

# MIMO 雷达多目标检测前跟踪算法研究

关 键, 黄 勇

(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001)

**摘 要:** 本文基于检测前跟踪技术研究了 MIMO 雷达系统中多个运动目标的早期预警问题, 在推导已知目标数量时的二元广义似然比检验的基础上, 提出了一种次优的基于“逐目标消除和极坐标 Hough 变换(STC-PHT)”的多目标检测前跟踪算法, 并推导了该算法的虚警概率和检测概率表达式. 与以往的多目标检测前跟踪算法相比, 新算法具有较低的计算量, 且本质上无需目标数量的先验信息, 避免了目标数量未知时需执行多元假设检验的问题. 仿真分析表明, 新算法能有效地改善 MIMO 雷达在低信噪比条件下的检测性能.

**关键词:** MIMO 雷达; 逐目标消除; 极坐标 Hough 变换; 检测前跟踪; 广义似然比检验

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1449-05

## Track-Before-Detect Algorithm in a MIMO Radar Multi-Target Environment

GUAN Jian, HUANG Yong

(Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

**Abstract:** This paper investigated the early detection problem of multiple moving targets in MIMO radar systems using the track-before-detect (TBD) techniques. Based on the binary generalized likelihood ratio test (GLRT) with a priori known number of targets, a suboptimum multi-target TBD algorithm using successive-target-cancellation and polar Hough transform (STC-PHT) was proposed, and false alarm probability and detection probability formulae were derived. Compared with previous multi-target TBD algorithms, the new proposed algorithm has low computational complexity, no need for the prior information of the number of targets, and avoids the implementation of multiple hypothesis tests when the number of targets is unknown. The simulation results show that the new proposed algorithm can effectively improve the detection performance of MIMO radar at low signal-to-noise ratio.

**Key words:** MIMO radar; successive-target-cancellation (STC); polar hough transform (PHT); track-before-detect (TBD); generalized likelihood ratio test (GLRT)

### 1 引言

在 MIMO 雷达探测过程中, 发射天线、接收天线和目标三者之间的相对位置关系随着目标的运动不断变化, 因此空间分集的条件并不总能得到满足. 即使是满足空间分集的条件, 空间分集对检测性能的改善也仅仅发生在较高信噪比时. 而且 MIMO 雷达的宽发射波束会降低发射功率密度, 进而降低了接收信噪比. 通过延长相参照射时间来提高信噪比的做法会受到许多实际因素的制约. 考虑到上述情况, 一种改善低信噪比条件下 MIMO 雷达检测性能的可行想法是利用目标运动信息进行长时间非相参积累, 其中 TBD 技术是实现这一想法的有效方法之一.

文献[1]简述了宽发射波束条件下采用 TBD 技术的必要性和可行性, 但没有研究具体的 TBD 算法. 文献[2,3]从多雷达系统数据互联的角度研究了基于 PHT

的单目标 TBD 算法在 MIMO 雷达中的应用问题. 本文将在此基础上研究 MIMO 雷达中多目标 TBD 问题的 GLRT 及其次优解.

另外, 在多目标环境中, 协方差矩阵估计相当于非均匀背景中的估计问题, 需要对参考距离单元进行选择, 相关研究可参考文献[4], 本文假设已经选出合适的参考距离单元.

### 2 广义似然比检验(GLRT)的推导

本文考虑由  $N$  个各向同性辐射的发射天线和  $M$  个  $d$  元均匀线阵接收天线组成的统计 MIMO 雷达系统. 同一次照射时, 各个发射天线都辐射包含  $L$  个相参脉冲的脉冲串波形, 且这  $N$  个波形相互正交. 总照射次数为  $Q$ . 利用发射波形的正交性可得  $MN$  个观测通道. 将所有观测通道在第  $q$  ( $q = 1, \dots, Q$ ) 次照射时获得的观测矢量排列成  $v = MNdL$  维长矢量  $z_q$ , 则有

$$\mathbf{z}_q = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{q,k} \mathbf{p}_{q,k} + \mathbf{w}_q = \mathbf{H}_q \mathbf{p}_q + \mathbf{w}_q \quad (1)$$

