

多基地雷达聚类分析鉴别有源假目标

刘子威^① 赵珊珊^{*②} 杨彪^② 易民举^②

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210042)

^②(南京邮电大学电子与光学工程学院 南京 210023)

摘 要: 针对现有多基地雷达抗欺骗式干扰方法无法应用于多干扰源的问题, 该文提出一种基于聚类分析的多基地雷达鉴别有源假目标方法, 利用真假目标接收信号矢量之间相关性的差异, 以相关系数为度量, 通过聚类分析方法, 将相同干扰源产生的假目标聚为一类, 每个真实目标各为一类, 实现有源假目标的有效鉴别。该方法可用于鉴别任意欺骗调制方式产生的有源假目标, 且适用于多个干扰源实施分布式干扰的应用场景。最后, 通过仿真实验, 验证了所提聚类分析方法鉴别有源假目标的有效性。

关键词: 雷达抗干扰; 多基地雷达; 欺骗式干扰; 有源假目标鉴别; 聚类分析

中图分类号: TN973

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)11-3211-09

DOI: [10.11999/JEIT210147](https://doi.org/10.11999/JEIT210147)

Clustering Method to Discriminate Active False Targets in Multistatic Radar System

LIU Ziwei^① ZHAO Shanshan^{*②} YANG Biao^② YI Minju^②

^①(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210042, China)

^②(College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The available deception anti-jamming methods in multistatic radar can not be applied to multiple jamming sources. In view of this problem, a clustering analysis-based method is proposed to discriminate active false targets in multistatic radar, according to the differences in the correlation between the received signal vectors of true and false targets. Measured by the correlation coefficient in clustering analysis method, the false targets generated by the same jamming source are grouped into one cluster, while each true target constitutes one singleton cluster, achieving the effective discrimination of active false targets. The proposed method can be used to discriminate active false targets generated by any deception modulation mode and is suitable for the application of distributed jamming with multiple jamming sources. Finally, the effectiveness of the clustering analysis method to discriminate active false targets is verified through simulation experiments.

Key words: Radar electronic counter-countermeasures; Multistatic radar; Deception jamming; Discrimination of active false targets; Clustering analysis

1 引言

欺骗式干扰是有源干扰的重要干扰样式, 通常

存在于自卫式干扰和随队干扰中, 通过对雷达发射信号进行延时转发, 在雷达回波中产生大量有源假目标, 以迷惑雷达, 让其真假难分, 达到保护期望目标的目的^[1]。尤其是随着大规模集成电路和数字射频存储(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)等先进器件的快速发展, 干扰机可以瞬间精确模仿雷达发射波形, 快速实现高逼真度的假目标欺骗, 在真实目标附近产生时域、频域、空域特征都高度相似的有源假目标。这种高逼真度假目标可以迷惑和扰乱雷达对期望目标的探测, 甚至造成雷达检测、跟踪和识别等处理电路的过载。

收稿日期: 2021-02-18; 改回日期: 2021-09-10; 网络出版: 2021-09-30

*通信作者: 赵珊珊 zhaoshanshan025@163.com

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(202000200X9001, 202000200X9002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801233, 61801445), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20170911), The Aeronautical Science Foundation of China (202000200X9001, 202000200X9002)

雷达系统通常采用多种抗干扰方式以对抗电子干扰,单站雷达常用的抗欺骗式干扰方法包括频率捷变、旁瓣匿隐、极化特性、发射信号优化,以及利用DRFM量化误差等^[2-4]。然而,单部雷达探测视角单一,可达到的抗干扰性能有限,通常无法对抗较高逼真度的有源假目标。多基地雷达由多个空间上分散布置的发射站、接收站或发射-接收站组成,通过将各接收站的信息在系统融合中心进行联合处理,完成目标检测、跟踪与识别^[5]。鉴于拥有多视角探测和融合处理这两个特点,多基地雷达具有天然的抗干扰优势,其协同抗干扰方法受到学者的广泛研究。

针对欺骗式干扰,首先可以利用数据融合处理进行有源假目标鉴别^[6,7],主要利用真实目标量测在统一坐标系下聚集而有源假目标量测相对分散的差异。数据融合对数据传输速率的要求较低,但信息融合级别较低,抗欺骗式干扰能力有限。随着数据同步和处理能力的不断提高,信号级融合算法逐渐成为信息融合发展趋势,由于进行融合的目标回波信息损失率较低,信号级融合技术可以大大提高系统抗欺骗式干扰的能力。由于真实目标雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)随探测视角的变化而随机起伏,因此,当各雷达站从不同视角对目标进行探测的情况下,雷达站得到的目标回波是去相关的。相反地,由于干扰机在各个辐射方向上的干扰信号均相同,各雷达站接收到干扰信号是高度相关的。真假目标空间相关性上的差异是信号级协同抗干扰的理论基础。在多基地雷达独立检测的情况下,文献^[8,9]提出利用目标回波复包络间的相关性进行有源假目标鉴别,但需要利用多个脉冲回波数据,仅适用于快起伏目标背景下。文献^[10]进一步提出利用真假目标幅度比特征的差异进行有源假目标鉴别,仅需要单脉冲回波数据。在多基地雷达联合检测的情况下,文献^[11]提出对目标接收信号矢量利用似然比检测的方法进行欺骗式干扰鉴别,但仅适用于单干扰源的场景下。

