

**编者按:**我国在雷达技术领域有一大批创新思维活跃、学术造诣深厚的青年学者。他们的来稿总能给我们带来耳目一新的感觉和立意高远的欣喜,因此我们就有了打造一期高水平专刊的设想。本期以“青年学者雷达与雷达对抗技术创新论坛”为主题,在雷达及其对抗技术的主要研究方向,特邀了在国内外具有广泛影响力的7名著名青年学者就电子侦察、模式识别、雷达一体化等前沿技术和研究热点为我刊撰稿,特辑出版这本专刊,以飨读者。

**引用格式:**张磊,罗迎,张群. 雷达组网系统对抗有源干扰方法综述[J]. 信息对抗技术, 2023, 2(6):1-16. [ZHANG Lei, LUO Ying, ZHANG Qun. Review of countermeasures against active jamming for radar network[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(6):1-16. (in Chinese)]

## 雷达组网系统对抗有源干扰方法综述

张磊, 罗迎\*, 张群

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

**摘要** 雷达干扰和抗干扰是现代电子战的主要内容之一,是作战双方围绕雷达展开的电磁博弈。受限于有限资源,单基地雷达不足以对抗复杂电子干扰。雷达组网系统将异地部署的多部雷达连接起来对特定区域进行协同探测和信息融合,具有覆盖范围广、获取信息全、测量精度高的优势。更重要的是,雷达组网系统可以通过多视角观测和协同控制,形成对单一干扰机的体系优势。首先简要介绍了雷达组网系统的发展趋势,分析了其抗干扰能力;随后从对抗压制干扰、对抗欺骗干扰和资源管控3个方面对现有雷达组网系统对抗有源干扰方法进行了归纳总结;最后对雷达组网系统对抗有源干扰的发展趋势进行了展望。

**关键词** 雷达抗干扰;组网雷达;有源压制干扰;有源欺骗干扰;资源管控

**中图分类号** TN 972.1 **文章编号** 2097-163X(2023)06-0001-16

**文献标志码** A **DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.06.001

## Review of countermeasures against active jamming for radar network

ZHANG Lei, LUO Ying\*, ZHANG Qun

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract** Radar countermeasures and counter-countermeasures are significant aspects of modern electronic warfare, representing the electromagnetic battle between opposing forces centered around radar systems. Due to limited resources, a monostatic radar system is insufficient to combat complex electronic interference. The radar network connects multiple radars deployed in different locations to achieve collaborative detection and information fusion for specific areas, offering advantages of comprehensive coverage, complete information acquisition, and high measurement accuracy. More importantly, the radar network offers a systemic

advantage against individual jamming platforms through multi-perspective observations and coordinated control. This paper provides a brief overview of the development trends in radar network and analyzes their anti-interference capabilities. Furthermore, the existing methods for countering jamming, deceptive interference, and resource management in networked radar systems are summarized. Finally, the future trajectory of radar networks in combating active interference is discussed.

**Keywords** radar electronic counter-countermeasure(ECCM); radar network; active suppression jamming; active deception jamming; resource management

## 0 引言

雷达是重要的战场态势感知器,是作战双方电磁博弈的焦点<sup>[1]</sup>。干扰方可通过主动发射或转发电磁波,破坏雷达对目标的检测、跟踪和识别。这种干扰方式即为有源干扰,又称积极干扰。根据作用效果,雷达有源干扰分为有源压制干扰和有源欺骗干扰。其中,有源压制干扰指干扰机通过发射大功率噪声或类噪声信号遮盖目标回波,进而降低目标检测概率;有源欺骗干扰指干扰机通过截获—调制—转发雷达信号产生错误目标信息,从而误导雷达获取错误的战场情报。根据生成的错误信息,有源欺骗干扰可划分为距离欺骗干扰、速度欺骗干扰、角度欺骗干扰和假目标欺骗干扰等类型<sup>[2-3]</sup>。相比无源干扰,有源干扰可以通过控制发射源参数对干扰信号进行实时调整和优化,从而对雷达系统实施精确干扰,因而在电磁战场中有着广泛应用。在此背景下,雷达工作的电磁环境日益恶化,雷达系统对抗有源干扰的需求也在日益增加。

根据使用目的,现有的雷达抗有源干扰方法可大致分为4类:一是通过辐射功率控制<sup>[4]</sup>、参数捷变<sup>[5]</sup>等方式降低侦察设备对雷达辐射源的截获概率,扰乱侦测设备对雷达参数的估计,从而使其不能有效干扰雷达;二是通过旁瓣对消<sup>[6]</sup>、旁瓣匿影<sup>[7]</sup>、波形分集<sup>[8]</sup>等方法在雷达接收端抑制干扰信号,避免干扰信号进入信号处理设备;三是利用多域滤波<sup>[9]</sup>、子空间分离<sup>[10]</sup>和干扰重构对消<sup>[11]</sup>等信号处理手段抑制已经进入信号处理设备的主瓣干扰,这些抗干扰措施在抑制干扰的同时往往会造成目标信号的损失;四是对无法抑制并已经形成虚假目标的欺骗干扰,利用获取的动力学特征<sup>[12]</sup>、散射特征<sup>[13]</sup>、数字射频存储器(digital radio frequency memory, DRFM)量化误差

特征<sup>[14]</sup>等识别并剔除假目标。

然而,随着微电子技术、计算机技术和现代信号处理技术的快速发展与广泛应用,雷达有源干扰技术也获得了长足的进步,上述雷达抗有源干扰方法越来越难以奏效<sup>[15]</sup>。如侦察接收机灵敏度提高,可对低截获概率(low probability of interception, LPI)雷达进行侦察;干扰机响应速度快,能对参数捷变雷达实施近乎实时的跟踪干扰;DRFM量化位数增大,转发式干扰信号与雷达信号的差异急剧缩减。可以看到,单基地雷达在与现代先进干扰机的博弈中逐渐落于下风。因此,有必要探索新的雷达对抗有源干扰方法。

一种朴素的思想是,干扰机虽然能对单部雷达保持性能优势,但很难对多部雷达依然保持性能优势,因此可以通过多雷达协同工作,获得对单一干扰机“多对一”的对抗优势。换句话说,多雷达体系效能的发挥是对抗先进干扰机的关键。注意,实际场景中会出现多干扰机干扰多雷达的场景。当多雷达通过波束聚焦协同观测某一区域时,该区域内的自卫式干扰机或伴随式干扰机产生的干扰信号同目标回波一起从主瓣进入雷达接收机,该区域外的干扰机发射的干扰信号可通过旁瓣匿影等手段予以抑制,此时可认为在小范围内依然存在“多对一”的对抗局面。雷达组网系统是一种空间位置相互分离的多个雷达在统一控制下对特定监视区域进行协同探测,并进行信息融合以获得最优探测性能的雷达系统<sup>[16]</sup>。其中,多雷达空间分置可以确保从多视角观测目标,获取目标全面信息,是雷达组网系统产生体系效能的物理基础;探测信息融合或协同信号处理可以提升探测信息的可信度,提高组网雷达对目标的检测概率,是雷达组网系统发挥体系效能的技术手段;探测行为统一控制能够实现各雷达

性能互补,提升网络对电磁环境和目标特性变化的适应性,是雷达组网系统提升体系效能的有效途径。相比于单基地雷达,雷达组网系统具备覆盖范围广、获取信息全、测量精度高等优势,还具备较高的系统容错性。近年来,围绕雷达组网系统对抗有源干扰,国内外众多学者展开深入研究,已取得了一些阶段性成果。本文将对现有雷达组网系统抗有源干扰技术进行总结梳理,为其未来的研究和发展提供参考。

## 1 雷达组网系统概述

### 1.1 发展过程

文献[17]将雷达组网系统的发展过程划分为 4 个阶段,分别对应图 1 中的(a)~(d)。可以看到,第一阶段的雷达组网系统由若干独立工作的单基地雷达构成,它们只能将各自获取的目标状态(点迹或航迹)信息进行交互融合,而无法进行信号级的协同处理。第二阶段的雷达组网系统仍然由多部单基地雷达构成,但每部雷达能够接收并处理发射自其他雷达的目标回波信号,这种构型可视为分布式多输入多输出(multiple

input multiple output, MIMO)雷达,此时,雷达网络对回波能量的利用率有所提高。第三阶段的雷达组网系统由多个共址 MIMO 雷达构成,它们各自发射并接收雷达信号,并在子站间进行检测级的融合。此时,雷达组网系统的灵活性有了进一步提升(各个共址 MIMO 在发射雷达信号时既可以发射正交信号覆盖整个监视区域,也可以在相控阵模式下灵活控制波束指向),在接收回波信号时可以通过多波束形成技术检测跟踪多个目标。当然,这一阶段的信号融合仅发生在子站内部。第四阶段的雷达组网系统虽然也由多个共址 MIMO 雷达构成,但一部分子站只在发射模式下工作,而另一部分只在接收模式下工作,它们能接收处理来自所有发射站的回波信号,这意味着目标回波能量得到了最充分的利用。这种收发分离的形态还使得发射站可以发射高占空比、低峰值功率的探测信号,提高发射子站的隐蔽性和探测距离。在这种架构下,雷达组网系统可以在单发多收、轮发多收和多发多收等多种模式下工作。最后,可移动的发射站使得实时优化布站成为可能。

