doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2022.05.003

多干扰源下多站雷达抗欺骗式干扰方法

赵珊珊[1],易民举[1],刘子威[2],杨 彪[1]

(1.南京邮电大学 电子与光学工程学院,江苏 南京 210023
2.南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:通过将多部干扰机链接组网,欺骗式干扰可大幅提高其干扰能力,对雷达性能构成了致命威胁。然而,现有的多站雷达抗欺骗式干扰方法大多仅适用于单一干扰源的情况。针对此问题,提出一种多干扰源场景下利用目标接收信号矢量之间的相关性进行真假目标鉴别的方法。由于同一个干扰机产生的假目标是高度相关的,而雷达真实目标之间、真实目标与假目标之间,以及不同干扰机产生的假目标之间均是不相关的,利用这一差异可设计目标鉴别算法对多干扰源产生的欺骗式假目标进行有效鉴别。提出算法的优势在于可用于鉴别任意调制方式产生的假目标,且不需要任何先验信息。仿真结果验证了该鉴别方法的可行性,并分析了雷达目标空间相关性、干噪比(JNR)和门限对其性能的影响。

关键词:多站雷达系统;欺骗式干扰;多干扰源组网;相关系数;假目标鉴别

中图分类号:TN973 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-5439(2022)05-0015-06

Deception ECCM for multiple jammer sources in distributed multiple-radar systems

ZHAO Shanshan[1], YI Minju[1], LIU Ziwei[2], YANG Biao[1]

(1.College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China
2.School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Deception jamming poses a fatal threat to the radar performance, and its jamming performance has been greatly improved through networking. However, available deception electronic counter-countermeasure (ECCM) methods can only work in the scenario of single jamming source. To solve the problem, this paper proposes a deception jamming discrimination method applicable to multiple jammer sources. It is based on the correlation coefficient between different received signal vectors. The false targets generated by one jammer are highly correlated, while the radar target is uncorrelated with either other targets or false targets. According to this difference, the target discrimination method can be designed to discriminate the false targets generated by multiple jammers. More importantly, compared with existing methods, no prior information is required, and the proposed method can be used to discriminate false targets generated by the arbitrary modulation mode. Simulation results demonstrate the feasibility of the proposed discrimination method. The simulation also investigates the influences of spatial correlation of radar targets, the jamming-to-noise ratio (JNR), and thresholds on the performance of the proposed method.

Keywords: distributed multiple-radar system; deception jamming; network jammer; correlation coefficient; false target discrimination

收稿日期:2022-07-12;**修回日期**:2022-08-26 **本刊网址**:http://nyzr.njupt.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(61801233,61801445)、江苏省自然科学基金(BK20170911)、航空科学基金(202000200X9002)和江苏省"六大人才高峰"第十六批高层次人才选拔培养(DZXX-025)资助项目

作者简介:赵珊珊,女,博士,讲师,zhaoshanshan025@njupt.edu.cn

引用本文:赵珊珊,易民举,刘子威,等.多干扰源下多站雷达抗欺骗式干扰方法[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2022,42(5):15-20.

有源欺骗式干扰是雷达面临的一种重要干扰样式,由于可利用雷达匹配滤波增益,具有较高的能量利用率[1-2]。随着数字射频存储器(DRFM)技术的发展,欺骗干扰机可以通过存储并延时转发产生大量有源假目标,以混淆或饱和目标检测和跟踪算法。在复杂作战环境下,多部欺骗式干扰机可以通过链接组网,大大提高其欺骗干扰能力,给雷达电子对抗(ECCM)带来巨大的挑战。

分布式多站雷达系统因其特殊的广泛分布的发射和接收站[3],在抗干扰方面具有天然的优势,因此,多站雷达协同抗干扰算法得到了广泛的研究[4-7]。最早的多站雷达抗欺骗式干扰算法主要是基于数据级融合算法,利用真假目标在统一直角坐标系下的空间分布差异对有源假目标进行有效鉴别[8-10]。随着同步技术和站间数据通信能力的提高,信号级融合抗干扰算法成为主要发展趋势,其利用真假目标空间散射特性的差异进行有源假目标鉴别[11-12]。相较于数据级融合的抗干扰算法,参与融合的信息量更丰富,可取得更好的抗欺骗式干扰性能。

