

雷达技术的多元化应用与发展

张道洋^{1*}, 徐仁豪², 刘晓璐¹, 韩 畅¹, 刘思岐²

¹北京遥感设备研究所毫米波遥感技术重点实验室, 北京

²上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年1月17日; 录用日期: 2025年2月10日; 发布日期: 2025年2月17日

摘 要

在国家“十四五”规划和《科技创新2030——重大项目》的指导下, 雷达信号技术作为国家重点支持的高科技项目, 正在多个关键领域发挥着重要作用。特别是在军事现代化、智慧城市建设、交通运输升级以及健康中国战略等具体政策的推动下, 发达的雷达技术不仅能够提升国防实力, 还可以促进公共安全、提高交通效率和改善医疗服务等。文章对雷达信号在这些领域中的应用现状和未来发展趋势进行了系统介绍, 目的是为相关政策的实施和产业技术的创新提供科学依据和技术支持。

关键词

雷达信号, 目标检测, 工程应用

Multidimensional Applications and Development of Radar Technology

Xiaoyang Zhang^{1*}, Renhao Xu², Xiaolu Liu¹, Chang Han¹, Siqi Liu²

¹Science and Technology on Millimeter-Wave Laboratory, Beijing Institute of Remote-Sensing Equipment, Beijing

²School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 17th, 2025; accepted: Feb. 10th, 2025; published: Feb. 17th, 2025

Abstract

Under the guidance of the national “14th Five Year Plan” and the “Science and Technology Innovation 2030—Major Projects”, radar signal technology, as a key high-tech project supported by the state, is playing an important role in multiple critical fields. Particularly driven by specific policies such as military modernization, smart city construction, transportation upgrades, and the Healthy China strategy, advanced radar technology not only enhances national defense capabilities but also

*第一作者。

文章引用: 张道洋, 徐仁豪, 刘晓璐, 韩畅, 刘思岐. 雷达技术的多元化应用与发展[J]. 机械工程技术, 2025, 14(1): 50-66.
DOI: 10.12677/met.2025.141005

promotes public safety, improves transportation efficiency, and enhances healthcare services. A systematic introduction was given to the current application status and future development trends of radar signals in these fields, with the aim of providing the scientific basis and technical support for the implementation of relevant policies and innovation of industrial technology.

Keywords

Radar Signal, Object Detection, Engineering Application

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

雷达(Radio Detection and Ranging, Radar)是一种利用无线电波来检测、跟踪和定位物体的技术。由发射机、天线、接收机、信号处理器和显示装置等组成。雷达的工作原理：雷达通过发射无线电波并接收反射波来探测物体的位置、速度和其他特性。雷达的开发起源于第二次世界大战，在 1935 年的 Daventry 实验之后，经过多年的发展，雷达技术已在众多领域被广泛应用[1]。目前，雷达技术已进入高速发展阶段，由最初短距离预警到现在数千公里国土防御，由最初的单一探测功能到现在具备警戒[2] [3]、火力控制[4] [5]以及高分辨成像[6] [7]等各种功能。如今，雷达技术在军用和民用领域都有广泛的应用，极大地提升了各个领域的探测和监控能力。随着军事需要和新兴技术的迅速发展，雷达全天时、全天候、超远程的探测能力，成为了空天来袭预警、武器火力控制、战场情报侦察的重要装备，成为大国争夺作战优势的制高点[8]-[10]，雷达探测技术面临新环境和新目标带来的挑战，推动了新雷达技术在各领域的发展。本文旨在作为雷达在各领域应用的入门，全面概述雷达技术和应用的基本方面。本文分为四个主要部分：第一部分为雷达的简单介绍；第二部分介绍基本雷达方程(主动探测)；第三部分介绍了当前雷达在各领域的应用；最后一部分提炼了结论，提出雷达技术未来发展的可能性，并让读者对其有一些了解。

2. 雷达的常见分类

雷达技术因具有高精度测量、远距离探测、多目标跟踪等优点而广泛运用于军事、气象、航空、航海和交通等领域。随着雷达技术的不断成熟，为了适应不同应用场景的要求，各种类型的雷达随之诞生。雷达根据不同的分类标准可以分为多种类型，一些常见的分类类型如表 1 所示。

Table 1. Classification of radar
表 1. 雷达的分类

		区别	适用领域
按探测方式分类	有源雷达	主动发射信号并接收反射回波	气象监测、航空管制、交通测速和军事探测
	无源雷达	不发射信号，只接收外界环境中的信号	军事隐蔽侦察、无线电通信监视等
		区别	适用领域
按成像方式分类	二维成像雷达	提供平面内目标分布的图像	地形测绘、环境监测、城市规划等
	三维成像雷达	提供三维空间中目标分布的图像	高精度地形测绘、环境结构监测等

续表

		适用领域	
按用途分类	气象雷达	探测和监测天气状况，如降雨、风暴和风速等	
	军事雷达	探测、跟踪和识别敌方目标，包括地面目标、海上目标和空中目标	
	航空雷达	飞机导航、空中交通管制和防撞预警等	
	海事雷达	船舶导航和避碰，保障海上交通安全	
	交通雷达	车辆测速和交通管理，如测速雷达和红绿灯控制雷达	
	探地雷达	探测地下结构和物体，如矿藏、管道和考古遗址	
		区别	适用领域
按工作模式分类	脉冲雷达	通过发射短时高功率的脉冲信号，利用回波间隔时间测量目标距离	航空与航海、气象监测、交通管理等
	连续波雷达	发射连续波信号，通过多普勒效应测量目标的速度	交通测速、气象监测、运动检测等
	脉冲多普勒雷达	结合脉冲雷达和连续波雷达的优点，既能测量距离又能测量速度	航空与航海、气象监测、交通管理等
	合成孔径雷达	通过移动天线合成大孔径，实现高分辨率的成像	地形测绘、环境监测、军事应用等
	逆合成孔径雷达	通过目标的运动实现高分辨率成像	军事侦察、海事监视、航空应用等
		区别	适用领域
按波束类型分类	单波束雷达	发射单一方向的雷达波束	简单的探测任务
	多波束雷达	同时发射多个方向的雷达波束	大范围的区域探测
	相控阵雷达	控制天线元件的相位，实现波束快速扫描和方向控制	现代军事和气象
		区别	适用领域
按信号处理方式分类	模拟雷达	模拟电路处理雷达信号，多为早期的雷达	传统航空与航海、基础气象监测等
	数字雷达	数字信号处理技术，具有高精度和灵活性	现代军事应用、精密气象监测等
	混合雷达	结合模拟和数字技术的优势	综合军事系统、气象与环境监测等

3. 常用雷达的介绍

随着智联化、网联化的快速发展和科研、军用、民用的实际需要，对一些如激光雷达、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)雷达、毫米波雷达等的需求日益增长，本节将对这些目前应用广泛的雷达进行介绍。

