

基于雷达组网的低可观测目标跟踪技术研究

孙殿星¹, 王国宏¹, 涂三军², 杨忠¹

(1. 海军航空工程学院信息融合研究所, 山东 烟台 264001; 2. 海军陆战学院, 广州 510430)

摘要: 本文利用距离多假目标欺骗干扰下虚假目标检测概率高、与真实目标角度量测相近的特点, 提出了基于雷达组网的低可观测目标跟踪方法。根据角度量测信息完成各雷达量测集的划分与融合, 对各雷达量测划分进行同源假设检验, 利用虚假目标所暴露的真实目标的角度信息, 构造低可观测目标的量测输入, 对漏检目标进行“补位”, 提高低可观测目标跟踪的稳定性。仿真结果证明了该技术的可行性和有效性。

关键词: 雷达网; 距离多假目标欺骗干扰; 低可观测目标

中图分类号: TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)04-0006-06

Study on Tracking Technique for Low Observable Target Based on Radar Network

SUN Dian-xing¹, WANG Guo-hong¹, TU San-jun², YANG Zhong¹

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

2. Institute of Navy and Marine Corps, Guangzhou 510430, China)

Abstract: Considering that the detection probability of false target is high under range-velocity deception jamming, which is similar to angle-measurements to the target, we proposed a low observable target tracking method based on radar network. At first, the angle-measurement set of each radar is partitioned according to the angle information, and the measurements within the same partition are fused. Then the hypothesis testing for the same source measurements of each partition is realized and the missed target measurements are compensated. Simulation results verify the feasibility and validity of the proposed algorithm.

Key words: radar network; multi-range-false-target jamming; low observable target

0 引言

随着现代战争中电子对抗愈加激烈, 雷达的生存环境变得十分恶劣, 尤其是数字电子技术、隐身技术和无人机技术的发展^[1-2]使雷达干扰技术呈现出新的发展趋势, 例如: 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^[3], 其中距离多假目标干扰即为应用较广的一种; 为提高干扰机平台的安全性, 尽量降低其检测概率, 美国计划将具有隐身能力的 F-35 改装为电子战飞机^[1], 并且广泛应用无人机作为干扰平台^[2,4]。针对上述问题, 如何提高

雷达的抗干扰能力已成为近年来关注的焦点^[5-11]。从公开文献来看, 针对欺骗干扰, 现有的抗干扰方法总体分为基于信号处理和基于数据处理两类。

文献[5-8]是基于信号处理的抗欺骗干扰方法, 其核心是利用真/假目标回波信号的差异性进行干扰的剔除, 随着欺骗信号逼真度的提高, 干扰识别的难度增大, 欺骗信号通过信号层的判别而进入数据处理层的情况在所难免, 并且当目标的信噪比降低、可观测性变差时, 上述方法对真实目标的正确鉴别率也会受到较大影响; 文献[9-10]是基于数据处理的单雷达抗距离欺骗干扰方法; 文献[11]是基于数据处理的集中式组网雷达抗距离欺骗干扰方法, 该方法利用雷达网对目标的探测、跟踪优势, 采用同源量测检验的方法能够有效剔除距离欺骗干扰。但是上述基于数据处理的抗干扰方法都是以存在目标量测输入为前提, 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

收稿日期: 2015-04-16

修回日期: 2015-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61179018, 61102165, 61002006); “泰山学者”建设工程专项经费

作者简介: 孙殿星(1983—), 男, 黑龙江伊春人, 博士, 工程师, 研究方向为雷达抗干扰技术。

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^[12-16],为提高低可观测目标的探测性能和跟踪精度^[16]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。

针对以上问题,本文以低可观测电子战飞机施放距离多假目标欺骗干扰^[1-2]为研究背景,利用虚假目标检测概率较高、与真实目标(电子战飞机)角度量测相近的特性,提出了距离多假目标欺骗干扰下基于雷达组网的低可观测目标跟踪技术。

1 问题描述和总体思路

距离多假目标干扰是指干扰机产生多个具有虚假距离信息的欺骗干扰回波,其能量大于真实目标回波,其他参数与真实目标近似相同,本文以信号层采取抗干扰措施效果不够理想、依然在数据层形成大量虚假目标的情况为研究前提。由于虚假目标较强的空间相关性,采用雷达网检测前跟踪(TBD)技术会对欺骗干扰的回波能量进行空间积累,易将其误判为真实目标,并漏掉真实目标。针对上述问题,本文首先根据角度量测信息完成雷达量测集的划分与融合,并对各雷达量测划分进行同源假设检验,以此剔除虚假目标,然后,在缺失真实目标量测的情况下利用虚假目标所暴露的真实目标角度信息构造低可观测目标量测输入,实现漏检目标“补位”,不但提高了低可观测目标跟踪的稳定性,而且不必对目标回波能量进行积累,避免了该复合干扰下 TBD 技术的“误判问题”。问题总体解决思路如图 1 所示。