在各接收站分别进行目标检测的场景下,通过对来自不同接收站的目标回波进行相关性检验,文献[13-14]提出了信号级协同鉴别有源假目标鉴别方法。但是,这些方法需要利用多个脉冲重复周期(PRT)的回波数据,只适用于在快起伏目标中对假目标进行鉴别。因此,文献[15]进一步提出单脉冲回波数据下聚类分析鉴别有源假目标方法。在各雷达站因信噪比过低无法独立地完成目标检测的情况下,多站雷达将采用协同目标检测算法提高目标检测概率。在协同目标检测场景下,提出了一种分步完成检测/鉴别的抗欺骗式干扰方法[16],首先进行目标的非相干积累检测,对检测到的目标再通过广义似然比检验(GLRT)实现目标的真假鉴别。该算法中所用到干扰子空间需要进行在线实时估计,将带来巨大的运算负担,且其估计精度将直接影响目标鉴别性能。但是,现有的信号级协同抗欺骗式干扰方法均只适用于单干扰源实施干扰的场景。

为扩展多站雷达协同抗欺骗式干扰方法的应用范围,提出了一种多干扰源场景下的信号级协同抗欺骗式干扰算法。该方法根据不同目标的接收信号矢量之间的相关性对欺骗式干扰产生的有源假目标进行有效鉴别,不需要任何先验信息,可适用于任意调制方式产生的有源假目标鉴别。最后,数值仿真分析验证了提出算法的鉴别性能。

1 信号模型

分布式多站雷达系统由 M 个发射站和 N 个接收站组成,如图 1 所示。为保护探测区域的雷达目标,多个独立的随队或自卫干扰机协同实施欺骗式干扰。

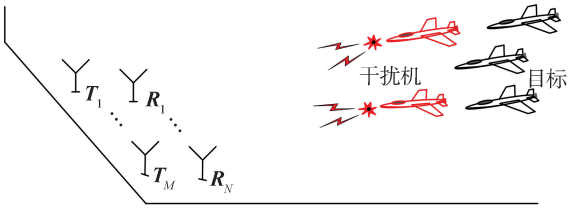


图 1 多个独立干扰源场景下的分布式多站雷达系统

设多站雷达系统已完成时间和相位同步。各发射站发射信号相互正交,各接收站接收信号首先经过一组匹配滤波器,将不同发射信号产生的回波信号进行分离,得到 MN 个发射站-接收站通道(不同的发射站和接收站对)的单脉冲回波信号,然后对通道回波信号在各离散距离单元进行采样。这样,对每个空间分辨单元,均可以从 MN 个发射站-接收站通道获得单脉冲回波样本,构成该分辨单元的目标接收信号矢量,用维数为 $MN\times 1$ 的接收信号矢量 $\boldsymbol{x}$ 表示。对每一个空间分辨单元,可以利用非相关积累检测完成目标联合检测,检测到的目标可以是真实目标,也可能是欺骗式干扰产生的有源假目标。

若该空间分辨单元中存在一个真实目标,其接收信号矢量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{PT}}$ 可以写成

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}_{\mathrm{PT}}=&[\alpha_{11}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1T1}/\lambda),\\&\alpha_{12}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1T2}/\lambda),\cdots,\\&\alpha_{mn}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{mTn}/\lambda),\cdots,\\&\alpha_{MN}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{MTN}/\lambda)]^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{n}=\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}+\boldsymbol{n}\end{aligned}\tag{1}$$

式中,$(\cdot)^{\mathrm{T}}$ 表示矩阵转置,$\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}$ 表示真实目标不含噪的理想接收信号矢量,$\boldsymbol{n}$ 表示噪声矢量,$\boldsymbol{n}\sim\mathrm{CN}(0,\sigma_n^2\boldsymbol{I}_{MN})$,$\boldsymbol{I}_{MN}$ 为 $MN\times MN$ 的单位矩阵,$\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{mTn}/\lambda)$ 为载波频率剩余,λ 为系统波长,距离和为 $R_{mTn}=R_{mT}+R_{Tn}$,R_{mT} 和 R_{Tn} 分别表示从第 m 个发射站到目标的距离和从目标到第 n 个接收站的距离。

根据雷达方程,第 mn 个通道中的目标信号幅度 α_{mn} 为

$$\alpha_{mn}=\lambda\sigma_{mn}\sqrt{P_{Tm}G_{Tm}G_{Rn}}/(4\pi\sqrt{4\pi}R_{mT}R_{Tn})\tag{2}$$

