

# RIS辅助单站雷达抗欺骗式干扰

赵珊珊<sup>1</sup>, 谢 飏<sup>1</sup>, 刘子威<sup>1</sup>, 许华健<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 中国航天科工集团 8511 所, 南京 210007)

**摘要:** 多站雷达协同虽然能利用多视角探测和信息融合处理有效提高抗干扰能力, 但实际场景下很难满足其需要的探测条件, 又往往面临着组网被摧毁的风险, 所以单站雷达的抗干扰能力仍需提升。针对单站雷达探测视角单一, 得到的回波信息有限, 抗干扰能力不足等问题, 通过在单站雷达回波接收过程中加入可配置智能超表面(Reconfigurable intelligence surface, RIS)构造分布式探测条件, 接收目标多方向散射信号, 从而开辟单站雷达抗欺骗式干扰的新途径。仿真结果表明, 加入 RIS 能有效地构建虚拟通道, 能有效提高单站雷达的抗干扰能力。

**关键词:** 单站雷达; 可配置智能超表面; 数据级融合; 欺骗式干扰对抗; 相关性处理

**中图分类号:** TN973 **文献标志码:** A

## Anti-Deception Jamming of RIS-Assisted Single Station Radar

ZHAO Shanshan<sup>1</sup>, XIE Biao<sup>1</sup>, LIU Ziwei<sup>1</sup>, XU Huajian<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;  
2. 8511 Research Institute, China Aerospace Science & Industry Corp, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Although multi-station radar cooperation can effectively improve the anti-jamming ability by using multi-view detection and information fusion processing, it is difficult to meet the detection conditions in the actual scene, or it suffers from the risk of network destruction in practice. Therefore, it is still necessary to improve the anti-jamming ability of single station radar. Aiming at problems of single-station radar, such as single detection angle, limited echo information and insufficient anti-jamming ability, a distributed detection condition is constructed by adding a reconfigurable intelligence surface (RIS) in the echo receiving process of single-station radar to receive the multi-directional scattering signal of the target, thus opening up a new way for the single-station radar to resist deceptive jamming. Simulation results show that adding RIS can effectively construct virtual channel and improve the anti-jamming ability of single station radar.

**Key words:** single station radar; reconfigurable intelligence surface (RIS); data fusion; deception jamming countermeasure; correlation processing

## 引 言

欺骗式干扰是一种特殊形式的有源干扰<sup>[1]</sup>。它通过对接收到的雷达发射信号进行调制、延迟、转发

等操作,将虚假的目标信息嵌入雷达回波信号中。这种干扰方式会扰乱雷达对真实目标的探测、精确定位和航迹追踪,使敌方雷达产生多个虚假目标而真假难辨,从而达到伪装真实目标的效果。

数字射频存储(Digital radio frequency memory, DRFM)技术是现代电子对抗系统中有源雷达干扰机的主要组成部分。它通过精确地复制接收到的雷达信号并将其返回给雷达,从而混淆雷达,实现对敌方雷达的干扰。伴随DRFM技术的不断发展,有源欺骗式干扰技术也不断提高。欺骗式干扰技术具备多个显著优势。首先,它能以较小的功率实现令人满意的干扰效果。其次,它能够产生多个有源假目标,从而更有效地扰乱和干扰跟踪雷达系统。最后,由于现代科技的进步,欺骗式干扰设备的质量和体积被大大减小,具有更高的性价比。因此,欺骗式干扰技术及其对抗策略<sup>[2]</sup>已经引起了全球学术研究者的密切关注。如何提高雷达性能,使其能够对具有高度欺骗性的假目标进行有效的鉴别,这对雷达探测和提高其跟踪能力具有重要意义。因此,解决这个问题显得尤为重要。

尽管针对有源欺骗式干扰,单站雷达已经开发出各种各样的抗干扰措施,如频率捷变、极化特性差异、发射信号优化、DRFM量化误差、弹道轨道运动学信息、时频分析<sup>[3]</sup>以及压缩感知方法<sup>[4]</sup>等抗欺骗式干扰方法,这些能够有效地鉴别有源假目标。但是,只能从单一视角获取有限的回波信息导致抗干扰能力有限是现有单站雷达不得不面对的劣势。然而,多站雷达协同需要的条件在实际电子对抗场景下往往较难满足,还要时刻面临着组网被破坏的风险。因此,虽然多站雷达协同具有优良的抗干扰性能,但单部雷达的抗干扰能力挖掘仍然十分必要。如果想要单站雷达能够获取多视角探测信息,那么将多站雷达协同抗干扰<sup>[5]</sup>的技术架构拓展至单部雷达中,是一个值得深入研究的解决思路,而其关键就在于实现单部雷达下的分布式多视角探测。

