

距离多假目标干扰下低可观测目标跟踪处理

孙殿星¹, 王国宏¹, 李迎春¹, 李世忠²

(1. 海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91445 部队, 辽宁大连 116043)

摘要: 距离多假目标干扰下, 当雷达对低可观测目标进行跟踪时, 会遇到虚假航迹较多、真-假目标鉴别难度大、真实目标跟踪不稳定等难题, 针对这些问题, 本文提出了基于角度量测统计特性差异的真-假目标识别方法与基于等效量测构建的低可观测目标跟踪方法, 实现了虚假目标的有效剔除, 有效提高了目标跟踪的稳定性, 仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 统计特性; 距离多假目标干扰; 低可观测目标; 目标跟踪

中图分类号: TN958.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)04-0826-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.04.011

Low Observable Target Tracking Processing in the Presence of Multi-Range-False-Target Jamming

SUN Dian-xing¹, WANG Guo-hong¹, LI Ying-chun¹, LI Shi-zhong²

(1. Institute of Information Fusion of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Unit 91445 of PLA, Dalian, Liaoning 116043, China)

Abstract: There are many problems on low observable target tracking based on radar in the presence of multi-range-false-target jamming such as lots of false target tracks, the difficulty in multi-range-false-target discrimination, the instability of target tracking and so on. In this paper a new method of discriminating real-false-target based on the statistical characteristic of angle measurements and the low observable target tracking technique based on the equivalent measurement are proposed. The false target measurements are eliminated mostly and the low observable target tracking is more stable. Simulation results verify the validity of the proposed algorithm.

Key words: statistical characteristic; multi-range-false-target jamming; low observable target; target tracking

1 引言

随着现代战争中电子对抗的愈加激烈, 各种针对雷达的干扰手段不断涌现, 使雷达的生存环境变得十分恶劣^[1-3], 尤其是数字电子技术、隐身技术和无人机技术的发展使雷达干扰技术呈现出新的发展趋势, 例如: (1) 随着数字射频存储器 (DRFM) 的广泛应用, 干扰机精确复制雷达信号的能力不断增强, 使雷达在信号层面上准确识别“假目标”的难度增大^[4], 其中距离多假目标干扰即为应用较广的一种, 在与真实目标方位角、俯仰角相近的方向上产生多个具有虚假距离信息的欺骗回波, 使雷达很难鉴别目标的真伪^[5]; (2) 为了提高干扰机平台的安全性, 尽量降低其检测概率, 一些具有隐身能力的作战平台改装为电子战飞机^[1], 并且

应用无人机作为干扰平台^[2,6], 尤其是小型无人机作为干扰平台时, 由于目标较小, 雷达检测跟踪较为困难, 而且小型无人机的姿态容易受到气流等因素的影响, 导致其检测概率变化较大, 会表现出“时隐时现”的特点, 因此目标跟踪很不稳定. 针对上述问题, 提高干扰条件下雷达的目标跟踪能力已成为近年来关注的焦点, 从公开文献来看, 针对欺骗干扰, 现有抗干扰方法总体分为基于信号处理和数据处理两类^[7-21].

基于信号处理的抗欺骗干扰方法主要有原子分解特征提取^[7]、信号似然比检验 + 卡方检验和移位寄存器结合的方法^[8]、基于神经网络的能量差异识别^[9]、频谱特征分析^[10]、干扰信号相位量化差异^[11]、干扰信号谐波分量调频率匹配检测^[12]和多域联合处理^[13]等, 但

是随着欺骗信号逼真度的提高,部分欺骗信号通过信号层的判别而进入数据处理层的情况也在所难免^[14],本文主要是针对信号处理无法鉴别的虚假目标形成点迹,乃至形成稳定虚假航迹的情况,采用数据层的处理方法对距离多假目标干扰进行识别。

文献[14~17]是基于数据处理的单雷达抗距离欺骗干扰方法:其中文献[14,15]以弹道导弹为研究对象,文献[16]通过估计距离欺骗的相关参数,用于相关计算和欺骗终止判断,以提高目标的跟踪精度,文献[17]将三门限检验方法与最近距离选择法相结合,实现了RGPO干扰下的目标跟踪,文献[18,19]通过主被动雷达组网的方法,实现了干扰下的目标跟踪,文献[20,21]是基于雷达组网的抗虚假目标干扰方法.上述基于数据处理的抗干扰方法都有其特定的应用对象和背景,例如文献[14,15]的主要结论是在二体意义下得到的,是针对弹道导弹的运动特性而量身打造的,对于机载目标并不适用,文献[16,17]主要是针对GRPO干扰,其对抗距离多假目标干扰的效果不一定很理想,更为重要的是上述方法并没有考虑低可观测目标的情况,若目标的检测概率降低、多个时刻没有目标量测输入,往往会导致跟踪滤波发散,使上述抗干扰方法失效。

同时,国内外学者对低可观测目标的探测跟踪技术也进行了大量的研究^[22~26],为提高低可观测目标的探测性能和跟踪精度^[26]发挥了重要作用,但现有方法大多是针对无欺骗干扰的情况,如何在距离多假目标欺骗干扰下实现低可观测目标的稳定跟踪,目前尚未见到公开报道。

以上述问题为背景,本文利用虚假目标检测概率较高、角度量测误差方差大于真实目标角度量测误差方差^[27]的特点,对虚假目标进行鉴别;在真实目标量测缺失时,通过构造真实目标等效量测,并以其为输入提高目标跟踪稳定性。

2 真实目标识别与距离欺骗干扰剔除方法

距离多假目标干扰是实际中对雷达威胁较大的一种欺骗干扰类型^[28],如图1所示,该干扰类型的特点是:当雷达受到距离多假目标欺骗干扰时,真实目标、虚假目标、雷达三者近似处于同一直线上,并且通常情况下保持虚假目标延迟或提前的时间恒定^[28],这样真-假目标与雷达的距离之差是恒定不变的,易形成与真实目标相似的虚假航迹,具有很强的迷惑性.针对这一空间位置特征,可以采用角度信息 χ^2 检验的方法初步判断距离假目标干扰是否存在,但是若有多个真实目标的角度量测相近,采用这种方法会将其误判为距离多假目标,因此在进行虚假目标鉴别之前需要进一步判断量测分组内真实目标的个数,根据判断结果,可以分

为两种情况:情况1,量测分组内仅有一个真实目标;情况2,量测分组内有多个真实目标.若判定为情况1,则直接采用本文方法对其进行识别即可,若判定为情况2,则将量测集进一步划分,直至量测分组内真实目标唯一,再进行识别.限于篇幅本文重点对情况1进行论述,对于情况2,在经过进一步划分后处理方法与情况1相似,本文不再赘述。

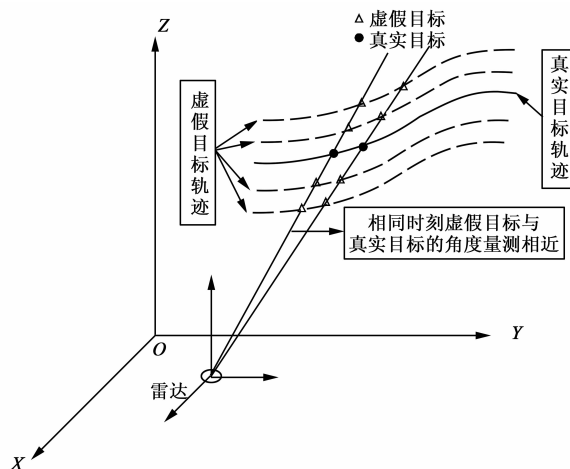


图1 距离欺骗干扰示意图

2.1 距离多假目标干扰存在性判断

2.1.1 基于 χ^2 检验的干扰判定方法

针对距离多假目标形成稳定航迹的情况,本文采用 χ^2 检验的方法对干扰进行初步判定^[8]:已知在雷达的监视区域内存在若干条稳定的航迹,设 k 时刻第 i 条航迹上对应的量测为 $(r_k^i, \theta_k^i, \varphi_k^i)$,其中 r_k^i 为距离量测、 θ_k^i 为俯仰角量测、 φ_k^i 为方位角量测,同样设 k 时刻第 j 条航迹上对应的量测为 $(r_k^j, \theta_k^j, \varphi_k^j)$,采用 χ^2 检验的方法对其进行判断:

$$\lambda = \frac{(\theta_k^i - \theta_k^j)^2}{2\sigma_\theta^2} + \frac{(\varphi_k^i - \varphi_k^j)^2}{2\sigma_\varphi^2} < F_\alpha \quad (1)$$