式中,P_{Tm} 为第 m 个发射站的发射功率,G_{Tm} 和 G_{Rn} 分别为第 m 个发射站和第 n 个接收站的天线增益,

σ_{mn} 为目标雷达截面积(RCS),服从复高斯分布的随机变量,即 $\sigma_{mn} \sim \mathrm{CN}(0,\zeta_{mn}^2)$。

若该空间分辨单元对应一个有源假目标,其接收信号向量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{FT}}$ 为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}_{\mathrm{FT}} = [&\beta_{11}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1J1}/\lambda),\\ &\beta_{12}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1J2}/\lambda),\cdots,\\ &\beta_{mn}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{mJn}/\lambda),\cdots,\\ &\beta_{MN}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{MJN}/\lambda)]^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{n} = \boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}} + \boldsymbol{n}\end{aligned} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}}$ 表示有源假目标不含噪的理想接收信号矢量,R_{mJn} 为沿发射站 m 到干扰机再到接收站 n 这条路径的距离和。

第 mn 个通道中的欺骗信号幅度 β_{mn} 为

$$\beta_{mn} = \upsilon\sqrt{P_J G_{Rn}}\lambda/(4\pi R_{Jn}) \tag{4}$$

式中,υ 表示未知分布的可能振幅波动,P_J 为干扰机的干扰功率,R_{Jn} 为干扰机到第 n 个接收站的距离。

2　目标相关性分析

真实目标具有各向异性,在各发射-接收通道中的回波信号是去相关的;而同一干扰机产生有源假目标具有各向同性,在各通道中的接收信号是高度相关的。因此,两个不同接收信号矢量之间的相关性是鉴别有源假目标的关键,这里用相关系数对目标相关性进行定量分析。具体可以分成以下 3 种情况。

2.1　情况一:两个真实目标之间的相关系数

由于雷达截面积 σ_{mn} 的随机起伏,雷达目标的理想接收信号向量 $\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}$ 是服从复高斯分布的随机向量。通过计算其协方差矩阵来分析其相关系数,有

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}_1 = E[\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}^{\mathrm{H}}] = \mathrm{diag}(\boldsymbol{a})\mathrm{diag}(\boldsymbol{\Theta})\,\boldsymbol{R}_c \cdot\\ \mathrm{diag}(\boldsymbol{\Theta})\mathrm{diag}(\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}})\end{aligned} \tag{5}$$

式中,$(\cdot)^{\mathrm{H}}$ 表示共轭转置,$\boldsymbol{a}$ 和 $\boldsymbol{\Theta}$ 都为 $MN\times 1$ 的矢量,是目标位置和信号幅度的函数,表达式分别为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a} = [&\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1T1}/\lambda),\\ &\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1T2}/\lambda),\cdots,\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{MTN}/\lambda)]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{\Theta} = [\sqrt{E[\alpha_{11}^2]},\sqrt{E[\alpha_{12}^2]},\cdots,\sqrt{E[\alpha_{MN}^2]}]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\sqrt{E[\alpha_{mn}^2]} = \lambda\zeta_{mn}\sqrt{P_{Tm}G_{Tm}G_{Rn}}/(4\pi\sqrt{4\pi}R_{mT}R_{Tn}) \tag{8}$$

$$[\boldsymbol{R}_c]_{ij} = \rho_{ij}\quad i = 1,2,\cdots,MN, j = 1,2,\cdots,MN \tag{9}$$

在维度为 $MN\times MN$ 的相关矩阵 $\boldsymbol{R}_c$ 中,ρ_{ij} 为第 i 和第 j 个通道之间的目标雷达截面积的相关系数,是雷达波长、目标尺寸、照度和探测角度的函数[12]。

在分布式多站雷达系统中,相关矩阵 $\boldsymbol{R}_c$ 和协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_1$ 通常是一个满秩矩阵。特别是在各通道独立的最理想情况下,$\boldsymbol{R}_c = \boldsymbol{I}_{MN}$,$\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}$ 在整个 MN 维空间中随机分布,不同雷达目标之间的相关系数近似为零。对应最差的情况是各通道完全相关,$\boldsymbol{R}_c = \boldsymbol{I}_{MN}$,协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_1$ 不再是满秩矩阵,但由于各目标的空间位置不同,$\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}$ 也并不是相关的,不同真实目标接收信号矢量的相关系数仍然较小。

