

临近空间高超声速目标 RHT-TBD 算法

A RHT-TBD Algorithm for Near Space Hypersonic Target

王国宏, 李林, 张翔宇, 于洪波

(海军航空工程学院信息融合研究所, 山东 烟台 264001)



王国宏

王国宏(1963-),男,山西沁水人,教授,博导,泰山学者特聘教授,入选“百千万人才工程”国家级人选,享受国务院政府特殊津贴。获“全国优秀博士学位论文”奖、“全国优秀博士后”称号;获科技进步奖十余项,其中,国家科技进步二等奖2项。出版获基金资助专著4部,在国内外发表学术论文160余篇(90余篇被国际三大检索收录)。主要研究领域有信息融合、雷达组网、目标检测与跟踪等。

0 引言

临近空间高超声速飞行器是指在距离地面20~100 km,以马赫数5以上的速度进行飞行的飞行器。其具有飞行速度快、巡航高度高、突防能力强的作战特点,随着临近空间高超声速飞行器技术的不断成熟及其在军事领域的进一步应用,必将对国家空天安全产生战略性影响^[1-4]。因此,针对临近空间高超声速目标的检测跟踪已经成为了一个亟待解决的问题。

检测前跟踪(Track Before Detect, TBD)技术是一种实现微弱目标

针对临近空间高超声速目标检测前跟踪问题,提出了一种基于随机 Hough 变换的检测前跟踪算法。通过对临近空间高超声速目标量测数据进行误差分析,采用时间-径向距离平面进行随机 Hough 变换,将量测转换到参数空间,并通过计算分析得到参数空间中进行参数合并时允许误差的选取标准,对目标量测进行积累。通过仿真对算法有效性进行了验证,并将本文算法与标准 HT-TBD 算法进行了比较分析。仿真结果表明,相比于标准 Hough 变换,本文算法能够有效减少算法运行时间和虚假航迹数,对临近空间高超声速目标进行有效检测。

关键词:高超声速目标;检测前跟踪;随机 Hough 变换;量测误差;临近空间
中图分类号:TN957 文章编号:1671-637X(2016)09-0001-06

检测跟踪的有效方法,其不在每次扫描时对目标进行检测,而是对来自同一个目标的回波信息进行非相参积累,提高目标的信噪比(SNR),在获取检测结果的同时获取目标的航迹^[5-6]。

基于 Hough 变换的检测前跟踪算法(HT-TBD)具有对局部缺损不敏感,对随机噪声鲁棒性等优点,因而在雷达目标检测跟踪领域应用广泛^[7-10]。由于基于标准 Hough 变换的 TBD 算法存在存储量大、计算时间长等问题,文献[11]提出了一种随机 Hough 变换(RHT)的方法,该方法通过在数据空间随机采样,采用多对一映射进行积累,有效提高了算法性能;文献[12]针对运动目标特性,研究了随机采样次数的问题,并给出了采样次数的取值范围;文献[13]提出了一种基于 Roberts 表示法的三维随机 Hough 变换法,通过 Roberts 参数合并,有效减少了随机 Hough 变换的不合理采样次数;文献[14]针对机载多普勒雷达对机动目标进行检测跟踪的问题,提出了一种基于距离多假设扩展的

抛物线随机 Hough 变换 TBD 算法,有效解决了测距模糊条件下机动弱目标的检测跟踪问题。但对于临近空间高超声速目标,为实现早期预警,通常雷达与目标间距离较远,雷达得到的量测数据存在较大的误差,为克服这个问题,在随机 Hough 变换时,参数空间中进行参数合并的允许误差选取标准就显得尤为重要,但从现有文献来看,针对这个选取标准的研究较少,特别是对于使用 HT-TBD 算法对临近空间高超声速目标进行检测前跟踪,该问题已经成为提高算法性能的关键。

针对上述问题,本文首先通过对远距离条件下量测误差进行分析,确定采用时间-径向距离平面,而非传统的 $x-y$ 位置平面进行随机 Hough 变换,而后通过对量测误差及 Hough 变换方程的分析计算,给出了参数空间中进行参数合并时允许误差 $\Delta\rho$ 与 $\Delta\theta$ 的选取标准,依据这个标准在参数空间中对目标量测进行积累检测,由于在 Hough 变换中未考虑方位角信息,因此,算法利用目标的速度、航向等特征对 Hough 变