式(1)中 λ 为检验统计量, σ_θ 、 σ_φ 分别为雷达的俯仰角和方位角量测误差标准差, F_α 为检验门限,可根据显著性水平来确定, λ 服从自由度为2的 χ^2 分布.如果这两组量测满足式(1),则初步判定航迹 i 与航迹 j 中至少有一条是虚假目标的航迹。

同时,针对距离欺骗干扰,文献[27]阐述了虚假目标与真实目标量测的关系:

$$\begin{cases} \theta_j \sim N(\theta_i, \sigma_{\theta_j}^2) \\ \varphi_j \sim N(\varphi_i, \sigma_{\varphi_j}^2) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 θ_j 、 φ_j 分别为虚假目标的俯仰角、方位角量测, $\sigma_{\theta_j}^2$ 、 $\sigma_{\varphi_j}^2$ 分别为干扰机所引入角度随机量测误差的方差,其具体数值由干扰机的信号处理系统所决定, θ_i 、 φ_i 分别为虚假目标所对应真实目标的俯仰角、方位角量

测,且 $\theta_i \sim N(\theta, \sigma_\theta^2)$ 、 $\varphi_i \sim N(\varphi, \sigma_\varphi^2)$,其中 θ, φ 分别为目标俯仰角、方位角的真实值.可见:干扰信号量测是在测量的不确定性上,叠加了干扰机的不确定性,因此可得:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta'}^2 = \sigma_\theta^2 + \sigma_{\theta'}^2 > \sigma_\theta^2 \\ \sigma_{\varphi'}^2 = \sigma_\varphi^2 + \sigma_{\varphi'}^2 > \sigma_\varphi^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\sigma_{\theta'}^2, \sigma_{\varphi'}^2$ 分别为虚假目标的俯仰角、方位角量测方差,虽然其具体数值无法获得,但是由上式可知虚假目标的角度量测误差要偏大,当考虑这种差异性时,设检验统计量为 λ' ,则有:

$$\lambda' = \frac{(\theta_k^i - \theta_k^j)^2}{2\sigma_{\theta'}^2} + \frac{(\varphi_k^i - \varphi_k^j)^2}{2\sigma_{\varphi'}^2} \quad (4)$$

由式(1)、(3)、(4)易知 $\lambda' < \lambda$,所以与 λ' 相比,用 λ 作为统计量进行检验要更加严格,即:如果式(1)成立,则式(4)一定成立.

为了提高判定的正确率并减少误判,可以累积多个时刻的判定结果,然后采用 M/N 准则得到综合的判定.将所有的航迹按照上述方法“两两”进行判定,把所有满足式(1)的航迹归为一类,形成一个量测分组,命名为集合 ω .

2.1.2 量测分组内真实目标唯一性判别

当量测分组 ω 内仅有一个真实目标时,才能利用本文方法进行真-假目标的识别,但实际中也存在相同角度分辨单元内有多个真实目标的情况,此时通过 χ^2 检验会将其量测归入同一个量测分组,若不加判断地采用本文方法,必定会造成鉴别错误,因此需要在 3.1.1 节的基础上进一步判断 ω 中真实目标的唯一性,以确定是否具备应用本方法的前提.

2.1.2.1 选取样本

设 ω 中的距离量测构成集合 R_ω ,并用矩阵表示为:

$$R_\omega = \begin{bmatrix} r_1^1 & \cdots & r_i^1 & \cdots & r_U^1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_1^j & \cdots & r_i^j & \cdots & r_U^j \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_1^v & \cdots & r_i^v & \cdots & r_U^v \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 r_i^j 是第 j 条航迹中第 i 个时刻的距离量测.

若集合 R_ω 中仅包含一个真实目标,其它的距离量测均源于该目标所产生的欺骗干扰,将 ω 中的元素以行为单位两两配对,设其中任意两行元素相减构造向量 R^{kl} :

$$R^{kl} = [r_1^k - r_1^l \quad \cdots \quad r_{i-1}^k - r_{i-1}^l \quad r_i^k - r_i^l \quad \cdots \quad r_U^k - r_U^l] \quad (6)$$

根据前文所述的距离多假目标特点,我们从两个方面对 R^{kl} 的性质进行论述.

(1)若不考虑随机量测误差的存在,则有:

$$r_1^k - r_1^l = \cdots = r_{i-1}^k - r_{i-1}^l = r_i^k - r_i^l = \cdots = r_U^k - r_U^l$$

既任意两条航迹与雷达的距离差是一固定值,该值大小由干扰机所决定.

(2)若考虑随机量测误差,则 R^{kl} 中的元素均是独立同分布的高斯随机变量,其均值由干扰机决定,方差由干扰机和雷达共同决定,因此 R^{kl} 可以视为源自同一正态总体的一组样本,但总体的均值和方差无法获得.

通过以上分析,我们对 R^{kl} 进行如下处理:将其拆分为两个样本集合 R_1^{kl} 与 R_2^{kl} ,其中:

$$R_1^{kl} = [r_1^k - r_1^l \quad \cdots \quad r_{i-1}^k - r_{i-1}^l]$$

$$R_2^{kl} = [r_i^k - r_i^l \quad \cdots \quad r_U^k - r_U^l]$$

若将 R_1^{kl} 与 R_2^{kl} 视为源自“两个总体”的样本,那么可以通过这两个样本集对两总体的均值和方差进行检验,并且在该假设条件下两个总体的均值和方差是相同的.若集合 R_ω 中不只包含一个真实目标,即使目标之间存在一定的配合,忽略随机量测误差的情况下,也不能保证它们与雷达的距离差保持恒定,这样我们采用前面的处理方法,利用 R_1^{kl} 与 R_2^{kl} 对两总体的均值和方差进行检验,就可以确定量测分组 ω 中是否仅有一个真实目标.

2.1.2.2 构造检验统计量

综合以上分析,我们将判断 ω 中真实目标是否唯一的问题转化为两个正态总体均值和方差相等的统计检验问题:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ 且 } \sigma_1 = \sigma_2 \quad (7)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ 或 } \sigma_1 \neq \sigma_2 \quad (8)$$

其中: μ_1, σ_1 分别为 R_1^{kl} 所对应总体的均值和方差; μ_2, σ_2 分别为 R_2^{kl} 所对应总体的均值和方差,基于样本集合 R_1^{kl} 与 R_2^{kl} 构造均值检验统计量 T 、方差检验统计量 F :

$$T = \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (9)$$

$$F = S_1^2 / S_2^2 \quad (10)$$

其中 $n_1 = i - 1, n_2 = U - i + 1$ 为样本容量, \bar{R}_1, \bar{R}_2 为样本均值, S_1^2, S_2^2 为样本方差:

$$\bar{R}_1 = \frac{\sum_{g=1}^{i-1} (r_g^k - r_g^l)}{i - 1}, \bar{R}_2 = \frac{\sum_{g=i}^U (r_g^k - r_g^l)}{U - i + 1} \quad (11)$$

$$S_1^2 = \frac{\sum_{g=1}^{i-1} (r_g^k - r_g^l - \bar{R}_1)^2}{n_1 - 1}, S_2^2 = \frac{\sum_{g=i}^U (r_g^k - r_g^l - \bar{R}_2)^2}{n_2 - 1} \quad (12)$$

2.1.2.3 真实目标唯一性判别方法

将 ω 中的元素以行为单位两两配对得到不同的组合,分别构造检验统计量 T 与 F ,并采用如下的判别准则进行判断:

$$|T| \leq t_{1-\alpha/2} \cap \frac{1}{F_{1-\alpha/2}(n_2-1, n_1-1)} \leq F$$

$$\leq F_{1-\alpha/2}(n_1-1, n_2-1) \quad (13)$$

$$|T| > t_{1-\alpha/2} \cup F > F_{1-\alpha/2}(n_1-1, n_2-1) \cup F$$

$$< \frac{1}{F_{1-\alpha/2}(n_2-1, n_1-1)} \quad (14)$$

若 ω 中所有行的两两组合均满足式(13), 则断定量测分组 ω 内仅有一个真实目标, 其余量测均源自于该真实目标所释放的距离多假目标干扰, 或者该分组内没有真实目标量测, 所有量测均源自同一真实目标所释放的距离多假目标干扰; 反之, 则断定量测分组 ω 内有不只一个真实目标; 若 ω 中所有行的两两组合均满足式(14), 则断定量测分组 ω 内全部为真实目标。