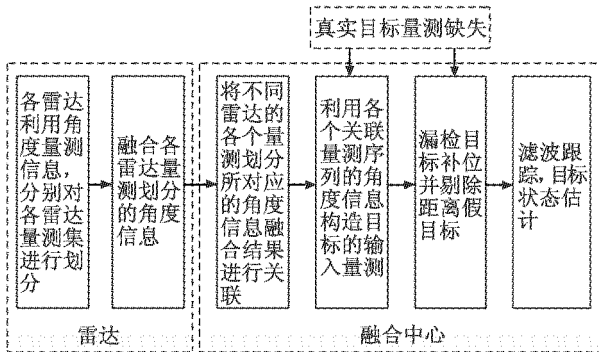


图 1 问题的解决思路

Fig. 1 Resolution of the problem

2 各雷达量测集的划分与融合

如图 2 所示,当干扰方对雷达进行距离假目标欺骗

时,由前文所述可知,真实目标、虚假目标和雷达三者应当近似处于同一直线,同时在相同的方位角和俯仰角上出现两个真实目标的可能性极小。可知:在某个时刻相同的方位、俯仰方向上一般只有一个真实目标,如果在这个方向上出现多个量测值,其中应当包含若干个虚假目标。利用这个特征,可以将雷达的所有量测进行分类,具体方法如下。

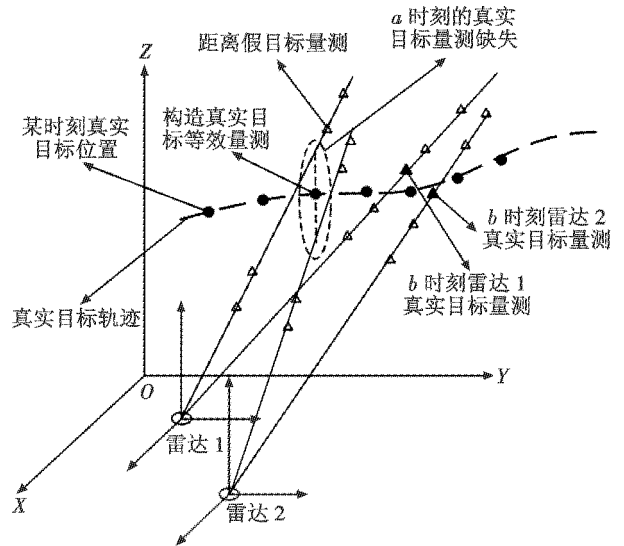


图 2 距离多假目标欺骗干扰示意图

Fig. 2 Sketch of multi-range-false-target jamming

以雷达 1 为例,设 k 时刻雷达的第 i 个量测为 $(r_k^i, \theta_k^i, \phi_k^i)$, 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, 同样设第 j 个量测为 $(r_k^j, \theta_k^j, \phi_k^j)$ 。采用假设检验的方法对其进行归类。

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

式中: $\sigma_\theta, \sigma_\phi$ 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。如果雷达的两个量测满足式(1), 那么就将这两个量测划分为一类, 将其他量测与已有类中的任意一个量测按相同的方法进行检验, 如果满足式(1)就将其划为该类, 如果某量测对所有的类都不满足式(1), 则产生一个新的类, 并将这个量测归入其中。

如上所述, 当雷达所有量测都划分完毕后, 将各个类中的方位角、俯仰角进行数据融合, 由于量测来自同一雷达, 因而测量精度近似相同, 融合后的量测为各个划分中量测的算术平均, θ_{lk}, ϕ_{lk} 分别为 k 时刻第 l 个类融合后的俯仰角量测、方位角量测。这样由每个类中的数据就可以提取出一个方位角量测和一个俯仰角量测, 设 n_l 为第 l 个类中量测的数量, 可知, 压缩后的量测精度提高了 $\sqrt{n_l}$ 倍。

3 组网雷达量测划分的关联假设检验

3.1 假设检验统计量

从上节可知每一个量测划分可以在空间确定一条直线。如图 2 所示,在不存在量测误差的理想情况下,如果量测来自同一真实目标,那么在不同雷达都发现目标的情况下,必定会出现两条直线相交的情况;在实际中,由于量测误差的存在,这两条直线不可能相交,但是这两条直线间的距离必定以较高的概率落在某个较小的范围内,即这两条直线距离很远的概率较小。

