

引用格式:吉喆,王国宏,孙殿星,等.基于空时特性的雷达网距离多假目标鉴别[J].电光与控制,2017,24(9):17-22. JI Z, WANG G H, SUN D X, et al. Discrimination of multi-range-false-target for radar network based on space and time characteristics[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9):17-22.

基于空时特性的雷达网距离多假目标鉴别

吉喆, 王国宏, 孙殿星, 张翔宇

(海军航空大学信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

摘要:针对单时刻雷达网距离多假目标鉴别可靠性低的问题,提出了一种基于空时特性的雷达网距离多假目标鉴别方法。首先,通过雷达网目标量测预处理,将各组网雷达目标量测转换至地心直角坐标系,以实现目标量测的坐标系统一;然后,基于真-假目标量测的空间分布特性构建检验统计量,通过单时刻的关联检验实现真假目标的初步鉴别;最后,对多个时刻检验进行积累,以增强目标量测判别的可靠性。仿真结果表明,利用多个时刻检验积累与单时刻检验相比能够提高距离多假目标鉴别的可靠性。

关键词: 雷达网; 距离多假目标鉴别; 空时维特性; 单时刻检验; 多时刻检验积累

中图分类号: TN957 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.09.004

Discrimination of Multi-Range-False-Target for Radar Network Based on Space and Time Characteristics

JI Zhe, WANG Guo-hong, SUN Dian-xing, ZHANG Xiang-yu

(Institute of Information Fusion Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the low reliability for single moment discrimination of multi-range-false-target, a method based on dimensions of space and time characteristics is proposed to discriminate the multi-range-false-targets. Firstly, measurements from radar network are transformed to the earth-centered earth-fixed coordinate system by preprocessing in order to unify the coordinate system. Then, test statistics are built up based on space distribution characteristics of the true-false targets for preliminary discrimination of the true-false targets by single moment association test. Finally, the tests of multiple moments are accumulated for improving the reliability of discrimination. The simulation results verify that: Compared with the single moment test, the accumulation of multi-moment tests is able to improve the reliability of multi-range-false-target discrimination.

Key words: radar network; multi-range-false-targets discrimination; space and time characteristics; single moment test; multi-moment test accumulation

0 引言

随着现代电子战技术的快速发展,对雷达网的欺骗式干扰^[1]已成为一种重要的电子对抗手段^[2]。采用了数字射频存储器(DRFM)等先进的干扰设备能够精确捕获、复制和转发雷达信号^[3-4],以较小的投入获取

最理想的干扰效果^[5],因此针对欺骗式干扰技术及其对抗技术的研究正受到国内外专家的广泛关注^[6-7]。

距离多假目标干扰作为欺骗干扰的一种常见方式,欺骗式干扰设备通过对雷达信号的复制、调制与转发,在与真实目标方位角和俯仰角相近的方向上产生多个具有虚假距离信息的目标回波,其信号特征与真实目标相差无几,具有极强的迷惑性。针对此种干扰的对抗,文献[8]提出了一种将信噪比检验、卡方检验和N/M逻辑检验的三门限检验与最近距离法相结合的检验方法,同时结合交互式多模型概率数据互联方法实现了在距离波门拖引(Range-Gate-Pull-off, RGPO)条件下的目标跟踪,然而,该文献对于距离多假目标的

收稿日期:2016-10-28

修回日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金(61372027,61501489,61671462);“泰山学者”建设工程专项经费

作者简介:吉喆(1991—),男,山东章丘人,硕士生,研究方向为雷达抗干扰技术。

分布超前于真实目标的情形并不适用。利用雷达组网^[9]的方式,通过分析距离多假目标的空间分布特性可以实现虚假目标的有效鉴别,其中:文献[10]通过融合位置信息与速度信息,有效增强了组网雷达对虚假目标的识别能力,然而,该方法要求组网雷达必须具备测速功能,且对于两雷达组网的情况并不适用,具有一定的局限性;文献[11]中的最近邻方法是雷达网鉴别距离多假目标的较有代表性的方法,然而,该方法对真-假目标量测只是进行了单时刻的关联鉴别,当雷达测量精度下降时,可靠性难以保证。