2.2 基于聚类划分的真实目标鉴别方法

通过 2.1 节判断出存在距离多假目标干扰, 并且断定量测分组 ω 内真实目标唯一后, 就可以进行真-假目标的识别了. 对于低可观测目标, 其航迹通常不够稳定, 因此经过上一节干扰判定后, 形成的集合 ω 中所包含航迹的数量是变化的, 即: 在目标检测概率较高的时间段, 此时的集合 ω 中既包含真实目标的航迹, 也包含虚假目标的航迹; 在目标检测概率较低的时间段, 目标不能形成稳定的航迹, 此时的集合 ω 仅包含虚假目标的航迹. 为了能够得到真实目标与虚假目标的空间位置关系, 应当选取集合 ω 中包含航迹的数量多的时段, 并提取该时段相应的量测, 设取 N 个时刻量测构成集合 ω , 并用矩阵表述为:

$$\omega = \begin{bmatrix} (r_1^1, \theta_1^1, \varphi_1^1) & \cdots & (r_i^1, \theta_i^1, \varphi_i^1) & \cdots & (r_N^1, \theta_N^1, \varphi_N^1) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (r_1^j, \theta_1^j, \varphi_1^j) & \cdots & (r_i^j, \theta_i^j, \varphi_i^j) & \cdots & (r_N^j, \theta_N^j, \varphi_N^j) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (r_1^M, \theta_1^M, \varphi_1^M) & \cdots & (r_i^M, \theta_i^M, \varphi_i^M) & \cdots & (r_N^M, \theta_N^M, \varphi_N^M) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$(r_i^j, \theta_i^j, \varphi_i^j)$ 是第 j 条航迹中第 i 个时刻的量测, 其中 r_i^j 为距离量测, θ_i^j 为俯仰角量测, φ_i^j 为方位角量测. 将 ω 中各个航迹相同时刻的方位角、俯仰角量测“两两”做差, 例如: 将第 j 条航迹与第 l 条航迹的俯仰角、方位角量测相减分别得到集合 $\Omega_\theta^j, \Omega_\varphi^j$ 如下:

$$\Omega_\theta^j = \{(\theta_1^j - \theta_1^l), \dots, (\theta_i^j - \theta_i^l), \dots, (\theta_N^j - \theta_N^l)\} \quad (16)$$

$$\Omega_\varphi^j = \{(\varphi_1^j - \varphi_1^l), \dots, (\varphi_i^j - \varphi_i^l), \dots, (\varphi_N^j - \varphi_N^l)\} \quad (17)$$

通常情况下集合 ω 中只有一条航迹为真实目标的航迹, 其余航迹由虚假目标形成, 那么所有的 Ω_θ^j 与 Ω_φ^j 可以划分为两类: 第一类是由“真实目标航迹”与“虚假目标航迹”所对应的角度量测相减构成; 第二类是由

“虚假目标航迹”与“虚假目标航迹”所对应的角度量测相减构成。

以 Ω_θ^j 为例, 当 Ω_θ^j 属于第一类时, 不失一般性设航迹 j 为真实目标航迹, 航迹 l 为虚假目标的航迹, 由式(2) θ_i^l 与 θ_i^j 存在如下关系:

$$\theta_i^l = \theta_i^j + \Delta\theta_f \quad (18)$$

$$\theta_i^l - \theta_i^j = \Delta\theta_f \sim N(0, \sigma_{\theta_f}^2) \quad (19)$$

θ_i^l 为航迹 l (虚假目标航迹) 的第 i 个时刻俯仰角量测, θ_i^j 为航迹 j (真实目标航迹) 的第 i 个时刻俯仰角量测, $\Delta\theta_f$ 为干扰机所引入的俯仰角随机量测误差。

当 Ω_θ^j 属于第二类时, 同样可知:

$$\theta_i^l = \theta_i^j + \Delta\theta_f^l \quad (20)$$

$$\theta_i^l = \theta_i^j + \Delta\theta_f^l \quad (21)$$

$$\theta_i^l - \theta_i^j = \Delta\theta_f^l - \Delta\theta_f^j \quad (22)$$

θ_i^l 为航迹 l 的第 i 个时刻俯仰角量测, θ_i^j 为航迹 j 的第 i 个时刻俯仰角量测, $\Delta\theta_f^l, \Delta\theta_f^j$ 为干扰机所引入的俯仰角随机量测误差, 由前文论述可知 $\Delta\theta_f^l, \Delta\theta_f^j$ 独立同分布, 且: $\Delta\theta_f^l \sim N(0, \sigma_{\theta_f}^2), \Delta\theta_f^j \sim N(0, \sigma_{\theta_f}^2)$, 则:

$$\theta_i^l - \theta_i^j \sim N(0, 2\sigma_{\theta_f}^2) \quad (23)$$

由式(19)、式(23)可知: Ω_θ^j 属于第二类时 $\theta_i^l - \theta_i^j$ 的方差大于 Ω_θ^j 属于第一类时 $\theta_i^l - \theta_i^j$ 的方差。

对 Ω_φ^j 的分析与 Ω_θ^j 类似, 当 Ω_φ^j 属于第一类时, 设航迹 j 为真实目标航迹, 航迹 l 为虚假目标的航迹, 可得:

$$\varphi_i^j - \varphi_i^l \sim N(0, \sigma_{\varphi_f}^2) \quad (24)$$

当 Ω_φ^j 属于第二类时, 航迹 j 与航迹 l 都为虚假目标的航迹, 可知:

$$\varphi_i^j - \varphi_i^l \sim N(0, 2\sigma_{\varphi_f}^2) \quad (25)$$

由式(24)、式(25), 可知: Ω_φ^j 属于第二类时 $\varphi_i^j - \varphi_i^l$ 的方差大于 Ω_φ^j 属于第一类时 $\varphi_i^j - \varphi_i^l$ 的方差. 正是根据 Ω_φ^j 属于第一类和属于第二类时方差的不同, 可以将所有与集合 $\Omega_\theta^j, \Omega_\varphi^j$ 对应的“航迹对”进行分类, 分为方差较大的一类与方差较小的一类, 同时每一类中的 $\theta_i^j - \theta_i^l, (1 \leq i \leq N, 1 \leq j, l \leq M)$ 是同分布的, 类似 $\varphi_i^j - \varphi_i^l, (1 \leq i \leq N, 1 \leq j, l \leq M)$ 也是同分布的, 但是通常情况下 $\sigma_{\theta_f}^2$ 和 $\sigma_{\varphi_f}^2$ 是与干扰机性能密切相关的, 属于非合作目标, 其参数无法获得, 由于 $\sigma_{\theta_f}^2$ 和 $\sigma_{\varphi_f}^2$ 的确切值无法得到, 只能通过估计求得. 对于已知的具体集合 ω , 求得集合 $\Omega_\theta^j, \Omega_\varphi^j$ 相当于构造出了“总体” $\Delta\theta = \theta_i^j - \theta_i^l$ 与 $\Delta\varphi = \varphi_i^j - \varphi_i^l$ 的容量为 N 的“样本”, 可以用于“总体方差”的估计, 通常采用无偏估计:

$$S_{\Delta\theta}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\theta_i^j - \theta_i^l - \overline{\Delta\theta})^2 \quad (26)$$

$$\overline{\Delta\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i^j - \theta_i^l) \quad (27)$$

$$S_{\Delta\varphi}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\varphi_i^j - \varphi_i^l - \overline{\Delta\varphi})^2 \quad (28)$$

$$\overline{\Delta\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi_i^j - \varphi_i^l) \quad (29)$$

在得到 $S_{\Delta\theta}^2$ 与 $S_{\Delta\varphi}^2$ 后检验两个总体方差关系的通常统计学方法是 F 检验法,但是仿真实验表明,应用 F 检验法的效果并不理想。

虽然当样本容量较小的时候方差估计的误差较大,但是仍然可以较为准确地反映出方差数值的相对大小,如图 2 所示:针对 Ω_{θ}^j 与 Ω_{φ}^l 属于第一类和属于第二类两种不同的情况,点 $(S_{\Delta\theta}^2, S_{\Delta\varphi}^2)$ 的分布状态应当有所不同,利用这一特点,我们以 $S_{\Delta\theta}^2 + S_{\Delta\varphi}^2$ 数值大小为分类特征,将 Ω_{θ}^j 与 Ω_{φ}^l 划分为第一类与第二类。由于集合 ω 中只有一条航迹是由真实目标形成的,所以对于 Ω_{θ}^j 与 Ω_{φ}^l 属于第一类的划分,每个 Ω_{θ}^j 与 Ω_{φ}^l 对应的“航迹对”都应该包含一个共同的航迹,这个航迹就是真实目标航迹,集合 ω 中其余的航迹都是虚假目标形成的。但是在实际应用时出现下图中“泾渭分明”的情况很少,因此需要进行改进:将每个“航迹对”所对应的 $S_{\Delta\theta}^2 + S_{\Delta\varphi}^2$ 值进行排序,取其中最小的 P 个,若其中有 $Q(Q < P)$ 个“航迹对”包含共同的航迹,则判定该航迹就是真实目标所对应的航迹。