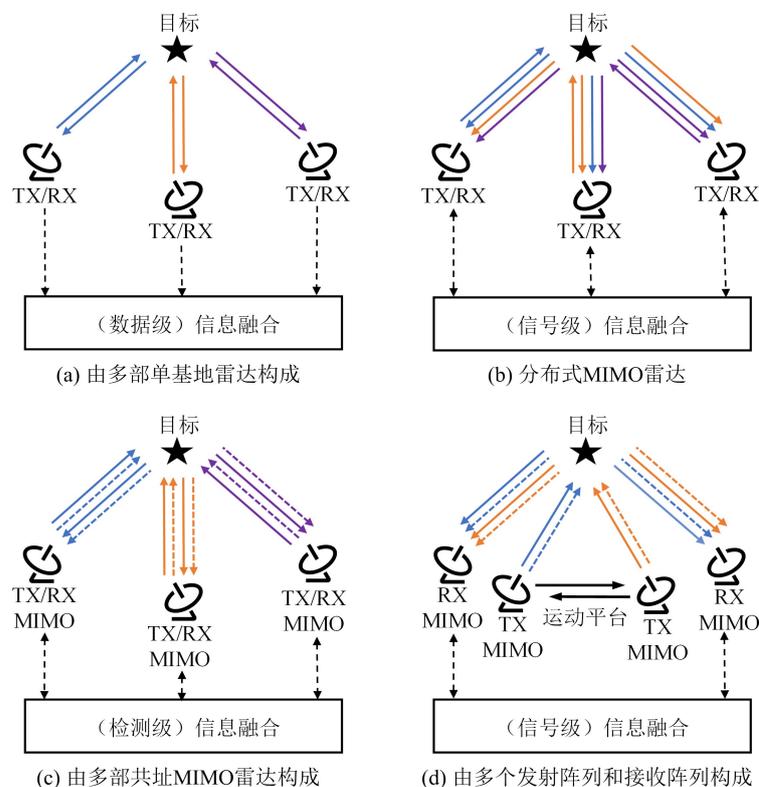


图 1 雷达组网系统的发展过程

Fig. 1 Evolution of radar networks

可以看到,雷达组网系统逐渐朝着由固定站

向运动平台、由点/航迹融合向原始数据融合、由

非相干处理向相干处理的趋势发展,工作模式也由 $N$ 发 $N$ 收的单站模式向 $M$ 发 $N$ 收的多站模式转变。这些转变提升了雷达组网系统获取目标信息的准确度和分配探测资源的灵活性,当然,也提升了雷达组网系统在复杂电磁环境下的生存能力。

## 1.2 抗干扰能力分析

雷达组网系统具有天然的抗干扰能力,主要体现在以下几个方面。

### 1.2.1 很强的反侦察能力

雷达网络包含了不同体制、不同频段、不同极化和不同工作模式的多部雷达,它们同时工作使得电磁信号高度密集、电磁环境高度复杂,增加了侦察设备接收处理信号、分选识别辐射源的难度,容易使干扰方侦察不清、判断不准、难以做出有效干扰决策。即使侦察设备截获并识别出某辐射源,也难以确定该辐射源是否参与组网,更无法从其窥见整个雷达组网系统的工作状态。

### 1.2.2 很强的抗压制干扰能力

组网雷达空间分开放置,且各自工作在不同的频段上,单个干扰机难以在空间和频谱上同时覆盖网内所有雷达。即使能够同时干扰所有雷达,也势必造成干扰能量的分散,降低对单部雷达的干扰效果。当干扰方采用多部干扰机分别干扰不同雷达时,雷达组网系统也能通过多站联合定位确定干扰源位置,并采取相应对抗措施,如通过空域滤波抑制干扰。无论何时,只要网内有雷达能够正常工作,雷达网络就能够有效检测和跟踪目标(当然,精度较全雷达融合有所下降)。

### 1.2.3 很强的抗欺骗干扰能力

由于物理目标具有空间状态的唯一性,多雷达从不同视角观测到的目标参数经过坐标转换和时空同步后近似相同。若要形成具有空间同源性质的假目标,干扰系统需要准确获取网内各雷达的位置坐标和工作参数;在释放干扰信号时,还需要与各雷达的脉冲发射周期及天线扫描周期同步。这些条件过于苛刻,干扰机很难满足。即使能够满足这些要求,干扰机自身也存在着不可避免的姿态变化和航迹抖动,产生的随机误差使得假目标难以形成稳定航迹,容易在数据关联和同源检测中被识别出来。此外,干扰机无法有针对性地干扰静默接收站。

## 2 雷达组网系统对抗压制干扰

噪声压制干扰具有设备简单、使用方便、效果可靠等优势,在各种干扰场景中有着广泛应用。当干扰机通过宽波束辐射压制干扰信号掩护目标突防时,组网雷达接收到的干扰信号高度相关。此时,可以利用干扰信号的这种相关性设计对消方法予以滤除。本节将现有雷达组网系统对抗压制干扰方法归纳为相干对消、盲源分离和子空间投影3类并分别予以介绍。

### 2.1 相干对消方法

多基地雷达通过相干对消方法抑制干扰最早见于文献[18]。当2个接收站接收到的类噪声干扰信号强相关而目标回波相互独立时,可以通过自适应估计加权系数使得2路干扰信号同相相减而回波信号得以保留。在实际应用中,同源干扰信号的空间相关性很容易得到满足。而回波信号的空间相关性可以通过改变雷达接收站的空间部署实现。根据文献[19],若把目标看作天线,当2部雷达不在该“天线”的同一接收波束内,它们接收到的目标回波是相互独立的。换言之,只要雷达观测视角的差异足够大,就能实现接收回波去相关。利用干扰信号与目标回波信号的这种空间相关性差异,文献[20]又提出一种基于LMS算法的分布式雷达抑制主瓣压制干扰方法。实验结果表明,这种自适应滤波方法对密集假目标干扰同样有效。

以上2种方法均默认干扰信号的空间相关性满足算法要求。实际中,同源干扰信号到不同接收站的传播时延和多普勒频率存在差异,这种差异会降低干扰信号的空间相关性。为了解决这个问题,文献[21]首先将接收信号转换至距离-多普勒域,随后利用互功率谱同步估计干扰信号的时延和多普勒频差并进行补偿,最后直接在距离-多普勒平面进行自适应对消。但是这种方法忽略了脉内多普勒频差对干扰信号相关性的影响。文献[22]在快时间域上利用互相关函数分步估计干扰信号到不同站点的时延和多普勒频差并予以补偿,随后进行多平台的干扰信号自适应对消。在自卫式干扰场景下,干扰信号发生器与待检测目标处于同一位置,经过时延补偿后,干扰信号与目标回波同时对齐,相干对消不会影响目标的分布;但是在伴随式干扰场景下,干扰源与

目标的空间位置并不一致,时延补偿后只有干扰信号对齐,而目标位于不同的距离单元,这时候进行相干对消会产生重复假目标影响目标检测,需要设计算法对其进行识别和剔除<sup>[23]</sup>。总的来说,多基地雷达通过相干对消方法抑制压制干扰信号需要经过“时延和多普勒频差估计与补偿—相干对消—重复假目标剔除”3个步骤。文献[24]还将相干对消方法应用于欺骗干扰的抑制,并用一个二元积分假设检验识别假目标:对参考信号和对消后的信号同时进行目标检测,当某一距离单元同时检测出目标,才判定其为真实目标。这是显然的,因为参考信号中的真实目标在对消前后没有发生位置的变化。