2.2　情况二:两个有源假目标之间的相关系数

根据式(3)和(4),有源假目标的理想接收信号向量 $\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}}$ 可以写成

$$\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}} = \frac{\upsilon\lambda\sqrt{P_J}}{4\pi}\cdot\boldsymbol{\zeta}_J \tag{10}$$

其中,倍数 $\upsilon\lambda\sqrt{P_J}/4\pi$ 并不影响其相关性,干扰信号向量 $\boldsymbol{\zeta}_J$ 定义为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\zeta}_J = \Bigg[&\frac{\sqrt{G_{R1}}}{R_{J1}}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1J1}/\lambda),\\ &\frac{\sqrt{G_{R2}}}{R_{J2}}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{1J2}/\lambda),\cdots,\\ &\frac{\sqrt{G_{Rn}}}{R_{Jn}}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{mJn}/\lambda),\cdots,\\ &\frac{\sqrt{G_{RN}}}{R_{JN}}\exp(-\mathrm{j}2\pi R_{MJN}/\lambda)\Bigg]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{11}$$

显然,对于一个干扰机,$\boldsymbol{\zeta}_J$ 是一个固定的常数矢量。

为了分析假目标接收信号矢量间的相关性,情况二可以进一步分为以下两个子情况。

(1) 对于同一个干扰机产生的两个有源假目标,它们的理想接收信号矢量 $\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}}$ 均是同一干扰信号向量 $\boldsymbol{\zeta}_J$ 的倍数,因此是线性相关的,相关系数为 1。

(2) 对于不同干扰机产生的两个有源假目标,不同干扰机对应 $\boldsymbol{\zeta}_J$ 之间的相关系数即为两个干扰机接收信号矢量 $\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}}$ 之间的相关系数。由于各干扰机位置坐标不同,这种情况下的相关系数通常是不为 1 的常数。

2.3　情况三:真假目标之间的相关系数

由于真假目标接收信号矢量的结构完全不同,同时,$\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{PT}}$ 和 $\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{FT}}$ 具有相互独立的随机性,真实目标和有源假目标之间的相关系数通常较小。

总之,对于真实目标,与任意目标之间的相关系数均较小。对于有源假目标,与同一干扰机所产生的假目标的相关系数近似为 1,与其他目标的相关系数较小。此外,为达到更好的欺骗性能,干扰机通常同时产生大量有源假目标。因此,真假目标鉴别规则可设计为:若探测目标与较多目标的回波信号均高度相关,该目标应被判断为假目标,相反地,若目标与其他目标均不相关或仅与极少数目标相关,则该目标应判断为真实目标。

3 真假目标鉴别算法

设多站雷达系统在探测区域中共检测到 K 个目标,各目标接收信号矢量分别为 $\boldsymbol{x}_k, k = 1,2,\cdots,K$。通过计算不同目标接收信号矢量 $\boldsymbol{x}_k$ 之间的相关系数,可以得到各目标之间的相关系数矩阵 $\boldsymbol{\Omega}$(维度为 $K \times K$),其第 k 行和第 l 列的元素 $\boldsymbol{\Omega}_{kl}$ 为

$$\boldsymbol{\Omega}_{kl} = \frac{\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{H}} \boldsymbol{x}_l}{\| \boldsymbol{x}_k \| \| \boldsymbol{x}_l \|}, k = 1,2,\cdots,K, l = 1,2,\cdots,K \tag{12}$$

式中,$\| \cdot \|$ 表示向量的欧几里得范数。

经过二进制量化后,可以得到量化后的相关系数矩阵 $\overline{\boldsymbol{\Omega}}$

$$\overline{\boldsymbol{\Omega}}_{kl} = \begin{cases} 0 & \boldsymbol{\Omega}_{kl} < 0.5 \\ 1 & \boldsymbol{\Omega}_{kl} \geqslant 0.5 \end{cases} \tag{13}$$

$\overline{\boldsymbol{\Omega}}$ 是对角元素全为 1 的对称矩阵,其所有元素非零即一。若 $\overline{\boldsymbol{\Omega}}_{kl} = 0$,表示第 k 个目标和第 l 个目标的接收信号矢量是不相关的;若 $\overline{\boldsymbol{\Omega}}_{kl} = 1$,表示第 k 个目标和第 l 个目标的接收信号矢量是相关的。