在无线通信中广泛应用的智能超表面可重构信号传播环境,它为这一需求带来可能。可重构智能超表面(Reconfigurable intelligence surface, RIS)是一种新型的智能无线通信技术,通过在控制表面上大量配置的灵活无源或有源反射元件,对电磁波进行精确调控,从而实现对无线信号的调制、反射和聚焦。这项技术在提高通信系统容量、覆盖范围和能效方面具有巨大潜力,并且正在成为当前无线通信领域的研究热点之一。RIS目前在无线通信领域的主要应用包括提升网络性能<sup>[6]</sup>、降低误码率<sup>[7]</sup>、研究基于RIS的实时传输技术<sup>[8]</sup>、测量RIS在自由空间中的路径损耗<sup>[9]</sup>、在RIS辅助链路中进行信道估计的研究<sup>[10-12]</sup>,以及在移动网络中实现用户定位和目标检测的应用研究<sup>[13-14]</sup>。

目前,RIS已成功应用于双功能雷达通信系统,以同时提高传感和通信性能<sup>[15-18]</sup>。RIS辅助雷达系统在目标检测<sup>[19-20]</sup>、参数估计<sup>[21]</sup>、目标定位<sup>[22-23]</sup>和雷达通信一体化等方向的应用已逐步展开,但还未应用到雷达抗干扰这一领域,而其在改变电磁波传播方向方面的卓越特性能够有效提升雷达的抗干扰能力,是具有广阔应用前景的研究方向。

本文针对单站雷达抗欺骗式干扰需求,拟引入RIS,结合雷达站实现多波束接收,构建虚拟多站接收通道,探索单站多视角空间分集增益,通过采用多站雷达协同抗干扰等先进技术手段,全面提升单站雷达在复杂电磁环境下的抗干扰性能,从而增强其生存能力。相比于辅助接收站,RIS低功耗、低成本,还能通过移相改变电磁波传播方向,再由雷达采用多波束接收不同探测视角下的目标回波信号,不需要融合信息的数据传输,更易实现高精度相位对齐。

## 1 问题描述及信号模型

在应对欺骗式干扰时,如何在保留真实目标的前提下,有效地区分和排除有源假目标,显得尤为关键。因此,研究真实目标与虚假目标之间的特性差异,并加以运用,成为抗欺骗式干扰的一个关键要

素。因回波信号经RIS反射传播,虚拟接收通道的目标量测和回波模型与实际雷达探测模型不同,在RIS辅助单站雷达构建虚拟多站雷达下,对真假目标在空间位置聚集特性和空间散射特性上的差异进行研究,是实现虚拟多站协同抗欺骗式干扰的前提。RIS辅助传输的信号由于是非目标直接散射信号,雷达接收后的可量测信息及误差模型与传统雷达回波不同,这对现有的多站雷达数据级融合抗干扰方法提出了新的挑战。

雷达发射波束指向探测目标,接收采用多波束模式,接收到目标回波信号包括两部分:(1)雷达直接接收通道,由目标直接到雷达的回波,下面称为“直接通道”;(2)RIS辅助接收通道,由目标到RIS,再由RIS反射到雷达接收通道的回波信号,下面称为“间接通道”。RIS与雷达分布式布站,使得直接通道和间接通道观测目标存在足够的视角差异,以保证目标在不同接收通道间的空间分集特性。为保护雷达期望目标,干扰机在雷达发射和接收主波束内,对雷达实施欺骗式干扰,直接通道和间接通道均将接收到欺骗式干扰信号。

为实现RIS辅助单站雷达构建虚拟多站雷达的协同工作,直接通道和间接通道需进行空间对齐。根据雷达和RIS空间波束宽度,确定空间分辨单元,对探测区间进行划分和扫描。RIS的入射波束指向由其幅相参数决定,并由雷达进行统一控制,雷达可以得到回波信号经由RIS反射到间接通道时的相位数据。由数据传输链连接雷达控制单元和RIS,雷达控制单元将根据不同任务需求进行系统设计,对各RIS可调参数(布站、各阵元幅度和相移等)进行优化控制。

如图1所示,虚拟多站雷达系统由单站雷达和一个RIS辅助构建,雷达发射波束指向目标,两个接收波束分别指向目标和RIS。

以二维坐标平面为例,设雷达的位置坐标为 $[x_R, y_R]$ ,RIS的位置坐标为 $[x_{RIS}, y_{RIS}]$ 。假设在RIS辅助的虚拟多站雷达的探测范围内,存在一个真实目标,其坐标位置为 $X_T = [x_0, y_0]$ 。直接通道得到的量测值为 $Z_1 = [r, \theta]$ ,分别表示单站雷达通过直接接收通道得到的目标径向距离和方位角。间接通道可以直接得到的量测信息为 $d_{sum}$ ,其表示为雷达到目标到RIS的距离和信息。通过文献[24-25]可知,通过压缩感知中稀疏重构的方法可以估计目标到RIS的到达角为 $\varphi$ ,即目标相对于RIS的方位角,通过这种方法的测角误差为 $\sigma_\varphi$ 。所以,间接通道的量测值 $Z_2 = [d_{sum}, \varphi]$ 。