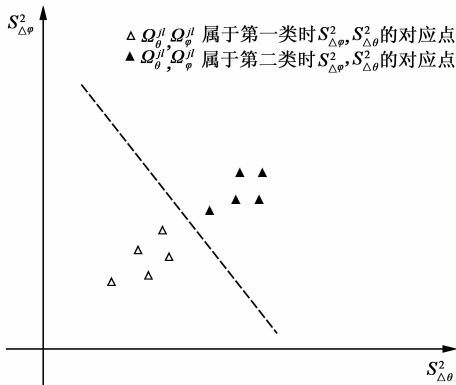


图2 方差估计分布示意图

3 目标跟踪

上一节中实现了真实目标与虚假目标的鉴别,为真实目标跟踪提供了前提条件,但是在实际情况中还存在着杂波干扰和目标低可观测性等因素,针对上述问题,本文利用虚假目标回波强度较大,检测概率较高的特点,采用构造目标输入量测的方法,不但实现了一定杂波环境下低可观测目标的稳定跟踪,而且无需采用 TBD 技术,避免虚假目标回波能量累积造成的误判。

3.1 欺骗干扰的参数估计

在真假目标鉴别的过程中,利用获得的量测数据可以对虚假目标的一些运动参数进行估计,为真实目

标量测“缺失”时的“输入量测构建”提供前提条件。

如前文所述,设 r_k^0 为真实目标在 k 时刻的距离量测, r_k^i ($i \neq 0$) 为虚假目标 i 在 k 时刻的距离量测,则有第 i 个假目标与真实目标的间距可由下式估计:

$$d^{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |r_k^0 - r_k^i| \quad (30)$$

设雷达距离量测方差为 σ_r^2 ,则 d^{0i} 的方差为:

$$D(d^{0i}) = \frac{2}{N} \sigma_r^2 \quad (31)$$

在上一节中,对每个“航迹对”所对应的 $S_{\Delta\theta}^2 + S_{\Delta\varphi}^2$ 值进行排序后,取其中的最大值,由前文分析可知:该最大值所对应的“航迹对”通常是由两条虚假目标航迹所构成的。通过式(23)与式(25)可得:该“航迹对”所对应的 $S_{\Delta\theta}^2, S_{\Delta\varphi}^2$ 分别为 $2\sigma_{\theta}^2, 2\sigma_{\varphi}^2$ 的无偏估计,从而可得 σ_{θ}^2 与 σ_{φ}^2 的无偏估计分别为 $\frac{1}{2}S_{\Delta\theta}^2, \frac{1}{2}S_{\Delta\varphi}^2$,所以虚假目标干扰的方位角、俯仰角量测方差可以近似为:

$$\sigma_{\theta}^2 \approx \frac{1}{2}S_{\Delta\theta}^2 + \sigma_{\theta}^2 \quad (32)$$

$$\sigma_{\varphi}^2 \approx \frac{1}{2}S_{\Delta\varphi}^2 + \sigma_{\varphi}^2 \quad (33)$$

3.2 存在目标量测输入时的目标跟踪

设 k 时刻与真实目标航迹关联成功的点迹量测为 $z^0(k)$:

$$z^0(k) = \begin{bmatrix} r_k^0 \\ \varphi_k^0 \\ \theta_k^0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

类似式(1),将 $z^0(k)$ 与 k 时刻其它量测进行角度量测 χ^2 检验,设有 L 个量测 $z^i(k)$ ($i=1, 2, \dots, L$) 通过了与 $z^0(k)$ 的 χ^2 检验:

$$z^i(k) = \begin{bmatrix} r_k^i \\ \varphi_k^i \\ \theta_k^i \end{bmatrix} \quad (35)$$

则可认为这 L 个量测是源于虚假目标的,然后将这 $L+1$ 个量测的方位角、俯仰角数据进行压缩,以实现数据求精,具体如下:

$$\varphi_k = \sigma_{\text{fused}\varphi}^2 (\sigma_{\varphi}^{-2} \sum_{i=1}^L \varphi_k^i + \sigma_{\varphi}^{-2} \varphi_k^0) \quad (36)$$

$$\sigma_{\text{fused}\varphi}^2 = (L\sigma_{\varphi}^{-2} + \sigma_{\varphi}^{-2})^{-1} \quad (37)$$

$$\theta_k = \sigma_{\text{fused}\theta}^2 (\sigma_{\theta}^{-2} \sum_{i=1}^L \theta_k^i + \sigma_{\theta}^{-2} \theta_k^0) \quad (38)$$

$$\sigma_{\text{fused}\theta}^2 = (L\sigma_{\theta}^{-2} + \sigma_{\theta}^{-2})^{-1} \quad (39)$$

φ_k, θ_k 分别为融合后的方位角、俯仰角量测, $\sigma_{\text{fused}\varphi}^2, \sigma_{\text{fused}\theta}^2$ 分别为融合后的方位角、俯仰角量测方差,设 k 时刻融合后的输入量测为 $z^{\text{fused}}(k)$,量测噪声协方差阵为 $R_1(k)$,则有:

$$z^{\text{fused}}(k) = \begin{bmatrix} r_k^0 \\ \varphi_k \\ \theta_k \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$R_1(k) = A_1 V_1 A_1^T \quad (41)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_k \cos\theta_k & -r_k^0 \sin\varphi_k \cos\theta_k & -r_k^0 \cos\varphi_k \sin\theta_k \\ \sin\varphi_k \cos\theta_k & r_k^0 \cos\varphi_k \cos\theta_k & -r_k^0 \sin\varphi_k \sin\theta_k \\ \sin\theta_k & 0 & r_k^0 \cos\theta_k \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{fused}\varphi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{fused}\theta}^2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

以 $z^{\text{fused}}(k)$ 为量测输入对目标进行滤波跟踪。

3.3 目标量测输入缺失时的目标跟踪

当目标漏检时,通常会导致目标点-航数据关联的失败,易造成滤波发散,针对这一问题,利用距离欺骗干扰所暴露的目标角度信息、距离信息,构造目标的“输入量测”,并以此进行滤波更新,克服了低可观测目标的滤波发散问题。

3.3.1 提取距离欺骗干扰的量测

当目标量测输入缺失时,雷达量测集合中不仅存在距离欺骗干扰的量测,而且存在许多杂波量测(如图 3 所示),从中识别和提取距离欺骗干扰量测是首要解决的问题。

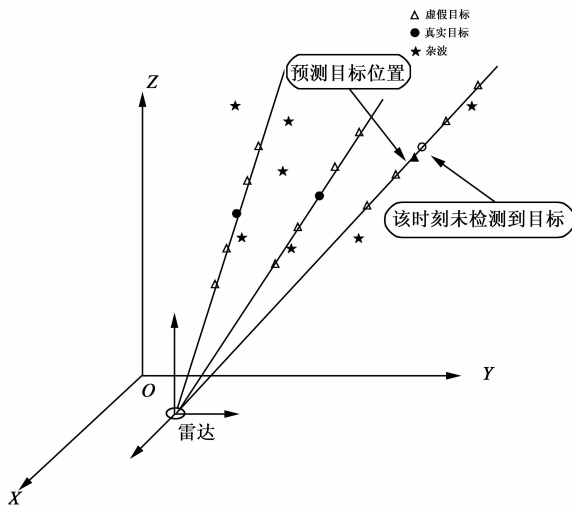


图3 未检测到目标时各个点迹的位置关系

3.3.1.1 预测目标方位角、俯仰角

根据对当前时刻目标状态的预测可以得到目标的方位角、俯仰角的粗略预测,设 $(x_{k|k-1}, y_{k|k-1}, z_{k|k-1})$ 为 k 时刻目标位置的预测, $\varphi_{k|k-1}$ 为目标方位角预测, $\theta_{k|k-1}$ 为目标俯仰角预测, $D(\varphi_{k|k-1})$ 、 $D(\theta_{k|k-1})$ 分别为方位角、俯仰角的预测方差,具体计算如下:

$$\varphi_{k|k-1} = \arctan\left(\frac{x_{k|k-1} - x_{\text{radar}}}{y_{k|k-1} - y_{\text{radar}}}\right), \arctan\left(\frac{x_{k|k-1} - x_{\text{radar}}}{y_{k|k-1} - y_{\text{radar}}}\right) > 0$$

$$\varphi_{k|k-1} = \arctan\left(\frac{x_{k|k-1} - x_{\text{radar}}}{y_{k|k-1} - y_{\text{radar}}}\right) + \pi, \arctan\left(\frac{x_{k|k-1} - x_{\text{radar}}}{y_{k|k-1} - y_{\text{radar}}}\right) < 0 \quad (44)$$