3.1. 激光雷达

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)是通过将发射的探测信号(激光束)与接收的探测物体反射信号(目标回波)进行比较处理后，得到探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统，可以实现测距[11] [12]、三维成像[13] [14]、大气检测[15]等功能。激光雷达主要由 4 个部分组成：发射激光模块、扫描系统、接收模块和信息处理模块。其中接收模块主要是光电探测器，其功能是接收回波信号，是激光雷达的关键部件。激光雷达的四大要素分别是测距原理、光束操纵方法、光源和探测器[16]，如图 1 所示：

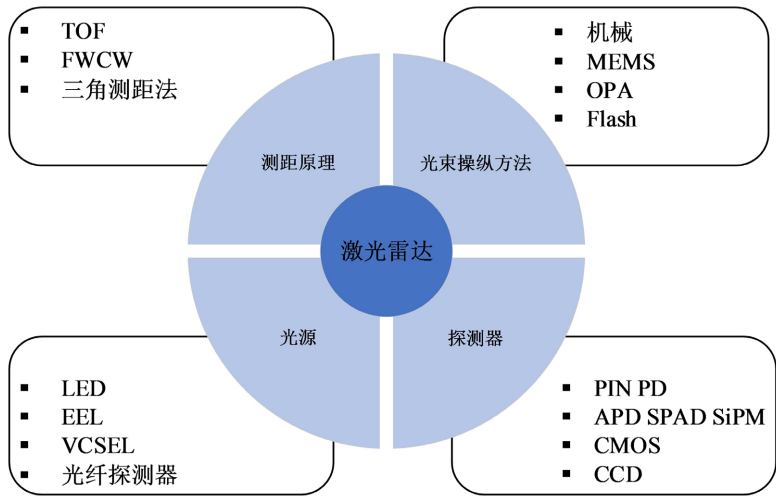


Figure 1. Components of LiDAR
图 1. 激光雷达组成要素

激光雷达三种常用的测距原理比较如表 2 所示。

Table 2. Comparison of three different ranging principles [17]
表 2. 三种不同测距原理比较[17]

	FMCW 测距法	TOF 测距法	三角测距法
抗干扰能力	极强	差	差
工作距离	可实现远距离探测	探测距离较近	探测距离较近
人眼安全等级	高	低	低
速度信息	有	无	无
固态扫描兼容性	完全兼容	不适用	不适用
技术成熟度	发展中	成熟	较成熟
技术复杂度	复杂	简单	简单

对比其他两种方法，TOF 测距法在短距离测量中具有高精度，适用于自动驾驶、机器人导航、手机面部识别等多种当下热门场景。目前，TOF 传感器和相关技术已经相对成熟、生产成本较低、市场接受度高。同时，该方法的实时性能优异，适合动态场景中的应用，并且可以用于不同类型的信号(如激光、超声波等)，应用范围广泛。因此，相对另外两种测距法，TOF 测距法的技术更为成熟。此外，TOF 传感器易于集成到各种设备中，具有小尺寸和相对较低的功耗。这些因素使得 TOF 测距法在实际应用中具有显著优势，成为了主流的测距方法[18]。

3.2. MIMO 雷达

MIMO 雷达是通过将多个辐射源和多个接收站搜集到的信息一并处理，信号从发射到接收所经历的空间过程被视作一个综合的信息通道，通过对通道的估计，得到空间目标信息的雷达[19]。MIMO 雷达一般由发射天线阵列、接收天线阵列、信号处理单元和数据融合中心四个部分组成。与传统的相控阵雷达不同，MIMO 雷达能够自由选择每个天线的发射波形，从而最大化目标区域的功率，并最小化目标反射信号的互相关性。这种灵活性使得 MIMO 雷达在参数估计、波束形成等方面具有显著的优势[20]。

MIMO 雷达应用了多样化的信号技术。其体制的概念是连续统一的,但是它经常被分为 2 种基本的体制,即统计 MIMO 雷达和相干 MIMO 雷达[21]。

1. 统计 MIMO 雷达(Statistical MIMO, SMIMO): 发射(接收)天线阵列单元分布较广的系统。在这种系统中,每个天线接收到的信号可以视为来自多个独立散射体的回波。

2. 相干 MIMO 雷达(Coherent MIMO, CMIMO): 发射(接收)天线阵列单元分布较广的系统。在这种系统中,每个天线接收到的信号可以视为来自多个独立散射体的回波。

对比传统雷达,因为 MIMO 雷达可以通过多天线发射和接收不同信号,在空间上形成多个独立的传输路径,增加了空间的自由度,所以具有更高的分辨率和参数估计的精度[22]。此外, MIMO 雷达的不同天线可以发射不同的波形,这些波形可以根据目标特性和环境条件进行优化,提升雷达在各种场景下的检测和估计性能[23]。但由于信号数据量大和不同天线发射的信号存在相互干扰,这导致 MIMO 雷达系统往往需要优秀的信号处理算法和良好的波形设计,这使得 MIMO 雷达系统的研究和设计存在一定的难度[24] REF_Ref190416063 \r \h [25]。

3.3. 合成孔径雷达

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Rader, SAR)是一种从远处获取高分辨率图像的主动成像雷达系统。通过利用雷达天线的运动和信号处理技术,合成孔径雷达能够合成一个比实际天线大得多的“合成孔径”,从而实现高分辨率的成像效果[26]。由于合成孔径雷达技术具有全天候、全天时的遥感属性,这为地质灾害调查与监测提供了新的手段[27]。SAR 系统一般由天线、发射机、接收机、信号处理器和平台五个部分组成。无人飞行器合成孔径雷达(Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar, UAVSAR)最初由美国 NASA 于 2002 年提出,旨在开发重复轨道航测能力。UAVSAR 系统具备高分辨率和强穿透能力,能够在各种地质灾害监测中提供可靠数据。同时, UAVSAR 系统可以通过雷达吊舱搭载在飞机上,进行高精度的地表形变监测[27]。合成孔径雷达的工作原理: SAR 通过传感器移动和多次发射接收微波信号,利用信号处理技术对回波信号进行合成,从而获得高分辨率的二维或三维图像,具体过程包括发射微波信号、接收回波信号、数据处理和图像合成[28]。

对比传统雷达,因为 SAR 具有利用天线的移动和复杂的信号处理技术来合成一个比实际天线大得多的“合成孔径”的能力,所以能够实现高分辨率的成像效果[28]。此外, SAR 使用的微波频段能够穿透云层、烟雾和植被,这使得 SAR 非常适合在恶劣天气条件下进行观测[29]。SAR 可以覆盖大区域,适合大面积的监测任务。例如, Capella Space 的卫星能够每小时对地球上的任何点进行重复观测,有利于热点区域变化的检测[28]。与此同时,由于复杂的信号数据处理需求、卫星平台的依赖、图片解译的高难度, SAR 系统需要高性能的计算资源和算法、较高的成本和丰富的经验[30]- REF_Ref172861736 \r \h [32]。

3.4. 毫米波雷达

毫米波雷达(Millimeter Wave Radar, mm wave Radar)是一种利用毫米波频段(30 GHz 到 300 GHz)的电磁波进行目标探测和测量的雷达系统。由于毫米波具有短波长和高频率的特性,它能够提供高分辨率的成像和精确的距离测量[33]。毫米波雷达的工作原理: 毫米波雷达基于发送和接收毫米波信号,由雷达发射器产生毫米波信号,信号在遇到目标物体时被反射,接收器捕捉反射信号,通过分析反射信号的时间延迟和频率变化来计算目标物体的距离、速度和角度[34]。毫米波雷达一般由天线系统、发射机、接收机、信号处理单元和显示以及控制单元五个部分组成[35]。