其中  $K$  为目标数量,  $\mathbf{H}_q = [\mathbf{H}_{q,1}, \dots, \mathbf{H}_{q,K}]$ ,  $\mathbf{p}_q = [\mathbf{p}_{q,1}^T, \dots, \mathbf{p}_{q,K}^T]^T$ ,  $\mathbf{H}_{q,k}$  和  $\mathbf{p}_{q,k}$  表示第  $q$  次照射第  $k$  个目标的空时模式矩阵和复幅度矢量,

$$\mathbf{H}_{q,k} = \text{Diag}(\mathbf{h}_{q,k,11}, \dots, \mathbf{h}_{q,k,mn}) \quad (2)$$

其中  $\text{Diag}(\cdot)$  是模块对角化算子;  $\mathbf{h}_{q,k,mn}$  表示第  $q$  次照射第  $k$  个目标在第  $mn$  个观测通道中的空时导向矢量; “杂波 + 热噪声”观测矢量  $\mathbf{w}_q$  是均值为  $\mathbf{0}$ , 协方差矩阵为  $\mathbf{R}_q$  的复高斯随机矢量. 那么式(1)对应的 GLRT 为

$$\text{Max}_{\mathbf{p}_q \in \phi(\mathbf{P}_{q-1})} \left\{ \sum_{q=1}^Q \mathbf{z}_q^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{H}_q (\mathbf{H}_q^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{H}_q)^{-1} \mathbf{H}_q^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{z}_q \right\} \quad (3)$$

其中, 由于各次照射时间间隔较长 (例如秒级), 因此  $Q$  次照射得到的观测矢量  $\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_Q$  相互统计独立;  $\hat{\mathbf{R}}_q$  是  $\mathbf{R}_q$  的最大似然估计;  $\mathbf{P}_q \in \phi(\mathbf{P}_{q-1})$  表示两次连续照射之间目标位置信息的传递关系,  $\mathbf{P}_q$  是第  $q$  次照射  $K$  个目标位置信息的集合.

假设在一次照射时同一个观测通道中, 任意两个目标不处在同一个距离单元中, 基于此假设条件,  $\mathbf{H}_{q,k}^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{H}_{q,k} = 0$  成立, 从而式(3)的 GLRT 可简化为,

$$\text{Max}_{\mathbf{p}_q \in \phi(\mathbf{P}_{q-1})} \left\{ \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \mathbf{T}_{q,k} \right\} = \text{Max}_{\mathbf{p}_q \in \phi(\mathbf{P}_{q-1})} \left\{ \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{q,k}^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{H}_{q,k} (\mathbf{H}_{q,k}^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{H}_{q,k})^{-1} \mathbf{H}_{q,k}^H \hat{\mathbf{R}}_q^{-1} \mathbf{z}_{q,k} \right\} \quad (4)$$

$\mathbf{z}_{q,k}$  是第  $q$  次照射第  $k$  个目标在所有观测通道上形成的观测矢量. 由式(4)可知, MIMO 雷达 TBD 问题的 GLRT 可简化为如下两个步骤:

(1) 基于第  $q$  次照射时第  $i$  个距离-方位分辨单元中的观测矢量  $\mathbf{z}_{q,i}$ , 计算检验统计量  $\mathbf{T}_{q,i}$ , 形成此次照射时的数据空间. 为了便于描述, 后续将  $\mathbf{T}_{q,i}$  称为“幅值”.

(2) 根据位置信息的传递关系  $\mathbf{P}_q \in \phi(\mathbf{P}_{q-1})$ , 在  $Q$  帧数据空间中进行搜索, 并积累幅值  $\mathbf{T}_{q,i}$ . 取积累值最大者进行门限判决.

显然, 此 GLRT 的最优解需进行两维位置信息的  $K$  维联合搜索, 其搜索量非常大, 因此本文寻求次优解. 借鉴文献[5]中“逐目标消除(STC)”的思想, 即“将  $K$  维联合搜索近似为多个独立的一维搜索”, 本文提出了一种基于 STC-PHT 的多目标 TBD 算法, 其中与文献[5]的 STC 技术不同, 本文的 STC 技术是指对 Hough 参数空间中的各个参数单元依次独立地进行检测判决.