在多个干扰源实施协同欺骗干扰的背景下,本文提出利用聚类分析方法对有源假目标进行有效鉴别,首先,分析了真假目标信号接收矢量之间相关系数的差异,并利用此差异进行聚类分析,将同一干扰源产生的有源假目标聚为一类,而真实目标各成一类,完成真假目标鉴别。由于本文利用真假目标空间散射特性的差异进行目标鉴别,与欺骗干扰类型无关,因此,提出方法可适用于任意调制产生的有源假目标。

2 信号模型

多基地雷达系统由 M 个发射站和 N 个接收站组成,采用多通道联合目标检测。在其探测区域内,存在多部有源干扰机对雷达系统实施欺骗式干扰,以达到保护探测目标的目的。这里的干扰机可以是随队干扰机或者自身携带的自卫式干扰机,产生欺骗式干扰可以采用距离欺骗、速度欺骗、角度欺骗,或者联合欺骗方式。

在进行协同探测之前,多基地雷达系统需要完成各个站之间的空间对齐、时间和相位同步。通过GPS可以实现精准的时间同步,更有挑战的相位同步和空间对齐也得到了学者的广泛研究^[12],本文不再做深入探讨,假设雷达系统空间对齐和同步工作已经完成。

多基地雷达将整个空间区域划分为不同空间分辨单元(Space Resolution Cell, SRC),进行协同探测,在多基地雷达短基线或目标位于相对较远区域时,转发干扰机可以在一个SRC中产生欺骗假目标^[13]。对于探测区域的一个SRC,它是不同发射-接收通道空间分辨单元的交集,所有发射站同时照射该探测区域,但采用正交发射信号。各接收站接收到的回波数据首先通过一组匹配滤波器,将接收到的不同发射站的回波信号进行分离,得到共 MN 个发射-接收通道回波信号。然后,对各通道回波信号在该SRC所在的离散距离单元进行采样,得到该SRC在各发射-接收通道中的回波样本,构成该分辨单元的目标接收信号矢量 $\mathbf{x}$,维度为 $MN \times 1$ 。

对各SRC的接收信号矢量 $\mathbf{x}$,利用非相干积累检测器进行协同探测,对于探测的目标,可能是真实目标或欺骗式干扰产生的有源假目标。

若探测目标是真实目标,其接收信号矢量 $\mathbf{x}_T$ 为

$$\mathbf{x}_T = \boldsymbol{\zeta}_T + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{n}$ 表示噪声矢量,服从复高斯分布,即 $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{MN})$, σ_n^2 是各独立通道中的噪声功率, $\mathbf{I}_{MN}$ 是 $MN \times MN$ 的单位矩阵。

$\boldsymbol{\zeta}_T$ 是真实目标的理想接收信号矢量,

$$\boldsymbol{\zeta}_T = [\alpha_{11} \exp(-j2\pi R_{1T1}/\lambda), \alpha_{12} \exp(-j2\pi R_{1T2}/\lambda), \dots, \alpha_{mn} \exp(-j2\pi R_{mTn}/\lambda), \dots, \alpha_{MN} \exp(-j2\pi R_{MTN}/\lambda)]^T \quad (2)$$

其中, $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置。 $\exp(-j2\pi R_{mTn}/\lambda)$ 是载频剩余项, λ 是系统波长,距离和 $R_{mTn} = R_{mT} + R_{Tn}$, R_{mT} 是第 m 个发射站到目标的距离, R_{Tn} 是目标到第 n 个接收站到目标的距离。

α_{mn} 是目标在第 mn 通道(发射站 m -接收站 n)所

构成通道)目标信号幅度,根据雷达方程,可以得到

$$\alpha_{mn} = \lambda \sigma_{mn} \sqrt{P_{Tm} G_{Tm} G_{Rn}} / (4\pi \sqrt{4\pi} R_{mT} R_{Tn}) \quad (3)$$

其中, P_{Tm} 是第 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} 是目标在第 mn 通道的 RCS, 设目标采用 Swerling-I 起伏模型, σ_{mn} 是服从零均值复高斯分布

$$f_e = f_m \sqrt{1 + [\cos(\theta_m - \phi_n) + \cos(\theta_{m'} - \phi_{n'}) - \cos(\theta_m - \theta_{m'}) - \cos(\theta_m - \phi_{n'}) - \cos(\phi_n - \theta_{m'}) - \cos(\phi_n - \phi_{n'})]} \quad (5)$$

其中, $J_1(\cdot)$ 是 1 阶的第 1 类贝塞尔函数, c 为光速, 载频 $f_m = c/\lambda$, θ_m 是第 m 个发射站的照射角度, ϕ_n 是第 n 个接收站的观测角度。

若探测目标是有源假目标, 其接收信号矢量 $\mathbf{x}_F$ 为

$$\mathbf{x}_F = \boldsymbol{\zeta}_F + \mathbf{n} \quad (6)$$

$\boldsymbol{\zeta}_F$ 是有源假目标的理想接收信号矢量,

$$\boldsymbol{\zeta}_F = [\beta_{11} \exp(-j2\pi R_{1J1}/\lambda), \beta_{12} \exp(-j2\pi R_{1J2}/\lambda), \dots, \beta_{mn} \exp(-j2\pi R_{mJn}/\lambda), \dots, \beta_{MN} \exp(-j2\pi R_{MJN}/\lambda)] \quad (7)$$