换后得到的可能航迹进行输出约束,最终实现对临近空间高超声速目标的有效检测。

1 问题分析

1.1 时间-径向距离平面 Hough 变换的选取

基于 Hough 变换的 TBD 算法通常采用位置量测数据进行变换,以直线运动目标为例,可将 x - y 坐标系中的量测数据变换到参数空间,即

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

式中: ρ 为原点到直线的法线距离; θ 为该法线与横轴正向的夹角。对于一条直线上的点 (x_i, y_i) , 必有两个唯一的参数 ρ_0 和 θ_0 与之对应^[15], 即

$$\rho_0 = x_i \cos \theta_0 + y_i \sin \theta_0 \quad (2)$$

但对于临近空间高超声速目标, 为保证足够的预警时间, 雷达对目标进行探测时, 目标与雷达之间的距离通常很远, 在雷达的方位角量测精度不高的情况下, 所获得的目标位置量测数据误差较大, 此时再采用位置量测数据进行变换, 很难实现对目标的有效检测跟踪。假设雷达测角误差为 $\Delta\alpha$, 目标径向距离为 r , 则由式(3)可得测角误差引起的目标横向偏差 ΔR 为

$$\Delta R = \frac{\pi \times \Delta\alpha}{180^\circ} r \quad (3)$$

根据式(3), 假设雷达测角误差为 0.2° , 目标径向距离为 500 km , 则目标横向偏差可达到 1.7 km , 根据高斯误差分布定律中的 3σ 准则, 目标横向偏差最大可达 5.1 km 。可以看出, 雷达测角误差对于临近空间高超声速目标位置量测数据影响较大, 但目标径向距离数据仅受测距误差影响, 精度较高, 选用时间-径向距离量测数据可有效避免测角误差影响。并且时间数据直接表征了目标运动的时序信息, 利用时间信息可以剔除大量不符合运动规律的虚假轨迹。

因此, 本文选用时间-径向距离

量测数据进行 Hough 变换, 目标在时间-径向距离平面的运动轨迹可近似为直线, 其运动轨迹可表示为

$$\rho = t \cos \theta + r \sin \theta \quad (4)$$

1.2 参数空间允许误差选取标准

式(4)描述了目标在时间-径向距离平面的运动方程, 对于同一条直线上的任意一点, 其对应的参数空间曲线必然交于一点 (ρ_0, θ_0) , 该点即为目标的运动参数。

根据随机 Hough 变换原理, 假设随机选取时间-径向距离平面内一条直线上的两点分别为 (t_1, r_1) , (t_2, r_2) , 根据这两点坐标, 联立方程组

$$\begin{cases} \rho = t_1 \cos \theta + r_1 \sin \theta \\ \rho = t_2 \cos \theta + r_2 \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

解得

$$\begin{cases} \theta_0 = \arctan\left(-\frac{t_2 - t_1}{r_2 - r_1}\right) \\ \rho_0 = t_1 \cos \theta_0 + r_1 \sin \theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

通过式(6)可以得到任意两点所对应的参数。在不考虑量测误差的情况下, 若选取的点均属于同一个目标运动轨迹, 那么得到的参数应该是相同的。但由于量测误差的存在, 得到的参数会集中在参数空间中以真实参数 (ρ_0, θ_0) 为中心的一定范围内, 即若满足 $|\rho_i - \rho_0| \leq \Delta\rho$ 且 $|\theta_i - \theta_0| \leq \Delta\theta$, 则认为所选取的点属于参数 (ρ_0, θ_0) 对应的运动轨迹。其中, $\Delta\rho$ 与 $\Delta\theta$ 就是参数空间中进行参数合并时的最大允许误差。若允许误差的取值较小, 则无法对目标轨迹进行有效积累; 若允许误差的取值过大, 则会引入大量杂波, 造成无效积累。因此, 如何对允许误差进行有效选取, 无疑是影响算法性能的关键。本文就针对该选取标准, 进行分析讨论。

