

# 雷达组网抗距离欺骗干扰技术研究

孙殿星，贺达超，杨忠，刘源

海军航空工程学院信息融合研究所，山东烟台，264001

**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。首先根据角度量测信息完成各雷达量测集的划分与融合，然后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；假设检验；目标跟踪

中图分类号：TN953 文献标识码：A

## Anti-jamming Technique for Radar Network in the Presence of Multi-range-false-target Jamming

Sun Dianxing, He Dachao, Yang Zhon, Liu Yuan

Institute of Information Fusion Technology, Naval Aeronautical Engineering Institute. Yantai 264001, China

**Abstract:** In this paper a low observable target tracking method based on radar network is proposed in the presence of the property of range-velocity deception compound jamming which has high detection probability and similar angle-measurements to the target. 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; hypothesis testing; target tracking

## 引言

随着现代战争中电子对抗的愈加激烈，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<sup>[1-2]</sup>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<sup>[4]</sup>，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；（2）为了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<sup>[1]</sup>，并且广泛应用无人机作为干扰平台<sup>[2-3]</sup>。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<sup>[5-11]</sup>。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目标量测输入的存在为前提，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<sup>[12-16]</sup>，为提高低可观测目

标的探测性能和跟踪精度<sup>[1-6]</sup>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<sup>[1-2]</sup>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。首先根据角度量测信息完成各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，然后在真实目标量测缺失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”，以提高低可观测目标跟踪稳定性。

## 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，而其他参数与真实目标近似相同。随着欺骗干扰机性能的提高，从信号层识别虚假目标的难度不断增大，因此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，同时随着隐身技术、无人机技术的不断发展，“低可观测性”与“干扰”同样是我们必须面对的挑战。目前针对低可观测目标探测跟踪技术的研究之中，检测前跟踪（TBD）方法占据着重要的地位，其特点是利用各个时刻目标量测的空间相关特性进行目标回波能量的累积，以提高信噪比，实现低可观测目标的检测和跟踪，但是虚假目标的回波能量通常高于真实目标，并且同样具有很高的空间相关性，因此采用 TBD 技术也会对欺骗干扰的回波能量进行空间积累，易将虚假目标误判为真实目标，并漏掉真实目标。针对上述问题，为了实现距离多假目标欺骗干扰下低可观测目标的稳定跟踪与干扰的剔除，本文利用干扰回波能量强、检测概率高、量测输入稳定，且与真实目标角度量测相近的特点，采用雷达组网的方式，充分挖掘该复合干扰所暴露的目标角度信息，基于不同组网雷达所得量测的同源性，构建低可观测目标的量测输入，实现漏检目标的“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下图所示。

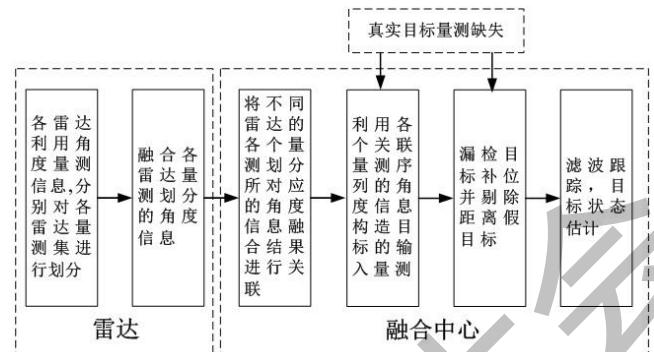


图 1 问题的总体解决思路

## 2 各雷达量测集的划分与融合

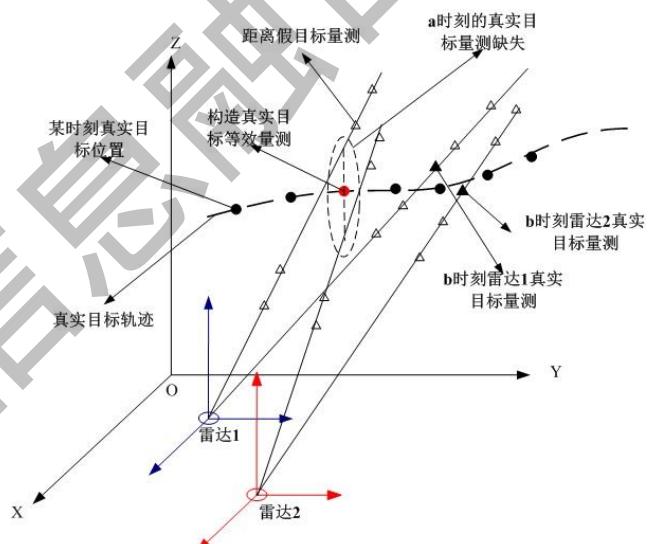


图 2 距离多假目标欺骗干扰示意图

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、雷达三者应当近似处于同一直线上，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（该情况作者将另文论述，不在本文研究范围）。通过上面的分析，可知：在某一时刻相同的方向、俯仰方向上一般只有一个真实目标，如果在这一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：