其中, R_{mJn} 是由第 m 个发射站到干扰机再到第 n 个接收站的距离和。

β_{mn} 是欺骗式干扰信号在第 mn 通道的信号幅度,

$$\beta_{mn} = v \sqrt{P_J G_{Rn}} / (4\pi R_{Jn}) \quad (8)$$

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

3 目标相关性分析

由于目标的空间分集特性, 在差异足够大的不同观测方向上, 目标 RCS 是相互独立的, 其回波信号是去相关的。相反地, 由于同一个干扰机发射的干扰信号在不同方向上是完全相同的, 因此, 在不同通道中接收的干扰信号是高度相关的。因此, 真实目标和欺骗式干扰产生有源假目标的接收信号矢量间的相关系数存在差异, 利用这种差异可以对有源假目标进行有效鉴别。

3.1 相关系数分析

多基地雷达系统探测的目标可能是真实目标或有源假目标, 若是假目标, 可能是同一部干扰机产生的假目标, 也可能是不同干扰机产生的假目标。因此, 对探测的目标相互间计算接收信号矢量的相关系数存在以下 4 种情况:

情况 1 两个真实目标间的相关系数;

情况 2 同一部干扰机产生的两个有源假目标间的相关系数;

的随机变量, 即 $\sigma_{mn} \sim \text{CN}(0, \zeta_{mn}^2)$ 。

由于多基地雷达系统中目标 RCS 的空间分集特性, 目标 RCS 在不同通道回波间的相关性可以用相关系数来衡量, Zhou 等人^[14]推导了目标圆形散射模型下的相关系数。设目标尺寸为 D , 第 mn 通道和第 $m'n'$ 通道目标 RCS 之间的相关系数为

$$\rho = \frac{2J_1(\pi f_e D/c)}{\pi f_e D/c} \quad (4)$$

情况 3 两部不同干扰机产生的有源假目标间的相关系数;

情况 4 真实目标和有源假目标间的相关系数。

下面依次对上述 4 种情况进行理论分析。

(1) 情况 1. 两个接收信号矢量均对应真实目标, 根据式(2)和式(3), 由于目标 RCS 的随机性, 真实目标的理想接收信号矢量 $\boldsymbol{\zeta}_T$ 是服从复高斯分布的随机矢量, 两个真实目标接收信号矢量 $\mathbf{x}_T$ 和 $\mathbf{x}'_T$ 之间的相关系数为

$$\rho_T = \frac{\mathbb{E}[(\mathbf{x}_T)^H \mathbf{x}'_T]}{\sqrt{\mathbb{E}[(\mathbf{x}_T)^H \mathbf{x}_T]} \sqrt{\mathbb{E}[(\mathbf{x}'_T)^H \mathbf{x}'_T]}} \quad (9)$$

对于其分子,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(\mathbf{x}_T)^H \mathbf{x}'_T] &= \mathbb{E}[(\boldsymbol{\zeta}_T + \mathbf{n})^H (\boldsymbol{\zeta}'_T + \mathbf{n}')] \\ &= \mathbb{E}[(\boldsymbol{\zeta}_T)^H \boldsymbol{\zeta}'_T] \\ &= \mathbb{E}\left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\alpha_{mn} \exp(-j2\pi R_{mTn}/\lambda)]^* \cdot \alpha'_{mn} \exp(-j2\pi R'_{mTn}/\lambda)\right] \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mathbb{E}[\alpha_{mn}^* \alpha'_{mn}] \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi(R_{mTn} - R'_{mTn})/\lambda) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置, $(\cdot)^*$ 表示共轭运算, $\mathbb{E}[\cdot]$ 表示求期望。

由于不同目标的幅度随机起伏 α_{mn} 和 α'_{mn} 一般是不相关的, 因此 $\mathbb{E}[\alpha_{mn}^* \alpha'_{mn}] = 0$, 则 $\mathbb{E}[(\mathbf{x}_T)^H \mathbf{x}'_T] = 0$, $\rho_T = 0$ 。这一结论是在样本足够的情况下, 不同真实目标间相关系数的理想值。

相关系数估计的样本数最大为总发射-接收通道个数 MN , 根据式(4), 不同通道内的随机样本可能存在一定的相关性, 与目标尺寸、系统波长、多基地雷达布站、目标位置都是相关的。因此, 相关系数估计的有效样本数 $K \leq MN$, $\hat{\rho}_T$ 将大于 0,

且 $\hat{\rho}_T$ 与有效样本数 K 成正比：在最大 $K = MN$ 的情况下， $\hat{\rho}_T$ 最小；在 K 最小的情况下，目标在不同通道内的RCS完全相同，此时，有效样本数 $K = 1$ ， $\hat{\rho}_T$ 最大。

值得注意的是，除了目标幅度起伏以外，由于不同目标的位置各不相同， $\exp(j2\pi(R_{mTn} - R'_{mTn})/\lambda)$ 在不同通道中也各不相同，也同样会带来目标回波信号的去相关。因此，即使在最差的情况下， $K = 1$ ，不同真实目标接收信号矢量间的相关性仍较小。

(2) 情况2。两个接收信号矢量对应同一部干扰机产生的有源假目标。根据式(7)和式(8)，有源假目标的理想接收信号矢量可以表示为

$$\zeta_F = \frac{v\lambda\sqrt{P_J}}{4\pi} \cdot \zeta_J \quad (11)$$

其中，线性倍数 $v\lambda\sqrt{P_J}/4\pi$ 不影响其相关性，矢量 ζ_J 定义为干扰导向矢量，

$$\zeta_J = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{G_{R1}}}{R_{J1}} \exp(-j2\pi R_{1J1}/\lambda), \\ \frac{\sqrt{G_{R2}}}{R_{J2}} \exp(-j2\pi R_{1J2}/\lambda), \dots, \\ \frac{\sqrt{G_{Rn}}}{R_{Jn}} \exp(-j2\pi R_{mJn}/\lambda), \dots, \\ \frac{\sqrt{G_{RN}}}{R_{JN}} \exp(-j2\pi R_{MJN}/\lambda) \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

