130) 单元处的是图 9 中的仿真目标航迹, 其余为对实测数据中真实目标的检测航迹. 由图 12 可以看出, 传统 TBD 算法可以从高频地波雷达中检测出相应的舰船目标, 并且检测结果较恒虚警方法检测结果更加直观可靠, 但是 160 距离单元附近的电离层杂波也被检测到并形成杂乱的航迹(已确认该区域中没有真实目标). 这说明传统 TBD 方法虽然可行但是有一定局限性.

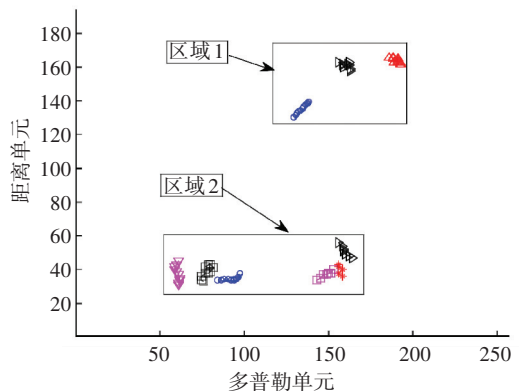


图 12 传统 TBD 方法检测

图 13 给出使用基于极化信息的 TBD 新方法的航迹检测结果. 从图 13 可以看出, 基于极化信息的 TBD 检测新方法在同样的背景中检测时, 160 距离单元附近的电离层杂波已经被压制, 这是因为该区域电离层杂波极化角较小, 通过极化加权使得该区域积累得到的值函数降低而低于最终检测门限. 此外, 对比图 12 和图 13 可以发现, 使用基于极化信息的 TBD 检测算法在同条件下多检测出一条航迹, 并且部分航迹更加明显, 这说明改进算法相对于传统算法不仅发现概率有所提高, 而且航迹跟踪效果也有所改善.

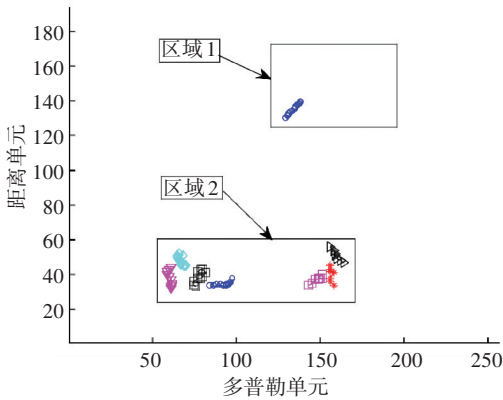


图 13 TBD 新方法检测结果

5 结 论

1) 经典检测算法如恒虚警检测算法无法在高频地波雷达中获得良好的检测性能, 检测前跟踪算法可以通过多帧累加获得一定的信噪比来检测目标, 但是在复杂的海态和小目标环境下, 常规动态规划算法检测跟踪性能欠佳.

2) 在 TBD 检测算法中引入极化信息, 并结合方向加权方法和预处理手段对检测算法做出改进. 仿真结果表明基于极化信息的 TBD 检测新算法在杂波背景下检测概率有所提高, 得到的航迹更加准确.

参考文献

- [1] SUN Minglei, XIE Junhao, JI Zhenyuan, et al. Remote sensing of ocean surface wind direction with shipborne high frequency surface wave radar [C] // Radar Conference (RadarCon 2015). Arlington VA: IEEE, 2015: 39-44.
- [2] DZVONKOVSKAYA A, ROHLING H. Fast-moving target observation using high-frequency surface wave radar [C] // Radar Conference (RadarCon 2014). Lille: IEEE, 2014: 1-4.
- [3] APRILE A, GROSSI E, LOPS M, et al. An application of track-before-detect to sea clutter rejection; experimental results based on real data [C] // European Microwave Conference. Rome: IEEE, 2014: 1808-1811.
- [4] YI W, MORELANDE M R, KONG L, et al. An efficient multi-frame track before detect algorithm for multi-target tracking [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7(3): 421-434.
- [5] GROSSI E, LOPS M, VENTURINO L. A novel dynamic programming algorithm for track-before-detect in radar systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(10): 2608-2619.
- [6] BUZZI S, LOPS M, VENTURINO L. Track-before-detect procedures for early detection of moving target form airborne radars [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 937-954.
- [7] ORLANDO D, VENTURINO L, LOPS M, et al. Track-before-detect strategies for STAP radars [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2): 933-938.
- [8] ORLANDO D, RICCI G. Track-before-detect algorithms for targets with kinematic constraints [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1837-1849.
- [9] COLLINS M J, DENBINA M, ATTEIA G. On the reconstruction of quad-pol SAR data from compact polarimetry data for ocean target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 591-600.
- [10] 强勇, 焦李成, 保铮. 动态规划算法进行弱目标检测的机理研究 [J]. 电子与信息学报, 2003, 25(6): 721-727.
- [11] 罗小云, 李明, 左磊, 等. 基于动态规划的雷达微弱目标检测 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1491-1496.
- [12] 夏共仪. 基于 TBD 方法的高频地波雷达弱目标检测与跟踪技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 41-42.
- [13] 赵宇. 基于动态规划的检测前跟踪算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 42-44.
- [14] MAO X, HONG H, DENG W, et al. Research on polarization cancellation of nonstationary ionosphere clutter in HF radar system [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015, 2015: 1-12.
- [15] 刘爱军. 基于极化信息的高频地波雷达干扰抑制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 106-108.
- [16] 洪泓, 毛兴鹏, 果然, 等. 基于距离-多普勒域的电离层杂波极化抑制方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(12): 2400-2405.

(编辑 王小唯 苗秀芝)