如果探测目标为真,真实目标作为真实存在的物理源,在直接通道中通过量测值 $Z_1$ 经过坐标转换可以得到探测目标的定位结果 $X_1 \sim \mathcal{N}(X_T, P_1)$ ,这里均假设定位结果是实际位置的无偏估计,其中 $P_1$ 为直接通道误差协方差矩阵。同理,在间接通道中通过量测值 $Z_2$ 可以得到探测目标的定位结果 $X_2 \sim \mathcal{N}(X_T, P_2)$ ,其中 $P_2$ 为直接通道误差协方差矩阵。由于 $X_1$ 和 $X_2$ 的均值相同,表明真实目标在一个误差椭圆范围内。也就是在虚拟多站雷达探测中,真实目标在直接通道和间接通道得到的定位结果转换到统一坐标系下是相对“集中”的。

鉴于角度欺骗困难,本文主要考虑自卫式转发干扰产生的距离欺骗。这种干扰方法通过捕获敌方探测雷达发射的信号,对其进行处理后重新发射,在目标所在区域生成有源假目标,达到干扰敌方探测设备的目的。这些生成的有源假目标与真实目标之间的距离受干扰机延迟转发时延的影响。由于直接通道和间接通道构成一种双基探测模式,相同距离的目标在同一个距离环上,如图2所示。干扰延迟决定着真实目标与假目标各自所在的距离环之间的距离大小。

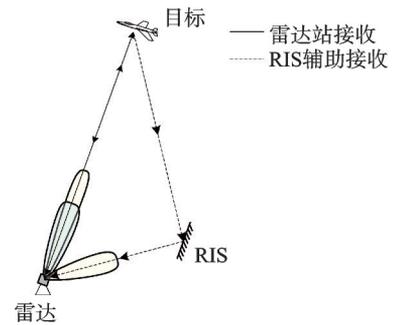


图1 虚拟多站雷达模型

Fig.1 Virtual multi-station radar model

假设欺骗距离为  $\Delta d$ , 如果探测目标为假, 通过直接量测值  $Z_1$  可以得到探测目标的定位结果  $X_1' \sim \mathcal{N}(X_{F_1}, P_1)$ , 通过间接通道量测值  $Z_2$  可以得到探测目标的定位结果  $X_2' \sim \mathcal{N}(X_{F_2}, P_2)$ 。

在直接通道中, 产生的有源假目标沿着目标与雷达站的延长线分布, 如图 2 中黑方块所示。直接通道中假目标的理论值为  $X_{F_1} = (x_1^f, y_1^f)$ , 式中

$$\begin{cases} x_1^f = (r + \Delta d) \cos \theta + x_R \\ y_1^f = (r + \Delta d) \sin \theta + y_R \end{cases} \quad (1)$$

在间接通道中, 产生的有源假目标分布在 RIS 的入射波束指向目标的延长线上, 如图 2 红圆点所示。间接通道中假目标的理论值  $X_{F_2} = (x_2^f, y_2^f)$ , 式中

$$\begin{cases} x_2^f = r_2' \cos \varphi + x_{\text{RIS}} \\ y_2^f = r_2' \sin \varphi + y_{\text{RIS}} \end{cases} \quad (2)$$

$$r_2' = \frac{(d_{\text{sum}} + 2 \times \Delta d)^2 - [(x_{\text{RIS}} - x_R)^2 + (y_{\text{RIS}} - y_R)^2]}{2[(d_{\text{sum}} + 2 \times \Delta d) + (x_{\text{RIS}} - x_R) \cos \varphi + (y_{\text{RIS}} - y_R) \sin \varphi]} \quad (3)$$

结合图 2 中黑方块和红圆点所在的位置可以得出  $X_{F_1} \neq X_{F_2}$ , 即在虚拟多站雷达探测中, 有源假目标在直接通道和间接通道得到的定位结果转换到统一坐标系下是相对“分散”的。

由于真实目标在一个误差椭圆范围内, 且假目标的理论值  $X_{F_1} \neq X_{F_2}$ , 这表明真实目标和假目标在空间上分布的方式有所不同。这种空间聚集特性的差异为进行有源假目标鉴别提供了理论基础。通过比较真实目标和假目标之间的空间分布差异, 可以有效地区分它们, 从而提高雷达系统对干扰的抵抗能力和作战效果。

## 2 有源真假目标鉴别算法

在虚拟多站雷达中, 将直接通道和间接通道获得的量测信息转换到以单站雷达为原点的直角坐标系中, 真实目标的位置是相对聚集在一起的, 而有源假目标的位置相对分散。点迹关联算法可以有效区分真实目标和有源假目标。这种算法依赖于基于卡方分布的假设检验方法, 通过设定合适的阈值来判断探测的目标到底是真实目标还是有源假目标。点迹关联算法可以根据目标的运动轨迹和特征, 对雷达探测到的目标进行有效区分, 从而提高识别的准确性和可靠性。