相干对消方法需要准确估计对消系数,不恰当的对消系数会导致干扰残留和回波损失。为此,文献[25]创造性地提出了一种不依赖参数估计的另类对消方法:在信号比特征域对干扰信号进行平滑滤波。信号比是指两路信号经过平方律检测后的比值,定义如下:

$$\chi_{mm'} = \frac{|r_n(t, q)|^2}{|r_{n'}(t, q)|^2} \quad (1)$$

式中,  $r_n(t, q)$  和  $r_{n'}(t, q)$  分别表示第  $n$  和第  $n'$  个雷达的接收信号,已经经过时延补偿,  $t$  和  $q$  分别表示快时间和慢时间。对于某距离单元,若只存在干扰信号,由于同源干扰信号空间相关,因此  $\chi_{mm'}$  是一个仅与天线增益和干扰机位置有关的常量;若该距离单元还存在目标回波,则  $\chi_{mm'}$  还与  $n$  和  $n'$  两站观测到的目标雷达散射截面积 (radar cross section, RCS) 有关,因此呈现随机起伏的状态,相比只存在干扰信号时的  $\chi_{mm'}$  有着明显差异。为了消除随机噪声的影响,还需进行如下多脉冲非相干积累和多站非相干积累:

$$\varphi_n(t) = \frac{\left(\sum_{q=1}^Q |r_1(t, q)|\right)^2}{\left(\sum_{q=1}^Q |r_n(t, q)|\right)^2}, n = 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \sum_{n=2}^N |\varphi_n(t) - E[\varphi_n(t)]| \quad (3)$$

式中,  $Q$  是用于非相干积累的脉冲个数,  $N$  是雷达个数,  $E[\cdot]$  表示取平均值。通过两步非相干积累,进一步平滑了特征域的背景噪声,也更加凸显了目标。当然,该方法也仅适用于自卫式干扰场景,且所需的时间空间资源更多。

## 2.2 盲源分离方法

盲源分离是一种信号处理技术,旨在从混合信号中通过数学方法分离出原始源信号,而无需混合过程或源信号的先验知识。文献[26]利用噪声压制干扰信号与回波信号互不相关,以及雷达组网系统多通道接收的特点,将盲源分离技术应用于干扰信号与回波信号的分离。其处理流程同前述方法相似,包括时延补偿、盲源分离和重复假目标剔除3个主要环节。其中,剔除虚假目标采用了多站联合定位的方法。盲源分离方法降低了对多站接收的目标回波的独立性要求,但仍需要满足干扰与回波不相关的要求,因此无法应对转发式干扰。

## 2.3 子空间投影方法

子空间方法是一类重要的阵列信号处理方法,其基本思想是数据的大部分信息存在于一个低维子空间。子空间投影方法是一种基于子空间模型的数据降维和特征提取方法,通过将数据投影到不同的子空间,实现对数据结构的保留和提取。文献[27]将多站雷达看作一个大的阵列天线,通过分析多路信号的协方差矩阵发现同源干扰信号处于一个单秩子空间中,而回波和噪声信号占满整个信号空间。基于这种差异,作者通过特征值分解划分干扰子空间和噪声子空间,并将接收信号投影到噪声子空间实现干扰抑制。虽然这种子空间投影方法会造成回波信号的损失,因为回波信号的部分能量落入干扰子空间,但这种“组网雷达阵列化”思想以及多通道信号联合处理的思想依然提供了一种新的多站雷达协同抗干扰思路。

## 3 雷达组网系统对抗欺骗干扰

对于与雷达信号高度相似的主瓣欺骗干扰信号,现有干扰抑制方法无法予以剔除。经过信号处理后,欺骗干扰信号将产生大量逼真假目标,使雷达无法识别并跟踪真实目标。因此,雷达组网系统对抗欺骗干扰就是通过融合多雷达的观测信息,从观测到的大量目标中甄别出真假目标。根据信息融合的层次,雷达组网系统对抗欺骗干扰方法可划分为数据级抗干扰和信号级抗干扰2大类,本节将根据公开文献归纳总结这2类抗干扰方法。多基地合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 抗欺骗干扰作为2类方

法结合使用的典型应用,也将单独介绍。

### 3.1 数据级抗欺骗干扰

物理目标的空间状态(位置和速度)具有唯一性,而组网雷达的空间分布具有多样性,因而同一时刻不同雷达观测到的目标状态具有多样性,比如目标分布在不同距离和多普勒单元,但经过坐标转换后,不同雷达对同一目标的量测值又是相对集中的。对于欺骗干扰,当干扰机无法获知网内所有雷达的工作参数或受硬件限制无法针对各雷达分别调制干扰参数时,往往采用同一组干扰参数调制所有截获的雷达信号。此时,同一时刻不同雷达观测到的假目标具有相同的量测值(假设干扰信号已经对齐),但转换到同一坐标系又是相对分散的。这种假目标也被称为非协同假目标,如图2所示。

根据物理目标与非协同假目标在空间状态上的差异,文献[28]提出一种基于同源量测融合的假目标辨识方法。各站将量测值转换到统一坐标系后,首先两两进行最近邻关联滤除部分虚假点迹,随后利用量测值的欧式距离进行同源检测从而进一步剔除假目标。该方法简单易行,具有较高的实用价值。文献[29]采用广义协方差交叉(generalized covariance intersection, GCI)融合不同传感器的数据,利用GCI融合的迫零性质,把坐标转换后位置相对分散的非协同假目标视作虚警并予以抑制。进一步,文献[30]提出一种联合位置信息和速度信息的假目标识别方法。该方法利用量测值的马氏距离进行同源检测。在同源检测阶段首先利用位置信息进行点迹融合,在此基础上再利用速度信息进一步进行点迹融合。较之只利用位置信息,位置和速度信息联合融合能够进一步提升假目标识别概率。需要指出的是,雷达对目标的定位误差实际上由雷达对目标的测量误差和雷达对自身定位的站址误差2部分构成,以上2种方法均没有考虑雷达站址误差。文献[31]提出一种考虑站址误差的假目标鉴别方法,通过改进坐标转换后的定位误差协方差矩阵,进一步改善量测值马氏距离的分布情况,并最终降低雷达组网系统被欺骗概率。如果各站数据并未经历坐标转换,非协同假目标在不同雷达观测下的多普勒频率是近似相同的,文献[32]根据这个特点通过比较多普勒频率识别假目标;当干扰信号经过时延补偿后,非协同假目

标在不同雷达观测下的距离又是近似相同的,文献[33]据此采用相干聚类方法鉴别假目标。文献[34]也提出了一种联合位置和多普勒信息识别假目标的方法,只不过首先利用各站观测到的假目标多普勒频率近似相同这一特点滤除一部分假目标,随后在统一坐标系下利用假目标空间位置的分散性进一步甄别假目标。这种方法不需要像文献[30]那样计算目标的真实速度。

以上数据级抗干扰方法实际上是衡量目标空间状态在不同雷达观测下的分散程度。分散程度既与雷达的量测误差(如果是位置信息,还需考虑站址误差)有关,还与假目标的状态设置有关。以位置信息为例,当各雷达站点的量测误差较大时,不同雷达对同一目标的位置估计会有较大出入,这种差异甚至会超过检测门限,导致将真目标误判为假目标;而在远场条件下,干扰机可以通过设置较小的转发时延让假目标落在同一空间分辨单元<sup>[35]</sup>,使雷达网络将假目标误判为真目标。以多普勒信息为例,当各雷达站点的多普勒分辨率较低时,真实目标在各站点测量下的多普勒频率比较接近,也可能使得真目标误判为假目标<sup>[32]</sup>。由此可知,干扰方通过控制干扰参数,使得各雷达观测下的假目标空间状态相对集中(在检测门限范围内)就可以有效干扰雷达组网系统<sup>[36]</sup>。

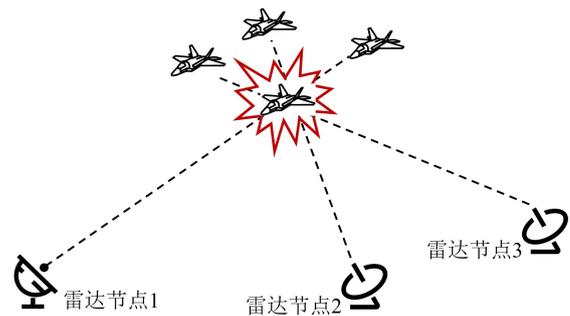


图2 非协同假目标示意图

Fig. 2 Illustration of the uncooperative false targets

在实际作战场景下,干扰方为了确保干扰效果常采用多机协同干扰的方式。例如,多架电子战飞机(electronic combat air vehicles, ECAV)在获取组网雷达工作参数的基础上,通过控制自身位置和干扰延时,使产生的虚假目标收敛于空间一点,即产生协同假目标。在此基础上再通过规划自身运动轨迹,使假目标按预设轨迹运动,产生虚假航迹<sup>[37]</sup>,如图3所示。