对于量测数据 (t_i, r_i) , 假设雷达量测的距离误差为 dr , 而时间数据不存在误差, 可作为常量, 对式(6)求导得

$$d\rho_0 = \sin \theta_0 dr_1 + (r_1 \cos \theta - t_1 \sin \theta_0) d\theta_0 \quad (7)$$

$$d\theta_0 = \frac{t_2 - t_1}{(r_2 - r_1)^2 + (t_2 - t_1)^2} \cdot (dr_2 - dr_1) \quad (8)$$

假设雷达量测误差服从正态分布, 且 $dr_1 \sim N(0, \sigma_r^2)$, $dr_2 \sim N(0, \sigma_r^2)$, 代入式(8)可得

$$d\theta_0 \sim N\left\{0, 2[(t_2 - t_1) / ((r_2 - r_1)^2 + (t_2 - t_1)^2)]^2 \sigma_r^2\right\} \sim N(0, \sigma_{\theta_0}^2) \quad (9)$$

将 $d\theta_0$ 代入式(7)可得

$$d\rho_0 \sim N\left\{0, \sin^2 \theta_0 \sigma_r^2 + [(\sqrt{2}(t_2 - t_1) \cdot (r_1 \cos \theta_0 - t_1 \sin \theta_0)) / ((r_2 - r_1)^2 + (t_2 - t_1)^2)]^2 \sigma_r^2\right\} \sim N(0, \sigma_{\rho_0}^2) \quad (10)$$

由式(9)与式(10)可知, 每选取一个点对, 都可以得到其对应的参数空间对应参数的误差分布, 根据高斯误差定律, 若随机误差的分布密度函数为正态分布密度函数, 则误差介于 3σ 范围内的概率为 99.7% , 因此, 本文给出的参数空间允许误差选取标准为

$$\begin{cases} \Delta\theta_0 = 3\sigma_{\theta_0} \\ \Delta\rho_0 = 3\sigma_{\rho_0} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 本文给出的允许误差选取标准不是一个固定的值, 而是根据每次随机采样点的不同动态变化的, 需要在运算时进行实时更新。

2 算法实现

假设雷达接收到的量测数据帧数为 N , 量测数据集 $Z = \{z_n | n = 1, 2, \dots, N\}$, 其中, $z_n = \{(r_n^k, \theta_n^k, A_n^k) | k = 1, 2, \dots, K_n\}$, r_n^k, θ_n^k, A_n^k 分别表示该量测点的径向距离、方位角和回波能量幅度信息, 时间信息包含在帧数 n 中, K_n 表示第 n 帧回波中接收到的量测点数。

2.1 改进的随机 Hough 变换

对接收到的雷达原始量测数据进行时间-径向距离平面 Hough 变换, 形成可能航迹, 主要包括以下步骤。

1) 根据初始虚警概率 P_{fa} 设置初始门限, 以消除部分杂波影响, 得到过门限后的量测数据, 初始化为

态链接列表 F , 采样次数 $s = 1$, 最大采样次数为 S 。

2) 随机采样, 随机从两帧量测数据中各取一点, 分别记为 $(r_{n_1}, \theta_{n_1}, A_{n_1}), (r_{n_2}, \theta_{n_2}, A_{n_2})$, 计算选取两点对应的速度 v_0

$$v_0 = |r_{n_1} - r_{n_2}| / |n_1 - n_2| * T \quad (12)$$

式中: n_1, n_2 分别表示两采样点对应的帧数; T 为雷达扫描周期。给定目标的速度变化区间 (v_{\min}, v_{\max}) , 若 $v_{\min} \leq v_0 \leq v_{\max}$, 则认为选取的点对为有效点对, 转至 3), 否则, 跳转至 4)。

3) 由式(6)计算选取点对所对应的运动参数 ρ_0, θ_0 , 根据 1.2 节给出的参数空间允许误差选取标准确定极距允许误差与极角允许误差 $\Delta\rho_0, \Delta\theta_0$ 。搜索动态链接列表 F 中的运动参数, 找出满足所有参数对应的集合 $f_0 = \{(\rho_i, \theta_i) \mid |\rho_i - \rho_0| \leq \Delta\rho_0 \text{ 且 } |\theta_i - \theta_0| \leq \Delta\theta_0\}$ 。若 $f_0 = \emptyset$, 即动态链接列表中没有参数与 (ρ_0, θ_0) 匹配, 则将 (ρ_0, θ_0) 插入到动态链接列表中, 并分别对其对应的点数与能量积累矩阵进行积累; 若 $f_0 \neq \emptyset$, 则找出 f_0 中与 (ρ_0, θ_0) 距离最近的一组参数 (ρ_i, θ_i) , 对其对应的点数与能量积累矩阵进行积累, 并用参数 (ρ'_i, θ'_i) 代替 (ρ_i, θ_i) 对动态链接列表进行更新, 即