对于每个目标,根据量化后相关系数矩阵 $\overline{\boldsymbol{\Omega}}$,可以统计与其相关的目标总数量,得到矢量 $\boldsymbol{\Phi}$,其第 k 个元素 $\boldsymbol{\Phi}_k$ 表示与第 k 个目标相关的目标个数,即

$$\boldsymbol{\Phi}_k = \sum_{l=1, l \neq k}^{K} \overline{\boldsymbol{\Omega}}_{kl} \tag{14}$$

若第 k 个目标是真实目标,那么其与任何目标的相关系数都很小,$\boldsymbol{\Phi}_k$ 是一个很小的整数。特别是在真实目标完全独立的情况下,没有任何目标与其相关,$\boldsymbol{\Phi}_k = 0$。

因此,可以根据以下准则对有源假目标进行有效鉴别

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi}_k \leqslant \eta & \text{第 } k \text{ 个目标为真实目标} \\ \boldsymbol{\Phi}_k > \eta & \text{第 } k \text{ 个目标为有源假目标} \end{cases} \tag{15}$$

在真实目标完全独立的理想情况下,鉴别门限 η 可以设为零。然而,考虑到一些低概率事件,譬如两个真实目标或一对真假目标出现高度相关的情况,η 可以设置为一个较小的整数。通常,可以设置 $\eta = 1$ 或 2,即可获得较好的真假目标鉴别性能,具体分析过程见仿真实验。

由于提出方法利用真假目标空间散射特性的差异进行有源假目标鉴别,可适用于任意调制方式产生的有源假目标。由于每个干扰机产生假目标的接收信号向量是近似线性相关的,只要干扰机产生有源假目标数量超过门限 η,所提出方法就能有效地对该干扰机产生的假目标进行有效鉴别,提出方法适用于多干扰源场景。

4 数值仿真分析

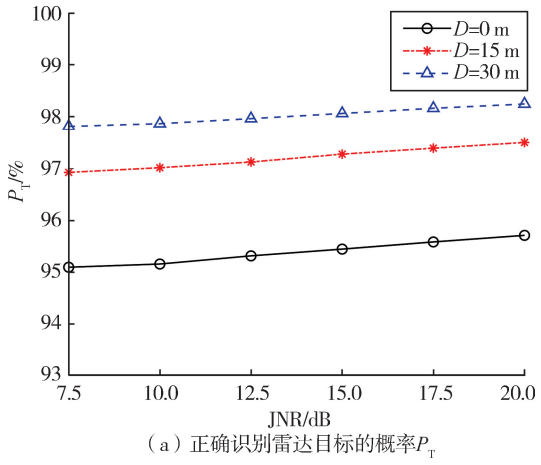
分布式多站雷达系统由 $M = 2$ 个发射站和 $N = 5$ 个接收站组成,对某飞机编队所在区域进行探测。该飞机编队中有 5 架飞机作为雷达真实目标,其中 2 架飞机携带有源干扰机,实施欺骗式干扰。多站雷达系统中各发射站、接收站,以及各飞机目标在笛卡尔直角坐标系下的坐标位置如表 1 所示。

表 1 各发射站、接收站和目标的位置坐标

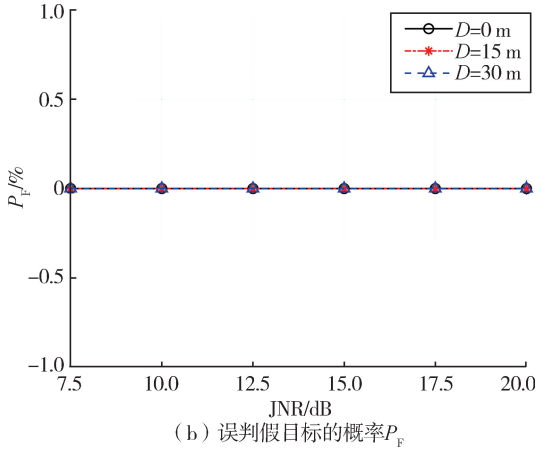
名称	位置坐标
发射站	[0, 0]m; [300, 0]m
接收站	[0, 0]m; [±500, 0]m; [±250, 0]m
目标	[30, 30]km; [30, 31]km; [31, 30]km; [29, 30]km; [30, 29]km
干扰机	最后两个目标,即[29, 30]km; [30, 29]km