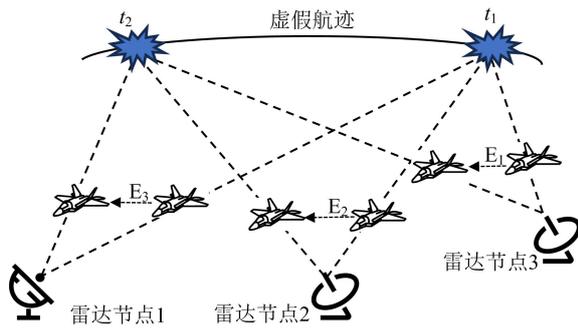


图3 虚假航迹示意图

Fig. 3 Illustration of the false track

由于ECAV在侦测雷达位置时存在量测误差,在编队飞行和调制干扰信号时也会不可避免地引入一些随机误差,因此虚假航迹和真目标航迹还是存在一定的统计特性差异<sup>[38]</sup>。在此基础上,文献[39]利用D-S证据理论融合干扰机功率放大器特征和目标运动特征共同鉴别虚假航迹。这种方法也可以视为一种数据级与信号级协同抗干扰方法。正因为协同假目标干扰需要同时干扰所有雷达,所以文献[40-41]分别提出一种利用T/R-R型异构网络对抗假目标及虚假航迹的方法。因为干扰机无法侦察到静默接收站,所以R站可能未遭受欺骗干扰,或者观测到的假目标与T/R站是非协同的。此时可以利用R站的冗余观测信息鉴别假目标。

### 3.2 信号级抗欺骗干扰

基于数据融合的组网雷达协同抗欺骗干扰方法虽然具有原理明确、操作简单、工程可实践性强的优势,但因为丢弃目标散射特征而不能完全发挥雷达组网系统体系优势。信号级抗欺骗干扰方法是指利用信号复包络序列鉴别真假目标。本小节将主要介绍基于回波相关性差异的抗欺骗干扰方法,并简要介绍其他几种方法。

#### 3.2.1 基于回波相关性的鉴别方法

假设雷达组网系统各站点间的基线足够长,满足回波独立性条件,而干扰机全向辐射的干扰信号经历不同的收发调制和传播损耗,仍然保持较高的相关性。文献[42]首先利用目标回波与干扰信号的这种空域相关性差异提出一种基于相关性检验的多基地雷达识别假目标方法。该方法要求所有接收站将检测到的目标两两进行相关性检验,相关性度量定义如下:

$$\mu_{pp'} = \text{Re}((\xi_p^n)^H (\xi_{p'}^{n'})) \quad (4)$$

式中, $\xi_p^n$ 和 $\xi_{p'}^{n'}$ 分别表示第 $n$ 部雷达观测到的第 $p$ 个目标和第 $n'$ 部雷达观测到的第 $p'$ 个目标的慢时间复包络序列, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部操作。若 $\mu_{pp'}$ 大于门限 $\eta$ ,则认为这2个目标均是假目标,其中门限 $\eta$ 是在真实目标回波完全独立假设下根据 $\mu_{pp'}$ 的概率分布和系统所能容忍的漏警率计算得到的。进一步,文献[43]研究了目标回波在部分相关模式下的目标辨识方法。其操作过程与文献[42]基本相似,唯一差异体现在自适应检测门限 $\eta$ 的计算上,需要根据目标尺寸预估目标回波在不同接收站的相关系数,然后再计算 $\mu_{pp'}$ 的概率分布。

这2种基于回波相关性检验的抗欺骗干扰方法需要用到多个脉冲的回波数据,因而只适用于快起伏目标。对于散射特性在慢时间域缓变甚至保持不变的慢起伏目标,需要研究单脉冲鉴别方法。为此,文献[44]提出一种对目标幅度比进行聚类分析的假目标识别方法,该文分析了真假目标幅度比特征,发现真目标的幅度比由目标到各接收站点的距离比和目标在各接收站的观测RCS之比决定,因而在站间随机分布,而同源假目标的幅度比近似相等。这也与文献[25]的基本思想一致。利用这种差异,聚类法可以很好地识别出假目标。

由于幅度比聚类法只利用了目标单次回波信号,在时域和空域均无累计效果,因而受噪声随机起伏的影响较大,仅在较高干信比条件下有理想效果。为了解决这一问题,文献[45]提出一种基于目标相似性的单脉冲鉴别假目标方法,作者认为,同源假目标的回波矢量高度相关,而真实目标的回波矢量相互独立,因此可利用该差异鉴别假目标。在多发多收雷达架构下,每个目标经过正交匹配滤波获得一个由多通道信号幅度组成的回波矢量,随后所有目标两两进行相关性检验就可以鉴别出假目标。该文的一大创新是用如下的厄密特距离(Hermitian distance, HD)来衡量2个复矢量 $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 的相关性:

$$D_H(\mu_1, \mu_2) = \cos^2 \theta_H = \frac{|\langle \mu_1, \mu_2 \rangle|^2}{\|\mu_1\| \|\mu_2\|} \quad (5)$$

式中, $0 \leq \theta_H \leq \pi/2$ 是 $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 之间的Hermitian角, $\langle \mu_1, \mu_2 \rangle = \mu_1^H \mu_2$ 是复矢量 $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 的内积。但该方法在本质上与文献[41]所提基于慢时间复包络序相关性检验的假目标鉴定方法相同,只

不过是用空间采样代替了慢时间采样。同样,基于多通道信号幅度组成的回波矢量,文献[46]首先分析了多干扰源条件下各类目标的相关性,随后用聚类分析方法鉴别真假目标:经过聚类后,同一干扰源生成的假目标聚集成一类,各真实目标单独成一类。相比前一种方法,该聚类分析法能够适用于多干扰源场景。

以上所有真假目标鉴别方法均基于这样一个前提条件:网内所有雷达都接收到了目标回波/欺骗干扰信号,并且以100%的概率检测出了所有目标,但这种假设过于理想。此外,以上方法大多需要目标两两进行相关性检验,实施过程较为繁琐。为此,文献[47]提出了一种基于多站联合似然比检测的目标检测/鉴别方法,在多发多收雷达架构下将目标检测/鉴别问题建模成一个多假设检验问题:

$$\begin{cases} H_0: \mathbf{x} = \mathbf{n}; \\ H_i: \mathbf{x} = \xi_i + \mathbf{n}, i = 1, 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $H_0$ 假设用于目标检测, $H_1$ 和 $H_2$ 假设分别表征真目标和假目标的存在, $\xi_i$ 是多部雷达观测数据拼接起来的信号矢量, $\mathbf{n}$ 是噪声矢量。雷达组网系统利用非相干积累检测器完成目标检测后再采用广义似然比检测器(generalized likelihood ratio test, GLRT)鉴别真假目标。在估计 $\xi_1$ 和 $\xi_2$ 时,作者利用真假目标回波空间相关性差异,引入了一个干扰特征矩阵 $\mathbf{A}$ 用来约束它们( $\mathbf{A}\xi_1 \neq 0, \mathbf{A}\xi_2 = 0$ )。这种似然比检测方法虽然避免了烦琐的相关性检测,但需要精确估计干扰特征矩阵 $\mathbf{A}$ 。

### 3.2.2 基于极化散射特性的鉴别方法

极化,又称偏振,表征了电磁波传播过程中电场矢量的方向和强度随时间变化的性质<sup>[48]</sup>。雷达目标的极化特性,则是指雷达目标对入射电磁波的变极化效应,一般可用一个相干矩阵来表征这种变极化效应,即“Sinclair”极化散射矩阵(polarization scattering matrix, PSM)。一般而言,PSM随雷达工作频率和目标姿态角变化,在给定的频率和观测视角下,PSM能够表征目标散射特性的全部信息。文献[49]率先将目标极化信息引入多雷达系统进行真假目标识别。在全极化组网雷达架构下,真实目标在各视角观测下的PSM互不相同。根据干扰信号模型,假目标的等效PSM是一个由干扰机天线的接收极化和发射

极化共同决定的秩一矩阵,在各个视角下都可以用一个干扰特征矩阵约束。因此,采用和文献[45]相似的方法,文献[49]用GLRT同步完成了目标的检测与鉴别。虽然干扰特征矩阵的精确估计问题仍未解决,但极化信息的引入为对抗假目标欺骗干扰提供了另一种思路。

### 3.2.3 基于能量空间分布的鉴别方法

前面在介绍数据级抗欺骗干扰方法时指出,非协同假目标的空间分布具有分散性,即转换到统一坐标系下不能汇聚于空间一点。换言之,对于某空间分辨单元,若存在一非协同假目标,其只能出现在部分雷达的接收回波中,如图4(a)所示;相反,若有一真实目标存在于该空间分辨单元,所有雷达均能接收到该目标的回波,如图4(b)所示。据此,在多雷达协同检测模型下,文献[50]提出一种基于回波能量空间分布的抗欺骗干扰方法,利用回波在接收信号矢量上的能量分布差异构建似然比检测器鉴别真假目标。但是很明显,这种方法无法识别协同假目标。