$$(\rho'_i, \theta'_i) = \left(\frac{\rho_i + \rho_0}{2}, \frac{\theta_i + \theta_0}{2} \right) \quad (13)$$

4) 令采样次数 $s = s + 1$, 若 $s < S$, 则跳转至 2), 否则, 执行 5)。

5) 设置点数积累门限和能量积累门限, 当动态链接列表中参数对应的点数积累值与能量积累值均超过预定门限时, 认为是有效检测, 进行 Hough 逆映射, 得到可能航迹。

2.2 航迹输出条件

对于经时间-径向距离平面 Hough 变换后得到的可能航迹, 由于未考虑方位角信息, 使得可能航迹中含有较多的杂波点和虚假航迹, 为对可能航迹进行进一步筛选, 需要对 Hough 变换后可能航迹进行速

度约束与航向约束。

1) 速度约束。

对于临近空间高超声速目标, 认为其飞行速度在 v_{\min} 与 v_{\max} 之间, 因此可利用目标两时刻的位置 $(x_k, y_k), (x_{k+1}, y_{k+1})$, 以及 v_{\min}, v_{\max} 建立环形波门对可能航迹进行约束。

$$v_{\min} \leq \sqrt{[x_{k+1} - x_k]^2 + [y_{k+1} - y_k]^2} / (t_{k+1} - t_k) \leq v_{\max} \quad (14)$$

根据定义, 对于临近空间高超声速目标, 其速度约束条件 v_{\min} 的取值应为马赫数大于 5, 而对于 v_{\max} 的取值应不超过第一宇宙速度, 即 7.9 km/s。

2) 航向约束。

对于临近空间高超声速目标, 由于其运动速度较快, 不会出现突然悬停或反向强机动运动, 即目标帧间航向的变化比较平稳, 可以将连续 3 个扫描周期内真实目标的航迹近似为一条直线, 因此, 可以通过目标机动角度的变化来消除虚假航迹, 进行航向约束。

定义矢量 $R_{k,k+1} = [x_{k+1} - x_k, y_{k+1} - y_k]$, $R_{k+1,k+2} = [x_{k+2} - x_{k+1}, y_{k+2} - y_{k+1}]$, 则将目标航向角定义为

$$\theta_{k,k+1,k+2} = \arccos \left(\frac{R_{k,k+1} \cdot R_{k+1,k+2}}{|R_{k,k+1}| \cdot |R_{k+1,k+2}|} \right) \quad (15)$$

定义临近空间高超声速目标最大机动角为 θ_0 , 因此, 航向约束条件为 $|\theta_{k,k+1,k+2}| \leq \theta_0$ 。

3) 航迹合并。

经速度约束与航向约束处理后, 可能会出现一个目标对应多条航迹的情况, 这时需要对多条航迹进行判断, 对于同一个目标产生的航迹, 需要对其进行合并。本文采用的航迹合并方法是将多条航迹对应的点集进行两两比较, 求出两个点集中相同量测点的个数, 设置门限 η , 如果两个点集中相同点的个数超过门限, 则可以认定进行比较的两个点集是由同一个目标产生, 需要将这两个点集代表的航迹进行合并, 对于两点集中相同时刻产生的

不同量测点, 算法取回波能量大的点作为该时刻目标的回波点。

若雷达量测数据帧数为 N , 则定义门限 η 为

$$\eta = \begin{cases} \frac{N}{2} & \text{当 } N \text{ 为偶数时} \\ \left[\frac{N}{2} \right] + 1 & \text{当 } N \text{ 为奇数时} \end{cases} \quad (16)$$