根据直接通道得到的量测信息  $Z_1$ , 通过坐标转换目标的定位结果  $X_1 = [x_1, y_1]^T$ , 式中

$$\begin{cases} x_1 = r \cos \theta + x_R \\ y_1 = r \sin \theta + y_R \end{cases} \quad (4)$$

量测值转换以单站雷达为原点的直角坐标系后, 由于各种随机误差的影响, 直接通道的量测值存在误差。这些误差近似服从均值为零的高斯分布, 即  $dX_1 \sim \mathcal{N}(0, P_1)$ , 其误差协方差矩阵  $P_1$  为

$$P_1 = E[dX_1 dX_1^T] = T_1 \mathbf{A}_1 T_1^T \quad (5)$$

式中:  $T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{bmatrix}$  是转换矩阵, 可通过对式(4)两边微分得到;  $\mathbf{A}_1 = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\theta^2)$ ,  $\sigma_r, \sigma_\theta$  分别表示直接通道的测距及测角误差。

间接通道的量测信息  $Z_2$  变换到以单站雷达为原点的统一直角坐标系后目标的坐标为  $X_2 = [x_2, y_2]^T$ , 其误差协方差矩阵为  $P_2$ 。

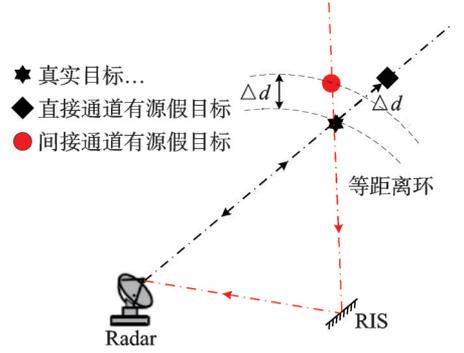


图 2 虚拟多站雷达及真假目标信息图  
Fig.2 Virtual multi-station radar and information map of true and false targets

$$\begin{cases} d_{\text{sum}} = \sqrt{(x_2 - x_R)^2 + (y_2 - y_R)^2} + \sqrt{(x_2 - x_{\text{RIS}})^2 + (y_2 - y_{\text{RIS}})^2} \\ \varphi = \arctan \frac{y_2 - y_{\text{RIS}}}{x_2 - x_{\text{RIS}}} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)计算求解,可以用距离和  $d_{\text{sum}}$  和目标相对于 RIS 的方位角  $\varphi$  表示目标位置坐标  $\mathbf{X}_2 = [x_2, y_2]^T$ , 式中

$$\begin{cases} x_2 = x_{\text{RIS}} + r_2 \cos \varphi \\ y_2 = y_{\text{RIS}} + r_2 \sin \varphi \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$r_2 = \frac{d_{\text{sum}}^2 - [(x_{\text{RIS}} - x_R)^2 + (y_{\text{RIS}} - y_R)^2]}{2[d_{\text{sum}} + (x_{\text{RIS}} - x_R) \cos \varphi + (y_{\text{RIS}} - y_R) \sin \varphi]} \quad (8)$$

由于虚拟多站雷达的接收信息都是由单站雷达进行处理,所以假设间接通道的距离误差与直接通道的距离误差相同,即虚拟多站雷达的间接接收通道的距离误差为  $\sigma_r$ ,其通过 RIS 的测角误差  $\sigma_\varphi$  为零均值、彼此不相关的高斯白噪声,则位置坐标  $\mathbf{X}_2$  的误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_2$  为

$$\mathbf{P}_2 = E[\mathbf{d}\mathbf{X}_2\mathbf{d}\mathbf{X}_2^T] = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{|C|^2} \left[ \frac{\cos^2 \varphi}{r_2^2} \sigma_r^2 + (c_{R_2} + c_{\text{RIS}_2})^2 \sigma_\varphi^2 \right] \quad (10)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{|C|^2} \left[ \frac{\sin(2\varphi)}{2r_2^2} \sigma_r^2 - (c_{R_1} + c_{\text{RIS}_1})(c_{R_2} + c_{\text{RIS}_2}) \sigma_\varphi^2 \right] \quad (11)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{|C|^2} \left[ \frac{\sin^2 \varphi}{r_2^2} \sigma_r^2 + (c_{R_1} + c_{\text{RIS}_1})^2 \sigma_\varphi^2 \right] \quad (12)$$

$$|C| = \frac{(c_{R_1} + c_{\text{RIS}_1}) \cos \varphi}{r_2} + \frac{(c_{R_2} + c_{\text{RIS}_2}) \sin \varphi}{r_2} \quad (13)$$

$$c_{\text{RIS}_1} = \frac{x_2 - x_{\text{RIS}}}{r_2} = \cos \varphi, \quad c_{\text{RIS}_2} = \frac{y_2 - y_{\text{RIS}}}{r_2} = \sin \varphi \quad (14)$$

$$c_{R_1} = \frac{x_2 - x_R}{r} = \cos \theta, \quad c_{R_2} = \frac{y_2 - y_R}{r} = \sin \theta \quad (15)$$