毫米波雷达的波长短(1~10 毫米),它能够检测到更小的物体细节和更准确的图像[36],可以设计出非常小型的天线和其他组件,适合应用在空间有限的场合,如汽车防撞系统和无人机等[37]。另一方面,毫

米波的波长相对较长，可以穿过较小的颗粒，从而不受恶劣天气条件的影响，可以穿透烟雾、灰尘、雨雾等环境障碍物[38]。但又因毫米波信号波长短、高频等特性，其衰减速度快，在大气中传播时易受到水汽、氧气等分子的吸收而被限制了有效传输距离[39]，且比较依赖高性能的硬件和复杂的算法[40]。

4. 基本雷达方程

有源雷达和无源雷达，又可以称作主动探测雷达和被动探测雷达。主动探测雷达在大多数应用场景下成为主流，特别是在需要精确探测目标位置、速度和方向的情况下。相对于主动探测雷达，虽然被动探测雷达在需要隐蔽侦察和电子战等场景中 also 具有重要应用，但是因其特殊性，其应用范围不及主动探测雷达的广泛，所以本章并不对被动探测雷达过多介绍与公式推导，只做简单的公式展示。

4.1. 主动探测雷达方程

基本雷达方程(Radar Range Equation)用于描述雷达系统中发射信号、目标反射信号以及接收信号之间的关系。基本雷达方程起源于对电磁波传播和反射的研究，最初由雷达技术的开创者们在 20 世纪中期提出。随着雷达技术的发展，这一方程被广泛应用并不断完善，以适应不同的雷达系统和应用场景。该方程用于计算目标在一定距离内被雷达检测到的接收功率。具体的关系式为： $P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$ 。以下是方程的简单推导：

1. 发射天线在距离 R 处的功率密度 S_t 是发射功率 P_t 和发射天线增益 G_t 的函数： $S_t = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}$ ；2. 目标的雷达截面积 σ 描述了目标反射信号的能力。目标反射的功率 P_r' ： $P_r' = S_t \sigma = \frac{P_t G_t \sigma}{4\pi R^2}$ ；3. 接收天线在目标反射信号中的增益 G_r 和接收到的功率密度 S_r 是目标反射回来的功率 P_r' 和接收天线增益 G_r 的函数： $S_r = \frac{P_r'}{4\pi R^2} = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2}$ ；4. 接收天线在接收信号的功率密度基础上再乘以接收天线增益 G_r ： $P_r = S_r G_r \lambda^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$ 。

镜像法(Method of Images)用于解决带有边界条件的电磁问题。镜像法球面波平面是镜像法与雷达方程的结合。通过假设雷达系统，目标位于地面之上，地面是一个理想导体，使用镜像法在地面以下构造一个虚拟的镜像目标来解决地面反射问题。菲涅耳区概念来源于光学领域，后来被引入到雷达技术中，用于描述和分析波前的传播特性和天线接收效果。镜像法球面波平面雷达方程与菲涅耳区的相关雷达方程如表 3、表 4 所示，由于这些方程是在基本雷达方程的基础上演变而来的，本文不进行逐一推导。

Table 3. Active sounding—surface [41]
表 3. 主动探测——地表[41]

类型	几何	方程
基本雷达方程		$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$

续表

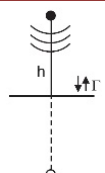
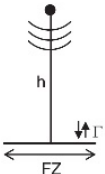
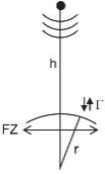
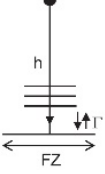
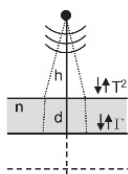
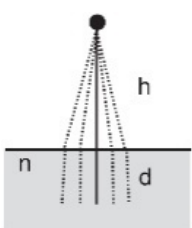
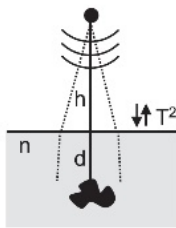
镜像法球面波平面		$P_r = \frac{P G_t G_r \lambda^2 \Gamma}{(4\pi)^2 (2h)^2}$
菲涅耳区 球面波平面		$P_r = \frac{P G_t G_r \lambda^2 \Gamma}{(4\pi)^2 h^2}$
菲涅耳区 球面波球面		$P_r = \frac{P G_t G_r \lambda^2 \Gamma}{(4\pi)^2 h^2} \frac{r^2}{(h+r)^2}$
菲涅耳区 平面波 接近“天线”平面		$P_r = \frac{P G_t G_r \lambda^2 \Gamma}{4^3 h^2}$

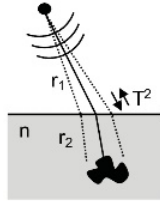
Table 4. Active sounding—subsurface [41]

表 4. 主动探测——地下[41]

类型	几何	方程
亚表面成像 法球面波平面 平坦的地下		$P_r = \frac{P G_t G_r \lambda^2 T^2 \Gamma}{(4\pi)^2 (2(h+d))^2} g_r^2$
地下单向折射 增益平面		$g_r = \frac{h+d}{h+d/n}$
地下最低点 一般雷达方程 球面波平面		$P_r = \frac{P G_t G_r \lambda^2 T^2 \sigma_{\epsilon_r}}{(4\pi)^3 (h+d)^4 n^2} g_r^4$

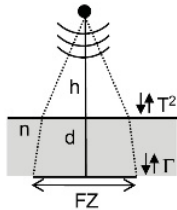
续表

地下非最低点
通用雷达方程
球面波平面



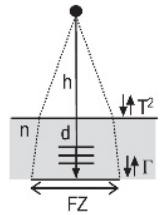
$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 T^2 \sigma_{er} g_r'^4}{(4\pi)^3 (r_1 + r_2)^4 n^2}$$

地下菲涅耳区
球面波平面
平坦地下



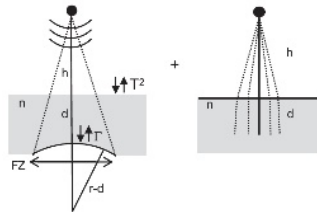
$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 T^2 \Gamma}{(4\pi)^2 (h+d)^2} g_r^2$$

地下菲涅耳区
平面波平面
次表面



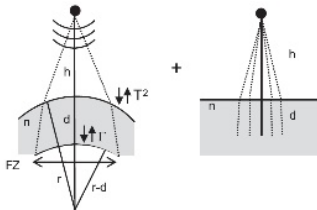
$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 T^2 \Gamma}{4^3 (h+d)^2} g_r^2$$

地下菲涅耳区
球面波
平面球面
次表面



$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 T^2 \Gamma}{(4\pi)^2 (h+d)^2} g_r^2 \cdot \frac{(r-d)^2}{((r-d) + (h+d))^2}$$