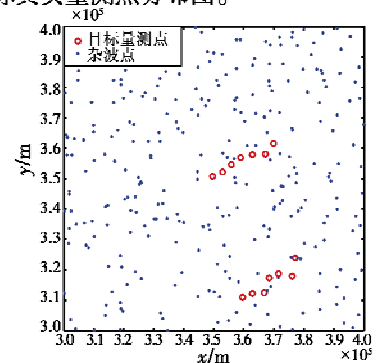
通过将同一个目标的多条航迹进行合并, 可以实现多条航迹的数据互补, 并对航迹内杂波点进行有效剔除, 得到最终确认航迹。

3 仿真与分析

为验证算法的有效性, 假设有 2 个临近空间高超声速目标, 目标 1 做匀速直线运动, 初始位置为 (350 km, 350 km), 初始速度为 (3000 m/s, 2000 m/s), 目标 2 做匀加速直线运动, 初始位置为 (360 km, 310 km), 初始速度为 (3000 m/s, 2000 m/s), 初始加速度为 (60 m/s², 40 m/s²)。设定雷达位于坐标原点, 扫描周期为 1 s, 雷达距离量测误差为 400 m, 角度量测误差为 0.2°; 积累量测数据为 7 帧, 每帧数据的杂波数服从泊松分布, 杂波密度为 λ , 产生的杂波按均匀分布随机地分布在雷达视域内。速度约束条件为马赫数最小等于 5, 最大等于 20, 航向约束条件 $\theta_0 = 100^\circ$, 门限 $\eta = 3$ 。

3.1 算法有效性验证

针对上述参数, 对杂波密度 $\lambda = 40$ 、信噪比为 8 dB 的情况进行仿真验证, 将 7 帧量测数据在数据空间进行叠加, 得到如图 1 所示的杂波点与目标真实量测点分布图。



a x-y 平面量测分布图

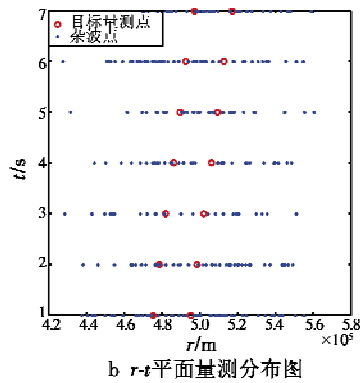


图1 杂波点与目标真实量测点分布图

Fig. 1 Distribution of clutter points and real target points

对扫描得到的雷达量测数据按2.1节步骤进行随机 Hough 变换,得到经参数空间点数积累矩阵和能量积累矩阵,如图2所示。

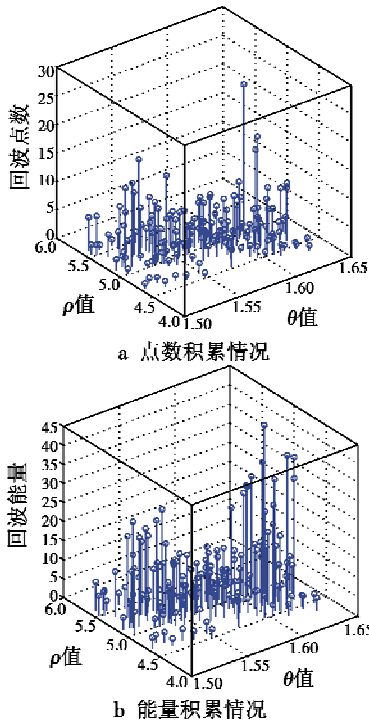


图2 参数空间积累情况
Fig. 2 Accumulation of parameter space

对参数空间积累数据进行峰值提取,得到过门限参数所对应的量测点迹,如图3a所示。由图可知,经时间-径向距离平面 Hough 变换后可以得到的过门限点迹,其中,既包含真实目标量测点,也包含部分杂波点,为进一步剔除航迹内杂波点,