$$\theta_{k|k-1} = \arctan\left(\frac{z_{k|k-1} - z_{\text{radar}}}{\sqrt{(x_{k|k-1} - x_{\text{radar}})^2 + (y_{k|k-1} - y_{\text{radar}})^2}}\right) \quad (45)$$

$$D(\varphi_{k|k-1}) = \left(\frac{\partial\varphi_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}}\right)^2 \sigma_{x_{k|k-1}}^2 + \left(\frac{\partial\varphi_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}}\right)^2 \sigma_{y_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial\varphi_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}} \frac{\partial\varphi_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}} \sigma_{x_{k|k-1}, y_{k|k-1}}^2 \quad (46)$$

$$D(\theta_{k|k-1}) = \left(\frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}}\right)^2 \sigma_{x_{k|k-1}}^2 + \left(\frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}}\right)^2 \sigma_{y_{k|k-1}}^2 + \left(\frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial z_{k|k-1}}\right)^2 \sigma_{z_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}} \frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}} \sigma_{x_{k|k-1}, y_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}} \frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial z_{k|k-1}} \sigma_{x_{k|k-1}, z_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}} \frac{\partial\theta_{k|k-1}}{\partial z_{k|k-1}} \sigma_{y_{k|k-1}, z_{k|k-1}}^2 \quad (47)$$

其中 $\sigma_{x_{k|k-1}}^2$ 、 $\sigma_{y_{k|k-1}}^2$ 、 $\sigma_{z_{k|k-1}}^2$ 分别为 $x_{k|k-1}$ 、 $y_{k|k-1}$ 、 $z_{k|k-1}$ 的方差, $\sigma_{x_{k|k-1}, y_{k|k-1}}^2$ 为 $x_{k|k-1}$ 与 $y_{k|k-1}$ 的协方差, $\sigma_{x_{k|k-1}, z_{k|k-1}}^2$ 为 $x_{k|k-1}$ 与 $z_{k|k-1}$ 的协方差, $\sigma_{y_{k|k-1}, z_{k|k-1}}^2$ 为 $y_{k|k-1}$ 与 $z_{k|k-1}$ 的协方差,其取值可以从目标预测协方差阵中直接获得。

3.3.1.2 基于角度信息的虚假目标鉴别

设此时雷达的量测集合为 $\Lambda = \{(r_k^i, \varphi_k^i, \theta_k^i), \dots, (r_k^i, \varphi_k^i, \theta_k^i), \dots, (r_k^M, \varphi_k^M, \theta_k^M)\}$, r_k^i 、 φ_k^i 、 θ_k^i 分别为 k 时刻第 i 个距离量测值、方位角量测值和俯仰角量测值,由于 $\varphi_{k|k-1}$ 、 $\theta_{k|k-1}$ 分别近似服从均值为目标真实方位角、俯仰角的正态分布,类似式(1)构造检验统计量 η :

$$\eta = \frac{(\varphi_{k|k-1} - \varphi_k^i)^2}{D(\varphi_{k|k-1}) + \sigma_{\varphi}^2} + \frac{(\theta_{k|k-1} - \theta_k^i)^2}{D(\theta_{k|k-1}) + \sigma_{\theta}^2} \quad (48)$$

η 近似服从自由度为 2 的 χ^2 分布,若 $\eta < G_\alpha$,则判定量测 i 为虚假目标, G_α 为检验门限,根据显著性水平来确定。

3.3.1.3 基于距离信息的虚假目标鉴别

集合 Λ 经过前面步骤的鉴别和分类后,将判定为虚假目标的所有量测组成一个新的量测集,设为 Λ_1 ,其中包含 F_1 组量测.如图 4 所示,集合 Λ_1 中除虚假目标的量测外,还可能包含较多的杂波,我们利用虚假目标与真实目标距离间隔相对固定的特点,在距离上设置多个“波门”,进一步筛选集合 Λ_1 中的量测,以更好地去除杂波干扰。

计算 k 时刻距离预测值 $r_{k|k-1}$:

$$r_{k|k-1} = \sqrt{[(x_{k|k-1} - x_{\text{radar}})^2 + (y_{k|k-1} - y_{\text{radar}})^2 + (z_{k|k-1} - z_{\text{radar}})^2]} \quad (49)$$

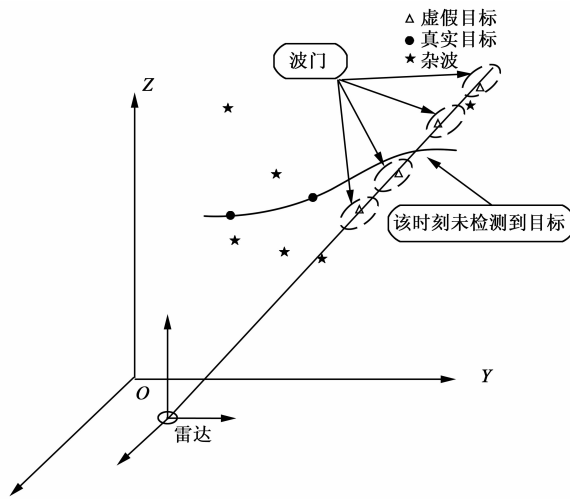


图4 基于距离信息的虚假目标鉴别示意图

构造检验统计量:

$$\xi_{il} = \frac{(r_{k|k-1} \pm d^{0i} - r_k^l)^2}{D(r_{k|k-1}) + D(d^{0i}) + \sigma_r^2} \quad (50)$$

其中 r_k^l 为 k 时刻集合 \mathbf{A}_1 中第 l 组量测中的距离量测, 当所确定的第 i 个虚假目标与雷达的距离大于真实目标与雷达的距离预测值 $r_{k|k-1}$ 时, 式 (50) 中的“ \pm ”取“ $+$ ”, 反之则取“ $-$ ”, d^{0i} 由式 (30) 计算, $D(d^{0i})$ 可由式 (31) 求得, σ_r^2 为已知, $D(r_{k|k-1})$ 为距离预测的方差:

$$D(r_{k|k-1}) = \left(\frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}} \right)^2 \sigma_{x_{k|k-1}}^2 + \left(\frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}} \right)^2 \sigma_{y_{k|k-1}}^2 + \left(\frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial z_{k|k-1}} \right)^2 \sigma_{z_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}} \frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}} \sigma_{x_{k|k-1} y_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial x_{k|k-1}} \frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial z_{k|k-1}} \sigma_{x_{k|k-1} z_{k|k-1}}^2 + \frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial y_{k|k-1}} \frac{\partial r_{k|k-1}}{\partial z_{k|k-1}} \sigma_{y_{k|k-1} z_{k|k-1}}^2 \quad (51)$$

$$\xi_{il} < G_\alpha \quad (52)$$

判别准则为: 若 ξ_{il} 满足式 (52), 则判定集合 \mathbf{A}_1 中第 l 组量测源于虚假目标 i ; 对于固定的 i , 若有多个 ξ_{il} 满足式 (52), 则选取 ξ_{il} 最小的量测为虚假目标 i 的量测; 若 r_k^l 对所有的 i 都不满足式 (52), 则认为该组量测源于杂波。

3.3.2 构造目标量测输入

设经过 3.3.1 节后的到虚假目标的量测集合为 \mathbf{A}_2 , 设其中包含 F_2 组量测:

$$\mathbf{A}_2 = \{ (r_k^1, \varphi_k^1, \theta_k^1), \dots, (r_k^{i_2}, \varphi_k^{i_2}, \theta_k^{i_2}), \dots, (r_k^{F_2}, \varphi_k^{F_2}, \theta_k^{F_2}) \} \quad (53)$$

利用 \mathbf{A}_2 构造真实目标的等效距离量测, 设利用第 i_2 组量测求得目标的距离量测为 $r_k^{0i_2}$:

$$r_k^{0i_2} = r_k^{i_2} + d^{0i} \quad \text{若 } r_k^{i_2} < r_{k|k-1} \quad (54)$$

$$r_k^{0i_2} = r_k^{i_2} - d^{0i} \quad \text{若 } r_k^{i_2} > r_{k|k-1} \quad (55)$$