从式(12)中，可以看到干扰导向矢量 ζ_J 是干扰机位置和接收天线增益的函数，对于同一个干扰机， ζ_J 是一个恒定矢量，对该干扰机产生的所有有源假目标均是相同的。

因此，对于同一部干扰机产生的两个有源假目标，其理想接收信号矢量 ζ_F 可以写成同一个干扰导向矢量 ζ_J 的倍数，是线性相关的，两者的相关系数为1。考虑到接收信号矢量中不可避免地叠加了噪声，但是干噪比一般较大，同一部干扰机产生有源假目标的接收信号矢量 $\mathbf{x}_F$ 之间的相关系数将略小于1。

(3) 情况3。两个接收信号矢量对应不同干扰机产生的有源假目标。根据式(11)，由于目标理想接收信号矢量 ζ_F 之间的相关系数即为干扰导向矢量 ζ_J 之间的相关系数，而不同干扰机对应的干扰导向矢量 ζ_J 不同，因此， ζ_F 的相关系数是一个不为1的恒定值，与两部干扰机的位置相关。一般来说，两部干扰机相距离越近，相关系数的值越大，当两部干扰机完全重合的情况下，其产生有源假目标的 ζ_F 之间的相关系数为1。

(4) 情况4。一个接收信号矢量对应真实目标，另一个接收信号矢量对应有源假目标。由于真实目

标和有源假目标接收信号矢量的结构不同，且真实目标RCS的随机起伏和干扰机的调制起伏是相互独立的，真假目标间的相关系数通常接近于0。

3.2 相关性仿真分析

目标接收信号矢量之间相关性的差异反映在接收信号矢量所在的多维空间内：同一部干扰机产生的有源假目标是聚在一处的，矢量间的角度差较小；不同干扰机产生的有源假目标是不相关的，接收信号矢量之间的角度差较大；此外，真实目标是各不相关的，其接受信号矢量之间的角度差较大。

通过仿真实验，验证真假目标接收信号矢量在的多维空间中的分布情况。因可观测空间的最高维度是3维，可以通过图形反映这一差异，以通道数为3的 1×3 多基地雷达为例。仿真参数如下：多基地雷达系统波长为 $\lambda = 0.1$ m，发射站位置为坐标原点 $[0,0]$ ，3个接收站位置坐标为 $[0,0]$ ， $[500,0]$ m和 $[-500,0]$ m。发射站和接收站的天线增益相同， $G_{T1} = G_{R1} = G_{R2} = G_{R3} = 20$ dB。在探测区域，存在一个飞机编队，由两架飞机和两部随队干扰机组成，飞机目标的位置坐标分别为 $[30,30]$ km， $[32,32]$ km，两个目标的尺寸均为 $D = 10$ m。两部随队干扰机位置坐标为 $[28,30]$ km， $[30,28]$ km，相互独立地对多基地雷达实施欺骗式干扰以保护飞机目标，每部干扰机均产生有源假目标个数为10。

目标信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)定义为第1个接收站中的SNR，设两个目标的SNR相同，且 $\text{SNR}=8$ dB。相似地，干噪比(Jamming-Noise Ratio, JNR)定义为第1个接收站中的JNR，设对每个产生的假目标均相同，且 $\text{JNR}=9$ dB，比目标SNR略高一点，以获得更好的欺骗性能。通过将3部接收站的回波信号进行非相关积累可有效提高目标SNR或JNR，保证可得到满意的检测性能。假设多基地雷达检测概率为1，真实目标和有源假目标均可被成功检测。因此，共检测到22个目标，图1中给出了所有检测目标的归一化接收信号矢量，其中，图中仅给出实部数据，两个三角形代表飞机目标，红色填充的圆圈代表第1部干扰机产生的有源假目标，没有填充的圆圈代表第2部干扰机产生的有源假目标。

接收信号矢量之间的角度差越小，则两个目标的相关系数越大，目标越聚集。如图1所示，同一部干扰机产生有源假目标是高度相关的，而不同干扰机产生假目标互不相关。此外，两个真实目标是互不相关的，与假目标也不相关。仿真结果与分析结果相符，说明了真假目标接收信号矢量相关性的差异。

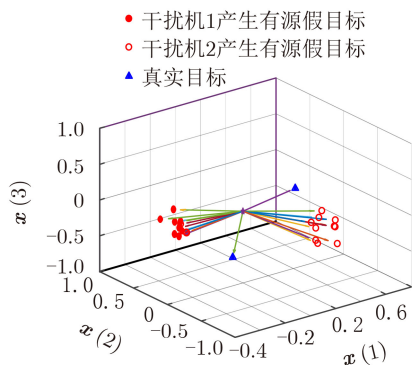


图1 探测目标的归一化接收信号矢量

4 聚类分析鉴别假目标方法

根据第3节的分析,同一部干扰机产生的有源假目标的接收信号矢量是高度相关的,相关系数近似为1,而不同真实目标接收信号矢量是去相关的,相关系数与目标位置和空间去相关程度有关。此外,不同干扰机产生假目标接收信号矢量或真假目标接收信号矢量是相互独立的,相关系数近似为0。