### 3.2.4 其他方法

数据级抗干扰方法利用的是目标的空间信息(距离和多普勒),信号级抗干扰方法利用的是目标的散射信息,这些信息结合起来才能更完整地描述目标。同样地,信号级抗干扰方法和数据级抗干扰方法相结合才能更高效地识别欺骗假目标。文献[51]提出一种基于多维信号联合的多基地雷达对抗距离-速度复合欺骗干扰方法,在利用相关性检验方法识别出部分假目标后,再利用同源检验方法识别出剩余的假目标。仿真结果表明,引入目标空间信息可以削弱脉冲个数对相关检验法的影响。

对于常规雷达构成的雷达组网系统,多视角多脉冲观测下的回波复包络序列已经包含了丰富的目标散射信息,理论上可以提取包含相关性在内的众多表征真假目标差异的特征,关键在于如何挖掘这些特征差异。文献[52]将卷积神经网络与回波信号处理相结合,利用神经网络自适应特征提取的优势,从回波数据中提取更全面更多维更深层次的特征差异用于真假目标辨识,获得了比现有相关性检验方法更好的识别性能。将神经网络应用于真假目标辨识也为组网雷达对抗欺骗干扰提供了一种新的思路。

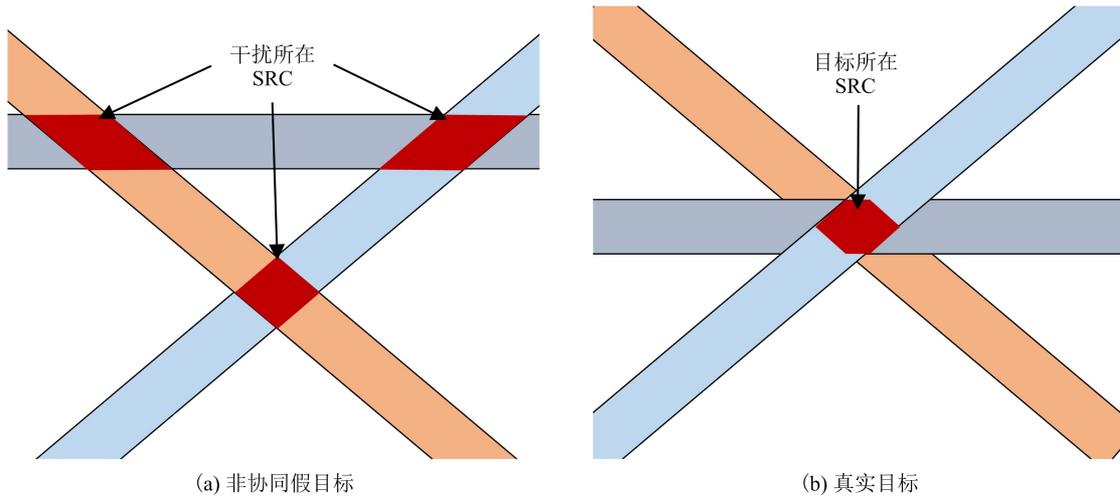


图 4 非协同假目标与真实目标的回波能量空间分布情况

Fig. 4 Spatial distribution of echo energy between uncooperative false target and physical target

### 3.3 多基地 SAR 抗欺骗干扰

SAR 是一种利用合成孔径原理获取地表目标高分辨二维像的有源遥感雷达系统,具备全天候全天候观测能力,广泛应用于地质勘探、环境检测、军事侦察等领域。近年来,随着应用场景的扩展,多基地 SAR 成像技术得到越来越多的关注。相比单基地 SAR,多基地 SAR 利用多个基线产生的多组相干回波数据,通过联合处理和分析,进一步提高了成像质量。在军事斗争领域,围绕 SAR 及多基地 SAR 的欺骗干扰技术也在不断发展。以转发式欺骗干扰为例,干扰机通过截获 SAR 信号、分析其参数、按预设假目标形态调制并转发 SAR 信号,可以在指定区域生成虚假目标,干扰 SAR 系统对地面目标的检测与识别。

相比 SAR 欺骗干扰技术的快速发展,多基地 SAR 抗欺骗干扰技术的发展略显滞后,近两年才有一些成果问世,其操作流程可归纳为“假目标检测与识别—假目标定位与分类—干扰源定位—干扰信号抑制与重新成像”<sup>[53-55]</sup>。具体讲,SAR 图像中感兴趣的目標是人造目标,通常具有较高的反射率和较明确的几何形状,与周围地物存在明显差别,因此可以很容易地从 SAR 图像中检测出来。从检测出的目标中识别出假目标则需要结合假目标的空间分布特性。同前面介绍的非协同假目标一样,假目标在多基地 SAR 图像中的分布较为分散,如果对两幅 SAR 图像中的所有目标两两进行配对,真目标能在第二幅 SAR 图像中至少找到一个“分身”与

之关联,而假目标与第二幅 SAR 图像中的所有目标均无法关联,利用这种差异就可以从检测到的目标中识别出假目标。在多干扰机场景下,假目标由不同的干扰源产生,为了准确定位干扰源,需要对假目标根据干扰源进行分类。对于距离欺骗假目标,其瞬时多普勒频率与干扰机保持一致,根据 SAR 成像原理,由同一干扰机生成的假目标分布在同一条等多普勒线上,据此可以实现多个假目标分类。之后,根据发射站、接收站和假目标的位置关系就可以确定干扰机位置。为了抑制干扰信号,文献[53]采用了线性约束最小方差(linearly constrained minimum variance, LCMV)波束形成方法,文献[54]采用了最小方差无失真响应(minimum variance distortionless response, MVDR)波束形成方法。当干扰机位于成像区域时,波束形成方法容易产生成像盲区,针对这种情况,文献[54]又采用图像拼接的方法,通过融合多幅 SAR 图像削减成像盲区,文献[55]直接采用优化布站的方法将假目标排除在成像区域以外。图 5 展示了文献[54]所提方案的操作流程。

综合来看,多基地 SAR 抗欺骗干扰方法充分体现了雷达组网系统的抗干扰优势:利用多站观测产生的冗余信息可以准确识别假目标并且定位干扰源;各接收站采用波束形成方法抑制干扰信号又充分发挥了网内各雷达自身的抗干扰能力;图像拼接则体现了多基地雷达多视角观测下的信息互补优势;优化布站则反映出雷达组网系统具有资源配置灵活的特点。

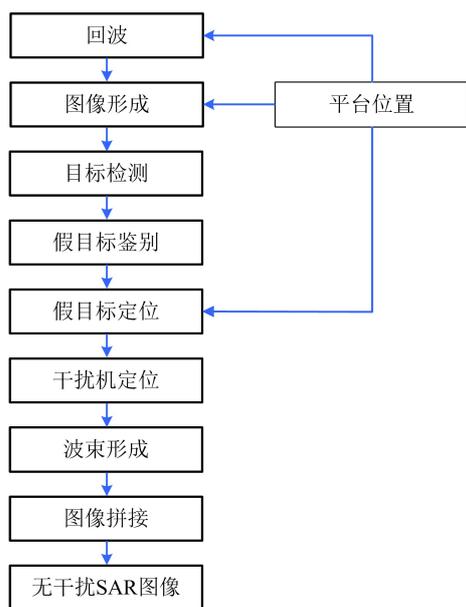


图5 多基地 SAR 协同对抗欺骗干扰方法流程图  
Fig. 5 Block diagram of the antideceptive jamming method for multistatic SAR

#### 4 雷达组网系统抗干扰资源管控

组网雷达具有丰富的抗干扰资源和灵活的资源管控手段。通过优化资源分配,可以进一步提升组网雷达抗干扰性能。本节按通过辐射控制避免被截获干扰和在已遭受干扰情况下通过资源分配提升探测性能 2 种情况,将现有雷达组网系统资源管控方法分为低截获辐射控制和抗干扰资源配置 2 大类。

##### 4.1 低截获辐射控制

雷达是一种主动传感器,通过辐射电磁波并接收处理目标散射波获取目标信息。雷达持续辐射电磁波会暴露自身位置,增加被敌方侦测、干扰,甚至是反辐射打击的风险。从雷达对抗的角度看,雷达干扰特别是转发式欺骗干扰是以侦测到雷达信号并成功进行分选为前提进行的,那么,雷达通过辐射控制降低被敌方无源探测系统截获、分选和识别的概率可视为一种主动抗干扰手段。囿于有限的探测资源,单基地雷达往往难以在降低截获风险和满足探测需求间取得平衡。相反,组网雷达天然具有探测资源丰富和资源配置灵活等特点,因此,众多学者研究基于组网雷达的低截获辐射控制方法,以期在满足探测任务需求的同时降低雷达系统辐射风险,提高雷达的战场生存能力。一般而言,这类问题首先需要建