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、 $\theta_k^i$  为俯仰角量测、 $\phi_k^i$  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。

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

上式中  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_\phi$  分别为雷达的俯仰角和方位角量测误差标准差,  $F_\alpha$  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, 将其它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, 当一个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,  $\theta_{lk}$ 、 $\phi_{lk}$  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, 但是由于两个雷达的方位、俯仰量测信息均来自同一个真实目标, 所以这两条直线间的距离必定以较高的概率落在某个特定的范围内, 即这两条直线距离很远的概率一定“不大”。

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  $\theta_1$ 、 $\phi_1$ ; 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  $\theta_i$ 、 $\phi_i$ ; 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  $\theta_j$ 、 $\phi_j$ ; 则由  $\theta_i$ 、 $\phi_i$  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  $\theta_j$ 、 $\phi_j$  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  $(x_r, y_r, z_r)$ , 雷达  $j$  的位置坐标为  $(x_r, y_r, z_r)$ , 应用解析几何知识可以构造检验统计量。

取行列式  $H$  的值如下:

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

因为  $\theta_i$ 、 $\phi_i$ 、 $\theta_j$ 、 $\phi_j$  分别服从均值为对应真值的高斯分布, 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  $\eta$ :

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

其服从自由度为 1 的  $\chi^2$  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。

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

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

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

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

直线 $l_i$ 与直线 $l_j$ 通过检验的判别准则为:

$$\rho \leq F_\alpha \quad (3)$$

$F_\alpha$ 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 $N$ 雷达构成, 利用前文第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 $Z_i$ ,  $i=1\cdots N$

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

$(\theta_k^i, \phi_k^i)$ 为集合 $Z_i$ 中第 $k$ 个划分的量测,  $\theta_k^i$ 为俯仰角量测值,  $\phi_k^i$ 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:

步骤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;

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

步骤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”;

步骤4: 若共有 $K$ 个量测序列, 则判定存在 $K$ 个真实目标, 其中的量测既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, 通过第3节建立的“量测序列”, 我们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完成了虚假目标的剔除。

不失一般性, 以三部雷达组网的情况为例, 设利用第2、3节所提出的方法将雷达1、雷达2、雷达3的量测进行关联, 设关联上的量测对分别为

$(\theta_1, \phi_1)$ 、 $(\theta_2, \phi_2)$ 、 $(\theta_3, \phi_3)$ , 三部雷达的位置坐标为 $(x_{ri}, y_{ri}, z_{ri})$ ,  $i=1, 2, 3$ , 可知这三组量测对应的直线方程为:

$$\begin{aligned} \frac{x-x_{r1}}{\cos\theta_1\cos\phi_1} &= \frac{y-y_{r1}}{\cos\theta_1\sin\phi_1} = \frac{z-z_{r1}}{\sin\theta_1} \\ \frac{x-x_{r2}}{\cos\theta_2\cos\phi_2} &= \frac{y-y_{r2}}{\cos\theta_2\sin\phi_2} = \frac{z-z_{r2}}{\sin\theta_2} \\ \frac{x-x_{r3}}{\cos\theta_3\cos\phi_3} &= \frac{y-y_{r3}}{\cos\theta_3\sin\phi_3} = \frac{z-z_{r3}}{\sin\theta_3} \end{aligned}$$

在理想状态下, 真实目标应当是上述三条直线的交点, 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:

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1\sin\phi_1 & -\cos\theta_1\cos\phi_1 & 0 \\ 0 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_1\sin\phi_1 \\ \cos\theta_2\sin\phi_2 & -\cos\theta_2\cos\phi_2 & 0 \\ 0 & \sin\theta_2 & -\cos\theta_2\sin\phi_2 \\ \cos\theta_3\sin\phi_3 & -\cos\theta_3\cos\phi_3 & 0 \\ 0 & \sin\theta_3 & -\cos\theta_3\sin\phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1\sin\phi_1x_{r1}-\cos\theta_1\cos\phi_1y_{r1} \\ \sin\theta_1y_{r1}-\cos\theta_1\sin\phi_1z_{r1} \\ \cos\theta_2\sin\phi_2x_{r2}-\cos\theta_2\cos\phi_2y_{r2} \\ \sin\theta_2y_{r2}-\cos\theta_2\sin\phi_2z_{r2} \\ \cos\theta_3\sin\phi_3x_{r3}-\cos\theta_3\cos\phi_3y_{r3} \\ \sin\theta_3y_{r3}-\cos\theta_3\sin\phi_3z_{r3} \end{bmatrix}$$