真假目标接收信号矢量的这一差异,与聚类分析的思想不谋而合。因此,可以利用聚类分析方法对有源假目标进行有效鉴别,聚类依据为目标接收信号矢量之间的相关系数,理想的聚类结果为同一部干扰机产生的有源假目标聚集为一类,各真实目标分别聚集为一类。

鉴于干扰机通常一次产生多个假目标来提高欺骗性能,可以得到如下鉴别准则:若一个目标类里面包含多个目标,则该类为假目标类,其包含的目标均为假目标;若一个目标类里面仅包含一个目标,则该类为真实目标类,其包含的目标均为真实目标。

4.1 系统聚类分析

聚类分析是对样本进行量化分类和数据挖掘的重要方法。基本原理是根据样本自身的属性,用数学方法按照某种相似性或差异性指标,定量地确定样本之间的亲疏关系,并按照这种亲疏关系对样本进行聚类。

系统聚类分析法^[15,16],也称之为层次聚类分析,是聚类分析的一种典型方法,也是应用最为广泛的。它可以分成两类:一类是凝聚式层次聚类方法,自低层向顶层,利用各样本之间的距离远近依次进行凝聚,建立数据层次结构;一类是分裂式层次聚类方法,自顶层向下层依次进行分解,建立数据层次结构。

以分裂式层次聚类方法为例,系统聚类分析方法的一般步骤如下:

步骤1 将 Q 个样本各作为一类,即 $\{C_1, C_2, \dots, C_Q\}$, Q 为样本个数;

步骤2 定义代价函数来评价各样本之间的距离,构成距离矩阵;

步骤3 合并距离最近的两类 C_k 和 C_l 作为一个新类 $C_k \cup C_l$,替换 C_k 和 C_l ;

步骤4 计算新类与当前各类的距离,更新距离矩阵;

步骤5 重复步骤3和步骤4,不断地进行合并和计算,直至类的个数达到指定值。

在进行系统聚类之前,首先要定义代价函数来评价样本之间的距离,常用的距离函数包括欧氏距离、方差加权距离、切比雪夫距离、绝对值距离、马氏距离、兰氏距离、杰氏距离等。除此以外,还要定义类与类之间的距离,常用的类间距离定义有8种之多,与之相应的系统聚类法分别为最短距离法、最长距离法、中间距离法、重心法、类平均法、可变类平均法、可变法和离差平方和法。

4.2 有源假目标鉴别

利用系统聚类分析方法对多基地雷达接收到目标数据进行分类,再根据鉴别准则对探测目标进行真假目标鉴别。根据真假目标接收信号矢量在相关性上的差异,选择相关系数来衡量目标间的亲疏关系。相关系数越大,表示目标之间相关性越大,两个目标更应该聚于一类,聚于一类的代价越小,因此,本文选择代价函数为

$$J(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = 1 - \rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (13)$$

$J(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为第 i 个目标和第 j 个目标聚类的代价函数, $\mathbf{x}_i$ 和 $\mathbf{x}_j$ 分别为其接收信号矢量。代价函数 $J(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 的取值范围是0~1, $J(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 越接近于0,则两目标相聚越近,聚于一类的代价越小; $J(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 越接近于1,则两目标相聚越远,聚于一类的代价越大。

采用最长距离法,定义类间聚类为最长距离,即两类中目标之间代价函数最大者作为两类间距离,则两类 C_k 和 C_l 之间的距离 D_{kr} 为

$$D_{kr} = \max_{\mathbf{x}_i \in C_k, \mathbf{x}_j \in C_l} J(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)的定义,利用第4.1节给出的系统聚类分析法步骤可以进行聚类分析,得到最后的聚类分析结果。

在上述步骤中,如何得到类的最优个数是聚类算法的关键,决定着最终的聚类结果。理想聚类条件下,同一干扰机产生有源假目标应聚为一类,每个真实目标各成一类,因此,最优聚类个数应该是干扰机个数和真实目标个数的和,但是,在完成真假目标鉴别之前,这是一个未知数。

最优聚类个数的确定问题是系统聚类分析法的

热点问题, 通常的解决思路是: 在所有可能类的个数下, 进行聚类分析, 并对聚类结果进行有效性评价, 评价结果中最有效的聚类结果所对应的类的个数就是最优聚类个数。这样, 最优聚类个数的确定问题转化为对聚类结果有效性评价指标的定义问题。现有文献中提出多种有效性评价指标, 主要包括HS指标、KL指标、DB指标、IGP指标等。

针对多基地雷达中的真假目标鉴别问题, 可应用的聚类结果有效性评价指标, 需要满足以下两个条件:

- (1) 有效性指标可对类的个数为1的聚类结果进行评价;
- (2) 有效性指标可应用于类中样本个数为1的情况。

在满足以上两个条件的情况下, 通过对现有可用指标进行大量仿真实验验证, 发现HS指标在真假目标鉴别的聚类问题中更大概率能得到理想的最优聚类个数。HS指标是Homogeneity-Separation指标的简称。设对聚类个数为 q 的情况下, 聚类结果为 $\{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_q\}$, $k = 1, 2, \dots, q$, 则HS指标的定义为

$$HS(q) = |\text{hom}(q) - \text{sep}(q)| \quad (15)$$

$\text{hom}(q)$ 代表同质性, 表示聚类结果中类内目标具有内聚结构的程度, 定义为所有类内目标之间相似度的平均值。 $\text{sep}(q)$ 代表分离性, 表示聚类结果中类与类之间被较好分开的程度, 定义为属于不同类的目标之间相似度的平均值

$$\text{hom}(q) = \frac{2}{\sum_{k=1}^q n_k(n_k - 1)} \sum_{k=1}^q \sum_{\substack{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \in C_k \\ i < j}} \rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (16)$$

$$\text{sep}(q) = \frac{1}{\sum_{k,l=1; k < l}^q n_k \times n_l} \sum_{k,l=1}^q \sum_{\substack{\mathbf{x}_i \in C_k \\ \mathbf{x}_j \in C_l \\ i < j}} \rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (17)$$