针对以上问题,本文在长基线雷达组网背景下进行距离多假目标鉴别的过程中,在利用真-假目标的空间位置特性进行单时刻关联鉴别的基础上,通过对多个时刻的积累以进一步增强虚假目标鉴别的可靠性,最终实现距离多假目标的有效鉴别。

1 问题描述与总体思路

在雷达受到距离多假目标干扰时,经过 DRFM 等先进转发式干扰设备的有效调制,所产生的虚假目标信号特征和运动状态与真实目标极为相似,具有极强的迷惑性。本文以在信号处理层面的抗干扰不够理想,在雷达数据处理层面依然存在虚假目标干扰为研究前提,利用雷达网数据融合的优势,通过分析距离多假目标干扰下真-假目标的空间分布特性实现虚假目标的有效鉴别。

如图1所示,在不考虑随机误差的情况下,雷达、真实目标、虚假目标应当近似处于同一直线上,由于真实目标在对雷达网进行欺骗干扰的过程中并不具备协同性^[12],因此不同组网雷达所探测到的虚假目标分布相对“分散”,而真实目标分布相对“集中”,基于此构建真-假目标空间位置的检验量,利用假设检验的方法进行虚假目标的初步鉴别,在此基础上,通过多个时刻检验的积累,以有效提高雷达网鉴别虚假目标的可靠性。问题的总体思路如图2所示。

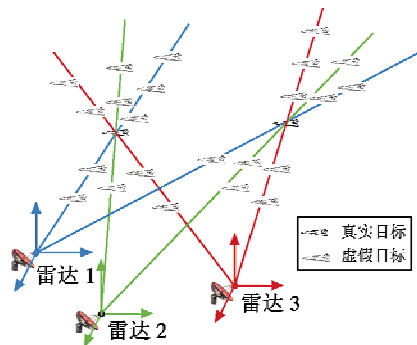


图1 距离多假目标干扰示意图

Fig.1 Diagram of multi-range-false-target jamming

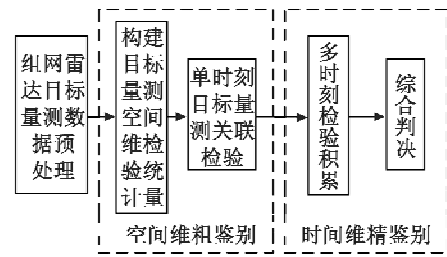


图2 总体思路框图

Fig.2 Diagram of general thought

2 组网雷达目标量测预处理

由于雷达网在进行虚假目标鉴别的过程中,目标量测所在的各组网雷达极坐标系没有统一,因此需要将各组网雷达量测转换至统一的坐标系中。在本文长基线雷达组网背景下,为消除地球曲率影响,引入地心直角(ECEF)坐标系^[13]作为真-假目标鉴别的统一坐标系,将目标量测由各组网雷达的局部坐标系转换至ECEF坐标系中。

首先将各组网雷达极坐标系下的量测通过无偏转换^[14]至雷达东北天(ENU)坐标系中^[15]

$$\begin{cases} x_i(k) = \lambda_{\theta_i}^{-1} \lambda_{\varepsilon_i}^{-1} \rho_i(k) \sin(\theta_i(k)) \cos(\varepsilon_i(k)) \\ y_i(k) = \lambda_{\theta_i}^{-1} \lambda_{\varepsilon_i}^{-1} \rho_i(k) \cos(\theta_i(k)) \cos(\varepsilon_i(k)) \\ z_i(k) = \lambda_{\theta_i}^{-1} \rho_i(k) \sin(\varepsilon_i(k)) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho_i(k)$, $\theta_i(k)$, $\varepsilon_i(k)$ 分别为目标在雷达*i*的距离、方位角和俯仰角量测; $\lambda_{\theta_i} = e^{-\sigma_{\theta_i}^2/2}$, $\lambda_{\varepsilon_i} = e^{-\sigma_{\varepsilon_i}^2/2}$ 和 $\sigma_{\theta_i}^2$ 分别为雷达*i*的方位角和俯仰角量测误差协方差。