需要根据临近空间高超声速目标运动特性进行速度约束和航向约束,再经航迹合并后,得到算法最终输出航迹如图3b所示。

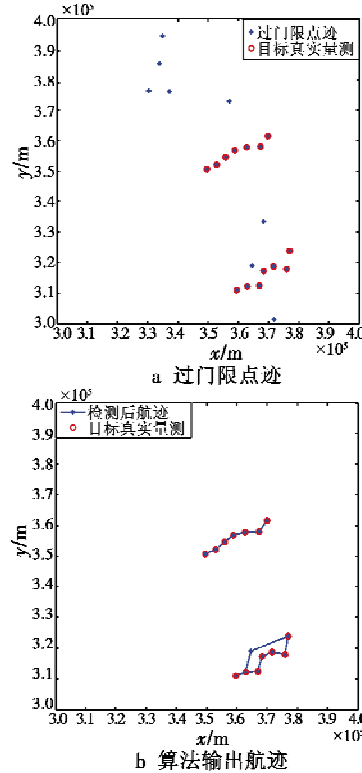


图3 目标航迹提取

Fig. 3 Extraction of target track

由图3可知,算法对目标1与目标2均能实现有效检测并获得目标回溯航迹,验证了算法的有效性。

3.2 不同信噪比条件下的仿真实验

为进一步对本文算法有效性进行验证,通过改变信噪比进行仿真分析。在其他条件不变的情况下,对信噪比进行不同取值,1000次 Monte-

Carlo 仿真后,得到目标检测概率及虚假航迹率的变化情况,如表1所示。

定义检测概率 p_d 为

$$p_d = \frac{\sum_{q=1}^Q \varepsilon_q}{Q} \quad (17)$$

式中: Q 为 Monte-Carlo 仿真试验次数; ε_q 代表第 q 次仿真中输出航迹是否包含目标航迹,即

$$\varepsilon_q = \begin{cases} 0 & \text{未检测到目标} \\ 1 & \text{检测到目标} \end{cases} \quad (18)$$

虚假航迹率 p_f 为

$$p_f = \frac{\sum_{q=1}^Q f_q}{\sum_{q=1}^Q M_q} \quad (19)$$

式中: f_q 表示第 q 次仿真中输出的虚假航迹数; M_q 表示第 q 次仿真中输出的航迹总数。

通过对表1仿真结果分析可知,随着信噪比的不断增大,算法对目标的检测概率呈上升趋势,当信噪比大于 8 dB 时,算法对目标的检测概率可以保持在 0.9 以上。对于输出结果中的虚假航迹情况,在杂波密度一定的条件下,算法的虚假航迹率较低,且随信噪比的增大,算法的虚假航迹率有所降低。

3.3 算法性能比较

为对本文算法进行进一步分析,在杂波密度 $\lambda = 40$ 、信噪比为 8 dB 的条件下,利用本文算法和标准 Hough 变换算法分别进行了 1000 次 Monte-Carlo 仿真,仿真程序均在 2.6 GHz, 3.45 GB 内存的计算机上运行,仿真语言为 Matlab2010a,得出两算法性能对比如表2所示。

表1 改变信噪比仿真结果

Table 1 Simulation results when changing the SNR

性能指标	信噪比/dB										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
检测概率	0.59	0.67	0.75	0.82	0.84	0.85	0.87	0.88	0.91	0.92	0.92
虚假航迹率	0.67	0.62	0.58	0.56	0.50	0.49	0.46	0.42	0.39	0.39	0.38

表2 算法性能对比

Table 2 Algorithm performance comparison

算法	检测概率	平均虚假航迹数	所用时间/s
本文算法	0.91	0.72	0.86
标准 HT-TBD 算法	0.93	1.82	4.11

通过对表 2 仿真结果分析可知,虽然本文算法与标准 HT-TBD 算法均能对临近空间高超声速目标进行有效检测,但相对于标准 HT-TBD 算法,本文算法能够有效减少运行时间,并且由于本文算法提出了参数空间允许误差选取的明确标准,避免了凭经验选取带来的性能损失,在保证检测概率的前提下,能够有效减少虚假航迹的输出。因此,本文采用基于时间-径向距离平面随机 Hough 变换的 TBD 算法,可有效提高算法性能,实现对临近空间高超声速目标的检测跟踪。

4 结论

本文研究了临近空间高超声速目标检测前跟踪问题,结合临近空间高超声速目标运动特性,提出了一种基于时间-径向距离平面进行随机 Hough 变换和多条件约束的检测前跟踪算法。仿真分析表明,本文算法能够对临近空间高超声速目标进行有效检测并对目标航迹进行回溯,而且在减少运算时间和抑制虚假航迹的产生上比使用标准 HT-TBD 算法性能更优,具有一定的工程实践意义。