立雷达辐射风险的量化指标。最简单的量化模型为“0-1”模型,即雷达被动接收信号时辐射风险为 0,主动辐射电磁波时风险为 1。这种模型常用于主被动传感器混合组网情况,主要用于决策是否调度主动传感器,但对辐射功率的实时控制不够灵活。还有一类常见模型是截获概率模型,即雷达脉冲信号同时落入侦察设备空域、时域、频域和极化域等各类侦察窗口,并且可被检测到的概率。可以看到,截获概率与侦察设备的工作参数和接收端信噪比有关。完成辐射风险建模后,还需根据雷达系统工作任务(如检测或跟踪)确定其他性能指标(如检测概率或跟踪精度),然后在系统可用资源约束下建立并求解一个多目标优化问题,优化变量包含雷达辐射间隔、辐射功率、雷达与目标的配对关系等。

现有研究多采用截获概率模型,并且有所简化,即只考虑侦察窗口参数或只考虑辐射功率。在传感器窗函数模型基础上,文献[56]提出一种针对组网火控雷达的间歇式目标跟踪方法,通过协同调控各火控雷达的辐射间隔,在满足目标跟踪精度的前提下降低了反辐射导弹对火控雷达的截获概率;文献[57]定义截获概率因子(interception probability factor, IPF)来量化描述雷达辐射风险,实际上是计算雷达信号同时落入多个侦察窗口的概率,并研究了多目标跟踪场景下的传感器调度问题,即在保证目标跟踪精度的前提下为各雷达分配合适的跟踪目标,使得各雷达截获风险最小。

当默认侦察窗口在频域、空域和时域全域宽开或不考虑侦察窗口参数时,截获概率由辐射功率控制。文献[58]通过最小化网内雷达的最大辐射功率来降低整个雷达系统的截获概率,并在多目标检测场景下将辐射控制问题转变成目标和功率联合分配问题。仿真结果表明,这种辐射控制方法可以取得与全雷达观测相近的检测性能,同时 LPI 性能相较于单基地雷达有大幅提升。此外还得到了一些有意义的结论,如增大网内雷达密度或者增加为同一目标分配的观测雷达数均可提升 LPI 性能。这与人们的直觉相符,即在满足检测性能约束下,越多的雷达参与观测意味着单个雷达的辐射功率越小,其 LPI 性能自然会提升。文献[59]同样研究了基于辐射功率控制的多目标跟踪算法,通过站点选择和功率分配,在满足跟踪精

度的前提下降低整个系统的截获概率。

分布式 MIMO 雷达可视为一种特殊形态的组网雷达,其探测性能优势来自于空间分集增益和波形分集增益。文献[60]率先分析了分布式 MIMO 的 LPI 特性,分析结果表明,发射站和接收站的空间分布对 MIMO 雷达的 LPI 性能有重要影响,因此可通过优化布站提升分布式 MIMO 雷达的 LPI 性能。正交频分信号和相位编码信号是 MIMO 雷达常用的信号形式,文献[61]分别针对这 2 种信号形式,研究了分布式 MIMO 雷达在 LPI 导向下的功率分配方法,进一步提升了分布式 MIMO 雷达的应用前景。

实际情况下,辐射方很难获取敌方无源侦察设备的各类工作参数并计算截获概率。同时,当雷达持续工作时,其辐射风险并非保持不变,或者说敌方侦察设备获取的雷达信息是动态变化的。因此,有必要研究新的辐射风险量化模型。文献[62]在异构多传感器架构下提出了一种考虑辐射度影响(emission level impact, ELI)的辐射风险量化模型,定义如下:

$$s_{k+1}^{(p)} = s_k^{(p)} + e_{k+1}^{(p)}, p \in \{1, \dots, P\} \quad (7)$$

式中,  $s_{k+1}^{(p)}$  表示传感器平台  $p$  在  $k+1$  时刻的 ELI,它等于该平台在上一时刻的  $s_k^{(p)}$  与当前时刻的瞬时辐射量  $e_{k+1}^{(p)}$  之和,  $P$  是传感器总数。如果将  $s_k^{(p)}$  的所有取值量化成一个有限集,则可以用一个有限状态马尔可夫链来描述 ELI 的演化过程,无须像窗函数模型一样获取各类侦察窗口的具体参数。在 ELI 模型下,该文提出一种满足低截获风险要求的异构多传感器动态调度算法。运用 ELI 模型,文献[63]提出一种基于风险管控的传感器调度方法,使得压制干扰背景下的雷达网络总风险(漏警风险+辐射风险)最小。相比其他常规情况下的低截获辐射控制方法,该方法更加贴合战场实际情况。

除了通过辐射控制降低雷达信号被电子侦察设备截获的概率外,通过优化发射波形降低电子侦察设备对辐射源的识别概率也可视为一种主动抗干扰手段。文献[64]从无线通信领域保密容量的定义出发,针对分布式多基地雷达系统,提出一种名为安全信息因子的低识别概率量化指标,通过优化各节点雷达的传输波形和协同干扰谱,提升整个雷达系统的抗识别性能。

#### 4.2 抗干扰资源配置

随着截获接收机性能的提升,如可以在全频

段实现对雷达辐射源的侦察识别,组网雷达通过辐射控制规避干扰已难以满足现实需求。当不可避免地遭受干扰时,合理配置组网雷达资源可以减弱干扰对雷达的影响,提升雷达在干扰条件下对目标的探测性能。

针对欺骗干扰,文献[65]提出一种基于组网雷达欺骗概率最小和覆盖范围最大的优化布站方法,仿真结果表明,雷达节点应尽可能地接近探测区域,并且尽可能地分散,这与文献[35]的结论相符;文献[66]以最大化假目标鉴别概率为目标函数,提出一种组网雷达功率分配方法,仿真结果表明,相较于功率平分方案,将主要功率分配给对目标观测视角差异更大的部分节点更有利于假目标鉴别,这也与文献[35]的结论相符。

噪声或类噪声压制干扰以及密集假目标欺骗干扰会降低雷达对目标的检测概率,压缩雷达覆盖范围,使得组网雷达出现探测盲区,因此有必要通过优化组网雷达的空间部署来消除探测盲区,提升雷达组网系统的抗干扰能力。文献[67]以干扰前后雷达组网系统对目标的发现概率相对变化率、定位精度相对变化率、数据率相对变化率以及探测区域相对变化率为抗干扰能力评估指标,优化组网雷达的空间部署和数据融合方案。文献[68]用干扰前后对空警戒区域覆盖率的相对变化率作为海上编队雷达网的抗干扰效能评估指标,通过优化编队成员的机动阵位来消除海上编队雷达网的探测盲区。

以上 2 种组网雷达资源配置方法只考虑了干扰模型给定情况下的雷达站点优化部署。事实上,雷达组网系统可调配的资源有很多,特别是在有压制干扰背景下,雷达组网系统还可以通过优化各站点的功率分配提升系统的探测性能。当然,随着干扰系统的日益智能,干扰方也可以实时监测雷达动向,评估干扰效果,进而动态调整干扰策略。如此看来,雷达与干扰机构成相互博弈的关系,这也更符合实际作战场景。近年来,有学者开展了压制干扰背景下雷达组网系统与智能干扰机之间的深度博弈研究。文献[69]将组网雷达和干扰机映射为 2 个智能体,将功率分配映射为组网雷达的动作,将波束选择和功率分配映射为干扰机的动作,以检测概率为目标函数,采用深度强化学习交替训练组网雷达与干扰机的资源配置策略。实际场景中,雷达本身配备

有包含辐射功率控制在内的多种抗干扰措施,仅依靠网内功率分配难以完全发挥组网雷达的抗干扰性能。同时,多部干扰机协同干扰多部雷达的场景也越来越普遍。为此,文献[70]建立了雷达组网系统与多部干扰机在压制干扰背景下的相互博弈模型。在该模型中,干扰机的动作只有干扰功率分配,而组网雷达的动作除功率分配外还增加了接收波束形成。相比前者,该模型更加贴合实际。当然,更理想的资源管控方案应该能根据干扰动态实时为网内各雷达站点选择合适的工作模式、工作参数和包括辐射控制和波束形成在内的多种抗干扰措施。

## 5 研究趋势展望

前文梳理总结了雷达组网系统对抗有源干扰的各类方法。可以看到,这些方法适用于不同的干扰场景且性能各有优劣。同时,受保密要求和实验难度限制,公开文献大多只给出了这些方法的理论仿真结果,很少有实测验证示例,各类方法的实际作用效果不得而知。为了推动现有研究成果应用到实际中,应该着手开展以下几个方面的工作:

1) 研究非理想条件下的抗干扰方法。现有雷达组网系统抗干扰方法均假设雷达间已经完成了时空同步和相位对齐,并且能够精确获取各雷达的位置坐标,这种假设过于理想。为提升雷达组网系统在非理想条件下的抗干扰性能,一方面需要设计更高精度的时、空、相位同步方案,另一方面需要分析各类同步误差对抗干扰性能的影响,改进现有方法或重新设计考虑同步误差的抗干扰方法。

2) 探索新的抗干扰机理。现有雷达组网系统抗干扰方法,如相干对消方法、子空间投影方法和相关性检验法,均利用了目标回波和干扰信号的空间相关性差异,当目标回波不满足空间独立性要求或干扰信号不满足相关性要求时,以上抗干扰方法将失效。这是很现实的问题,因为雷达站点间基线过长会增加信息传输的负担,有时雷达组网系统不得不做出妥协而缩减基线长度,使得不同站点接收的回波信号部分相关。而当干扰机采用窄波束定向干扰不同雷达时,干扰信号虽然同源但不一定相关。因此,很有必要探索除信号相关性差异以外的抗干扰机理。回波信

号由物理目标散射形成,干扰信号由干扰机调制得到,产生机理的不同必然会在接收信号中生成某些细微差别,雷达组网系统时空多维接收会放大这种差异。关键在于如何从接收信号中提取这些特征差异。除相关性这种人工设置特征外,可尝试使用深度学习等方法自适应挖掘某种或某些深层次的、隐形的特征。此外,数据级抗干扰方法较少依赖回波相关性差异,可尝试基于“数据+信号”联合处理的抗干扰方法。

3) 干扰认知与动态对抗。雷达组网系统面临着由各式各样的电子干扰组成的复杂电磁环境,只有准确识别干扰类型,才能有的放矢地选择最佳抗干扰措施。与协同观测目标一样,雷达组网系统可以对各站观测到的干扰信息进行交互融合,提取干扰特征,定位干扰类型。在干扰认知的基础上,雷达组网系统通过协同管控各类抗干扰资源实现动态对抗。落实到各雷达站点,就是选择合适的工作模式、工作参数和抗干扰措施;落实到整个雷达网络,就是选择合适的网络拓扑结构和数据融合方式。当然,雷达组网系统抗干扰资源还包含丰富的战术措施,可以通过隐蔽开机、佯动开机等战术措施,以及闪烁发射、捷变发射等技战术结合措施误导干扰机,使其侦察不清、判断失误,实现主动对抗。最后,干扰方释放干扰后并非就“大功告成”了,还需在干扰效果评估基础上动态调整干扰策略。在相互博弈过程中,雷达组网系统需要实时感知干扰,主动调整抗干扰措施,最终实现动态对抗。

## 6 结束语

随着有源干扰技术的快速发展,雷达面临日益复杂的战场电磁环境。为确保雷达正常遂行目标检测、跟踪和目标识别等任务,需研究更高效的雷达对抗有源干扰方法。雷达组网系统作为一种新型雷达构型,在对抗有源干扰方面相较于单基地雷达具备显著的体系优势。本文从发表的公开文献入手,介绍了雷达组网系统的发展历程,并对现有的雷达组网系统对抗有源干扰方法进行了归纳总结。通过分类梳理,方便研究者了解雷达组网系统对抗有源压制干扰和欺骗干扰的研究动态。最后,基于现有的研究成果,对该领域未来可能的研究方向进行了展望,为相关研究者探索新的雷达抗干扰方法提供了思路。

## 参 考 文 献

- [1] RICHARDS M A, SCHEER J A, HOLM W A. Principles of modern radar; basic principle[M]. Edison, NJ; Scitech Publishing, 2010.
- [2] DE MARTINO A. Introduction to modern EW systems[M]. 2nd ed. Norwood, MA: Artech, 2018.
- [3] NERI F. Introduction to electronic defense systems [M]. 3rd ed. Norwood, MA: Artech, 2018.
- [4] LAWRENCE D E. Low probability of intercept antenna array beamforming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(9): 2858-2865.
- [5] SHAAR, ADIB A, WOODCOCK, et al. Prime sequences for asynchronous pulse repetition interval agile radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2): 543-548.
- [6] FARINA A. Single sidelobe canceller: theory and evaluation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1977, 13(6): 690-699.
- [7] MAISEL L. Performance of sidelobe blanking systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, 4(2): 174-180.
- [8] AKHTAR J. Orthogonal block coded ECCM schemes against repeat radar jammers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 1218-1226.
- [9] ELGAMEL S A, SORAGHAN J J. Using EMD-FrFT filtering to mitigate very high power interference in chirp tracking radars[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(4): 263-266.
- [10] ZHOU F, TAO M, BAI X, et al. Narrow-band interference suppression for SAR based on independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(10): 4952-4960.
- [11] YANG Z W, DU W T, LIU Z L, et al. WBI suppression for SAR using iterative adaptive method [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(3): 1008-1014.
- [12] RAO B, XIAO S P, WANG X S, et al. Maximum likelihood approach to the estimation and discrimination of exoatmospheric active phantom tracks using motion features[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 794-819.
- [13] BLAIR W D, PEARCE M B. Discrimination of target and RGPO echoes using frequency diversity[C]//Proceedings of the 29th Southeastern Symposium on System Theory. [S. l.]: IEEE, 1997: 509-513.
- [14] GRECO M, GINI F, FARINA A. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1984-1993.
- [15] 温敬朋,杨健,王沙飞. 电子战装备技术发展现状与展望[J]. 信息对抗技术, 2022, 1(1): 1-10.
- WEN Jingpeng, YANG Jian, WANG Shafei. Development status and prospect of electronic warfare equipment technology[J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(1): 1-10. (in Chinese)
- [16] CHERNYAK V S, ZHOU W X, WU M Y, et al. Fundamentals of multistatic radar systems; multistatic radars and multiradar systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [17] GENG Z. Evolution of netted radar systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 124961-124977.
- [18] CHERNYAK V S. Adaptive mainlobe jamming cancellation and target detection in multistatic radar systems[C]//Proceedings of International Conference of Radar. [S. l.]: IEEE, 1996: 297-300.
- [19] 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.
- [20] 蒋铁珍,廖同庆. 分布式雷达抗主瓣干扰方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(4): 389-394.
- JIANG Tiezhen, LIAO Tongqing. Research on anti-mainlobe jamming method of distributed radar based on LMS algorithm[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(4): 389-394. (in Chinese)
- [21] MENG J, WANG N. Main-lobe jamming cancellation for multi-static radar by joint range-Doppler processing [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(20): 6807-6810.
- [22] 胡勤振,杨建宇,吴良斌,等. 基于距离-多普勒补偿的多基雷达协同抗主瓣压制干扰[J]. 电子与信息学报, 2020, 43(3): 516-522.
- HU Qinzen, YANG Jianyu, WU Liangbin, et al. Main-lobe suppression jamming cancellation for multistatic radar based on range-Doppler bias offsetting[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 43(3): 516-522. (in Chinese)
- [23] YANG Y, SU H T, HUANG J S, et al. Duplicate false targets discrimination for mainlobe jamming cancellation in multistatic radar[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. [S. l.]: IEEE, 2017: 1-5.