地下菲涅耳区
球面波球面
次球面



$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 T^2 \Gamma}{(4\pi)^2 (h+d)^2} g_r^2 \cdot \frac{(r-d)^2}{((r-d) + (h+d))^2} \cdot \left(\frac{r(r+h)n(h+d/n)}{hn(r-d)(r+h) + d(hn+r)^2} \right)^2$$

表中的符号含义:

- P_t , P_r —— 雷达的发射/接收功率;
- G_t , G_r —— 发射机/接收机天线增益;
- λ —— 自由空间中的波长;
- L_s —— 系统损耗;
- σ , σ_{er} —— 雷达在自由空间或介质中的横截面;
- R , r_1 , r_2 —— 传感器范围;
- h —— 传感器最低点高度;
- Γ —— 接口的反射率;
- d —— 地下界面深度;
- g_r , g_r' —— 最低点或非最低点几何的折射增益;

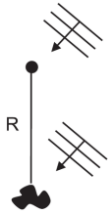
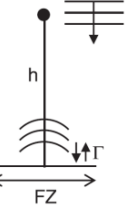
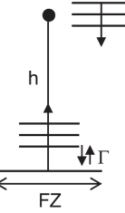
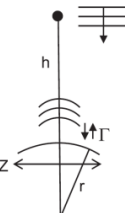
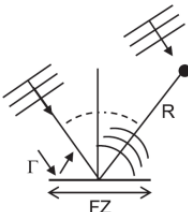
n ——折射率;
 r ——球面半径;
 ϵ_r ——相对介电常数;
 T ——界面处的透射率。

4.2. 被动探测雷达方程

被动探测雷达系统利用环境中已有的射频信号(例如广播电视信号、移动通信信号等)进行目标检测。被动探测雷达方程描述了接收这些反射信号的功率关系,表 5 为被动探测雷达方程。

Table 5. Passive sounding [41]

表 5. 被动探测[41]

类型	几何	方程
无源雷达方程		$P_d = \frac{SG_r \lambda^2}{4\pi}$
被动 菲涅耳区 法向平面波入射 球面散射平面		$P_r = \frac{SG_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 R^2}$
被动 菲涅耳区 法向平面波入射平面 波散射平面		$P_r = \frac{SG_r \lambda^2 \Gamma}{\pi}$
被动 菲涅耳区 法向平面波入射 球面散射球面		$P_r = \frac{SG_r \lambda^2 \Gamma \pi}{4}$
被动 菲涅耳区 非最低点平面波入射 球面散射平面		$P_r = \frac{SG_r \lambda^2 \Gamma}{\pi} \frac{r^2}{(2h+r)^2}$

表中的符号含义:

P_t , P_r ——雷达的发射/接收功率;
 S ——平面波功率密度;
 G_r ——接收机天线增益;
 λ ——自由空间中的波长;
 σ ——雷达在自由空间中的横截面;
 R ——传感器范围;
 h ——传感器最低点高度;
 Γ ——接口的反射率;
 r ——球面半径。

5. 雷达技术的应用与发展

5.1. 雷达技术在目标检测与跟踪中的应用与发展

随着科学技术的不断前进,现代战争对信息获取的准确性和实时性要求越来越高。为了满足军事领域的需求[42]、保障民用航空和航海的安全、减少交通事故的发生[43] REF_Ref173040875 \r\h [44]、满足气象监测等民用领域的需求,雷达信号目标检测与跟踪中的应用具有非常重要的意义。

虽然雷达技术的高精度和实时性在目标检测与追踪的应用上展现了显著的优势,但仍面临多径、杂波和非视距条件下的无线传播损伤问题。为了解决这一挑战,Stefania Bartoletti 等人开展了研究,采用多种传感技术和智能处理方法优化了雷达信号的无限传播损伤[45]。此外,Kristine L. Bell 在目标检测与跟踪的研究中,通过适应性调整传感器/处理器的设计和后续发射波形,显著提升了系统性能,提出了一种用于目标跟踪的认知雷达的新框架[46]。另一方面,在复杂环境中,雷达信号可能会通过多个路径到达接收器,导致信号干扰和失真,且杂波信号可能会掩盖目标信号,降低其检测性能。针对这一问题,Wei Lu 等人使用智能反射面(IRS)的方法,动态调整反射信号的相位和幅度,成功提高了目标检测性能,实现了比传统 MIMO 雷达更优的效果[47]。与此同时,许多研究人员也不断地通过雷达技术算法的优化与创新来实现更高效的目前检测性能,算法的设计与实现不仅能够提升信号处理的精度,还能在复杂环境中增强系统的鲁棒性。例如,Martin Stolz 等人通过结合自适应扩展卡尔曼滤波算法、深度学习目标检测方法和决策级融合的方法,将毫米波雷达技术应用于主动刹车系统,增强了对车辆的实时检测与跟踪能力。同时,通过结合视觉传感器与毫米波雷达的算法,显著提升了车辆检测的准确性和速度[48]。Khalid Z. Rajab 等人,通过数字波束形成技术实现对多个移动目标的微多普勒特征测量,并使用深度神经网络进行活动分类,提出了一种利用毫米波雷达进行高精度跟踪和活动分类的方法[49]。Chen 等人在基于被动多静态雷达的目标联合检测与跟踪的研究中,提出了一种在低信噪比情况下使用被动多静态雷达接收信号直接进行目标检测与跟踪的新方法,通过粒子伯努利滤波器成功实现了目标存在和运动状态的估计[50]。

近年来,雷达技术在现代目标检测与跟踪中发挥着至关重要的作用,在目标检测与跟踪领域的发展呈现出几个显著的趋势,这些趋势不仅深刻影响了学术研究的方向,也促进了实际应用的广泛拓展。随着科学技术的不断成熟,为了适应日益复杂环境的需求,高分辨率雷达技术脱颖而出。高分辨率雷达通过增加雷达的带宽和改进信号处理算法,显著提高了目标检测的精度和细节分辨能力。研究表明,高分辨率雷达在小目标检测和复杂环境下的目标分辨中表现突出[51]。针对单一传感器在复杂环境下的局限性,多传感器融合技术通过对雷达和其他传感器(如红外、光学摄像机)的数据融合技术,能够提升目标检测和跟踪的鲁棒性和准确性。研究显示,多传感器融合能够有效应对这一局限性,提高整体目标检测与跟踪性能[52]。近年来,人工智能特别是深度学习技术在雷达数据处理中的应用受到广泛关注。这些技术可以自动识别和分类目标,显著提高检测和跟踪效率。深度学习算法在处理雷达回波信号和复杂目标识

别方面展现出巨大潜力[46]。雷达技术在目标检测与跟踪中的发展迅速,展现出高分辨率、多传感器融合、人工智能等应用趋势。未来,这些技术将进一步提升雷达系统的性能和应用广度。

5.2. 雷达技术在通信与导航中的应用与发展

由于雷达具有精确定位、精确测距、抗干扰、全天候操作和广泛覆盖范围的能力,这使得雷达无论是在航空、海洋和汽车通信与导航中都有着不可替代的地位。在互联网和大数据高度发达的今天,这无疑使通信与导航的安全性变得更为重要。