其中 d^{0i} 与式 (50) 中一致。

将距离量测集合 $\{ r_k^{0i_2} \mid i_2 = 1, \dots, F_2 \}$ 进行融合, 求

得 r_k^{fused} :

$$r_k^{\text{fused}} = \frac{1}{F_2} \sum_{i_2=1}^{F_2} r_k^{0i_2} \quad (56)$$

利用式 (31) 可得 r_k^{fused} 方差:

$$D(r_k^{\text{fused}}) = \frac{N+2}{F_2 N} \sigma_r^2 \quad (57)$$

将集合 \mathbf{A}_2 中的方位角、俯仰角量测进行融合:

$$\varphi_k^{\text{fused}} = \frac{1}{F_2} \sum_{i_2=1}^{F_2} \varphi_k^{i_2} \quad (58)$$

$$D(\varphi_k^{\text{fused}}) = \frac{1}{F_2} \sigma_{\varphi}^2 \quad (59)$$

$$\theta_k^{\text{fused}} = \frac{1}{F_2} \sum_{i_2=1}^{F_2} \theta_k^{i_2} \quad (60)$$

$$D(\theta_k^{\text{fused}}) = \frac{1}{F_2} \sigma_{\theta}^2 \quad (61)$$

φ_k^{fused} 、 θ_k^{fused} 分别为融合后的方位角、俯仰角量测, $D(\varphi_k^{\text{fused}})$ 、 $D(\theta_k^{\text{fused}})$ 分别为其方差, 从而可得真实目标的等效量测 \mathbf{Z}_k^d 及其方差阵 \mathbf{R}_k^d :

$$\mathbf{Z}_k^d = \begin{pmatrix} r_k^{\text{fused}} \\ \varphi_k^{\text{fused}} \\ \theta_k^{\text{fused}} \end{pmatrix} \quad (62)$$

$$\mathbf{R}_k^d = \begin{bmatrix} D(r_k^{\text{fused}}) & 0 & 0 \\ 0 & D(\varphi_k^{\text{fused}}) & 0 \\ 0 & 0 & D(\theta_k^{\text{fused}}) \end{bmatrix} \quad (63)$$

3.3.3 滤波跟踪

在构造出目标的等效量测后, 以 \mathbf{Z}_k^d 为滤波器输入, 实现对目标的跟踪, 具体过程与 3.2 节类似。

4 仿真分析

由于目前尚未见到有关距离多假目标干扰下低可观测目标跟踪的相关文献, 只能将本文方法与所掌握的一些研究背景相似的文献进行比较。

4.1 仿真实验一

本试验主要是对 3.1 节方法的有效性进行验证, 设雷达位于坐标原点 (0m, 0m, 0m), 测距精度均为 100m, 方位角、俯仰角测量精度为 0.1rad, 监视区域内共有 5 个真实目标, 按照目标 1 至目标 5 的顺序, 起始位置分别为 (30, 50, 15)、(29.4, 49, 14.7)、(30.6, 51, 15.3)、(28.8, 48, 14.4)、(31.2, 52, 15.6), 单位为 km; 速度分别为 (380, 200, -25)、(372.4, 196, -24.5)、(387.6, 204, -25.5)、(364.8, 192, -24)、(395.2, 208, -26), 单位为 m/s, 雷达对目标持续观测 200s。

不失一般性以目标 1 和目标 2 为例进行讨论, 采用 χ^2 检验对距离多假目标干扰的存在性初步判断结果如图 5 所示, 图中鉴别结果为 1 的时刻是指该时刻的量测

通过了 χ^2 检验,可见这两个真实目标的量测几乎全部通过了 χ^2 检验,这意味着初步判定存在距离欺骗干扰.蒙特卡洛仿真 300 次,按照 2.1.1 节的方法对其进行初步的判断和量测分组,其中 $M = 2$ 、 $N = 3$ 、 $F_\alpha = 9.2103$,最终这 5 个真实目标的量测被划分为同一集合 ω ,并初步判断存在距离欺骗干扰的判别率达到 100%.

其它仿真条件不变,进一步判断 ω 内真实目标的个数是否唯一, $\alpha = 0.01$ 、 $t_{1-\alpha/2} = 2.8609$ 固定不变,显著

性水平始终为 0.01. 图 6 为不同测距精度下正确判断出量测分组内真实目标不唯一的概率曲线,横坐标为样本容量,纵坐标为正确判别率,箭头标出了对应的雷达测距精度.

图 7 为不同样本容量下判断出量测分组内真实目标不唯一的概率变化曲线,箭头标出了三条曲线所对应样本容量.

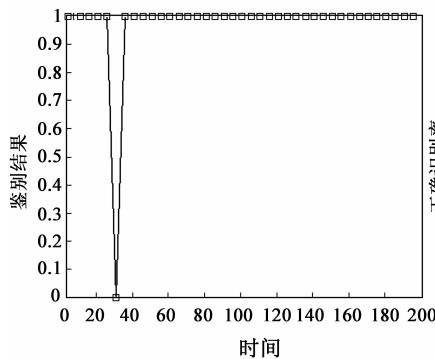


图5 目标1与目标2量测 χ^2 检验结果

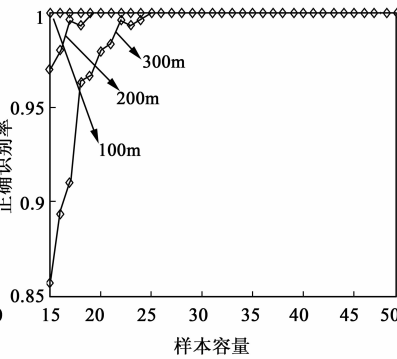


图6 不同测距精度下对真实目标不唯一的正确判别率与样本容量的关系

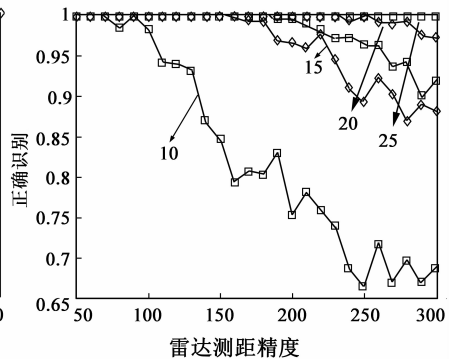


图7 不同样本容量下对真实目标不唯一的正确判别率与测距精度的关系

综合以上实验结果,可见:识别效果随着样本容量的增大、雷达测距精度的提高而改善,并且本方法能够得到较好的识别效果,在测距精度为 300m 时,只需 15 个样本就能使正确识别率达到 0.85 以上.

其它仿真条件不变,设只有一个真实目标,其参数与目标 1 相同,共有 4 个距离假目标,分布在真实目标的两侧,每侧两个,间距相等均为间隔为 1500m. 真实目标唯一的正确判别率如图 8、图 9 所示.

采用本文的方法则可以较好地识别出相同角度分辨单元内多个真实目标的存在,但由于本文的方法是将 χ^2 检验与两总体均值-方差检验相结合的,所以会加大计算量. 确定集合 ω 中真实目标是否唯一,额外的加减法运算次数最少为 $4(n_1 + n_2)$,乘除法运算次数最少为 $(n_1 + n_2 + 9)$,开方运算次数最少为 2.

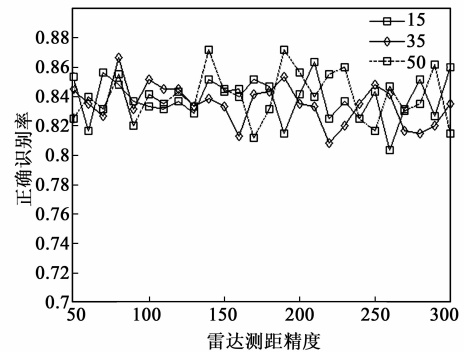


图9 不同样本容量下对真实目标唯一的正确判别率与测距精度的关系

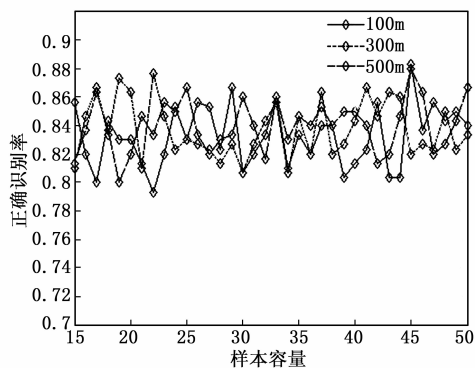


图8 不同测距精度下对真实目标唯一的正确判别率与样本容量的关系

4.2 仿真实验二

本试验主要是对 3.2 节方法的有效性进行验证,选择研究背景相近的文献[17]进行比较. 仿真条件与的 4.1 节相同,取 3.2 节中的参数 $P = 3$ 、 $Q = 2$,样本容量为 30. 设干扰机所引入的虚假目标方位角、俯仰角量测误差标准差为 0.1° ,改变雷达方位角、俯仰角的测量精度,使其从 0.05° 均匀增大到 0.2° ,得到真实目标的正确鉴别率,仿真结果如图 10、图 11 所示. 图中实线为本文方法,虚线为文献[17]中的方法.