### 3 基于 STC-PHT 的多目标 TBD 算法

#### 3.1 算法的具体步骤

(1) 用  $r = r_p \cdot \cos(\theta_p - \theta)$  将  $Q$  帧数据空间中通过第一门限  $Z_1$  的所有数据点变换到 Hough 参数空间中, 其

中  $r_p$  和  $\theta_p$  是第  $p$  个数据点的距离和方位信息. 将变换后每个参数单元包含的各数据点的幅值之和称为该参数单元的度量值.

(2) 取出度量值最大的参数单元中的各个数据点, 并根据位置信息传递关系对各个数据点进行关联, 形成点迹, 并积累该点迹中各数据点的幅值; 取累积幅值最大者与第二门限  $Z_2$  进行比较, 判定目标是否存在.

(3) 若目标存在, 则将目标计数加 1, 并记录该目标的点迹, 其中数据点数就是该点迹的长度. 然后将其它参数单元中属于该点迹的点删除. 最后不论是否存在目标, 都将该参数单元的度量值置为 0, 这样就形成了新的参数空间.

(4) 重复步骤(2)~(3), 遍历整个参数空间, 最终得到目标数量的估计和目标点迹.

由上述步骤可知, 与文献[5~7]研究的多目标 TBD 算法相比, 本文算法的特点与优势在于: (1) 它是针对点迹参数而非点迹本身的搜索算法, 因此不要求每次照射时目标位置之间都间隔很大; (2) 具备多目标同时形成峰值的能力, 本质上不需要目标数量的先验信息, 不存在多目标联合搜索的多元假设检验问题; (3) 克服了直接在 Hough 参数空间设置统一门限以及采用二值积累等做法带来的各目标之间相互影响的缺陷.

上述步骤中, 关键是求解第一门限  $Z_1$  和第二门限  $Z_2$ , 3.2 节将对此展开详细论述.

#### 3.2 虚警概率与 CFAR 门限的函数关系

本文算法利用 STC 技术, 将多目标检测问题近似为针对各个参数单元的单目标检测问题, 因此虚警率的控制也应当转换为控制各个参数单元中的虚警率. 为求解虚警概率与 CFAR 门限的函数关系, 需先做如下三点说明.

(1) 设整个参数空间的虚警概率为  $P_{FA}$ , 并依据 Hough 可达空间以及对所检测点迹最小长度  $n_0$  的要求找出参数空间中的有效参数单元及其总数  $N_1$ , 且假设各有效参数单元中的虚警概率均相同, 即为  $1 - \sqrt[n_0]{1 - P_{FA}}$ . 这个假设的合理性在于每个参数单元都意味着一个可能的目标;

(2) 根据 Hough 可达空间以及位置传递关系确定的搜索范围, 确定各次照射时的最大可行数据点数  $n_1$ , 以及各个参数单元中包含的最大照射次数, 即点迹的最大长度  $n_3$ , 显然  $n_3 \leq Q$ ;

(3) 规定任意长度为  $n_2$  的虚假点迹的累积幅值  $Y$  超过  $Z_2$  的概率  $P_{Y0} = P\{Y \geq Z_2(n_2)\}$  均相同, 其中  $Z_2$  是  $n_2$  的函数.

于是,  $P_{Y0}$  可由下式求得,

$$1 - \sqrt[n_0]{1 - P_{FA}} = P_{Y0} \cdot \sum_{n_2=n_0}^{n_3} [C_{n_3}^{n_2} p_{\Gamma}^{n_2} p_2^{n_3-n_2}] \quad (5)$$

其中  $C_{n_3}^{n_2}$  表示求组合数;  $p_{fa}$  是  $Z_1$  对应的虚警概率;  $p_1 = n_1 \cdot p_{fa}$ ;  $p_2 = (1 - p_{fa})^{n_1}$ . 下面结合幅值的统计特性推导  $Z_1$  和  $Z_2(n_2)$  的计算式.