设在 k 时刻,雷达 1 的某个“量测划分”确定压缩后的俯仰角、方位角量测分别为 θ_1, ϕ_1 ; 雷达 i 的某个“量测划分”确定压缩后的俯仰角、方位角量测分别为 θ_i, ϕ_i ; 雷达 j 的某个“量测划分”确定压缩后的俯仰角、方位角量测分别为 θ_j, ϕ_j ; 则由 θ_i, ϕ_i 所确定空间直线 l_i 的方向矢量为 $[\cos \theta_i \cos \phi_i, \cos \theta_i \sin \phi_i, \sin \theta_i]$; 由 θ_j, ϕ_j 所确定空间直线 l_j 的方向矢量为 $[\cos \theta_j \cos \phi_j, \cos \theta_j \sin \phi_j, \sin \theta_j]$; 设雷达 i 的位置坐标为 (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}) , 雷达 j 的位置坐标为 (x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}) , 应用解析几何知识可以构造检验统计量。

取行列式 H 的值为

$$H = \begin{vmatrix} x_i - x_j & \cos \theta_i \cos \phi_i & \cos \theta_j \cos \phi_j \\ y_i - y_j & \cos \theta_i \sin \phi_i & \cos \theta_j \sin \phi_j \\ z_i - z_j & \sin \theta_i & \sin \theta_j \end{vmatrix} \quad (2)$$

因为 $\theta_i, \phi_i, \theta_j, \phi_j$ 分别服从均值为相应真值的高斯分布,所以行列式 H 亦近似服从高斯分布。同时,在不考虑量测误差的理想状态下直线 l_i, l_j 相交的充要条件是 $M=0$ 。所以,当原假设为:量测 $\theta_i, \phi_i, \theta_j, \phi_j$ 来自同一真实目标时,行列式 H 的均值为 0,从而有检验统计量 η 为

$$\eta = \frac{H^2}{\left(\frac{\partial H}{\partial \theta_i}\right)^2 \sigma_{\theta_i}^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \phi_i}\right)^2 \sigma_{\phi_i}^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \theta_j}\right)^2 \sigma_{\theta_j}^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \phi_j}\right)^2 \sigma_{\phi_j}^2}$$

其服从自由度为 1 的 χ^2 分布,其中 $\sigma_{\theta_i}, \sigma_{\phi_i}, \sigma_{\theta_j}, \sigma_{\phi_j}$ 分别为雷达 i 与雷达 j 俯仰角、方位角的量测精度。

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \theta_i} &= (x_i - x_j)(-\sin \theta_i \sin \phi_i \sin \theta_j - \cos \theta_j \sin \phi_j \cos \theta_i) + \\ & (y_i - y_j)(\sin \theta_i \cos \phi_i \sin \theta_j + \cos \theta_j \sin \phi_j \cos \theta_i) + \\ & (z_i - z_j)(-\sin \theta_i \cos \phi_i \cos \theta_j \sin \phi_j + \cos \theta_j \cos \phi_j \sin \theta_i \sin \phi_i), \\ \frac{\partial H}{\partial \phi_i} &= (x_i - x_j) \cos \theta_i \cos \phi_i \sin \theta_j + (y_i - y_j) \cos \theta_i \sin \phi_i \sin \theta_j - \\ & (z_i - z_j)(\cos \theta_i \sin \phi_i \cos \theta_j \sin \phi_j - \cos \theta_j \cos \phi_j \cos \theta_i \cos \phi_i), \\ \frac{\partial H}{\partial \theta_j} &= (x_i - x_j)(\cos \theta_i \sin \phi_i \cos \theta_j + \sin \theta_j \sin \phi_j \sin \theta_i) - \\ & (y_i - y_j)(\cos \theta_i \cos \phi_i \cos \theta_j + \sin \theta_j \cos \phi_j \sin \theta_i) + \\ & (z_i - z_j)(-\cos \theta_i \cos \phi_i \sin \theta_j \sin \phi_j + \sin \theta_j \cos \phi_j \cos \theta_i \sin \phi_i), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \phi_j} &= -(x_i - x_j) \cos \theta_j \cos \phi_j \sin \theta_i - (y_i - y_j) \cos \theta_j \sin \phi_j \sin \theta_i + \\ & (z_i - z_j)(\cos \theta_i \cos \phi_i \cos \theta_j \cos \phi_j + \cos \theta_j \sin \phi_i \cos \theta_i \sin \phi_i). \end{aligned}$$