当测量目标是真实目标时,经过坐标转换,在统一直角坐标系下,通过直接通道和间接通道的测量值得到的位置信息,可得出两者坐标之间的差异近似符合均值为零的高斯分布,即

$$\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2 \sim \mathcal{N}(0, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (16)$$

通过式(16),协方差矩阵  $\boldsymbol{\Sigma}$  可以表示为

$$\boldsymbol{\Sigma} = E[\mathbf{d}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)\mathbf{d}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)^T] = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 \quad (17)$$

因此,目标鉴别统计量为

$$d_{\text{ma}} = (\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2) \quad (18)$$

由式(18)得到的目标鉴别统计量可以得出目标鉴别准则为

$$\begin{cases} d_{\text{ma}} \leq \eta & \text{目标为真实目标} \\ d_{\text{ma}} > \eta & \text{目标为有源假目标} \end{cases} \quad (19)$$

在提出的虚拟多站雷达模型中,门限  $\eta$  是由预设的显著性水平  $\alpha$  和量测数据维数  $\varepsilon$  决定的。其中,  $\alpha$  也表

示真实目标误判概率,对于该模型 $\epsilon=2$ 。虚拟多站雷达模型中鉴别门限 $\eta$ 的计算公式为 $\eta = \chi^2_{\epsilon}(1 - \alpha)$ 。

设虚拟多站雷达探测范围内存在一个真实目标,自卫式干扰机执行雷达信号延迟转发的操作,在直接通道和间接通道各形成一个假目标。如图3所示,如果直接通道中的某一目标与间接通道中的某一目标计算得到的马氏距离小于门限,则这两个目标就是真实目标。如果直接通道的一个目标与间接通道的所有目标的马氏距离都大于门限,则直接通道的该目标为假目标。反之,如果间接通道的一个目标与直接通道的所有目标的马氏距离都大于门限,则间接通道的该目标为假目标。

### 3 数值仿真实验

根据上述虚拟多站雷达数据模型,依据图3的算法流程图进行对应的仿真实验,设单站雷达的雷达位置坐标为 $[0,0]$  km,在雷达的探测范围中存在一个目标,其位置坐标为 $[30,50]$  km,RIS的坐标为 $[50,0]$  km,其他虚拟多站雷达的参数信息如表1所示。

假设将真实目标判断为假即真实目标误判的概率为 $\alpha = 0.01$ ,根据鉴别门限的计算公式可得门限为 $\eta = \chi^2_{\epsilon}(1 - 0.01) = 9.21$ 。

#### 实验1 虚拟多站雷达的鉴别能力仿真及分析

干扰机延迟转发雷达发射信号,产生一个有源假目标。逐步增大干扰机的转发延迟时间,也就是将欺骗距离从200 m逐步增加到2 000 m,每次增加200 m。通过 $10^4$ 次蒙特卡洛仿真统计出虚拟多站雷达在测距误差变大,测角误差如表1所示,对真假目标的鉴别能力随欺骗距离的变化趋势如图4所示。若测距误差如表1所示,只改变测角误差,且假定间接通道的测角误差为直接通道的1.5倍,在虚拟多站雷达直接通道的不同测角误差下也通过 $10^4$ 次蒙特卡洛仿真统计真假目标鉴别能力在不同测角误差下随欺骗距离的变化趋势,如图5所示。