然后将ENU坐标系中的量测转换至ECEF坐标系中

$$X_{i,ECEF}(k) = P_{g,i} X_i(k) + X_{i,R,ECEF} \quad (2)$$

式中, $X_{i,R,ECEF}$ 为雷达*i*在ECEF坐标系中的坐标,即

$$X_{i,R,ECEF} = \begin{bmatrix} (N_R + H_i) \cos L_i \cos B_i \\ (N_R + H_i) \cos L_i \sin B_i \\ [N_R(1 - e_1^2) + H_i] \sin L_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

L_i, B_i, H_i 分别为雷达*i*的经度、纬度和高度, $N_R = a / \sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 B_i}$, $e_1^2 = (a^2 - b^2) / a^2$,为第一偏心率,在ECEF坐标系中, $a = 6378137$ m, $b = 6356752$ m。

雷达*i*的旋转矩阵 $P_{g,i}$ 为

$$P_{g,i} = \begin{bmatrix} -\sin B_i & -\sin L_i \cos B_i & \cos L_i \cos B_i \\ \cos B_i & -\sin L_i \sin B_i & \cos L_i \sin B_i \\ 0 & \cos L_i & \sin L_i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

3 基于空时特性检验的虚假目标鉴别

3.1 基于空间维特性的粗鉴别

经过目标量测坐标系统一后,将进行真-假目标的

关联检验。根据前文的分析,考虑真-假目标的空间分布特性可知,当来自组网雷达的目标量测能够实现成功关联时,可认为目标量测来源于同一真实目标;当来自组网雷达的目标量测未能成功关联时,目标量测来源于不同的目标。

不失一般性,以两雷达组网为例进行分析,对于多部雷达的情况,可以采用两两组合的方式进行组网。基于上文的分析,构建某时刻雷达网目标量测检验统计量为

$$\eta(k) = \mathbf{V}_{\text{ECEFF}}^T(k) (\mathbf{R}_{1,\text{ECEFF}}(k) + \mathbf{R}_{2,\text{ECEFF}}(k))^{-1} \mathbf{V}_{\text{ECEFF}}(k) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{V}_{\text{ECEFF}}(k) = \mathbf{X}_{1,\text{ECEFF}}(k) - \mathbf{X}_{2,\text{ECEFF}}(k)$, $\mathbf{X}_{1,\text{ECEFF}}(k)$ 和 $\mathbf{X}_{2,\text{ECEFF}}(k)$ 分别为转换至 ECEF 坐标系下的目标量测; $\mathbf{R}_{1,\text{ECEFF}}(k)$ 和 $\mathbf{R}_{2,\text{ECEFF}}(k)$ 分别为目标量测对应的协方差,有^[15]

$$\mathbf{R}_{i,\text{ECEFF}}(k) = \mathbf{P}_{g,i} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{g,i}^T \quad (6)$$

$$r_{11} = [(\lambda_{\theta_i} \lambda_{\varepsilon_i})^{-2} - 2] \rho_i^2 \cos^2 \theta_i \cos^2 \varepsilon_i + \frac{1}{4} (\rho_i^2 + \sigma_{\rho_i}^2) (1 + \lambda'_{\theta_i} \cos 2\theta_i) (1 + \lambda'_{\varepsilon_i} \cos 2\varepsilon_i) \quad (7)$$

$$r_{22} = [(\lambda_{\theta_i} \lambda_{\varepsilon_i})^{-2} - 2] \rho_i^2 \sin^2 \theta_i \cos^2 \varepsilon_i + \frac{1}{4} (\rho_i^2 + \sigma_{\rho_i}^2) (1 - \lambda'_{\theta_i} \cos 2\theta_i) (1 + \lambda'_{\varepsilon_i} \cos 2\varepsilon_i) \quad (8)$$

$$r_{33} = (\lambda_{\varepsilon_i}^{-2} - 2) \rho_i^2 \sin^2 \varepsilon_i + \frac{1}{2} (\rho_i^2 + \sigma_{\rho_i}^2) \cdot (1 - \lambda'_{\varepsilon_i} \cos 2\varepsilon_i) \quad (9)$$