其中, n_k 和 n_l 分别为类 C_k 和 C_l 中目标的个数, 相关系数矩阵 $\rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 可衡量第 i 个目标接收信号矢量 $\mathbf{x}_i$ 和第 j 个目标接收信号矢量 $\mathbf{x}_j$ 之间的相似度。

对多基地雷达探测到的 Q 个目标, 所有可能的聚类个数为 $1 \sim Q$ 。根据HS指标, 可以得到最优聚类个数为

$$q_{\text{opt}} = \max_{q=1,2,\dots,Q} HS(q) \quad (18)$$

最优聚类个数 q_{opt} 所对应的聚类结果即为最终的聚类结果 $\{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_{q_{\text{opt}}}\}$, $k = 1, 2, \dots, q_{\text{opt}}$ 。根据这一聚类结果, 第3节给出的鉴别准则可以描述为

$$\left. \begin{aligned} &\forall \mathbf{x}_i \in C_k \text{ 均对应源假目标, } n_k > 1 \\ &\forall \mathbf{x}_i \in C_k \text{ 均对应真实目标, } n_k = 1 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

综上所述, 在多基地雷达中, 基于聚类分析的有源假目标鉴别方法的基本步骤包括:

步骤1 针对探测目标的接收信号矢量 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_Q\}$, 计算目标间的相关系数矩阵 $\rho(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$;

步骤2 根据式(13)和式(14)的定义, 对所有可能聚类数($q=1 \sim Q$), 进行系统聚类分析, 得到聚类结果;

步骤3 根据式(15)定义的HS指标, 对所有可能聚类数的聚类结果进行有效性评价, 并根据式(18), 得到最优聚类数;

步骤4 根据式(19)的鉴别准则, 对每个类中的目标依次进行真假鉴别。

5 数值仿真分析

本节将通过数值仿真验证聚类分析方法鉴别有源假目标的可行性。仿真参数如下: 多基地雷达由两个发射站和5个接收站组成, 发射站的位置坐标为 $[0, 0]$, $[300, 0]$ m, 接收站的位置坐标分别为 $[-500, 0]$ m, $[-250, 0]$ m, $[0, 0]$, $[250, 0]$ m, $[500, 0]$ m, 其他仿真参数与第3.3节的仿真参数相同。

目标SNR=5 dB, 干扰JNR=5~10 dB, 在不同JNR下, 通过 10^5 次Monte Carlo仿真实验得到真实目标鉴别概率和有源假目标误判概率, 如图2所示。

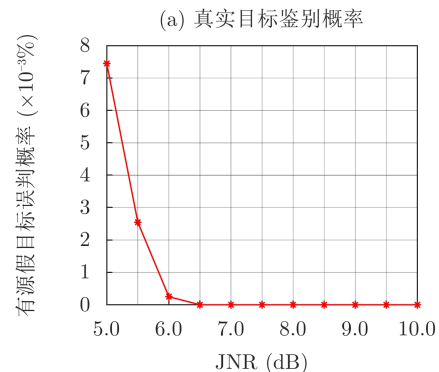
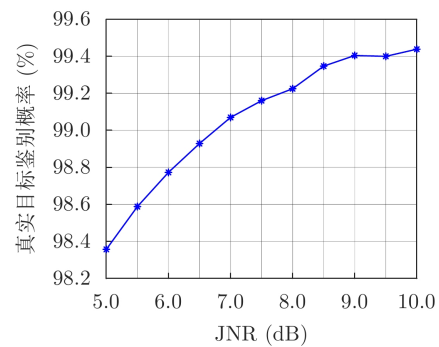


图2 聚类分析法鉴别有源假目标性能仿真

从图2可以看出, 本文算法对真实目标鉴别概率在98%以上, 将有源假目标误判为真实目标的概率仅为0.01%以下, 说明本文算法对有源假目标进行有效鉴别的可行性。此外, 随着JNR越来越大, 真实目标鉴别概率越高, 有源假目标误判概率越低, 本文算法可得到更好的鉴别性能。这是由于随着JNR的增大, 同一干扰机产生有源假目标接收信号矢量之间的相关系数变大, 假目标聚集性更好, 与真实目标的差异变大, 算法可达到的鉴别性能更好。

在自卫式干扰下, 飞机目标位置坐标与干扰机位置相同, 即[28, 30] km, [30, 28] km, 两个目标的尺寸 D 相同。目标尺寸影响真实目标空间散射特性, 进而影响聚类算法的目标鉴别性能。在不同目标尺寸下, $D=0, 10\text{ m}, 30\text{ m}$, 本文算法的鉴别性能如图3所示。