随着通信技术的飞速发展和无线频谱资源的日益紧张,各类电子设备和系统共存于相同或相邻的频段内,导致信号干扰问题愈发突出,这给信号的传输和接收带来了巨大的挑战。Jeremy Johnston 等人,提出了利用雷达产生的回波作为载波波形来建立和维持通信链接的架构,再利用现有的电磁能量实现无缝的雷达通信共存[53]。为了减小全球导航卫星系统(GNSS)信号在与通信信号共存时的干扰影响,并提升导航系统的可靠性与稳定性。B. Motella 等人,提出了一种新的干扰误差包络(IEE)曲线,用于评估 GNSS 信号的干扰影响,改进了 GPS (Global Positioning System)与通信信号的共存关系[51]。由于多目标反射信号与通信信号的混叠直接影响多天线雷达通信系统的探测能力、通信质量和资源效率。Roman Jacome 等人,提出了一种用于联合多天线雷达通信系统的多维双盲反卷积方法,用以解决多目标反射信号和多载波通信信号的提取问题[54]。雷达探测与数据传输功能的冲突会严重影响系统的可靠性、性能和安全性。为此,Christian Sturm 等人,基于无线通信中使用的经典相位编码波形,提出了适用于同时执行数据传输和雷达探测的智能波形设计方法,实现高动态范围的雷达测量[55]。由于通信、传感器、算法、环境和系统架构等方面的限制,往往会出现多无人机系统中位置与速度信息协调不一致的情况,这种情况不仅会严重削弱多无人机系统的稳定性、任务执行能力和效率,还会增加能量消耗、碰撞风险和系统资源浪费。秦澍祺等人,提出了一种基于图论与一致性理论的分布式通信控制结构,实现了虚拟领航一致性编队控制飞行,成功使三架无人机在位置与速度信息上达成一致[56]。为了实现自主导航应用中雷达与通信系统的高精度定位,M. Elkholy 等人,提出了紧耦合集成算法,通过多步骤处理和扩展卡尔曼滤波器实现精确的车辆位置增强[57]。

随着经济全球化和互联网的蓬勃发展,通讯与导航不仅成为人们日常生活不可或缺的一部分,更是推动社会进步、经济发展和科技创新的重要力量,在现代社会中扮演着极其重要的地位和作用。在科技创新的推动下,雷达技术在通信与导航中也有了一些热门的发展趋势。研究表明,联合雷达与通信技术(JRC)系统在环境感知和即兴通信链路分配方面具有效率高和成本效益等优点[58]。JRC 技术通过共用频谱和硬件资源,实现了低成本、紧凑、低功耗和频谱共享的优势,已经成为民用和军事应用的重要组成部分。毫米波通信技术拥有几千兆赫宽的传输带宽,被认为是短距离无线链路的首选技术。且它的频段也适用于短距离雷达应用,能够提供高分辨率。研究指出,毫米波雷达通信系统在信号处理和多输入多输出技术方面具有巨大的发展潜力[40]。OFDM 雷达的波形在通信标准中被广泛应用,具有同时进行数据传输和雷达感知的优势,顺利解决了通信过程中频谱拥挤问题。相关研究讨论了 OFDM 波形设计和信号处理方法,以优化雷达和通信功能之间的权衡[59]。由于对系统高效率、高带宽、分辨率、精准定位和稳定数据传输的需求日益增长,相信这些技术在未来会愈加成熟。

5.3. 雷达技术在气象监测中的应用与发展

雷达信号在气象监测领域中具有重要作用,因为它能够精确探测和跟踪气象现象,如降雨、风暴和飓风。通过发射和接收无线电波,雷达可以实时提供降水强度、风速和风向等关键数据,帮助气象学家准确预报天气和监测极端气象事件。此外,雷达信号能够穿透云层和降水,提供全天候监测能力,因此

雷达信号在气象监测的应用具有重要意义。

由于传统水文气象分类算法在低信噪比条件下表现可靠性差,难以提供稳定的数据支持,导致在水平和垂直结构上的气象相态识别结果不够准确。Chong Wu 等人,研究开发了一种适用于中国极化雷达的改进水文气象分类算法(HCA),并在珠海雷达上进行了验证和应用,证实了该算法在低信噪比时能保持数据可靠性,并在水平和垂直结构上提供合理的相态识别结果[60]。此外,短期降水预测在时间分辨率和预测精度方面依然面临巨大挑战,而传统方法难以应对短时间内复杂的天气变化。为此,Yerin Kim 等人,通过条件生成对抗网络(CGAN)模型取得了 10 分钟到 4 小时高精度的短期降水预测[61]。与此同时,传统气象雷达数据网格化方法在数据精度和计算效率上存在不足,这种局限性进一步影响了天气数据的实际应用效果。Jordan P. Brook 等人,在气象雷达数据网格化的研究中,通过一系列理论和实际数据实验证实了新的变分网格化方法优于现有方法[62],新方法优化雷达数据处理流程,提高了网格化结果的精度与效率。为了解决现有天气预报方法对复杂天气场景的预测能力不足,难以平衡预测精度和可靠性的问题,Çağlar Küçük 等人,提出了一种基于变换器模型的天气预报方法,通过卫星数据进行地基雷达图像序列的预测,提高了预报的精度和可靠性[63]。

近年来,雷达技术在气象监测中的应用有了新的发展趋势。多波段雷达可以通过不同频率的雷达波来探测不同类型的气象现象,从而提高气象监测的精度和可靠性,在识别云层、降水类型和强度等方面具有明显优势和发展潜力[64]。气象雷达网络的建设和多源数据融合技术也是近年来的另一个重要发展方向。通过构建覆盖广泛的雷达网络,可以更全面地捕捉气象数据,通过融合其他气象观测数据,可以更全面地监测气象情况,提高预报的准确性和时效性[65]。相控阵雷达因其快速扫描和高分辨率的特点,逐渐成为气象监测中的新兴工具。研究表明,相控阵雷达可以实时监测大气层的动态变化,为气象预报提供详尽的数据支持[66]。相信雷达技术的新发展,可以在提高气象监测的精度和实时性的同时,也为未来的气象预报和灾害预警提供了更强大的技术支持。

5.4. 雷达技术在地质勘测中的应用与发展

为了降低自然灾害对人们生命财产的威胁,及时准确地监测和评估灾害的发生和演化是地球科学研究的主要内容之一。雷达的全天候工作能力,使其能够在恶劣天气条件下,进行灾害预警和地质灾害监测。同时,由于高分辨率成像和良好的穿透能力,雷达在地下水探测与考古勘探应用等方面也表现优越。在文献计量和科学计量分析中,雷达也在土木工程、地质研究、考古学和水文学中有广泛的应用[67]。