#### (1) 第一门限 $Z_1$ 的求解

就每次照射而言, 本文设置的场景与文献[8]是相同的, 因此可直接利用该文献推导的虚警概率  $p_{fa}$  与  $Z_1$  的关系式, 如下式所示,

$$p_{fa} = 1 - E_b \left\{ \psi \left( \frac{bZ_1}{G + bZ_1}, MN, G - v + 1 \right) \right\} \quad (6)$$

其中  $b$  服从参数为  $G - v + MN + 1$  和  $v - MN$  的  $\beta$  分布;  $E_b \{ \cdot \}$  表示关于随机变量  $b$  取均值; 函数  $\psi(c, a, b)$  表示参数为  $a$  和  $b$  的  $\beta$  分布的概率分布函数在  $c$  值处的函数值;  $G$  是估计背景协方差矩阵时用到的参考距离单元个数.

#### (2) 第二门限 $Z_2$ 的求解

文献[8]表明, 各数据点的幅值服从以  $b$  为条件的复  $F$  分布, 因此很难直接推导  $Y$  的概率分布, 此时可采用 Padé 近似方法求解  $Z_2$ [6], 但求解过程很繁琐. 若假设  $G \rightarrow \infty$ , 即  $\hat{R}_q \rightarrow R_q$ , 那么  $Z_2$  的求解就变得简单了, 其结果可作为一般情况下的参考. 此时,  $Y$  服从自由度为  $n_2 MN$  的卡方分布, 那么  $Z_2(n_2)$  的计算式为,

$$PY0 = \int_{Z_2(n_2)}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(n_2 MN)} y^{n_2 MN - 1} e^{-y} dy \quad (7)$$

### 3.3 检测概率表达式

各有效参数单元中检测概率表达式  $P_D$  为,

$$P_D = \sum_{n_2=n_0}^{n_3} \left[ C_{n_3}^{n_2} p_d^{n_2} (1 - p_d)^{n_3 - n_2} \cdot PY1 \right] \quad (8)$$

其中  $PY1$  是长度为  $n_2$  的可能目标点迹的累积幅值  $Y$  超过  $Z_2$  的概率;  $p_d$  是  $Z_1$  对应的检测概率, 其表达式为[8],

$$p_d = E_{\xi} \left\{ 1 - E_b \left\{ e^{-\xi} \sum_{g=0}^{\infty} \psi \left( \frac{bZ_1}{G + bZ_1}, MN + g, G - v + 1 \right) \right\} \right\} \quad (9)$$

其中随机变量  $\xi$  是杂波抑制后各个观测通道的剩余信噪比之和. 令  $SNR$  表示杂波抑制后各个观测通道的剩余信噪比的均值, 那么当各观测通道相互统计独立且  $G \rightarrow \infty$  时, 式(9)可简化为,

$$p_d = \int_{Z_1/(SNR+1)}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(MN)} y^{MN-1} e^{-y} dy \quad (10)$$

且,  $PY1 = \int_{\frac{Z_2(n_2)}{SNR+1}}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(n_2 MN)} y^{n_2 MN - 1} e^{-y} dy$ .

但对于各观测通道间或者各次照射间目标 RCS 完全相关的情况, 只能根据式(8)和式(9), 通过仿真来获取这些情况下的检测性能曲线.

## 4 数值仿真

### 4.1 仿真结果

仿真参数如下:  $N = M = 3$ ,  $d = 8$ ,  $L = 16$ ,  $Q = 25$ ,  $P_{FA} = 10^{-6}$ ,  $n_0 = 6$ . 为了简化分析, 假设背景为白噪声.  $K = 2$  个目标的真实运动点迹如图 1 中符号“o”所示.

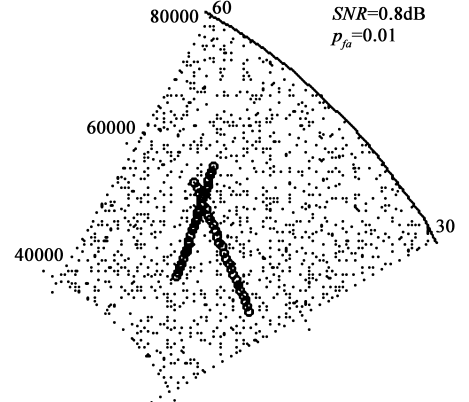


图1 第一门限后的数据空间

图 2 基于 3.2 和 3.3 节的理论分析, 给出了单个 Hough 参数单元中, 三种假设情况下的性能曲线, 并与情况 0, 即“不采用 TBD 技术且各观测通道独立”条件下的检测性能进行比较. 其中各个观测通道中, 各次照射时目标的 RCS 都是指数分布的随机变量, 而情况 1~3 的区别在于不同的 RCS 起伏特性. 横坐标  $SNR$  如 3.3 节所定义, 并忽略距离变化对  $SNR$  的影响.