$$r_{12} = [(\lambda_{\theta_i} \lambda_{\varepsilon_i})^{-2} - 2] \rho_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i \cos^2 \varepsilon_i + \frac{1}{4} (\rho_i^2 + \sigma_{\rho_i}^2) \lambda'_{\theta_i} \sin 2\theta_i (1 + \lambda'_{\varepsilon_i} \cos 2\varepsilon_i) \quad (10)$$

$$r_{13} = (\lambda_{\theta_i}^{-1} \lambda_{\varepsilon_i}^{-2} - \lambda_{\theta_i}^{-1} - \lambda_{\varepsilon_i}) \rho_i^2 \cos \theta_i \sin \varepsilon_i \cos \varepsilon_i + \frac{1}{2} (\rho_i^2 + \sigma_{\rho_i}^2) \lambda_{\theta_i} \lambda'_{\varepsilon_i} \cos \theta_i \sin 2\varepsilon_i \quad (11)$$

$$r_{23} = (\lambda_{\theta_i}^{-1} \lambda_{\varepsilon_i}^{-2} - \lambda_{\theta_i}^{-1} - \lambda_{\varepsilon_i}) \rho_i^2 \sin \theta_i \sin \varepsilon_i \cos \varepsilon_i + \frac{1}{2} (\rho_i^2 + \sigma_{\rho_i}^2) \lambda_{\theta_i} \lambda'_{\varepsilon_i} \sin \theta_i \sin 2\varepsilon_i \quad (12)$$

$$\lambda'_{\theta_i} = e^{-2\sigma_{\theta_i}^2} = \lambda_{\theta}^4 \quad (13)$$

$$\lambda'_{\varepsilon_i} = e^{-2\sigma_{\varepsilon_i}^2} = \lambda_{\varepsilon}^4 \quad (14)$$

则距离多假目标鉴别问题可以采用如下判别准则。 $H_0: \eta(k) \leq \lambda$, 目标量测来自同一真实目标; $H_1: \eta(k) > \lambda$, 目标量测来自不同的目标。其中, $\lambda = \chi_{\alpha}^2(n)$ 为判决门限, α 为其显著性水平, $n=3$ 为自由度。

3.2 基于时间维特性积累的精确鉴别

经过单时刻的关联检验可以实现真-假目标的初步鉴别,然而,当雷达网量测误差增加或真-假目标间隔较近时,单时刻的关联检验可能造成组网雷达真实

目标量测无法成功关联的情况,从而导致错误鉴别,此时单时刻的关联检验可靠性较低,通过对积累多个时刻的关联检验可以提高判别的可靠性。基于时间维特性积累的流程如图3所示。

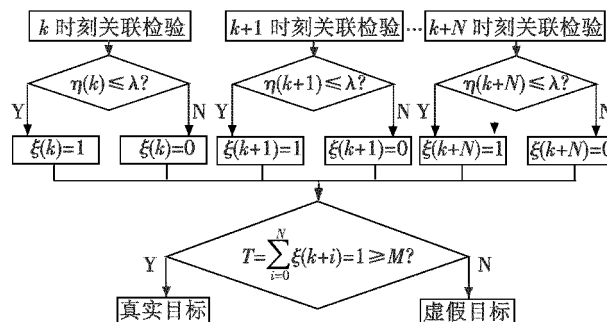


图3 基于时间特性的多时刻检验积累

Fig. 3 Multi-moment test accumulation

based on time characteristic

根据前文的分析, k 时刻目标量测的检验统计量和门限分别为 $\eta(k)$ 和 λ , 建立统计量 $\xi(k)$, 则 $k+i$ 时刻的统计量可作如下赋值

$$\xi(k+i) = \begin{cases} 1 & \eta(k+i) \leq \lambda \\ 0 & \eta(k+i) > \lambda \end{cases} \quad (15)$$

将多个时刻的统计量 $\xi(k+i)$ 进行求和, 有

$$T = \sum_{i=0}^N \xi(k+i) \quad (16)$$

选取恰当的门限值 M , 则通过多时刻检验积累的虚假目标鉴别问题可以建立如下判决。 H_0 : 若 $T \geq M$, 则判决距离多假目标干扰下所检验的目标为真实目标; H_1 : 若 $T < M$, 则判决距离多假目标干扰下所检验的目标为虚假目标。