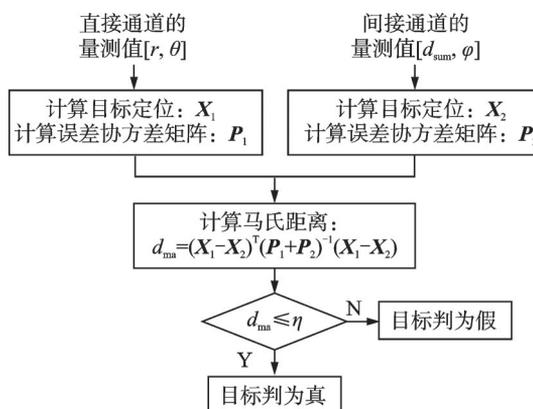


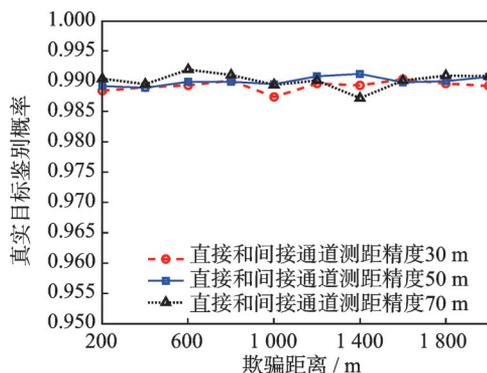
图3 算法流程图

Fig.3 Flow chart of algorithm

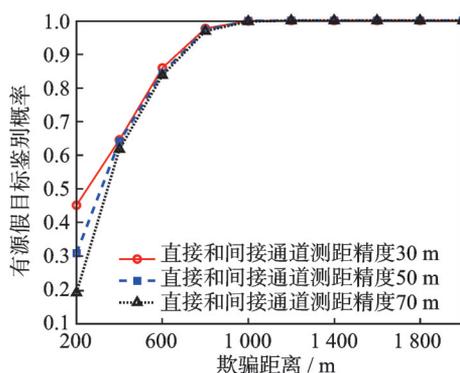
表1 虚拟多站雷达参数信息表

Table 1 Virtual multi-station radar parameter information table

参数	数值
直接通道测距误差/m	50
间接通道测距误差/m	50
直接通道测角误差/(°)	0.1
间接通道测角误差/(°)	0.15



(a) Discrimination probability of true target



(b) Discrimination probability of active false target

图4 虚拟多站雷达在不同测距误差下鉴别真假目标能力的仿真结果

Fig.4 Simulation results of ability of virtual multi-station radar to distinguish true and false targets under different ranging errors

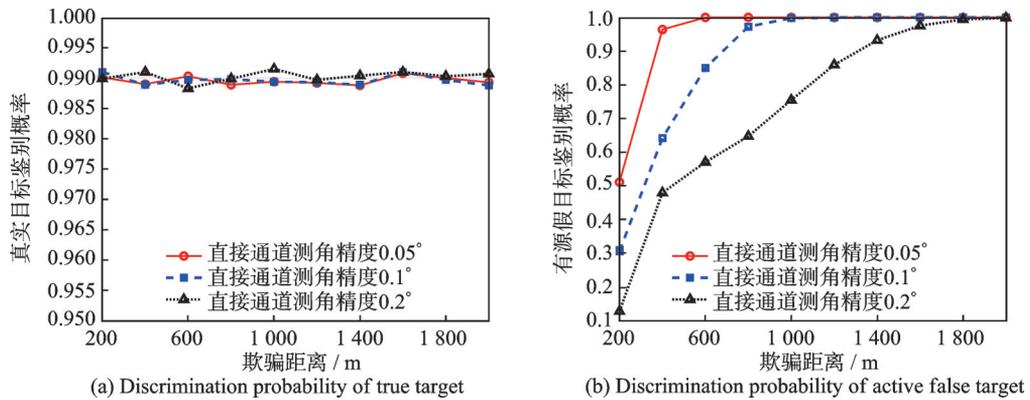


图5 虚拟多站雷达在不同测角误差下鉴别真目标能力的仿真结果

Fig.5 Simulation results of ability of virtual multi-station radar to distinguish true and false targets under different angle measurement errors

由于间接通道与直接通道的距离测量误差都取决于单站雷达的测距误差,根据图4(a)和图5(a)的结果,可以看出在直接通道和间接通道的不同测距和测角误差下,虚拟多站雷达对真实目标的鉴别能力基本能够达到预期,鉴别概率在预期值  $1 - \alpha = 0.99$  附近波动且波动范围较小。这说明鉴别算法在很大程度上能够稳定地识别真实目标,且误判率较低;从图4(b)和图5(b)中可以看出,对于干扰机产生的有源假目标而言,欺骗距离越大,测距和测角误差越小,其鉴别概率越高。当欺骗距离较小时,有源假目标鉴别概率与虚拟多站雷达的测距误差有一定的关系。相比较而言,虚拟多站雷达的测角误差对假目标的鉴别影响更为显著。

实验2 真实目标在不同位置下鉴别能力仿真及分析

表1列出了虚拟多站雷达的直接通道和间接通道的参数设置。假设有源假目标的距离欺骗为1 000 m,真实目标的位置在指定区域内连续变化,该区域范围设定为: X轴坐标在-50~100 km, Y轴坐标在30~130 km,变化间隔为10 km。针对该区域内的所有真实目标位置坐标点,均进行了5 000次蒙特卡洛仿真实验,并统计出虚拟多站雷达鉴别能力随目标位置变化的区域图,仿真结果如图6所示。通过这些仿真实验结果,可以更好地分析虚拟多站雷达探测不同真实目标位置下的鉴别性能表现。