令:

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

$$b = \begin{bmatrix} \cos\theta_1\sin\phi_1x_{r1}-\cos\theta_1\cos\phi_1y_{r1} \\ \sin\theta_1y_{r1}-\cos\theta_1\sin\phi_1z_{r1} \\ \cos\theta_2\sin\phi_2x_{r2}-\cos\theta_2\cos\phi_2y_{r2} \\ \sin\theta_2y_{r2}-\cos\theta_2\sin\phi_2z_{r2} \\ \cos\theta_3\sin\phi_3x_{r3}-\cos\theta_3\cos\phi_3y_{r3} \\ \sin\theta_3y_{r3}-\cos\theta_3\sin\phi_3z_{r3} \end{bmatrix}$$

则漏检目标的补位量测为:

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

### 5 利用漏检目标的补位量测进行目标跟踪

利用(5)式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：

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

将  $P$  分块：

$$P = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\partial(A^T A)^{-1} A^T b}{\partial \theta_1} \\ &= \frac{\partial(A^T A)^{-1}}{\partial \theta_1} A^T b + (A^T A)^{-1} \frac{\partial A^T b}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial(A^T A)^{-1}}{\partial \theta_1} &= -(A^T A)^{-1} \frac{\partial(A^T A)}{\partial \theta_1} (A^T A)^{-1} \\ &= -(A^T A)^{-1} \left( \frac{\partial A^T}{\partial \theta_1} A + A^T \frac{\partial A}{\partial \theta_1} \right) (A^T A)^{-1} \\ \frac{\partial A^T b}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial A^T}{\partial \theta_1} b + A^T \frac{\partial b}{\partial \theta_1} \end{aligned}$$

得：

$$\begin{aligned} P_1 &= -(A^T A)^{-1} \left[ \left( \frac{\partial A^T}{\partial \theta_1} A + A^T \frac{\partial A}{\partial \theta_1} \right) (A^T A)^{-1} A^T b - \frac{\partial A^T}{\partial \theta_1} b - A^T \frac{\partial b}{\partial \theta_1} \right] \\ &= -(A^T A)^{-1} \left[ \left( \frac{\partial A^T}{\partial \theta_1} A + A^T \frac{\partial A}{\partial \theta_1} \right) Z_m - \frac{\partial A^T}{\partial \theta_1} b - A^T \frac{\partial b}{\partial \theta_1} \right] \end{aligned}$$

其中：

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

$$\frac{\partial b^T}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \sin \phi_1 x_{r1} + \sin \theta_1 \cos \phi_1 y_{r1} & \cos \theta_1 y_{r1} + \sin \theta_1 \sin \phi_1 z_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理可得  $P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 。

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的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：

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

其中  $P$  由式(6)确定， $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\phi_1}, \sigma_{\theta_2}, \sigma_{\phi_2}, \sigma_{\theta_3}, \sigma_{\phi_3}$  分别是三部雷达的方位角、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，即在第3节中处理的数据输出是“零”，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

### 仿真初始条件

不失一般性，设有三部雷达位置坐标分别为  $(0m, 0m, 0m)$ 、 $(5.7 \times 10^4 m, 0m, 0m)$ 、 $(1.5 \times 10^5 m, 0m, 0m)$ ，真实目标的起始位置是  $(3.6 \times 10^4 m, 1.2 \times 10^5 m, 1.5 \times 10^4 m)$ ；目标在 X、Y、Z 三个坐标轴方向的运动速度是  $(370m/s, -220m/s, -26m/s)$ ，单位是  $m/s$ ，对目标连续观测 200s；三部雷达采样周期均为  $1s$ ，测距精度均为  $100m$ ，测角精度均为  $0.1rad$ 。

### 仿真实验一

蒙特卡洛仿真次数为 200 次，在真实目标的两侧每隔  $1600m$  的距离产生一虚假距离目标，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。