4 仿真与分析

4.1 仿真环境

假设雷达1的地理坐标为经度 26.5° , 纬度 29.5° , 高度 300 m ; 雷达2的地理坐标为经度 27.5° , 纬度 30° , 高度 300 m 。雷达1与雷达2的测距精度均为 100 m , 测方位角、俯仰角精度均为 0.1° , 采样周期均为 1 s , 对目标跟踪采样时间为 200 s , 检验的显著性水平为 0.05 。真实目标起始位置地理坐标为经度 26.5° , 纬度 30° , 高度为 8000 m , 相对于雷达1的 E, N, U 这3个方向上的速度分别为 250 m/s , 275 m/s , 4 m/s 。真实目标携带干扰机, 能够对雷达网实施有效的距离多假目标欺骗干扰, 为便于分析, 不失一般性, 本文选取离真实目标最近的一个虚假目标, 利用本文所提方法进行真-假目标的关联鉴别, 其中, 将雷达1探测到的真实目标设为真实目标1, 虚假目标设为虚假目标1, 雷达2探测到的真实目标设为真实目标2, 虚假目标设为虚

假目标2。蒙特卡罗仿真次数为300。

4.2 仿真结果

4.2.1 不同测距精度下目标量测关联情况比较

其他仿真条件不变,改变组网雷达测距精度,使其从80 m均匀增大到340 m,多时刻积累的起始时刻取第50时刻,分别取3个与5个时刻,利用2/3,4/5逻辑进行多时刻的积累,得到真-假目标间隔分别为800 m和1000 m两种情况下,单时刻与多时刻检验积累的目标量测关联概率随雷达测距精度的变化情况,见图4、图5。

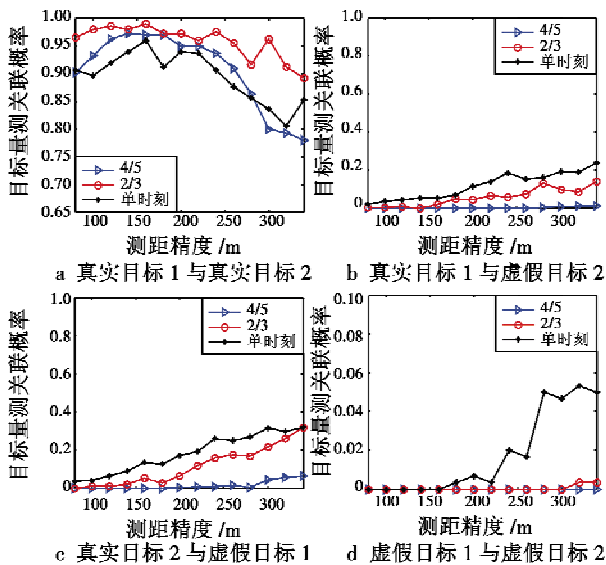


图4 真-假目标间隔800 m时目标量测关联概率随雷达测距精度变化情况

Fig. 4 Radar range accuracy vs target association probability with deception distance of 800 m

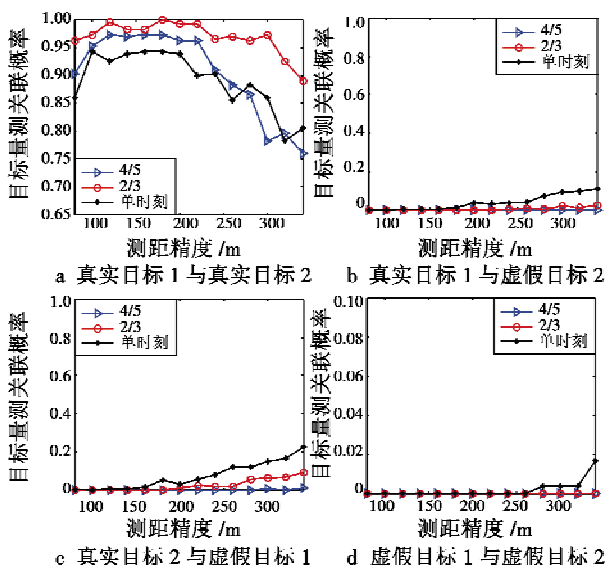


图5 真-假目标间隔1000 m时目标量测关联概率随雷达测距精度变化情况

Fig. 5 Radar range accuracy vs target association probability with deception distance of 1000 m