复杂地质环境中的多重干扰通常会限制信号的穿透能力和分辨率,从而对探测结果的准确性产生较大影响。A. K. Benson 等人,在地下水污染和断层检测中,通过研究证实地质雷达数据与井中的碳氢化合物污染有良好相关性,并能识别浅层断层和地下空洞,地质雷达可用于绘制地下结构图和检测地下水污染[68]。同时,Zhao Zhonghai 在地质危害调查中,发现地质雷达在调查地质灾害如地裂、岩溶塌陷、滑坡和活断层方面表现出色,能够快速准确地检测这些地质特征[69]。此外,Kong 的研究发现,地质雷达在隧道施工的地质预测中被广泛应用,其对工作面前的地质变化具有较高的识别能力,特别是在断裂带和含水层的探测中表现突出[70]。在复杂地质环境下,回波信号往往会受到信号衰减、噪声干扰、多路径效应、地层异构性影响。为了改善回波信号在复杂地质条件下的不足,Fan Cui 等人,采用高辐射功率增益的平面波束信号地质雷达阵列方法,提高回波信号的稳定性和质量,丰富目标响应参数[71]。此外,为了进一步提高复杂地质环境下探测信号的质量并减少环境噪声的干扰,Li Guo 等人,提出了 CEEMD (Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition)和排列熵的地质雷达去噪算法,有效去除复杂地质结构探测中的环境噪声,提高目标信号的分离效果[72]。

雷达技术在探测地质结构、识别地质灾害以及矿产资源勘探等方面发挥了重要作用,雷达技术随着

不断发展与演变,在地质勘测中的应用有了新的发展趋势。近年来,高分辨率雷达技术在地质勘测中的应用显著增加。研究表明,高分辨率雷达可以提供更清晰、更详细的地质信息,提高地质调查的准确性和效率[73]。由于合成孔径雷达干涉技术(InSAR)能够提供高精度的地表形变监测数据,且相比传统地质灾害监测方法,InSAR 技术成本较低,适用于大面积区域的监测。其在地质灾害监测中的应用得到显著提升,具有全天候检测、广泛检测范围和高检测精度等优点[74]。地下雷达能够提前预测不利的地质体和岩体结构,指导施工安全。并且可以探测深层地下结构,提供隧道和地下工程的安全保障。这些年,地下雷达技术在探测地下管线、岩石裂隙、富水区和岩溶洞穴方面取得了显著进展。这些技术可以在隧道建设和地下工程中提供重要的地质信息[75]。随着科技的前进,雷达技术在地址勘测中的应用与发展一定会取得显著的进步,也注定会为地质灾害预测和矿产资源勘探提供了更强大的技术支持。

5.5. 雷达技术在生物医学的应用与发展

雷达信号不仅能够在不接触人体的情况下,远程监测人的心跳、呼吸等生理信号,而且还可以穿透人体组织,实现高分辨率成像,进行疾病监测。由于雷达信号的优秀特性,使得雷达在生物医学领域的应用越来越广泛,尤其是在非接触式监测、成像和诊断方面。

无创检测技术以其安全性、便捷性和高效性,正在逐渐满足临床诊断、健康监测、慢性病管理和公共卫生等领域的多样化需求。随着技术的不断进步和成本的降低,无创检测的需求将进一步扩大。E.M. Staderini 等人,在论文中讲述了 UWB (Ultra Wide-Band)雷达在医学中的应用包括心脏生物力学评估、胸部运动评估、阻塞性睡眠呼吸暂停监测、软组织生物力学研究、心脏成像等,通过高分辨率、实时监测,该技术解决了传统医疗设备中检测精度不足、操作复杂或患者不适的问题[76]。然而,传统雷达系统在监测人体生理信号时面临一定的技术瓶颈,例如在心跳和呼吸率测量中的误差问题。Romon Neely 等人在电磁人体建模与生理运动雷达应用的研究中发现,通过雷达系统参数的选择、高保真人体模型的验证,提高了心跳和呼吸检测的准确性,增强了雷达在医学监测中的精确度和可靠性[77]。与此同时,当前用于医学成像的高精度设备(如矢量网络分析仪)因成本高昂而难以广泛推广。为了解决这一问题,Jayaseelan Marimuthu 等人,提出了使用软件定义雷达(SDR)技术的低成本可重构微波收发器。研究表明,该技术能够成功检测具有人体组织属性的模拟目标,不仅能够替代昂贵的矢量网络分析仪,还推动了医疗设备的普及化与可负担性[78]。此外,乳腺癌检测对深度分辨率和检测精度要求极高,但现有技术在这两方面存在明显不足。针对这一难题,Martin Maier 等人,提出了一种工作在 14 到 27 GHz 的 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave)雷达系统设计方法。通过 3D 电磁求解器模拟完整设置,该方法实现了小于 5 毫米的深度分辨率的高精度检测,为更精确的癌症诊断工具开发提供了技术路径[79]。传统生命体征监测设备需要直接接触患者,且同时监测多个目标时容易出现信号干扰和混叠问题。为了解决这一局限,Shekh M. M. Islam 等人,借助多对象生命体征无接触监测的雷达传感器,研究开发了用于远程呼吸和心脏活动监测的多普勒雷达,展示了在不接触的情况下同时对多个近距离对象的远程呼吸和心脏活动监测的能力,为解决多对象场景中成像难题提供了可能性,为未来更复杂的医学成像场景奠定了技术基础[80]。《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》将生物技术作为重点培育和发展的七大战略性新兴产业之一,这极大地推动了生物医学领域的发展,雷达技术在生物医学中的应用近年来得到了广泛关注,其在无接触生命体征监测、肿瘤检测、人体活动分析等方面展现了巨大的潜力。无接触生命体征监测技术能够检测微小的胸腔运动,提取心跳和呼吸信号。且其因无需直接接触,能够保障被监测对象隐私性的特点,而备受青睐[81] REF_Ref190440932 \r \h [82]。

一些先进天线技术,如 MIMO (多输入多输出)和相控阵天线技术,在复杂环境中依然能够保持高性能的监测能力,并且实现更广范围的监测和更高的空间分辨率。这些技术能够在低信噪比环境中提供更

好的性能,在医学雷达中的应用逐渐增加[83]。本文相信这些技术的发展能够提高医疗监测的精度和安全性,也为未来的医疗健康管理提供创新升级。

6. 总结与展望

综上所述,雷达信号技术在目标检测与追踪、通信与导航、气象监测、地址勘测和生物医学等多个领域展现了广泛的应用前景。随着国家“十四五”规划和《科技创新 2030——重大项目》的逐步落实,雷达技术已成为推动科技进步和产业升级的重要引擎,发展雷达信号技术和基于雷达信号的实际应用在提升国家综合实力和促进社会发展上起到关键作用。然而,互联网和大数据的高度发展,也使得雷达信号技术面临着数据处理、信号干扰和隐私保护等挑战。

展望未来,随着传统雷达信号技术与人工智能、大数据和物联网等新技术的融合,雷达信号技术有望实现更高的精度、更广的应用范围和更低的成本。此外,通过加强国际合作和跨学科研究,雷达技术的发展将进一步满足国家安全、经济建设和民生改善的需求。持续的政策支持和科研投入,将为雷达信号技术的创新和应用提供坚实保障,推动其在更多新兴领域中发挥重要作用。