在虚假目标所引入方位角、俯仰角量测误差不变的前提下,随着雷达角度测量精度不断降低,目标的正确鉴别率也不断降低,这是由于雷达角度测量精度的降低削弱了虚假目标所引入量测误差造成的差异性,增加了真-假目标的区分难度;与文献[17]中的方法相

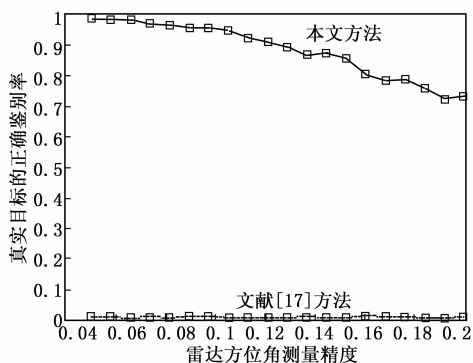


图10 雷达方位角量测精度与真实目标正确鉴别率的关系

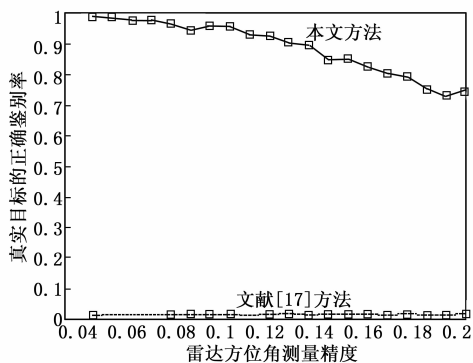


图11 雷达俯仰角量测精度与真实目标正确鉴别率的关系

比本文方法的优势明显,在距离多假目标干扰下,文献[17]对真实目标的正确鉴别率几乎为0,这是由于该方法采用了最近距离选择的方法,当距离假目标与雷达的距离小于真实目标时,该方法很容易造成误判,但同时本文方法也引入了额外的运算量:额外的加减法运算次数为 $2C_M^2(4N-2)$,乘除法运算次数为 $2C_M^2(N+2)$ 。

4.3 仿真实验三

将本文方法与文献[21]进行比较.三部雷达位置坐标分别为 $(0,0,0)$ 、 $(57,0,0)$ 、 $(150,0,0)$,单位为 km,本文方法只利用第1部雷达对目标进行跟踪,文献[21]的方法利用三部雷达,其它仿真条件不变.在一定的空间范围内存在着均匀分布的杂波,杂波的个数服从均值为5和50的泊松分布,设这个空间范围是: X 方向 $0 \sim 120\text{km}$, Y 方向 $0 \sim 100\text{km}$, Z 方向 $0 \sim 15\text{km}$,雷达的测角精度为 0.1° ,距离假目标的角度量测误差为 0.2° ,在起始的20个周期内目标检测概率为0.95,在20个周期以后每次实验取不同的目标检测概率,使其从0.1逐渐增大到1,每次实验蒙特卡洛仿真300次,计算目标跟踪收敛率,仿真结果如图12和图13所示.

分析仿真结果,可见:随着目标检测概率从0.1增大到1,本文方法稳定跟踪概率的变化不大,并且始终保持在0.9以上,可见本文提出的方法能够有效克服目标低可观测性造成的滤波发散问题,并且对杂波干扰

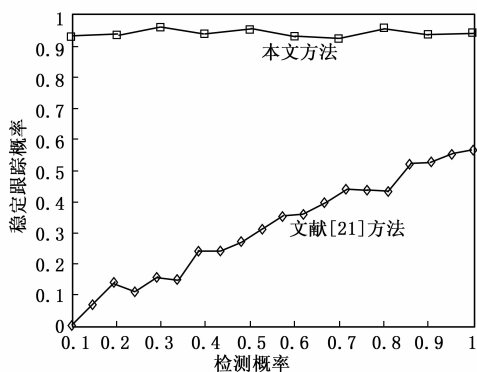


图12 稳定跟踪概率随检测概率的变化曲线 (杂波均值为5)

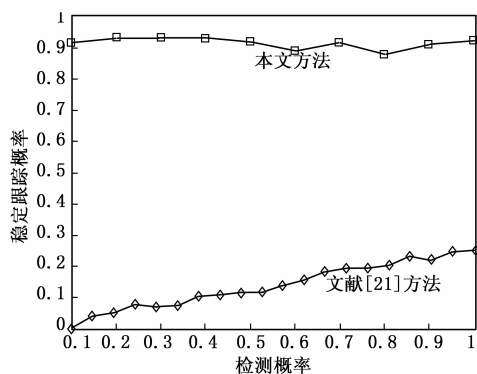


图13 稳定跟踪概率随检测概率的变化曲线 (杂波均值为50)

不敏感;由于文献[21]主要是以高信噪比情况下的目标跟踪为研究对象,并没有考虑低可观测目标的情况,因此文献[21]方法易受目标检测概率的影响,并且对杂波干扰较为敏感.下面对这两种方法的运算量进行比较:本文方法在 χ^2 检验、真实目标唯一性判别、等效量测构建三个步骤额外增加了计算量,但是这三个步骤也实现了相同角度分辨单元内真实目标唯一性判别、目标量测缺失时的目标跟踪;文献[21]采用了集中式的雷达网数据处理结构,其运算量也会随着组网雷达数目和量测个数的增大而有较大幅度的增加.

4.4 仿真实验四

为了减少计算量,且不失一般性,在二维情况下进行仿真实验,其它条件不变,设目标起始位置为 $(30\text{km}, 100\text{km})$,目标运动速度为 $(380\text{m/s}, -200\text{m/s})$,存在6个欺骗干扰假目标,真实目标回波的信噪比为6dB,对于普通目标,欺骗干扰信号幅度通常为真实目标回波信号幅度的1.3~1.5倍,而本文是针对低可观测目标,所以此处取保守值,即,干扰信号幅度为真实目标回波信号幅度的1.5倍.文献[25]提出了一种基于Hough变换的检测前跟踪(TBD)方法,利用该方法对目标进行跟踪,仿真结果如图14、图15所示.

由实验结果可知:图14中6个明显的“尖峰”即为

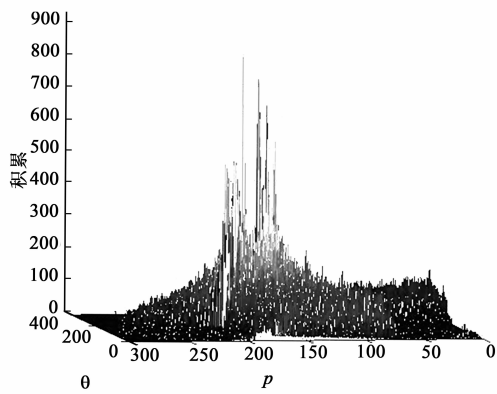


图14 参数空间上的能量积累

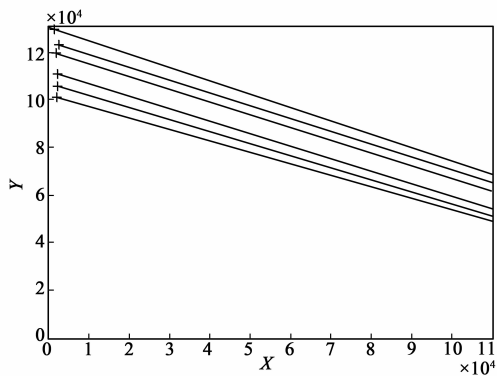


图15 目标航迹

虚假目标的能量累积,而中间“凹口”部分是真实目标的能量累积;图 15 即为 6 个“尖峰”所对应虚假目标的航迹,由于量化误差等原因,其与真实目标轨迹存在一定的偏差,并且中间真实目标航迹是“空位”的.就计算量而言,虽然已经有一些关于 Hough 变换的快速算法,但是与普通的数据处理方法相比其运算负担仍然是较大的,尤其是在三维空间内,其运算量较之二维空间会有大幅的增加,因此在运算量上与本文方法相比不占优势.

5 总结

本文从距离多假目标干扰的特点出发,利用距离假目标所暴露的目标空间位置信息,采用等效量测补位的方法,提出了一种雷达抗距离欺骗干扰技术,着重解决了以下两个方面的问题:当多个距离假目标形成稳定航迹时,真假目标鉴别困难;杂波环境下,真目标的检测概率下降时,目标跟踪不稳定,容易出现滤波发散.通过仿真实验对以上问题的解决效果进行了分析,结果表明本文提出的方法能够在距离多假目标干扰和杂波环境下对低可观测目标进行准确鉴别,并保持稳定跟踪.