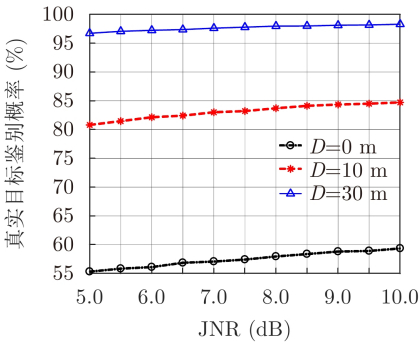
从图3(a)中可以看到, 当 $D=0$ 时, 两个真实目标均看成点目标, 在不同发射-接收通道中的RCS散射特性都是完全相关的, 不存在空间分集特性, 真实目标鉴别概率最低, 仅为55%~60%。这是因为真实目标和自卫式干扰机位置相同, 且不存在空间散射特性差异, 导致真实目标与假目标接收信号矢量之间的相关性变大, 聚类算法将真实目标聚到假目标类的可能性变大, 真实目标鉴别显著下降。但是, 聚类算法还有一定的鉴别能力是由于真实目标双程衰减和欺骗干扰单程衰减的差异, 使得真实目标与假目标接收信号矢量并不会完全相关。随着目标尺寸不断变大, 真实目标鉴别概率不断提高, 直至接近100%, 这是由空间散射特性带来的真假目标接收信号矢量之间相关系数不断变小带来的, 和理论描述相符。

从图3(b)中可以看到, 聚类分析算法对有源假目标的误判概率一直较低, 始终在0.01%以下, 这是由于真实目标尺寸并不会影响假目标的聚集性, 因此, 有源假目标误判概率不受目标尺寸的影响。

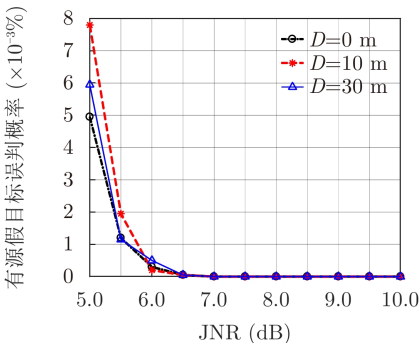
为分析多基地雷达布站结构对聚类算法目标鉴别性能的影响, 表1中给出了3种多基地雷达布站结构。第1种布站结构与图2的仿真参数相同, 作为参照; 第2种布站结构比第1种少1个发射站, 独立发射-接收信道数减少了1/2; 第3种布站结构中接收站孔径是第1种布站接收站孔径的1/2, 真实目标的空间散射特性更差。

在表1中的3种雷达布站下, 目标尺寸 $D=10\text{ m}$, 通过Monte Carlo仿真实验得到聚类分析算法的真假目标鉴别性能, 如图4所示。

相比于布站1的仿真结果, 在布站2下, 本文算法的鉴别性能下降, 真实目标鉴别概率变小, 有源



(a) 真实目标鉴别概率

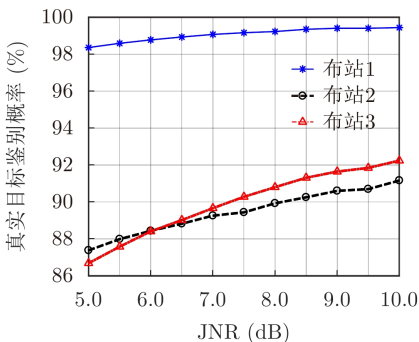


(b) 有源假目标误判概率

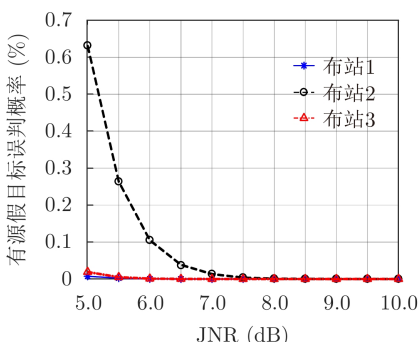
图 3 不同目标尺寸下鉴别性能仿真

表 1 多基地雷达布站 (m)

序号	发射站	接收站
布站1	[0, 0], [300, 0]	[-500, 0], [-250, 0], [0, 0], [250, 0], [500, 0]
布站2	[0, 0]	[-500, 0], [-250, 0], [0, 0], [250, 0], [500, 0]
布站3	[0, 0], [300, 0]	[-250, 0], [-125, 0], [0, 0], [125, 0], [250, 0]



(a) 真实目标鉴别概率



(b) 有源假目标误判概率

图 4 不同雷达布站结构下鉴别性能仿真

假目标误判概率变大。这主要是因为发射-接收通道数下降,真假目标的分辨维度降低,真假目标相关性的差异的体现更不明显,导致算法鉴别性能下降。

相比于布站1的仿真结果,在布站孔径更小的布站3下,本文算法的鉴别性能下降,真实目标鉴别概率变小,有源假目标误判概率基本不变。布站孔径通过影响真实目标空间散射特性来影响算法的鉴别性能,其分析与目标尺寸对算法影响的分析是类似的。布站3的布站孔径变小,真实目标的空间散射特性变差,真假目标之间的差异更小,聚类分析算法对真实目标鉴别概率降低。然而,布站空间的变化并不会影响有源假目标的聚集特性,因此,有源假目标误判概率几乎不受影响。

6 结束语

本文提出一种基于聚类分析的多基地雷达鉴别有源假目标方法,利用了空间分集带来的真实目标和有源假目标接收信号矢量之间相关性的差异。通过计算各目标接收信号矢量之间的相关系数,并利用相关系数对探测目标进行聚类分析,得到有源假目标类和真实目标类,完成目标鉴别。本文方法可应用于不同干扰调制方式产生的有源假目标,且可适用于多欺骗干扰场景下的假目标鉴别问题。但是,本文信号模型未考虑运动目标的多普勒信息,利用目标多普勒参数可进一步提高真假目标鉴别概率,这将作为下一步研究工作。