直线 l_i 与直线 l_j 通过检验的判别准则为

$$\rho \leq F'_\alpha \quad (3)$$

式中, F'_α 为检验门限,依据显著性水平来确定。

3.2 关联假设检验算法

在距离多假目标欺骗的环境下要实现多目标的定位、跟踪,首先要尽可能去除虚假量测,以减小计算负担,并达到“去伪存真,精炼数据”的目的。为此本文采取如下关联假设检验算法:设雷达网由 N 部雷达构成,利用 3 节的方法对各部雷达的量测进行“归类划分、量测融合”,得到量测集合 Z_i 为

$$Z_i = \{(\theta_1^i, \phi_1^i), (\theta_2^i, \phi_2^i), \dots, (\theta_{M_i}^i, \phi_{M_i}^i)\} \quad i=1, \dots, N \quad (4)$$

式中: (θ_k^i, ϕ_k^i) 为集合 Z_i 中第 k 个划分的量测, θ_k^i 为俯仰角量测值, ϕ_k^i 为方位角量测值; M_i 为量测集合 Z_i 中所包含划分的总数,算法步骤如下:

1) 对集合 Z_1, Z_2 中的量测进行关联假设检验,将通过检验的量测建立映射关系;

2) 提取集合 Z_1, Z_2 中通过检验的量测,构成量测集合 Z'_1, Z'_2 ;

3) 用同样的方法将量测集合 Z'_2 与量测集合 Z_3 进行关联假设检验,以此类推直至量测集合 Z_N ,这样就建立了若干个长度为 N 的“量测序列”;

4) 若共有 K 个量测序列,则判定存在 K 个真实目标,其中的量测即为该目标在各个雷达中所对应的方位角、俯仰角量测。

4 漏检目标补位

如图 2 所示,通过 3 节建立的“量测序列”,能够得到不同雷达对真实目标的角度量测信息,对于低可观测目标,通过构造目标的量测输入进行“漏检目标补位”,以克服目标量测缺失造成的滤波发散问题,提高目标跟踪的稳定性,并且在利用所构造的量测输入进行跟踪的同时也剔除了虚假目标。

不失一般性,以 3 部雷达组网的情况为例,设利用 2,3 节所提出的方法将雷达 1、雷达 2 和雷达 3 的量测进行关联,关联上的量测对分别为 $(\theta_1, \phi_1), (\theta_2, \phi_2), (\theta_3, \phi_3)$, 3 部雷达的位置坐标为 $(x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}), i=1, 2, 3$, 可知这 3 组量测对应的直线方程为

$$\frac{x - x_{r1}}{\cos \theta_1 \cos \phi_1} =$$

$$\frac{y - y_{r1}}{\cos \theta_1 \sin \phi_1} = \frac{z - z_{r1}}{\sin \theta_1}; \quad \frac{x - x_{r2}}{\cos \theta_2 \cos \phi_2} = \frac{y - y_{r2}}{\cos \theta_2 \sin \phi_2} =$$

$$\frac{z - z_{r2}}{\sin \theta_2}; \quad \frac{x - x_{r3}}{\cos \theta_3 \cos \phi_3} = \frac{y - y_{r3}}{\cos \theta_3 \sin \phi_3} = \frac{z - z_{r3}}{\sin \theta_3}.$$

在理想状态下,真实目标应当是上述 3 条直线的

交点,由于实际量测误差的存在,方程组不可能相容,因此利用最小二乘法求其近似解,上式经变化后可得如下方程组

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 \sin \phi_1 & -\cos \theta_1 \cos \phi_1 & 0 \\ 0 & \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \sin \phi_1 \\ \cos \theta_2 \sin \phi_2 & -\cos \theta_2 \cos \phi_2 & 0 \\ 0 & \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \sin \phi_2 \\ \cos \theta_3 \sin \phi_3 & -\cos \theta_3 \cos \phi_3 & 0 \\ 0 & \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 \sin \phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 \sin \phi_1 x_{r1} - \cos \theta_1 \cos \phi_1 y_{r1} \\ \sin \theta_1 y_{r1} - \cos \theta_1 \sin \phi_1 z_{r1} \\ \cos \theta_2 \sin \phi_2 x_{r2} - \cos \theta_2 \cos \phi_2 y_{r2} \\ \sin \theta_2 y_{r2} - \cos \theta_2 \sin \phi_2 z_{r2} \\ \cos \theta_3 \sin \phi_3 x_{r3} - \cos \theta_3 \cos \phi_3 y_{r3} \\ \sin \theta_3 y_{r3} - \cos \theta_3 \sin \phi_3 z_{r3} \end{bmatrix},$$

令:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \sin \phi_1 & -\cos \theta_1 \cos \phi_1 & 0 \\ 0 & \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \sin \phi_1 \\ \cos \theta_2 \sin \phi_2 & -\cos \theta_2 \cos \phi_2 & 0 \\ 0 & \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \sin \phi_2 \\ \cos \theta_3 \sin \phi_3 & -\cos \theta_3 \cos \phi_3 & 0 \\ 0 & \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 \sin \phi_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \sin \phi_1 x_{r1} - \cos \theta_1 \cos \phi_1 y_{r1} \\ \sin \theta_1 y_{r1} - \cos \theta_1 \sin \phi_1 z_{r1} \\ \cos \theta_2 \sin \phi_2 x_{r2} - \cos \theta_2 \cos \phi_2 y_{r2} \\ \sin \theta_2 y_{r2} - \cos \theta_2 \sin \phi_2 z_{r2} \\ \cos \theta_3 \sin \phi_3 x_{r3} - \cos \theta_3 \cos \phi_3 y_{r3} \\ \sin \theta_3 y_{r3} - \cos \theta_3 \sin \phi_3 z_{r3} \end{bmatrix},$$

则漏检目标的补位量测为

$$\mathbf{Z}_m = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (5)$$

5 利用漏检目标的补位量测进行目标跟踪

利用式(5)作为量测输入对目标进行跟踪,可以有效抑制距离欺骗的虚假目标,并且当真实目标出现暂消时,仍然可以利用距离假目标提供的角度信息实现目标的稳定跟踪,因此需计算其量测误差协方差阵。

$$dx = \frac{\partial x}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial x}{\partial \phi_1} d\phi_1 + \frac{\partial x}{\partial \theta_2} d\theta_2 + \frac{\partial x}{\partial \phi_2} d\phi_2 + \frac{\partial x}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial x}{\partial \phi_3} d\phi_3,$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial y}{\partial \phi_1} d\phi_1 + \frac{\partial y}{\partial \theta_2} d\theta_2 + \frac{\partial y}{\partial \phi_2} d\phi_2 + \frac{\partial y}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial y}{\partial \phi_3} d\phi_3,$$

$$dz = \frac{\partial z}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial z}{\partial \phi_1} d\phi_1 + \frac{\partial z}{\partial \theta_2} d\theta_2 + \frac{\partial z}{\partial \phi_2} d\phi_2 + \frac{\partial z}{\partial \theta_3} d\theta_3 + \frac{\partial z}{\partial \phi_3} d\phi_3,$$

写成矩阵型式为

$$d\mathbf{Z}_m = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \phi_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \phi_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \phi_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \phi_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \phi_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \phi_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial z}{\partial \phi_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\phi_1 \\ d\theta_2 \\ d\phi_2 \\ d\theta_3 \\ d\phi_3 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\phi_1 \\ d\theta_2 \\ d\phi_2 \\ d\theta_3 \\ d\phi_3 \end{bmatrix}$$

将 \mathbf{P} 分块

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4, \mathbf{P}_5, \mathbf{P}_6] \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_1 = \frac{\partial (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}}{\partial \theta_1} = \frac{\partial (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}}{\partial \theta_1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}^T \mathbf{b}}{\partial \theta_1}.$$

$$\frac{\partial (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}}{\partial \theta_1} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \frac{\partial (\mathbf{A}^T \mathbf{A})}{\partial \theta_1} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} =$$

$$-(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \theta_1} \right) (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}^T \mathbf{b}}{\partial \theta_1} =$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} \mathbf{b} + \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \theta_1},$$

$$\text{得 } \mathbf{P}_1 = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \theta_1} \right) (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} - \frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} \mathbf{b} - \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \theta_1} \right] =$$

$$-(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \theta_1} \right) \mathbf{Z}_m - \frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} \mathbf{b} - \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial \theta_1} \right]. \text{ 其中:}$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}^T}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \sin \phi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 \cos \phi_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta_1 \sin \phi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\frac{\partial \mathbf{b}^T}{\partial \theta_1} = [-\sin \theta_1 \sin \phi_1 x_{r1} + \sin \theta_1 \cos \phi_1 y_{r1} \quad \cos \theta_1 y_{r1} + \sin \theta_1 \sin \phi_1 z_{r1}$$