- [24] WANG B, CUI G L, ZHANG S, et al. Deceptive jamming suppression based on coherent cancelling in multistatic radar system [C]//Proceedings of 2016 IEEE Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-5.
- [25] ZHAO S, LIU Z. Main-lobe jamming suppression and target detection in signal ratio feature domain for multistatic radar[J]. The Journal of Engineering, 2021, 2021(8): 437-444.
- [26] 葛萌萌, 崔国龙, 孔令讲, 等. 分布式雷达盲源分离干扰抑制算法[J]. 信号处理, 2017, 33(12): 1562-1570.  
GE Mengmeng, CUI Guolong, KONG Lingjiang, et al. Jamming suppression based on blind source separation in distributed radars[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(12): 1562-1570. (in Chinese)
- [27] YU H, LIU N, ZHANG L, et al. An interference suppression method for multistatic radar based on noise subspace projection[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(15): 8797-8805.
- [28] 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-rang-false-target deception jamming [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 454-458. (in Chinese)
- [29] 朱永锋, 达凯, 杨焯. 基于 GCI 融合的分布式雷达抗欺骗干扰算法[J]. 航空兵器, 2022, 29(4): 58-63.  
ZHU Yongfeng, DA Kai, YANG Ye. GCI fusion-based anti-deception jamming algorithm for distributed radar[J]. Aero Weaponry, 2022, 29(4): 58-63. (in Chinese)
- [30] 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.  
ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, ZHOU Yu, et al. Measurement fusion method against false-target jamming for radar network[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(2): 207-211. (in Chinese)
- [31] 刘洁怡, 张林让, 赵珊珊, 等. 一种考虑站址误差的抗欺骗式假目标方法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 54-58.  
LIU Jieyi, ZHANG Linrang, ZHAO Shanshan, et al. A method against deception-false-target jamming based on position errors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 54-58. (in Chinese)
- [32] LYU B, SONG Y, ZHOU C Y, et al. Study of multistatic radar against velocity-deception jamming [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control. [S.l.]: IEEE, 2011: 1044-1047.
- [33] ABDALLA A, AHMED M G S, ZHAO Y, et al. Deceptive jamming suppression in multistatic radar based on coherent clustering[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 269-277.
- [34] HUANG D T, CUI G L, YU X X, et al. Joint range-velocity deception jamming suppression for SIMO radar [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(1): 113-122.
- [35] 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, 2016, 39(1): 138-143.  
ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, LI Qiang, et al. Research on repeater jamming against distributed multiple-radar system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 39(1): 138-143. (in Chinese)
- [36] 朱宇, 罗景青, 田玮. 对组网雷达的多假目标欺骗干扰技术[J]. 电光与控制, 2013, 20(9): 93-98.  
ZHU Yu, LUO Jingqing, TIAN Wei. Research on multi-false-target jamming against netted radar [J]. Electronic Optics & Control, 2013, 20(9): 93-98. (in Chinese)
- [37] 柳向. 对组网雷达的协同干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
LIU Xiang. Study on cooperative jamming techniques against radar work[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [38] 孙殿星, 王国宏, 盛丹. 基于均值-方差联合检验的航迹欺骗干扰识别[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1292-1304.  
SUN Dianxing, WANG Guohong, SHENG Dan. Phantom track jamming recognition based on mean-covariance collaborative testing[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1292-1304. (in Chinese)
- [39] ZHAO Y, ALI A A, TANG B. Phantom track identification for radar network based on multi-feature fusion [C]//Proceedings of Communications, Signal Processing, and Systems. [S.l. : s.n.], 2019: 2746-2753.
- [40] YANG L, SUN Z K. Identification of false targets in bistatic radar system [C]//Proceedings of IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conferenc. [S.l.]: IEEE, 1997: 878-883.
- [41] 刘洁怡, 张林让, 赵珊珊, 等. 分布式结构下主/被动

- 雷达抗假目标干扰方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(3): 1-6.
- LIU Jieyi, ZHANG Linrang, ZHAO Shanshan, et al. Anti-deception jamming method for active/passive radar based on distributed architectures[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(3): 1-6. (in Chinese)
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] LI Q, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Discrimination of active false targets based on hermitian distance for distributed multiple-radar architectures [J]. IEEE Access, 2019, 7: 71872-71883.
- [46] 刘子威, 赵珊珊, 杨彪, 等. 多基地雷达聚类分析鉴别有源假目标[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(11): 3211-3219.
- LIU Ziwei, ZHAO Shanshan, YANG Biao, et al. Clustering method to discriminate active false targets in multistatic radar system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(11): 3211-3219. (in Chinese)
- [47] 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.
- [48] HUYNEN J R. Measurement of the target scattering matrix[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 936-946.
- [49] YU H L, ZHANG J, ZHANG L R, 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.
- [50] ZHANG S Y, ZHOU Y, ZHANG L R, et al. Target detection for multistatic radar in the presence of deception jamming [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 8130-8141.
- [51] 黄大通, 崔国龙, 葛萌萌, 等. 多维信息联合的多基地雷达欺骗干扰抑制技术[J]. 信号处理, 2019, 35(8): 1324-1333.
- HUANG Datong, CUI Guolong, Ge Mengmeng, et al. A suppression technique for deception jamming in multi-static radar system based on multi-dimensional information association[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(8): 1324-1333. (in Chinese)
- [52] LIU J Y, GONG M G, ZHANG M Y, et al. An anti-jamming method in multistatic radar system based on convolutional neural network[J]. IET Signal Processing, 2022, 16(2): 220-231.
- [53] WANG W J, WU J J, PEI J F, et al. Antirange-deception jamming from multijammer for multistatic SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-12.
- [54] WANG W J, WU J J, PEI J F, et al. An antideceptive jamming method for multistatic synthetic aperture radar based on collaborative localization and spatial suppression[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13: 2757-2768.
- [55] WANG W J, WU J J, PEI J F, et al. Deception-jamming localization and suppression via configuration optimization for multistatic SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-16.
- [56] 熊久良, 徐宏, 韩壮志, 等. 基于组网的火控雷达间歇式目标跟踪技术研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(8): 13-16.
- XIONG Jiuliang, XU Hong, HAN Zhuangzhi, et al. A study on intermittent target tracking technology in fire-control radar network[J]. Modern Radar, 2011, 33(8): 13-16. (in Chinese)
- [57] XU G G, PANG C, DUAN X S, et al. Multi-sensor optimization scheduling for target tracking based on PCRLB and a novel intercept probability factor[J]. Electronics, 2019, 8(2): 140.
- [58] ANDARGOLI S M H, MALEKZADEH J. LPI optimization framework for search radar network based on information fusion[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 67: 206-214.
- [59] SHE J, WANG F, ZHOU J. A novel sensor selection and power allocation algorithm for multiple-target tracking in an LPI radar network[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2193.
- [60] 赵宜楠, 亓玉佩, 赵占锋, 等. 分布式 MIMO 雷达的低截获特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(1): 59-63.
- ZHAO Yinan, QI Yupei, ZHAO Zhanfeng, et al. Analysis of LPI performance for distributed MIMO radar systems[J]. Journal of Harbin Institute of Tech-

- nology, 2014, 46(1): 59-63. (in Chinese)
- [61] GHOREISHIAN M J, HOSSEINI A S M, PARVARI F. Power allocation in MIMO radars based on LPI optimisation and detection performance fulfilment[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(6): 822-832.
- [62] KRISHNAMURTHY V. Emission management for low probability intercept sensors in network centric warfare[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1): 133-151.
- [63] ZHANG Y, SHAN G. A risk-based sensor management method for target detection in the presence of suppressive jamming[J]. Tehnicki Vjesnik-technical Gazette, 2020, 27(1): 114-124.
- [64] SHI C, WANG F, ZHOU J, et al. Security information factor based low probability of identification in distributed multiple-radar system[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S. l.]: IEEE, 2015: 3716-3720.
- [65] 刘洁怡, 张林让, 赵珊珊, 等. 欺骗式干扰下组网雷达优化布站方法分析与仿真[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(4): 513-519.  
LIU Jieyi, ZHANG Linrang, ZHAO Shanshan, et al. Analysis and simulation of optimal deployment for netted radar under deception jamming[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(4): 513-519. (in Chinese)
- [66] 于恒力, 张林让, 刘洁怡, 等. 一种对抗欺骗式干扰的组网雷达功率分配方法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 139-145.  
YU Hengli, ZHANG Linrang, LIU Jieyi, et al. A power allocation approach of netted radars for anti-deception jamming[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 139-145. (in Chinese)
- [67] 向龙, 丁建江, 周芬. 雷达组网抗复合干扰能力动态评估研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(3): 209-213.  
XIANG Long, DING Jianjiang, ZHOU Fen. Research on dynamic evaluation of anti complex blanketing jamming of radar netted system[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(3): 209-213. (in Chinese)
- [68] 张绪春, 刘效武. 海上编队雷达网空间优化部署方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(9): 8-13.  
ZHANG Xuchun, LIU Xiaowu. Method of naval fleet radar network space optimal deployment[J]. Modern Radar, 2011, 33(9): 8-13. (in Chinese)
- [69] 王跃东, 顾以静, 梁彦, 等. 伴随压制干扰与组网雷达功率分配的深度博弈研究[J]. 雷达学报, 2023, 12(3): 642-656.  
WANG Yuedong, GU Yijing, LIANG Yan, et al. Deep game of escorting suppressive jamming and networked radar power allocation[J]. Journal of Radars, 2023, 12(3): 642-656. (in Chinese)
- [70] HE B, SU H T. Game theoretic countermeasure analysis for multistatic radars and multiple jammers[J]. Radio Science, 2021, 56(5): 1-14.

## 作者简介

### 张 磊

男,1998年生,博士研究生,研究方向为雷达对抗

E-mail: xsmzl2023@163.com



### 罗 迎

男,1984年生,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为雷达成像与目标识别

E-mail: luoying2002521@163.com



### 张 群

男,1964年生,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为雷达成像与目标识别

E-mail: rsplzq@163.com



责任编辑 钱 静