参考文献

[1] 温杰. F-35 的电子攻击型[J]. 国际航空,2009,32(1):46

-47.

Wen Jie. F-35 with electronic attack capability[J]. International Aviation,2009,32(1):46-47. (in Chinese)

[2] 肖霞. 无人机的电子战运用及对未来电子战的影响[J]. 现代防御技术,2005,33(6):32-36.

Xiao Xia. Utilization of UAV in EW and its effects on future EW[J]. Modern Defence Technology,2005,33(6):32-36. (in Chinese)

[3] 刘志伟,许克峰. 基于图像信息损失率的合成孔径雷达干扰效果评估指标[J]. 电子学报,2007,35(6):1042-1045.

Liu Zhiwei, Xu Kefeng. The effectiveness index of SAR jamming based on information loss of images[J]. Acta Electronica Sinica,2007,35(6):1042-1045. (in Chinese)

[4] Schleher D Curtis. Electronic Warfare in the Information Age[M]. Boston,MA:Artech House,2000.284-320.

[5] Butt F A, Jalil M. An overview of electronic warfare in radar systems[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering [C]. Konya, Turkey: IEEE Press,2013.213-217.

[6] 周晓群. 电子战无人机的未来发展趋势预测[J]. 舰船科学技术,2004,26(4):33-36.

Zhou Xiaqun. Alternative future forecasting of electronic warfare unmanned aerial vehicles[J]. Ship Science and Technology,2004,26(4):33-36. (in Chinese)

[7] 孙闽红,唐斌. 基于原子分解理论的雷达欺骗式干扰信号特征提[J]. 电波科学学报,2008,23(3):550-554.

Sun Minhong, Tang Bin. Feature extraction of radar deceptive jamming signal based on atomic decomposition[J]. Chinese Journal of Radio Science,2008,23(3):550-554. (in Chinese)

[8] 周文辉,李琳,陈国海. 一种有效的 RGPO 干扰鉴别算法及性能分析[J]. 电子学报,2007,35(6):1165-1169.

Zhou Wen-hui, Li Lin, Chen Guo-hai. An effective algorithm for discriminating RGPO with performance analysis[J]. Acta Electronica Sinica,2007,35(6):1165-1169. (in Chinese)

[9] 吕强,李建勋,秦江敏. 基于神经网络的雷达抗转发式距离欺骗干扰方法[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(2):240-243.

Lü Qiang, Li Jian-xun, Qin Jiang-min. Method against radar's transmitting deceptive jamming in distance based on neural network[J]. Systems Engineering and Electronics,2005,27(2):240-243. (in Chinese)

[10] 孙闽红,唐斌. 距离-速度同步拖引欺骗干扰的频谱特征分析[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(1):83-85.

Sun Minhong, Tang Bin. Analysis of the frequency spec-

- trum of a simultaneous range-gate-pull-off and velocity-gate-pull-off jamming signal[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(1): 83 – 85. (in Chinese)
- [11] Bandiera F, Farina A, Orlando D, et al. Detection algorithms to discriminate between radar targets and ECM signals[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(12): 5984 – 5993.
- [12] 卢云龙, 李明, 闫琰. 一种利用调频率匹配的 DRFM 欺骗干扰检测方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2014, 41(5): 77 – 84.
Lu Yunlong, Li Ming, Yan Yan. Method for detecting DRFM deception jamming based on LFM rate matching[J]. *Journal of Xidian University*, 2014, 41(5): 77 – 84. (in Chinese)
- [13] Tian Xiao, Tang Bin. Spectrum texture features based radar deception jamming recognition using joint frequency-slow time processing[J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2013, 9(13): 5181 – 5188.
- [14] 饶彬, 王雪松. 球坐标系下具有抗干扰能力的弹道导弹跟踪算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(9): 1944 – 1949.
Rao Bin, Wang Xuesong. Ballistic missile tracking algorithm with anti-jamming capability in spherical coordinates[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 1944 – 1949. (in Chinese)
- [15] 饶彬, 肖顺平, 赵志超, 等. 导弹突防电子假目标弹道特性的数学分析[J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 1910 – 1914.
Rao Bin, Xiao Shunping, Zhao Zhichao, et al. Mathematical analysis of trajectories for ballistic-missile-penetration electronic decoys[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 1910 – 1914. (in Chinese)
- [16] 刘兆磊, 许建峰. 脉冲多普勒雷达距离拖引目标序贯滤波跟踪方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(8): 1401 – 1404.
Liu Zhaolei, Xu Jianfeng. Sequential filtering algorithm for RGPO target tracking impulse Doppler radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(8): 1401 – 1404. (in Chinese)
- [17] 徐海全, 王国宏, 关成斌. RGPO 干扰条件下一种改进的机动目标跟踪方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(4): 157 – 162.
Xu Haiquan, Wang Guohong, Guan Chengbin. A modified maneuvering target tracking algorithm under RGPO jamming[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(4): 157 – 162. (in Chinese)
- [18] 李世忠, 王国宏, 徐海全. 异地配置的主/被动雷达抗多假目标干扰研究[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(5): 10 – 13.
Li Shizhong, Wang Guohong, Xu Haiquan. Study on algorithm against multi-false-target deception jamming for active/passive radar at different sites[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(5): 10 – 13. (in Chinese)
- [19] 李世忠, 王国宏, 徐海全, 吴巍. 三维空间主/被动雷达抗多假目标干扰研究[J]. *现代防御技术*, 2012, 40(6): 118 – 124.
Li Shizhong, Wang Guohong, Xu Haiquan, Wu Wei. Algorithm against multi-false-target deception jamming for three-dimensional active / passive radar at different sites[J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(6): 118 – 124. (in Chinese)
- [20] 徐海全, 王国宏, 关成斌. 虚假目标干扰下的雷达网目标跟踪技术[J]. *电子信息对抗技术*, 2012, 27(1): 28 – 31.
Xu Haiquan, Wang Guohong, Guan Chengbin. A tracking technique of radar network with false target jamming[J]. *Electronic and Information Warfare Technology*, 2012, 27(1): 28 – 31. (in Chinese)
- [21] 赵艳丽, 王雪松. 多假目标欺骗干扰下组网雷达跟踪技术[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 454 – 459.
Zhao Yanli, Wang Xuesong. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range false-target deception jamming[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 454 – 459. (in Chinese)
- [22] Li Lei, Sun Jinqiu, Zhu Yu, Li Haisen. Dim target tracking base on GM-PHD filter[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2012, 7202(1): 286 – 294.
- [23] Wang Wenguang, Sun Zuowei, Li Chenming. Study on dim target detection and discrimination from sea clutter[J]. *China Ocean Engineering*, 2013, 27(2): 183 – 192.
- [24] Yankowich S W, Farooq M. Hough transform based multi-sensor, multitarget, track initiation technique[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(7): 2064 – 2077.
- [25] Kabachiev C, Garvanov I, Doukovska L, Kyvtorov V. TBD netted radar system in presence of multi false alarms[A]. *The 6th European Radar Conference*[C]. Rome, Italy: IEEE Press, 2009. 509 – 512.
- [26] 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 Zhichao, Rao Bin, Wang Xuesong, et al. Multi-radar track initiation algorithm based on probabilistic grid Hough transform[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(11): 2209 – 2215. (in Chinese)
- [27] Li X R, Slocumb B J, West P D. Tracking in the presence of range deception ECM and clutter by decomposition and fusion[A]. *Proceedings of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets*[C]. Denver Colorado: SPIE Press, 1999. 198 – 210.

- [28] 饶彬. 对抗条件下弹道目标的雷达跟踪技术研究[D]. 湖南长沙:国防科学技术大学,2011.
Rao Bin. Study on Radar Tracking Technologies of Ballis-

tic Targets in the Presence of Countermeasures[D]. Changsha, Hunan: NUDT, 2011. (in Chinese)

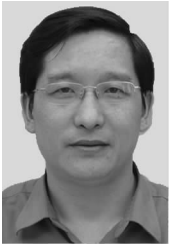
作者简介



孙殿星 男,生于1983年06月,黑龙江伊春人. 海军航空工程学院信息融合研究所博士研究生. 研究方向为雷达组网.
E-mail:sdxdd. hi@163. com



李迎春 男,1988年8月出生,河南郑州人,海军航空工程学院信息融合研究所工程师. 主要从事雷达组网、机动目标跟踪等方面的研究.



王国宏 男,1963年10月出生,山西沁水人,教授、博士生导师. 海军航空工程学院信息融合研究所副所长,主要从事信息融合、机动目标跟踪等方面的研究.



李世忠 男,1980年6月出生,山西平遥人,中国人民解放军91445部队工程师. 主要从事雷达组网抗干扰等方面的研究.