图 2 是理论分析的结果, 并没有考虑实际中存在的各种误差, 如目标运动的过程误差、雷达测量误差、Hough 参数空间的分割等等, 为此表 1 列出了情况 1 条件下, 本文算法在已知与未知目标数量两种情况进行 100 次 Monte-Carlo 仿真得到的检测结果, 其中目标的真实数量是 2, 并考虑了各种误差的影响. 另外, 仿真中对虚警的定义是“检测到的点迹中, 若有半数以上的点是噪声点, 那么就认为该点迹是虚假点迹, 即为虚警”.

### 4.2 结果分析

(1) 由图 2(a)~(c) 可知, 在不同的 RCS 起伏情况下,  $p_{fa}$  对检测性能的影响是不同的.

**现象 1** 图 2(a) 中似乎存在最优  $p_{fa}$  值, 当  $p_{fa}$  高于或低于此值时, 检测性能都会下降;

**解释** 由于 MIMO 雷达系统多个独立观测通道以及多次照射对信噪比的平均作用, 可近似等价认为情况 1 中, 本文算法是在恒定信噪比条件下执行的, 因此在同一信噪比条件下, 不同  $p_{fa}$  导致不同  $P_D$  的主要原因在于通过  $Z_1$  的数据点数的不同. 较高的  $p_{fa}$  将有较多的目标数据点通过  $Z_1$ , 因而在与噪声点迹的竞争中拥有较强的竞争能力, 而较低的  $p_{fa}$  对应较少的目标数据点通过  $Z_1$ , 在与噪声点迹的竞争中不如前者强, 因为噪声

数据点容易形成较短的点迹. 但是当  $p_{fa}$  超过一定程度时, 通过  $Z_1$  的目标数据点数不一定会增加, 相反由于超过  $Z_1$  的噪声点数据的进一步增加, 噪声点迹的竞争能力增强, 因此  $P_D$  将会有所下降. 这表明在情况 1 中应该存在一个最优的  $p_{fa}$  值. 在实践中, 此最优值可选择为稍大一点的  $p_{fa}$  值, 如  $p_{fa} = 0.1$ .

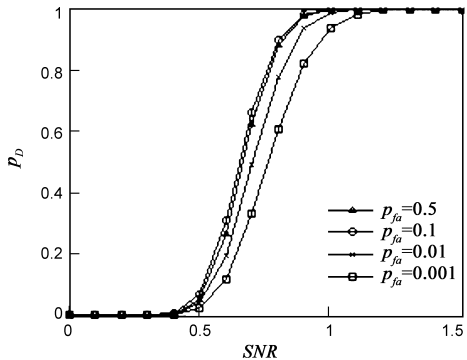
**现象 2** 图 2(c) 中  $p_{fa}$  对检测性能的影响与平均信噪比 SNR 有关, 在低 SNR 区域, 高  $p_{fa}$  对应的检测性能优于低  $p_{fa}$ , 而在高 SNR 区域, 则相反. 图 2(b) 的结果介于图 2(a) 与图 2(c) 之间, 下面就对图 2(b) 的结果做单独解释.