通过图4和图5中各目标关联情况可得:

1) 在测距精度相同时,不同的多时刻检验积累与单时刻检验的真实目标1与真实目标2的关联概率均高于其他3种属性目标之间的关联概率;随着测距精度的逐渐下降,真实目标与真实目标之间的关联概率逐渐降低,其他3种属性目标之间的关联概率逐渐增加;

2) 多时刻检验积累的真实目标之间的关联概率高于单时刻检验情况,而多时刻检验积累的其他3种属性目标之间的关联概率低于单时刻检验情况;

3) 真-假目标间隔距离较大时(1000 m),其他3种属性目标之间的关联概率低于真-假目标间隔距离较小(800 m)的情况,而真实目标之间的关联概率不随真-假目标间隔距离的变化而明显变化。

4.2.2 不同测角精度下目标量测关联情况比较

其他仿真条件不变,改变组网雷达测角精度,使其从0.05°均匀增大到0.3°,多时刻积累的起始时刻取第50时刻,分别取3和5个时刻,利用2/3,4/5逻辑进行多时刻的积累,得到真-假目标间隔分别为800 m和1000 m两种情况下,单时刻与多时刻检验积累的目标量测关联概率随雷达测角精度的变化情况,见图6、图7。

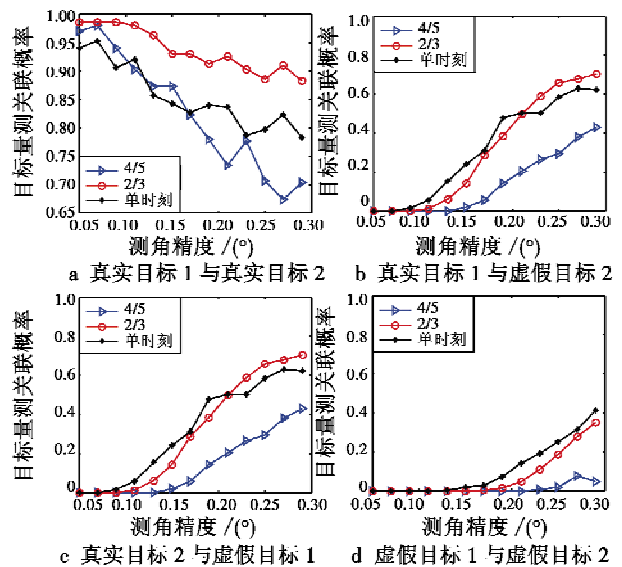


图6 真-假目标间隔800 m时目标量测关联概率随雷达测角精度变化情况

Fig. 6 Radar angle accuracy vs target association probability with deception distance of 800 m

由图6和图7中各目标关联情况可得:

1) 在测角精度相同时,不同的多时刻检验积累与单时刻检验的真实目标1与真实目标2的关联概率均高于其他3种属性目标之间的关联概率;随着测角精度的逐渐下降,真实目标与真实目标之间的关联概率逐渐降低,其他3种属性目标之间的关联概率逐渐增加;

2) 对于图6和图7a,2/3逻辑方法的真实目标之

间的关联概率始终高于单时刻检验方法,当测角精度较低时,4/5逻辑方法的真实目标关联概率低于单时刻检验;对于图6和图7b、图6和图7c,4/5逻辑方法的真-假目标量测关联概率始终低于单时刻方法,当测角精度较低时,2/3逻辑方法的真-假目标量测关联概率高于单时刻检验方法;

3) 真-假目标间隔距离较大时(1000 m),其他3种属性目标之间的关联概率低于真-假目标间隔距离较小(800 m)的情况,而真实目标之间的关联概率不随真-假目标间隔距离的变化而明显变化。