参 考 文 献

- [1] POISEL R A. Information Warfare and Electronic Warfare Systems[M]. Boston: Artech House, 2013.
- [2] WU Chuanshang and CHEN Baixiao. A recognition algorithm of VGPO jamming based on discrete chirp-Fourier transform[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2020, 2020: 37. doi: [10.1186/s13634-020-00694-3](https://doi.org/10.1186/s13634-020-00694-3).
- [3] YU Hengli, ZHANG Juan, ZHANG Linrang, *et al.* Polarimetric multiple-radar architectures with distributed antennas for discriminating between radar targets and deception jamming[J]. *Digital Signal Processing*, 2019, 90: 46–53. doi: [10.1016/j.dsp.2019.03.012](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2019.03.012).
- [4] 文才, 王彤, 吴亿锋, 等. 极化-空域联合抗机载雷达欺骗式主瓣干扰[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7): 1552–1559. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01739](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01739).
WEN Cai, WANG Tong, WU Yifeng, *et al.* Deceptive mainlobe jamming suppression for airborne radar based on joint processing in polarizational and spatial domains[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1552–1559. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01739](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01739).
- [5] CHERNYAK V S. Fundamentals of Multisite Radar Systems: Multistatic Radars and Multi-radar Systems[M]. London: CRC Press, 1998: 44.
- [6] BUTT F A, NAQVI I H, and NAJAM A I. Radar ECCM against deception jamming: A novel approach using bi-static and mono-static radars[C]. 2012 15th International Multitopic Conference, Islamabad, Pakistan, 2012: 137–141. doi: [10.1109/INMIC.2012.6511482](https://doi.org/10.1109/INMIC.2012.6511482).
- [7] 于恒力, 张林让, 刘洁怡, 等. 一种异构组网雷达系统抗欺骗式假目标方法[J]. *电子科技大学学报*, 2019, 48(5): 706–710. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2019.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2019.05.007).
YU Hengli, ZHANG Linrang, LIU Jieyi, *et al.* A method against deception-false-target jamming based on isomeric netted radars[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2019, 48(5): 706–710. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2019.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2019.05.007).
- [8] ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, ZHOU Yu, *et al.* Discrimination of active false targets in multistatic radar using spatial scattering properties[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(5): 817–826. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0147](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0147).
- [9] 孙闽红, 丁辰伟, 张树奇, 等. 基于统计相关差异的多基地雷达拖引欺骗干扰识别[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(12): 2992–2998. doi: [10.11999/JEIT190634](https://doi.org/10.11999/JEIT190634).
SUN Minhong, DING Chenwei, ZHANG Shuqi, *et al.* Recognition of deception jamming based on statistical correlation difference in a multistatic radar system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(12): 2992–2998. doi: [10.11999/JEIT190634](https://doi.org/10.11999/JEIT190634).
- [10] ZHAO Shanshan, LIU Nan, ZHANG Linrang, *et al.* Discrimination of deception targets in multistatic radar based on clustering analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(8): 2500–2508. doi: [10.1109/JSEN.2016.2516000](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2516000).
- [11] ZHAO Shanshan, ZHOU Yu, ZHANG Linrang, *et al.* Discrimination between radar targets and deception jamming in distributed multiple-radar architectures[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(7): 1124–1131. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0540](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0540).
- [12] SUI Mingyan, ZHOU Peng, WANG Ying, *et al.* Verification of compensation accuracy of high precision time and phase synchronization algorithms based on bidirectional synchronization chain[C]. 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xiamen, China, 2019: 1–6. doi: [10.1109/APSAR46974.2019.9048368](https://doi.org/10.1109/APSAR46974.2019.9048368).
- [13] 赵珊珊, 张林让, 李强, 等. 分布式多站雷达转发式欺骗干扰研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 138–143. doi: [10.11999/JEIT160118](https://doi.org/10.11999/JEIT160118).

- ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, LI Qiang, *et al.* Research on repeater jamming against distributed multiple-radar system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 138–143. doi: [10.11999/JEIT160118](https://doi.org/10.11999/JEIT160118).
- [14] ZHOU Shenghua, LIU Hongwei, ZHAO Yongbo, *et al.* Target spatial and frequency scattering diversity property for diversity MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(2): 269–276. doi: [10.1016/j.sigpro.2010.07.004](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.07.004).
- [15] XU Rui and WUNSCH II D C. Clustering[M]. Hoboken: Wiley, 2009: 74–76.
- [16] VIJAYA, SHARMA S, BATRA N. Comparative study of single linkage, complete linkage, and ward method of agglomerative clustering[C]. 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing, Faridabad, India, 2019: 568–573. doi: [10.1109/COMITCon.2019.8862232](https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862232).
- 刘子威：男，1989年生，讲师，研究方向为雷达信号处理、雷达自适应抗干扰技术和阵列信号处理。
- 赵珊珊：女，1989年生，讲师，研究方向为多站雷达信号融合技术、多站雷达协同抗干扰技术、雷达通信一体化技术。
- 杨 彪：男，1998年生，硕士生，研究方向为雷达信号处理、雷达通信一体化技术。
- 易民举：男，1997年生，硕士生，研究方向为雷达信号处理、多站雷达协同抗干扰技术。
- 责任编辑：马秀强