参考文献

- [1] 肖松,谭贤四,王红,等. 国外临近空间高超声速飞行器探测系统研究[J]. 飞航导弹,2012,6:28-31. (XIAO S, TAN X S, WANG H, et al. Detection system research on near space hypersonic flight vehicle abroad [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012, 6:28-31.)
- [2] WANG W Q. Near-space vehicle-borne SAR with reflector antenna for high-resolution and wide-swath remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(2):338-348.
- [3] YANG Y N, WU J, XIE Y, et al. Dynamics modeling and maneuverability analysis of a near-space earth observation platform [C]//IEEE The 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2011:223-226.
- [4] 李志淮,谭贤四,王红,等. 基于运动参数估计的高超声速目标检测方法研究[J]. 宇航学报,2012,33(3):346-352. (LI Z H, TAN X S, WANG H, et al. Detection algorithm for hypersonic targets based on motion parameter estimation [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(3):346-352.)
- [5] 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.
- [6] ORLANDO D, RICCI G, BAR-SHALOM Y. Track-before-detect algorithms for targets with kinematic constraints [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3):1837-1849.
- [7] 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.
- [8] 陈稳,张智军,秦占师,等. 基于子孔径 Hough 变换的 SAR 转动目标检测[J]. 电光与控制,2014,21(9):85-89. (CHEN W, ZHANG Z J, QIN Z S, et al. Sub-aperture Hough transform based SAR rotational target detection [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(9):85-89.)
- [9] 赵志超,饶彬,王雪松,等. 基于概率网格 Hough 变换的多雷达航迹起始算法[J]. 航空学报,2010,31(11):2209-2215. (ZHAO Z C, RAO B, WANG X S, et al. Multi-radar track initiation algorithm based on probabilistic grid Hough transform [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11):2209-2215.)
- [10] MOYER L R, SPAK J, LAMANNA P. A multi-dimensional hough transform based track-before-detect technique for detecting weak targets in strong clutter backgrounds [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4):3062-3068.
- [11] XU L, OJA E. Randomized Hough Transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities [J]. Computer Vision & Image Understanding, 1993, 57(2):131-154.
- [12] 樊玲. 微弱目标检测前跟踪算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2013. (FAN L. Research on track-before-detect algorithms for weak targets [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [13] 吴泽民,张磊,刘晗,等. 基于随机 Hough 变换的三维集中式航迹起始算法[J]. 电子学报,2013,41(5):840-846. (WU Z M, ZHANG L, LIU H, et al. Centralized 3D track initialization using random Hough transformation [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5):840-846.)
- [14] 于洪波,王国宏,张仲凯. 基于抛物线随机 Hough 变换的机载脉冲多普勒雷达机动弱目标检测前跟踪方法[J]. 兵工学报,2015,36(10):1924-1931. (YU H B, WANG G H, ZHANG Z K. A RPHT-TBD algorithm for tracking and detecting maneuvering weak target via airborne PD radar [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(10):1924-1931.)
- [15] 王国宏,孔敏,何友. Hough 变换及其在信息处理中的应用[M].

北京:兵器工业出版社,2005:2-4. (WANG G H, KONG M, HE Y.

Hough transform with applications in information processing [M].

Beijing: Weapon Industry Press, 2005:2-4.)

Abstract: Aiming at the Track-Before-Detect (TBD) problem of near space hypersonic target, a kind of track-before-detect algorithm based on Random Hough Transform (RHT) is proposed. By making error analysis to target measurement data, the time-radial distance plane random Hough transform is used to convert measurement to the parameter space. And the selection criterion of parameter space permissible error is obtained by calculation and analysis. Then the target measurement can be accumulated effectively. The algorithm validity is verified by simulation, and the algorithm performance is compared with the algorithm based on Standard Hough Transform (SHT). The simulation results show that, compared with the standard Hough transform, the algorithm in this paper can effectively reduce the algorithm running time and the false track number, and realize effective detection of near space hypersonic target.

Key words: hypersonic target; Track-Before-Detect (TBD); Random Hough Transform (RHT); measurement error; near space

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。



请扫描二维码关注我刊