0 0 0 0],同理可得 $\mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4, \mathbf{P}_5, \mathbf{P}_6$ 。

由上面的计算就可以求得滤波跟踪的量测误差协方差阵,本文利用卡尔曼滤波算法对目标进行状态估计,直角坐标系下的量测噪声协方差阵为

$$\mathbf{R}(k+1) = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \sigma_{\theta_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\phi_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta_2}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta_3}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi_3}^2 \end{bmatrix} \mathbf{P}^T$$

其中, \mathbf{P} 由式(6)确定, $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\phi_1}, \sigma_{\theta_2}, \sigma_{\phi_2}, \sigma_{\theta_3}, \sigma_{\phi_3}$ 分别是3部雷达的方位角、俯仰角量测误差标准差。

由于在实际目标跟踪问题中很可能出现各部雷达的已有量测之间关联失败,即在3节中处理的数据输出是0,使跟踪波门内没有量测数据,这样就无法对漏检目标进行补位,从而使跟踪的量测数据出现空缺,此时则采用预测值代替估计值。

6 仿真分析

6.1 仿真初始条件

不失一般性,设有3部雷达位置坐标分别为(0 m,

0 m, 0 m), (5.7 × 10⁴ m, 0 m, 0 m), (1.5 × 10⁵ m, 0 m, 0 m), 真实目标的起始位置是(3.6 × 10⁴ m, 1.2 × 10⁵ m, 1.5 × 10⁴ m); 目标在 X, Y, Z 3 个坐标轴方向的运动速度分别是 370 m/s, -220 m/s, -26 m/s, 对目标连续观测 200 s; 3 部雷达采样周期均为 1 s, 测距精度均为 100 m, 测角精度均为 0.1 rad。

6.2 仿真实验一

蒙特卡罗仿真次数为 200 次, 在真实目标的两侧每隔 1600 m 的距离产生 1 个虚假距离目标, 共产生 6 个虚假目标, 每侧各 3 个, 并且真实目标以 0.7 的概率暂消。

如图 3 所示, 图中共有 7 条轨迹, 其中, 位置居中的红色轨迹为雷达 1 所获得的真实目标量测形成的轨迹(此处不考虑目标暂消); 图 4 为目标跟踪位置误差, 可见虽然每个时刻都存在距离欺骗假目标的干扰, 同时真实目标的量测以 0.7 的概率暂消, 但是并没有引起跟踪发散, 并且在跟踪稳定后误差基本能够保持在 50 m 以内, 可见本文方法几乎完全排除了距离欺骗假目标的干扰与低可观测性的影响。

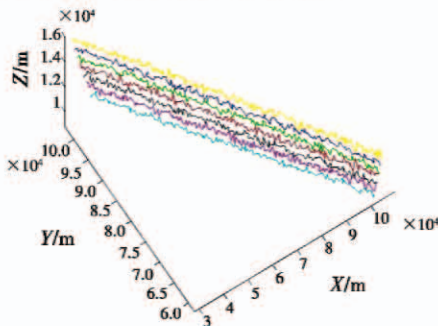


图 3 真实目标和虚假目标的轨迹
Fig. 3 Tracks of real target and false target

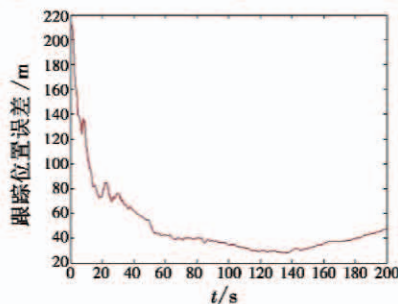


图 4 目标跟踪位置误差
Fig. 4 Position RMSE of target

6.3 仿真实验二

文献[11]是关于雷达网抗距离多假目标欺骗干扰的代表性文献, 与本文研究背景的相似性较高, 因此将本文方法与文献[11]中基于同源量测融合的跟踪技

术进行比较。

其他仿真条件不变, 目标的检测概率从 0.1 增大到 1.0, 得到滤波发散概率随目标检测概率变化的关系曲线, 如图 5 所示。由于文献[11]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, 而本文方法是以低可观测目标为研究对象, 因此文献[11]方法对目标检测概率的变化较为敏感。

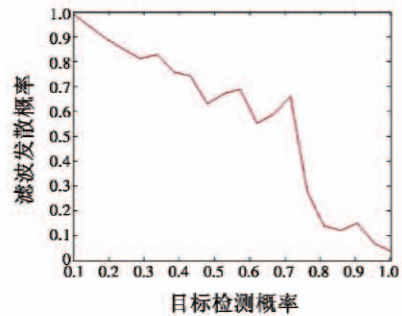


图 5 基于同源量测融合跟踪技术的滤波发散概率
Fig. 5 Divergence probability of tracking technique based on the same source measurement fusion