参考文献

- [1] James, R.J. (1989) A History of Radar. *IEE Review*, **35**, 343-349. <https://doi.org/10.1049/ir:19890152>
- [2] 鉴福升, 李洁, 李迅, 等. 国外海岸警戒雷达现状与发展趋势[J]. 电讯技术, 2020, 60(2): 245-250.
- [3] 李纪三, 侯娇, 刘溶, 等. 基于贝叶斯滤波算法的警戒相控阵雷达目标跟踪时间资源优化分配算法[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1902-1910.
- [4] 杨秋, 顾杰, 魏平. 利用幅度重排的机载火控雷达工作模式识别方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(2): 42-48.
- [5] 余巍, 罗江, 李坤, 等. 基于指挥信息系统的火控雷达组网研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(10): 73-77.
- [6] 黄琼男, 朱卫纲, 李永刚. SAR 图像舰船目标检测数据集构建研究综述[J]. 电讯技术, 2021, 61(11): 1451-1458.
- [7] Liping, H.U., Chunzhu, D., Jinfan, L.I.U., et al. (2021) Non-Homologous Target Recognition of Ground Vehicles Based on SAR Simulation Image. *Systems Engineering & Electronics*, **43**, 3518-3525.
- [8] 韩长喜, 董金良, 邓大松, 等. 2021 年雷达技术态势与发展趋势[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(4): 329-334.
- [9] 刘尚争. 未来雷达探测发展重点[J]. 现代雷达, 2022, 44(2): 102-103.
- [10] 刘宏伟, 严峻坤, 周生华. 网络化雷达协同探测技术[J]. 现代雷达, 2020, 42(12): 7-12.
- [11] Williams, G.M. (2017) Optimization of Eyesafe Avalanche Photodiode Lidar for Automobile Safety and Autonomous Navigation Systems. *Optical Engineering*, **56**, Article 031224. <https://doi.org/10.1117/1.oe.56.3.031224>
- [12] Leonard, J., How, J., Teller, S., Berger, M., Campbell, S., Fiore, G., et al. (2008) A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle. *Journal of Field Robotics*, **25**, 727-774. <https://doi.org/10.1002/rob.20262>
- [13] Hu, C., Huang, Z., Qin, S. and Wang, X. (2012) A New 3D Imaging Lidar Based on the High-Speed 2D Laser Scanner. *SPIE Proceedings*, Beijing, 30 November 2012, Article 855805. <https://doi.org/10.1117/12.999564>
- [14] Gleckler, A.D., Gelbart, A. and Bowden, J.M. (2001) Multispectral and Hyperspectral 3D Imaging Lidar Based Upon the Multiple-Slit Streak Tube Imaging Lidar. *SPIE Proceedings*, Orlando, 19 September 2001, Article 440121. <https://doi.org/10.1117/12.440121>
- [15] Shangguan, M., Xia, H., Dou, X., Qiu, J. and Yu, C. (2020) Development of Multifunction Micro-Pulse Lidar at 1.5 Micrometer. *EPJ Web of Conferences*, **237**, Article 07010. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023707010>
- [16] Anthes, J.P., Garcia, P., Pierce, J.T. and Dressendorfer, P.V. (1993) Non-Scanned Ladar Imaging and Applications. *SPIE Proceedings*, Orlando, 15 October 1993, Article 157111. <https://doi.org/10.1117/12.157111>
- [17] 程川, 宋春华, 王鹏. 车载激光雷达发展研究综述[J]. 装备制造技术, 2022(5): 247-251.
- [18] Martin, A., Verheyen, P., De Heyn, P., Absil, P., Feneyrou, P., Bourderionnet, J., et al. (2018) Photonic Integrated Circuit-Based FMCW Coherent Lidar. *Journal of Lightwave Technology*, **36**, 4640-4645. <https://doi.org/10.1109/jlt.2018.2840223>
- [19] 李仙茂, 董天临, 黄高明. MIMO 雷达信号处理综述[J]. 现代防御技术, 2017, 45(1): 107-112+146.

- [20] Li, J., Stoica, P. and Xie, Y. (2006) On Probing Signal Design for MIMO Radar. 2006 *Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, 29 October-1 November 2006, 31-35. <https://doi.org/10.1109/acssc.2006.356577>
- [21] 李仙茂, 董天临, 黄高明. MIMO 雷达及其特性综述[J]. 现代防御技术, 2015, 43(4): 124-131+149.
- [22] Brookner, E. (2016) MIMO Radars and Their Conventional Equivalents. 2016 *IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW)*, Kiev, 27-28 September 2016, 7-15. <https://doi.org/10.1109/rmsw.2016.7778540>
- [23] Li, J. and Stoica, P. (2007) MIMO Radar with Colocated Antennas. *IEEE Signal Processing Magazine*, **24**, 106-114. <https://doi.org/10.1109/msp.2007.904812>
- [24] Brookner, E. (2016) MIMO Radars Demystified—And Their Conventional Equivalents. 2016 *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, Waltham, 18-21 October 2016, 1-10. <https://doi.org/10.1109/array.2016.7832614>
- [25] Chen, C.-Y. and Vaidyanathan, P.P. (2009) MIMO Radar Waveform Optimization with Prior Information of the Extended Target and Clutter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **57**, 3533-3544. <https://doi.org/10.1109/tsp.2009.2021632>
- [26] Chapman, B. (2018) Synthetic Aperture Radar. In: *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, Wiley, 1-4. <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0567>
- [27] 吴玉婕, 赵超英. UAVSAR 在地表形变监测中的应用综述[J]. 测绘科学, 2024, 49(1): 50-66.
- [28] Gilman, M. and Tsynkov, S.V. (2023) Transionospheric Autofocus for Synthetic Aperture Radar. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, **16**, 2144-2174. <https://doi.org/10.1137/22m153570x>
- [29] Villano, M., Krieger, G., Papathanassiou, K.P. and Moreira, A. (2018) Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface Using Synthetic Aperture Radar. 2018 *IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE)*, Milan, 12-14 March 2018, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ee1.2018.8385251>
- [30] Khoshnevis, S.A. and Ghorshi, S. (2020) A Tutorial on Tomographic Synthetic Aperture Radar Methods. *SN Applied Sciences*, **2**, Article 1504. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03298-6>
- [31] Chim, M.C. (2018) Prototype L-Band Synthetic Aperture Radar on Low-Altitude/Near-Ground Platforms. Purdue University.
- [32] Nascimento, A.D.C., Silva, K.F. and Frery, A.C. (2021) Distance-Based Edge Detection on Synthetic Aperture Radar Imagery. *Chilean Journal of Statistics*, **12**, 71-82.
- [33] Nüßler, D., Leuchs, S. and Krebs, C. (2023) Imaging Radar Systems for Non-Destructive Material Testing: An Overview of the State of the Art, the Limitations and the Opportunities of Radar Technology. *OCM 2023—6th International Conference on Optical Characterization of Materials*, Karlsruhe, 22-23 March 2023, 1-10. <https://doi.org/10.58895/ksp/1000155014-15>
- [34] Zhang, Y. and Wang, G. (2018) Application of Compressed Sensing in Vehicular LFM CW Millimeter Wave Radar Ranging. 2018 *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Chengdu, 7-11 May 2018, 1-3. <https://doi.org/10.1109/icmmt.2018.8563360>
- [35] Gao, X., Xing, G., Roy, S. and Liu, H. (2019) Experiments with Mmwave Automotive Radar Test-Bed. 2019 *53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, 3-6 November 2019, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ieeeconf44664.2019.9048939>
- [36] Pauli, M., Götzel, B., Scherr, S., Bhutani, A., Ayhan, S., Winkler, W., et al. (2017) Miniaturized Millimeter-Wave Radar Sensor for High-Accuracy Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **65**, 1707-1715. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2017.2677910>
- [37] McAulay, A.D. (2011) Millimeter Radar Improves Target Identification. *SPIE Proceedings*, Orlando, 5 May 2011, Article 885320. <https://doi.org/10.1117/12.885320>
- [38] Jose, E., Adams, M., Mullane, J.S. and Patrikalakis, N.M. (2010) Predicting Millimeter Wave Radar Spectra for Autonomous Navigation. *IEEE Sensors Journal*, **10**, 960-971. <https://doi.org/10.1109/jsen.2009.2037013>
- [39] Brooker, G.M. (2007) Mutual Interference of Millimeter-Wave Radar Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **49**, 170-181. <https://doi.org/10.1109/temc.2006.890223>
- [40] Mishra, K.V., Bhavani Shankar, M.R., Koivunen, V., Ottersten, B. and Vorobyov, S.A. (2019) Toward Millimeter-Wave Joint Radar Communications: A Signal Processing Perspective. *IEEE Signal Processing Magazine*, **36**, 100-114. <https://doi.org/10.1109/msp.2019.2913173>
- [41] Haynes, M.S. (2020) Surface and Subsurface Radar Equations for Radar Sounders. *Annals of Glaciology*, **61**, 135-142. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.16>
- [42] 郁文贤. 自动目标识别的工程视角述评[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 737-752.