设所有发射站和接收站的天线增益均相同,多站雷达系统波长 $\lambda = 0.1$ m,所有真实目标的尺寸 D 相同。每个干扰源一次产生 10 个有源假目标。为简化起见,假设各真实目标的信噪比(SNR)相同,在第一个通道中的信噪比设为 5 dB,其他通道中的 SNR 可以根据雷达方程得到。在经过非相干积累后,SNR 将提高到 15 dB,可获得较满意的检测性能。有源假目标的干噪比(JNR)同样设置为第一个通道中的 JNR,在 7.5 dB 到 20 dB 之间变化。

设鉴别门限 $\eta = 2$,利用提出方法对多站雷达中的有源假目标进行鉴别,通过 10^5 Monte Carlo 仿真实验,统计得到不同干噪比 JNR 下的真实目标鉴别概率 P_{T} 和有源假目标误判概率 P_{F},如图 2 所示。图中不同曲线对应不同目标尺寸 D,其中 $D = 0$ m、15 m 和 30 m。



（a）正确识别雷达目标的概率P_T



（b）误判假目标的概率P_F

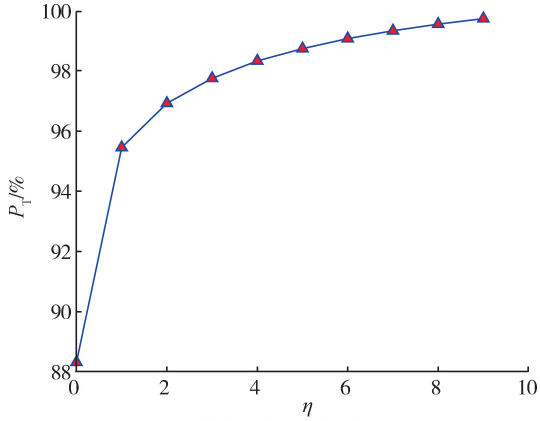
图 2　有源假目标鉴别算法的鉴别性能

从图 2(b)可以看出，对于不同的 JNR 和目标尺寸，有源假目标误判概率 P_F 始终保持为零，说明该方法可始终保证对有源假目标的有效鉴别。在实际干扰应用场景下，为了确保产生有源假目标可以超过雷达检测门限，JNR 通常比较大，使得一个干扰机产生的两个有源假目标之间通常是高度相关的。此外，为了提高欺骗性能，干扰机往往一次产生较多假目标，因此，所提出鉴别算法对有源假目标进行误判的概率几乎为 0。

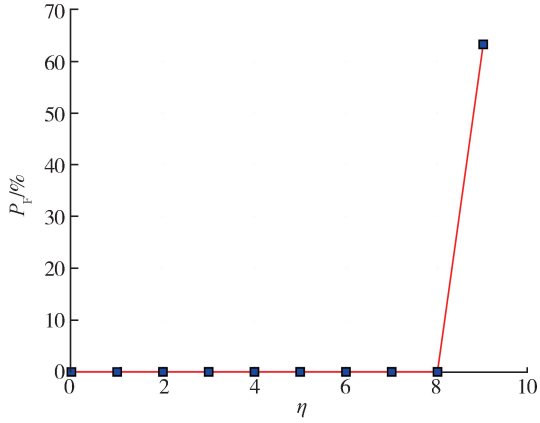
如图 2(a)所示，不同仿真参数下，真实目标鉴别概率 P_T 均在 95%以上，说明提出鉴别算法可以对真实目标进行有效鉴别。此外，干噪比 JNR 越大，真实目标鉴别概率 P_T 越高，这是因为较高的 JNR 使得有源假目标的接收信号矢量之间的相关性越高，所在矢量子空间更小，则真实目标与有源假目标高度相关的概率变低，因此，JNR 的提高将带来真实目标鉴别概率 P_T 的提高。

此外，比较图 2(a)中的 3 条曲线可以看出，在较大目标尺寸下，提出算法可得到更好的鉴别性能。这是因为目标尺寸越大，目标回波的相关性越低，真实目标和假目标之间的差异越大，因此，提出算法可以得到更好的目标鉴别概率。