本文方法在跟踪稳定性上具有一定的优势, 如图 6 所示, 本文方法受目标检测概率影响不大, 当目标检测概率在 0.1 ~ 1.0 之间变化时, 滤波发散的的概率始终保持在 0.01 左右, 可见, 本文构建的等效量测能够及时地填补目标暂消所造成的量测“空缺”, 保持滤波跟踪的稳定性。

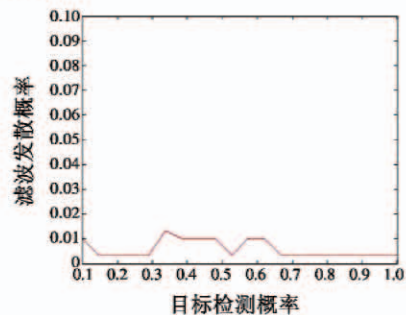


图 6 本文方法的滤波发散概率

Fig. 6 Divergence probability of the technique in this paper

6.4 仿真实验三

设存在 6 个欺骗干扰假目标, 真实目标回波的信噪比为 6 dB, 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[14]提出了一种基于 Hough 变换的 TBD 方法, 利用该方法对目标进行跟踪, 仿真结果如图 7、图 8 所示。

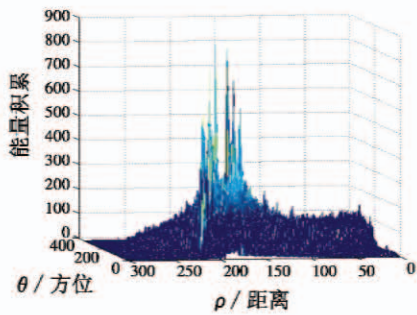


图7 参数空间上的能量积累

Fig. 7 Energy accumulation in parameter space

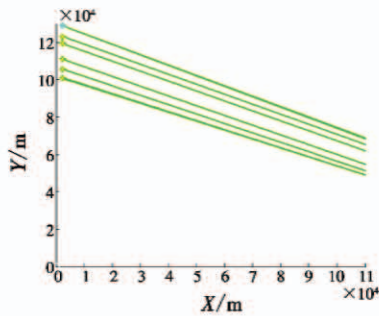


图8 虚假目标航迹

Fig. 8 Track of false targets

由图7可知,由于欺骗干扰各个时刻的量测具有很好的空间相关性,能够较好地实现能量累积,同时干扰信号强度大于真实目标回波的信号强度,因此欺骗干扰能量累积的峰值大于真实目标能量累积的峰值,易将虚假目标误判为真实目标并将真实目标丢失,图中,6个明显的“尖峰”即为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8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空位。

通过仿真可知:当存在欺骗干扰时,文献[14]中的目标检测跟踪方法容易失效,会造成目标丢失与误判。

7 结论

本文从距离多假目标欺骗干扰的特点出发,利用雷达网的信息融合优势,提出了一种距离多假目标欺骗干扰下基于雷达组网的低可观测目标跟踪技术,着重解决了干扰鉴别难度大、低可观测目标跟踪稳定性差的问题。仿真实验表明:在距离多假目标欺骗干扰下,当目标检测概率较低时本文方法仍能保持目标的稳定跟踪,并且跟踪的精度较高。