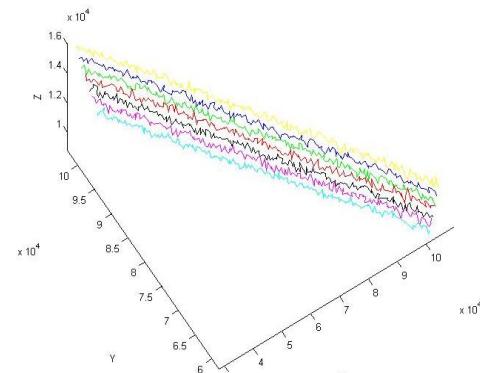


图 3 真实目标和虚假目标的轨迹

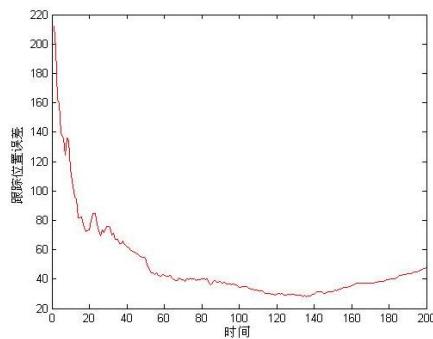


图 4 跟踪位置误差

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 50m 以内, 可见本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。

### 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。

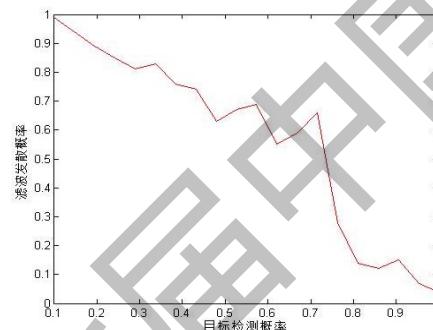


图 5 基于同源量测融合跟踪技术的滤波发散概率

### 随目标检测概率变化曲线

其它仿真条件不变, 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, 如上图所示。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。

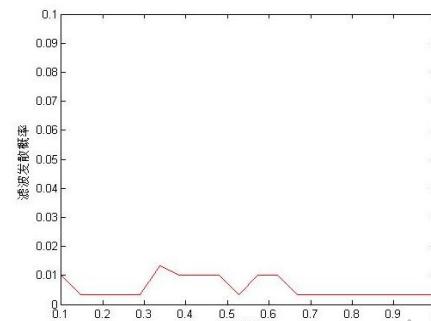


图 6 本文方法的滤波发散概率随目标检测概率变化曲线

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 到 1 之间变化时, 滤波发散的概率始终保持在 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。

### 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 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[14]提出了一种基于 Hough 变换的雷达网检测前跟踪(TBD)方法, 利用该方法对目标进行跟踪, 仿真结果如下所示:

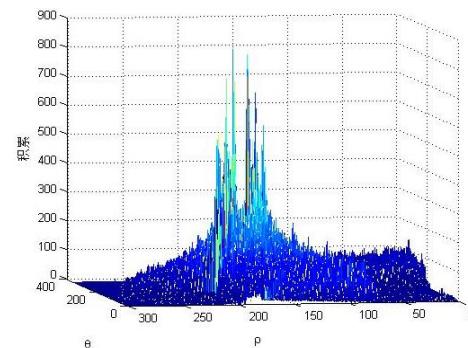
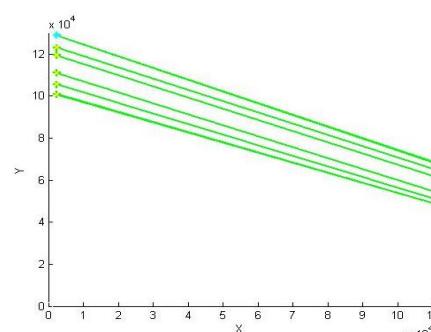


图 7 参数空间上的能量积累



### 图 8 目标航迹

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”。

通过本仿真可知：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, 32(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.
- [3] 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.
- [4] D Curtis Schleher. Electronic Warfare in the Information Age [M]. Boston, MA: Artech House, 2000 . 284-320
- [5] 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.
- [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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] L. Li, J. Sun, Yu Zhu, and Haisen Li, Dim Target Tracking Base on GM-PHD Filter[J]. Lecture Notes in Computer Science .2012. 7202(1):286-294.
- [13] W. G. WANG, Z. W.SUN,C. M. LI, Study on Dim Target Detection and Discrimination from Sea Clutter[J].China Ocean Engineering. 2013. 27(2):183-192.
- [14] S.W. Yankowich, M. Farooq, Hough transform based multisensor,multitarget,track initiantion technique[J]. Optical Engineering, 1998, 37(7):2064~2077.
- [15] Chr.Kabakchiev, Garvanov, L.Doukovska, V.Kyovtorov. TBD Netted Radar System in Presence of Multi False Alarms[C]. The 6th European Radar Conference, Rome Italy, October 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.