**解释** 图 2(c) 中各条检测概率曲线都是在给定 SNR 条件下对多个随机信噪比进行 Monte-Carlo 仿真的基础上平均得到的.

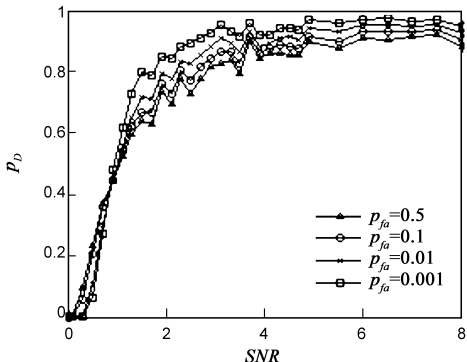
图 2(a) 中, 高  $p_{fa}$  时的性能曲线比低  $p_{fa}$  时的陡峭, 这表明 SNR 的变化对高  $p_{fa}$  时的检测性能有较大影响. 基于此现象可以推断, 在低 SNR 区域, 由于少量高的随机信噪比能明显提高高  $p_{fa}$  条件下的检测性能, 因此对

各个随机信噪比条件下的检测概率取平均后, 高  $p_{fa}$  时的检测性能将优于低  $p_{fa}$ . 同理, 在高 SNR 区域, 由于少量低的随机信噪比能明显降低高  $p_{fa}$  条件下的检测性能, 因此对各个随机信噪比条件下的检测概率取平均后, 低  $p_{fa}$  时的检测性能将优于高  $p_{fa}$ . 这一现象表明, 在情况 3 中, 应适当选择较小的  $p_{fa}$  值.

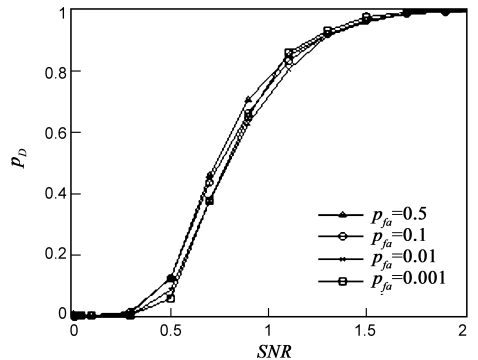
最后, 图 2(d) 清楚地表明, 与不采用 TBD 技术的情况 0 相比, 采用 TBD 技术能显著地改善 MIMO 雷达系统在低信噪比条件下的检测性能, 其性能改善来源于利用了目标的运动信息. 根据图 2(d) 中的曲线和椭圆处的放大图, 还可以得出更一般的结论, 就对目标 RCS 起伏的抑制作用而言, MIMO 雷达系统是通过空域扩展来抑制目标 RCS 起伏, 而 TBD 技术是通过时域扩展来达到这一目的的, 基本手段都是非相参积累, 两者实际上是异曲同工. 鉴于传统上比较 MIMO 雷达与相控阵雷达二者检测性能时所采用的方式, TBD 条件下, 相控阵雷达单通道观测实际上就对应着情况 2 和 3 中的观测通道完全相关.



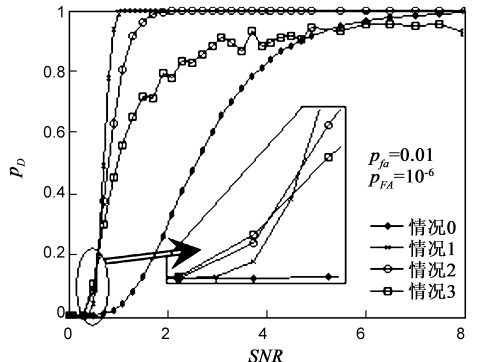
(a) 情况1: 观测通道间、各次照射间目标RCS统计独立



(c) 情况3: 观测通道间、各次照射间目标RCS完全相关



(b) 情况2: 观测通道完全相关, 各次照射间目标RCS独立



(d) 四种假设情况下检测性能比较

图2

(2)表 1 的 Monte-Carlo 仿真结果分析.

(1)对比已知与未知目标数量两种条件下的检测结果可知, 未知目标数量时, 尽管需对 Hough 空间中所有有效参数单元进行搜索, 大大增加了运算量, 但本文算法在检测性能指标(正确检测的次数, 虚警次数)上并没有明显下降.

这两个方面的原因, 一是, 本文算法将整个 Hough 参数空间中的多目标检测问题转化为在各个参数单元中独立进行单目标检测判决, 因此该算法在本质上并不要求已知目标数量的信息; 另一方面是, 算法在虚警率控制上是针对整个 Hough 参数空间的, 因此在未知目标数量的条件下并不会明显增加虚警次数.