图 3 给出在不同鉴别门限 η 下的仿真结果。仿真参数为：目标尺寸为 $D=15$ m，JNR = 7.5 dB。可以看到，随着门限 η 不断变大，真实目标鉴别概率 P_T 逐渐变高，直至几乎接近 1，在 $\eta = 2$ 时，已可获得 97%的鉴别概率；有源假目标鉴别概率 P_F 几乎保持为零，直至鉴别门限 $\eta = 9$，即干扰机产生有源假目标个数减 1，这是理想情况下与假目标相关的目标个数。当鉴别门限 $\eta \geqslant 9$，大量有源假目标将被判定为真实目标。因此，鉴别门限 $\eta = 8$ 可得到最好的鉴别性能，然而干扰机产生假目标的个数是未知的，最优门限是无法获得的。综上，通常门限 η 可以设置为一个较小的整数，即 $\eta = 2$，即可同时获得较好的真假目标鉴别性能。



（a）目标鉴别概率P_T



（b）有源假目标误判概率P_F

图 3　不同鉴别门限 η 下的目标鉴别性能

5　结束语

在分布式多站雷达系统下，提出了一种可适用于多干扰源场景的有源假目标鉴别算法，扩展了现有算法的应用范围。根据真假目标空间散射特性的

差异,利用目标接收信号矢量之间的相关性对有源假目标进行鉴别。该方法的优点在于可对任意调制方式产生的有源假目标进行有效鉴别,且鉴别算法不需要任何先验信息。然而,对相关系数矩阵进行简单的二进制量化缺乏理论基础,鉴别门限需要凭经验进行设定,这些问题留待以后进行研究。

参考文献:

[1] BUTT F A, JALIL M. An overview of electronic warfare in radar systems[C]// International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013: 213-217.

[2] 郭海燕, 周飞, 冯蕴天. 双可重构智能表面辅助的联合主被动干扰方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2022,42(3): 14-21.
GUO Haiyan, ZHOU Fei, FENG Yuntian. A joint active and passive jamming method assisted by double reconfigurable intelligent surfaces[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022,42(3): 14-21.(in Chinese)

[3] CHERNYAK V. Fundamentals of Multisite Radar Systems: Multistatic Radars and Multistatic Radar Systems [M]. London: CRC Press, 1998.

[4] 赵珊珊, 刘子威. 多站雷达主瓣干扰抑制方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(4): 584-589.
ZHAO Shanshan, LIU Ziwei. Main-lobe jamming suppression method in multiple-radar system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(4): 584-589.(in Chinese)

[5] 李强. 多站雷达抗有源欺骗式干扰方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
LI Qiang. Study on active deception ECCM in multiple-radar systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)

[6] LI Q, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Hermitian distance-based method to discriminate physical targets and active false targets in a distributed multiple-radar architecture [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (22): 10432-10442.

[7] YU H L, LIU N, ZHANG L R, et al. An interference suppression method for multistatic radar based on noise subspace projection [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (15): 8797-8805.

[8] 胡祺勇, 谢军伟, 刘占强, 等. 基于点迹融合的假目标鉴别方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 88-92.
HU Qiyong, XIE Junwei, LIU Zhanqiang, et al. False-targets discrimination method based on measurement fusion [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 37(3): 88-92.(in Chinese)

[9] 赵艳丽, 陈永光, 蒙洁, 等. 分布式组网雷达抗多假目标欺骗干扰处理方法[J]. 电光与控制, 2011,18(3): 25-30.
ZHAO Yanli, CHEN Yongguang, MENG Jie, et al. A data processing method against multi-false-target deception jamming for distributed radar network[J]. Electronics Optics & Control, 2011,18(3): 25-30.(in Chinese)

[10] 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.
ZHAO Yanli, WANG Xuesong, WANG Guoyu, et al. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range-false-target deception jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2007,35(3): 454-458.(in Chinese)

[11] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R S, et al. Spatial diversity in radars—models and detection performance [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (3): 823-838.

[12] ZHOU S H, LIU H W, ZHAO Y B, et al. Target spatial and frequency scattering diversity property for diversity MIMO radar [J]. Signal Processing, 2011, 91 (2): 269-276.

[13] ZHAO S S, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Discrimination of active false targets in multistatic radar using spatial scattering properties [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(5): 817-826.

[14] ZHAO S S, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Signal fusion-based algorithms to discriminate between radar targets and deception jamming in distributed multiple-radar architectures [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15 (11): 6697-6706.

[15] 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.

[16] ZHAO S S, ZHOU Y, ZHANG L R, et al. Discrimination between radar targets and deception jamming in distributed multiple-radar architectures [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2017, 11(7):1124-1131.

(责任编辑:潘雪松)