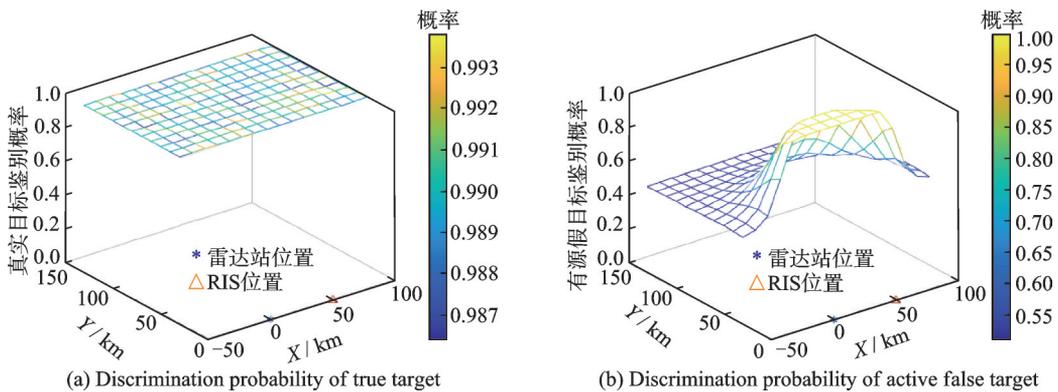


图6 虚拟多站雷达探测不同位置的目标时鉴别真假目标能力的仿真结果

Fig.6 Simulation results of ability of virtual multi-station radar to distinguish true and false targets in different positions

从图6(a)中可以看出,真实目标鉴别概率恒定在预设值附近,这说明所提鉴别算法在目标不同位置的情况下,基本实现了对真实目标的准确识别,同时能够保持较低的误判率。图6(b)显示了有源假目标鉴别概率的非对称分布特征,靠近RIS周围的部分比靠近雷达周围的部分衰减慢一些。越靠近雷达和RIS,目标与两者角度差异越大,鉴别能力越强。仿真实验验证了在虚拟多站雷达下使用有源假目标鉴别算法可以在对真实目标准确识别的基础上精准识别假目标。

### 实验3 RIS不同布站位置下鉴别性能仿真分析

虚拟多站的直接通道和间接通道的参数如表1所示,假设RIS的布站位置分别为 $[30,0]$ km、 $[40,0]$ km和 $[50,0]$ km,探究RIS布站位置变化对假目标鉴别概率的影响。

从图7(a)可以看出,真实目标鉴别概率恒定在预设值附近,说明在不同RIS布站位置下鉴别算法基本上能够持续地对真实目标进行准确识别,也就是不同的RIS布站位置对真实目标的鉴别性能影响不大。如图7(b)所示,有源假目标鉴别概率随RIS布站位置的变化而变化,RIS距离雷达越远,直接通道和间接通道在目标位置产生的角度差异越大,越容易实现假目标的鉴别。

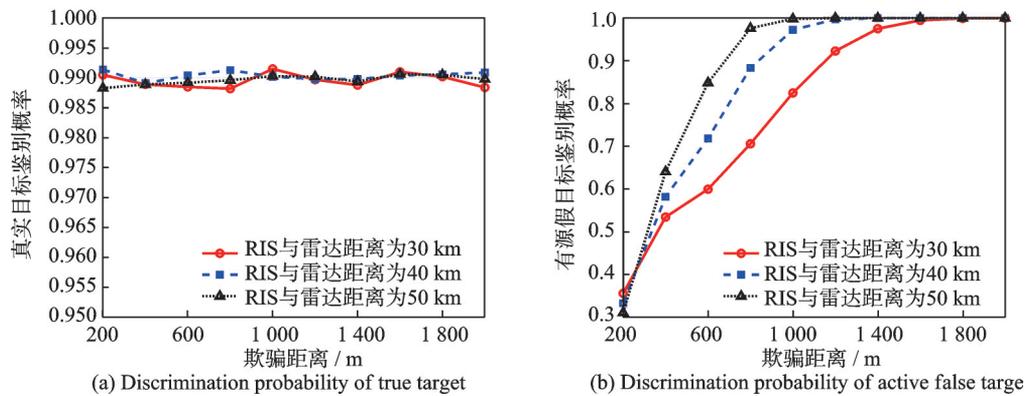


图7 不同RIS布站位置下鉴别真假目标能力的仿真结果

Fig.7 Simulation results of ability to distinguish true and false targets under different RIS station locations

## 4 结束语

欺骗性干扰对抗的实质是在确保真实目标准确识别的前提下,找出并剔除假目标,因此理解真实目标与假目标之间的区别是对抗欺骗性干扰的关键。本文探索了单站雷达引入RIS构建虚拟多站接收通道,研究了单站多视角空间分集增益的可行性,且对该虚拟多站雷达进行数据级抗欺骗式干扰,并对其抗干扰能力进行了数值仿真和分析。本文RIS布站位置仿真分析仅考虑了探测角度差异,并未考虑RIS位置对间接通道目标信噪比及测量误差的影响。因此,为得到RIS的最优布站,需要同时考虑这两个方面的影响,RIS的优化布站将是下一步的研究重点。

### 参考文献:

- [1] 周红平,王子伟,郭忠义.雷达有源干扰识别算法综述[J].数据采集与处理,2022,37(1):1-20.  
ZHOU Hongping, WANG Ziwei, GUO Zhongyi. Overview of radar active jamming identification algorithms[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(1): 1-20.
- [2] 唐斌,赵源,蔡天一,等.雷达抗有源干扰技术现状与展望[J].数据采集与处理,2016,31(4):623-639.  
TANG Bin, ZHAO Yuan, CAI Tianyi, et al. Present situation and prospect of radar anti-active jamming technology[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 623-639.
- [3] NOURI M, MIVEHCHY M, AGHDAM S A. Adaptive time-frequency kernel local fisher discriminant analysis to distinguish