(2) 表 1 的虚警概率明显高于预先设定的  $P_{FA} = 10^{-6}$ , 主要原因在于 3.2 节得出的虚警概率与 CFAR 门限的表达式中没有考虑到实际中存在的目标位置误差对虚警的增强作用, 致使求得 CFAR 门限偏低, 从而导致实际得到的虚警概率明显高于设定值。

表 1 100 次 Monte-Carlo 仿真的实验结果

$P_{fa}$	已知目标数量				未知目标数量		
	正确检测到 1 个目标	正确检测到 2 个目标	出现虚警	2 目标检测结束时的平均搜索单元个数	正确检测到 1 个目标	正确检测到 2 个目标	出现虚警
0.5	21	76	1	517	22	75	2
0.1	19	80	1	101	18	81	1
0.01	40	58	0	13	42	56	1
0.001	68	30	0	9	67	32	0

## 5 总结

本文研究了 MIMO 雷达系统中的多目标检测前跟踪问题, 提出了一种基于 STC-PHT 的多目标 TBD 算法, 并推导了虚警概率与检测概率的表达式. 该算法在 MIMO 雷达系统不同应用场景中的仿真分析表明, TBD 技术能够明显改善 MIMO 雷达系统在低信噪比区域的检测性能。

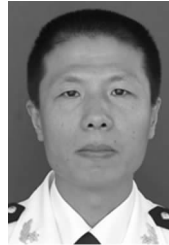
本文在推导虚警概率与 CFAR 门限的关系式的过程中, 尚未考虑目标位置误差带来的影响, 这是今后需要进一步研究的问题。

### 参考文献:

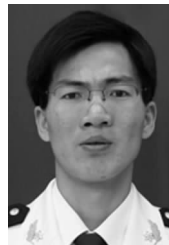
- [1] 张明友. 数字阵列雷达和软件化雷达[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 378 - 379.  
Zhang Ming-you. Digital Array Radar and Software Defined Radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 378 - 379. (in Chinese)
- [2] C Kabakchiev, I Garvanov, L Doukovska, V Kyovtorov, H Rohling. Data association algorithm in multiradar system[A]. Proc 2008 IEEE International Radar Conference[C]. Rome: IEEE AESS, 2008. 1 - 4.
- [3] C Kabakchiev, I Garvanov, L Doukovska, V Kyovtorov, H Rohling. Data association algorithm in TBD multiradar system [A]. Proc 2007 International Radar Symposium[C]. Cologne: GIN, 2007. 521 - 525.

- [4] A K Shackelford, K Gerlach, S D Blunt. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(1): 58 - 69.
- [5] S Buzzi, M Lops, L Venturino, M Ferri. Track-before-detect procedures in a multi-target environment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 1135 - 1150.
- [6] 曲长文, 黄勇, 苏峰. 基于动态规划的多目标检测前跟踪算法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2138 - 2141.  
Qu Chang-wen, Huang Yong, Su Feng. Radar track before detect algorithm of multitarget based on the dynamic programming [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2138 - 2141. (in Chinese)
- [7] 黄勇. 雷达检测前跟踪算法的研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2005. 32 - 73.  
Huang Yong. Research on the Radar Track Before Detect Algorithm[D]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2005. 32 - 73. (in Chinese)
- [8] 关键, 黄勇. 高斯色噪声中 MIMO 分布孔径雷达检测性能分析[J]. 中国科学, 2009, 39(3): 363 - 369.  
Guan Jian, Huang Yong. Detection performance analysis for MIMO radar with distributed apertures in Gaussian colored noise[J]. Science in China-Part F, 2009, 39(3): 363 - 369. (in Chinese)

### 作者简介:



关键 男, 1968 年生, 海军航空工程学院教授、博士生导师, 研究方向为雷达目标检测、阵列信号处理、图像处理。  
E-mail: guanjian96@tsinghua.org.cn



黄勇 男, 1979 年生, 海军航空工程学院博士生, 研究方向为雷达目标检测、阵列信号处理。  
E-mail: huangyong\_2003@163.com