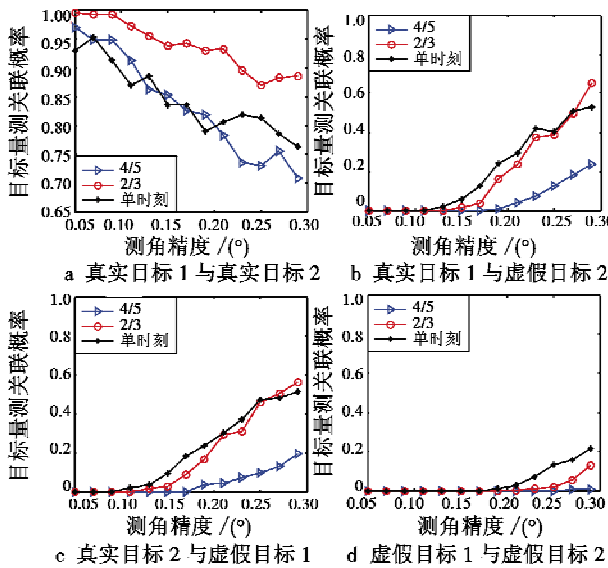


图7 真-假目标间隔1000 m时目标量测关联概率随雷达测角精度变化情况

Fig. 7 Radar angle accuracy vs target association probability with deception distance of 1000 m

4.3 仿真结果综合分析

4.3.1 仿真结论

综合图4~图7的仿真结果可得:

1) 通过目标量测关联概率随雷达不同参数测量精度变化情况可以看出,雷达测角精度对目标量测关联概率的影响大于雷达测距精度,随着测角精度的逐渐下降,目标量测关联概率的变化趋势较测距精度下降时变化更加明显;

2) 真-假目标间隔距离对于真实目标1与真实目标2量测之间的关联概率无明显影响,如图4~图7a;对于其他3种属性目标,当真-假目标间隔较近(800 m)时,目标量测之间的关联概率高于真-假目标间隔较远(1000 m)的情况;

3) 多时刻检验积累的不同目标量测关联概率之间差异较大,与单时刻检验相比所具有的优势不同。

4.3.2 不同参数测量精度对关联概率影响分析

1) 在对来自各组网雷达的量测进行关联检验时,

对于同一个真实目标,其量测关联概率由卡方检验中的显著性水平与组网雷达不同参数测量精度决定。在相同显著性水平下,真实目标量测误差随雷达不同参数测量精度的降低而变大,使得在试验中的统计量值高于门限值,造成关联概率下降;而显著性水平决定了判决门限的大小,同样对关联概率产生影响;真-假目标不同间隔影响的是真实目标量测与虚假目标量测之间的关联概率,当间隔较大时,真-假目标量测、假-假目标量测之间发生关联的概率较低,当间隔较小时,真-假目标量测、假-假目标量测之间发生关联的概率增大,而真实目标的空间位置不会因间隔距离的变化而变化,因此,真-假目标的间隔距离对相同的真实目标量测之间的关联检验并无影响。

2) 当雷达不同参数测量精度降低时,各组网雷达对于真-假目标的量测误差增大,造成组网雷达之间的真实目标量测与虚假目标量测、虚假目标量测与虚假目标量测出现关联的情况,而这种情况出现的概率将随着测量精度的降低而增加。

4.3.3 真-假目标间隔距离对关联概率影响分析

当真-假目标间隔距离较小(800 m)时,来自一部组网雷达的真实目标量测或虚假目标量测与来自另一部组网雷达的虚假目标量测之间的距离相对减小,会出现真-假目标量测、假-假目标量测之间相互关联的情况,因此,相比于真假目标间隔距离较大(1000 m)的情况,间隔距离较小时出现上述关联情况的概率有所增加,使得单时刻距离多假目标鉴别的可靠性降低。

4.3.4 多时刻检验积累方法性能分析

在进行距离多假目标鉴别的过程中,需要考虑同一个真实目标量测之间关联成功的概率,同时也要考虑来自不同目标之间,如真实目标与虚假目标、虚假目标与虚假目标之间相互关联的概率,而所期望达到的效果是真实目标量测之间的高关联概率与其他属性目标量测的低关联概率,基于此,对本文所给出的3种检验方法(积累3个时刻与5个时刻以及单时刻)的性能进行分析,以单时刻检验为比较标准,则:

1) 对于积累3个时刻的2/3逻辑方法,在相同的雷达测距精度下,其来自同一个真实目标之间的关联概率高于其他2种方法,但随着测角精度的逐渐下降,会出现该方法真实目标与虚假目标之间的关联概率高于单时刻检验方法;

2) 对于积累5个时刻的4/5逻辑方法,其他3种属性目标之间的关联概率均低于单时刻方法,但当雷达不同参数测量精度较低(测距精度低于250 m、测角精度低于 0.15°)时,对于来自同一个真实目标之间的关联概率低于单时刻检验方法。

在进行鉴别方法选取的过程中,需要考虑选取真实目标之间关联概率高而其他非真实目标之间关联概率低的逻辑方法,结合本文仿真环境,对于本文所给出的 2 种多时刻检验积累方法中,4/5 逻辑方法与 2/3 逻辑方法相比,对于满足的检验条件更为严格,因此会造成真实目标之间关联概率随雷达测量精度降低而降低的情况,但对于其他 3 种不同属性目标的关联概率,判别条件更为严格的 4/5 逻辑方法远低于 2/3 逻辑方法。

因此,综合上述分析可得,当雷达测量精度较高时,可以采用 2/3 逻辑进行虚假目标的鉴别,当雷达测量精度较低时,可以切换至 4/5 逻辑进行虚假目标的鉴别,上述 2 种情况下,多时刻检验积累方法的鉴别可靠性均优于单时刻检验方法。

5 结束语

本文从对雷达网的距离多假目标干扰的特点出发,利用组网雷达信息融合的优势,提出一种基于空时特性的雷达网距离多假目标鉴别方法,在分析真-假目标空间分布特性进行单时刻检验的基础上,利用多时刻检验积累的方式实现虚假目标的进一步鉴别。仿真结果表明,通过多时刻检验积累的方法比单时刻检验方法可靠性高,能够实现距离多假目标的有效鉴别。

参考文献

- [1] SHI X R, ZHOU F, ZHAO B, et al. Deception jamming method based on micro-Doppler effect for vehicle target [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2016, 10(6): 1071-1079.
- [2] ZHAO S S, LIU N, ZHANG L R, et al. Discrimination of deception targets in multistatic radar based on clustering analysis [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2500-2508.
- [3] OLIVIER K, CILLIERS J E, DU PLESSIS M. Design and performance of wideband DRFM for radar test and evaluation [J]. Electronics Letters, 2011, 47(14): 824-825.
- [4] ALMSLMANY A, WANG C Y, CAO Q S. Advanced deceptive jamming model based on DRFM Sub-Nyquist sampling [C]//Proceedings of 13th International Bhurban Conference on Applied Science and Technology (IBCAST), 2016: 727-730.
- [5] XIONG W, ZHANG G, WEN F Q, et al. Trilinear decomposition-based spatial-polarisation filter method for deception jamming suppression of radar [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(4): 765-773.
- [6] MOURI M, MIVECHCHY M, AGHDAM S A. Adaptive time-frequency kernel local Fisher discriminant analysis to distinguish range deception jamming [C]//The 6th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2015: 1-5.
- [7] ZHAO S S, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Signal fusion-based algorithms to discriminate between radar targets and deception jamming in distributed multi-radar architectures [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6697-6706.
- [8] XU H Q, WANG G H, BAI J. A modified anti-RGPO jamming algorithm [C]//IEEE 11th International Conference on Signal Processing, 2010: 2555-2559.
- [9] LE H S T, LIANG Q L. Joint multi-target identification and classification in cognitive radar sensor networks [J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2011, 18(2): 100-107.
- [10] 赵珊珊, 张林让, 周宇, 等. 组网雷达点迹信息融合抗假目标干扰方法 [J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(2): 207-211.
- [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): 454-458.
- [12] 张林让, 赵珊珊, 周宇, 等. 网络化雷达协同抗欺骗式干扰技术研究进展 [J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 516-525.
- [13] DONG Y L, HE Y, WANG G H. A generalized least squares registration algorithm with earth-centered earth-fixed (ECEF) coordinate system [C]//The 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications, 2004: 79-84.
- [14] BORDONARO S, WILLETT P, BAR-SHALOM Y. Decorrelated unbiased converted measurement Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 1431-1444.
- [15] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.