由于本文在真实目标漏检时采用构建目标量测补位的方法,而量测的构造依赖于虚假目标干扰所暴露的真实目标角度信息,因此各组网雷达量测划分的关联假设检验是重点环节。

参考文献

- [1] 温杰. F-35 的电子攻击型[J]. 国际航空, 2009(1): 46-47. (WEN J. F-35 with electronic attack capability[J]. International Aviation, 2009(1): 46-47.)
- [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): 32-35. (XIAO X. Utilization of UAV in EW and its effects on future EW[J]. Modern Defence Technology, 2005, 33(6): 32-35.)
- [3] SCHLEHER D C. Electronic warfare in the information age[M]. Boston, MA: Artech House, 2000: 284-320.
- [4] 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 X Q. Alternative future forecasting of electronic warfare unmanned aerial vehicles[J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(4): 33-36.)
- [5] 孙闾红, 唐斌. 基于原子分解理论的雷达欺骗式干扰信号特征提取[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 550-554. (SUN M H, TANG B. Feature extraction of radar deceptive jamming signal based on atomic decomposition[J]. Chinese Journal of Radio Scienc, 2008, 23(3): 550-554.)
- [6] 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 W H, LI L, CHEN G H. An effective algorithm for discriminating RGPO with performance analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1165-1169.)
- [7] 吕强, 李建勋, 秦江敏, 等. 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. (LYU Q, LI J X, QIN J M, et al. Method against radar's transmitting deceptive jamming in distance based on neural network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(2): 240-243.)
- [8] 孙闾红, 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 M H, TANG B. Analysis of the frequency spectrum of a simultaneous range-gate-pull-off and velocity-gate-pull-off jamming signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1): 83-85.)
- [9] 刘兆磊, 许建峰, 张光义, 等. 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 Z L, XU J F, ZHANG G Y, et al. Sequential filtering algorithm for RGPO target tracking impulse Doppler radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(8): 1401-1404.)

(下转第 27 页)

5 结束语

本文主要研究了在双机IRST系统中自主引导协同搜索的问题,长机在没有目标距离信息的情况下根据红外传感器的探测距离参数确定目标存在的范围,并引导僚机进行搜索。仿真实验采用了对目标存在区域的顺序搜索和中心搜索方式,两种搜索方式都能成功搜索到目标,而基于目标存在概率分布提出的中心搜索方式效率更高,所需时间更短。同时,在目标不同位置条件下进行了一次成功引导搜索概率的数值计算,对成功引导搜索随目标位置变化规律进行了验证,为双机IRST自主引导搜索系统配置提供了一定的参考。

参考文献

- [1] 牟达,王建立,陈涛. 红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 93-95. (MU D, WANG J L, CHEN T. Analysis for operating range of IR search & track system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 93-95.)
- [2] 王国华,毛大鹏,刘洵,等. 机载光电跟踪系统搜索策略研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 1014-1018. (WANG G H, MAO D P, LIU X, et al. Study of search strategy on airborne optical tracking system[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 1014-1018.)
- [3] 白学福,梁永辉,江文杰. 红外搜索跟踪系统的关键技术和发展前景[J]. 国防科技, 2007(1): 34-36. (BAI X F, LIANG Y H, JIANG W J. Key techniques and prospects of infrared search and tracking systems[J]. National Defense Science & Technology, 2007(1): 34-36.)
- [4] 吴巍,王国宏,李世忠,等. 双机被动定位系统的最优传感器配置研究[J]. 光电工程, 2011, 38(10): 51-56. (WU W, WANG G H, LI S Z, et al. Optimum sensors deployment of double-plane passive system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(10): 51-56.)
- [5] 李富栋. 机载红外搜索与跟踪系统的现状与发展[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 409-412. (LI F D. Status and development of airborne IRST systems[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 409-412.)
- [6] 杨秀珍,何友,鞠传文. 目标检测中的传感器管理方法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2805-2808. (YANG X Z, HE Y, JU C W. Study on methods of sensor management used in target detection[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(12): 2805-2808.)
- [7] 王国宏,何友,毛士艺. IRST对3D雷达引导性能分析[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1-4. (WANG G H, HE Y, MAO S Y. Performance analysis of using an IRST sensor cueing a 3D radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1-4.)
- [8] 王国宏,毛士艺. ESM对2D雷达引导性能分析[J]. 航空学报, 2002, 23(4): 298-301. (WANG G H, MAO S Y. Performance analysis of an ESM guiding a 2D radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(4): 298-301.)
- [9] (上接第11页)
- [10] 饶彬,王雪松,丹梅,等. 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 B, WANG X S, DAN M, et al. Ballistic missile tracking algorithm with anti-jamming capability in spherical coordinates[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1944-1949.)
- [11] 赵艳丽,王雪松,王国玉,等. 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 Y L, WANG X S, WANG G Y, et al. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range false-target deception jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 454-459.)
- [12] LI L, SUN J Q, ZHU Y, et al. Dim target tracking base on GM-PHD filter[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7202(1): 286-294.
- [13] WANG W G, SUN Z W, LI C M, et al. Study on dim target detection and discrimination from sea clutter[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(2): 183-192.
- [14] YANKOWICH S W, FAROOQ M. Hough transform based multisensor, multitarget track initiation technique[J]. Optical Engineering, 1998, 37(7): 2064-2077.
- [15] KABAKCHIEV C, GARVANOV I, DOUKOVSKA L, et al. TBD netted radar system in presence of multi false alarms[C]//The 6th European Radar Conference, Rome Italy, 2009: 509-512.
- [16] 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.)