- range deception jamming[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies. [S.l.]: IEEE, 2015: 13-15.
- [4] DING L, DAI L, LI R, et al. Discrimination and identification of time-delay repeater jamming and target echo by basis pursuit [C]//Proceedings of IET International Radar Conference. [S.l.]: IET, 2016: 14-16.
- [5] 赵珊珊.多站雷达协同抗欺骗式干扰方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2016.  
ZHAO Shanshan. The deception ECCM in multiple-radar systems[D]. Xi'an: Xidian University of China, 2016.
- [6] ZHANG H, DI B, SONG L, et al. Reconfigurable intelligent surfaces assisted communications with limited phase shifts: How many phase shifts are enough?[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4498-4502.
- [7] YE J, GUO S, ALOUINI M S. Joint reflecting and precoding designs for SER minimization in reconfigurable intelligent surfaces assisted MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(8): 5561-5574.
- [8] TANG W, DAI J Y, CHEN M Z, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: System design, analysis, and implementation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2683-2699.
- [9] TANG W, CHEN M Z, CHEN X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 20(1): 421-439.
- [10] MIRZA J, ALI B. Channel estimation method and phase shift design for reconfigurable intelligent surface assisted MIMO networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(2): 441-451.
- [11] 党建,李业伟,朱永东,等.可重构智能表面通信系统的渐进信道估计方法[J].系统工程与电子技术,2022,44(3):998-1006.  
DANG Jian, LI Yewei, ZHU Yongdong, et al. Progressive channel estimation method for reconfigurable intelligent surface communication system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 998-1006.
- [12] 张静,王栋,张梦雨.改进的IRS辅助毫米波MIMO级联信道估计[J].数据采集与处理,2022,37(6):1259-1267.  
ZHANG Jing, WANG Dong, ZHANG Mengyu. Improved IRS-assisted MMW MIMO cascade channel estimation[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(6): 1259-1267.
- [13] WYMEERSCH H, HE J, DENIS B, et al. Radio localization and mapping with reconfigurable intelligent surfaces: Challenges, opportunities, and research directions[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 52-61.
- [14] ELZANATY A, GUERRA A, GUIDI F, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for localization: Position and orientation error bounds[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 5386-5402.
- [15] JIANG Z M, RIHAN M, ZHANG P, et al. Intelligent reflecting surface aided dual-function radar and communication system [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(1): 475-486.
- [16] SONG X, ZHAO D, HUA H, et al. Joint transmit and reflective beamforming for IRS-assisted integrated sensing and communication[C]//Proceedings of 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). [S.l.]: IEEE, 2022: 189-194.
- [17] LIU R, LI M, LIU Y, et al. Joint transmit waveform and passive beamforming design for RIS-aided DFRC systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2022, 16(5): 995-1010.
- [18] HE Y, CAI Y, MAO H, et al. RIS-assisted communication radar coexistence: Joint beamforming design and analysis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2131-2145.
- [19] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. RIS-aided monostatic MIMO radar with co-located antennas[C]//Proceedings of ICASSP IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). [S.l.]: IEEE, 2022: 4998-5002.
- [20] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. Foundations of MIMO radar detection aided by reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022, 70: 1749-1763.
- [21] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. Radar target detection aided by reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28: 1315-1319.
- [22] ČIŠIJA E, AHMED A M, SEZGIN A, et al. RIS-aided mmWave MIMO radar system for adaptive multi-target localization [C]//Proceeding of 2021 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP). [S.l.]: IEEE, 2021: 196-200.
- [23] BUZZIT S, GROSSI E, LOPS M, et al. Exploiting reconfigurable intelligent surfaces in MIMO radar detection[C]// Proceeding of 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22). [S.l.]: IEEE, 2022: 1-6.

- [24] YANG Z, CHEN P, GUO Z, et al. Low-cost beamforming and DOA estimation based on one-bit reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022, 29: 2397-2401.
- [25] CHEN P, YANG Z, CHEN Z, et al. Reconfigurable intelligent surface aided sparse DOA estimation method with non-ULA[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 2023-2027.

**作者简介:**

赵珊珊(1989-),女,副教授,研究方向:雷达信号处理、雷达自适应抗干扰技术和阵列信号处理, E-mail: zss@njupt.edu.cn。



谢飏(1999-),通信作者,男,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理、多站雷达协同抗干扰技术, E-mail: xb1679002646@163.com。



刘子威(1989-),男,副教授,研究方向:卫星通信、雷达通信一体化、电子对抗。



许华健(1990-),男,高级工程师,研究方向:电子对抗。

(编辑:陈珺)