- [43] 白冬杰. 车载毫米波雷达多目标跟踪算法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [44] Thakur, R. (2016) Scanning LIDAR in Advanced Driver Assistance Systems and Beyond: Building a Road Map for Next-Generation LIDAR Technology. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, **5**, 48-54. <https://doi.org/10.1109/mce.2016.2556878>
- [45] Bartoletti, S., Conti, A., Giorgetti, A., et al. (2014) Sensor Radar Networks for Indoor Tracking. *IEEE Wireless Communications Letters*, **3**, 157-160.
- [46] Bell, K.L., Baker, C.J., Smith, G.E., Johnson, J.T. and Rangaswamy, M. (2015) Cognitive Radar Framework for Target Detection and Tracking. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **9**, 1427-1439. <https://doi.org/10.1109/jstsp.2015.2465304>
- [47] Lu, W., Lin, Q., Song, N., Fang, Q., Hua, X. and Deng, B. (2021) Target Detection in Intelligent Reflecting Surface Aided Distributed MIMO Radar Systems. *IEEE Sensors Letters*, **5**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/lsens.2021.3061534>
- [48] Stolz, M., Li, M., Feng, Z., Kunert, M. and Menzel, W. (2018) High Resolution Automotive Radar Data Clustering with Novel Cluster Method. 2018 *IEEE Radar Conference*, Oklahoma City, 23-27 April 2018, 164-168. <https://doi.org/10.1109/radar.2018.8378550>
- [49] Rajab, K.Z., Wu, B., Alizadeh, P. and Alomainy, A. (2021) Multi-Target Tracking and Activity Classification with Millimeter-Wave Radar. *Applied Physics Letters*, **119**, Article 034101. <https://doi.org/10.1063/5.0055641>
- [50] Chen, Y., Wei, P., Zhang, H., You, M. and Li, W. (2023) Direct Target Joint Detection and Tracking Based on Passive Multi-Static Radar. *Remote Sensing*, **15**, Article 624. <https://doi.org/10.3390/rs15030624>
- [51] Motella, B., Savasta, S., Margaria, D. and Dovis, F. (2009) Assessing GPS Robustness in Presence of Communication Signals. 2009 *IEEE International Conference on Communications Workshops*, Dresden, 14-18 June 2009, 1-5. <https://doi.org/10.1109/iccw.2009.5207985>
- [52] Long, T., Liang, Z. and Liu, Q. (2019) Advanced Technology of High-Resolution Radar: Target Detection, Tracking, Imaging, and Recognition. *Science China Information Sciences*, **62**, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9811-0>
- [53] Johnston, J., Venturino, L., Grossi, E., Lops, M. and Wang, X. (2022) Radar-Enabled Backscatter Communication. 2022 *56th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, 31 October-2 November 2022, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ieeeconf56349.2022.10051960>
- [54] Jacome, R., Mishra, K.V., Vargas, E., Sadler, B.M. and Arguello, H. (2022) Multi-Dimensional Dual-Blind Deconvolution Approach toward Joint Radar-Communications. 2022 *IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC)*, Oulu, 4-6 July 2022, 1-5. <https://doi.org/10.1109/spawc51304.2022.9834016>
- [55] Sturm, C. and Wiesbeck, W. (2011) Waveform Design and Signal Processing Aspects for Fusion of Wireless Communications and Radar Sensing. *Proceedings of the IEEE*, **99**, 1236-1259. <https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2131110>
- [56] 秦澍祺, 王国胜, 梁冰. 基于分布式的虚拟领航一致性四旋翼无人机编队控制[J]. 人工智能与机器人研究, 2018, 7(4): 184-192.
- [57] Elkholy, M., Elsheikh, M. and El-Sheimy, N. (2023) Radar/Ins Tightly-Coupled Integration for Land Vehicle Navigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **1**, 807-813. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxviii-1-w2-2023-807-2023>
- [58] Feng, Z., Fang, Z., Wei, Z., Chen, X., Quan, Z. and Ji, D. (2020) Joint Radar and Communication: A Survey. *China Communications*, **17**, 1-27. <https://doi.org/10.23919/jcc.2020.01.001>
- [59] Zhang, J.A., Liu, F., Masouros, C., Heath, R.W., Feng, Z., Zheng, L., et al. (2021) An Overview of Signal Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **15**, 1295-1315. <https://doi.org/10.1109/jstsp.2021.3113120>
- [60] Wu, C., Liu, L., Wei, M., Xi, B. and Yu, M. (2018) Statistics-Based Optimization of the Polarimetric Radar Hydrometeor Classification Algorithm and Its Application for a Squall Line in South China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **35**, 296-316. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6241-0>
- [61] Kim, Y. and Hong, S. (2022) Very Short-Term Rainfall Prediction Using Ground Radar Observations and Conditional Generative Adversarial Networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **60**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3108812>
- [62] Brook, J.P., Protat, A., Soderholm, J.S., Warren, R.A. and McGowan, H. (2022) A Variational Interpolation Method for Gridding Weather Radar Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **39**, 1633-1654. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-22-0015.1>
- [63] Küçük, Ç., Giannakos, A., Schneider, S. and Jann, A. (2024) Transformer-Based Nowcasting of Radar Composites from Satellite Images for Severe Weather. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, **3**, 1-7. <https://doi.org/10.1175/aies-d-23-0041.1>

-
- [64] Montopoli, M., Ferrauto, G., Scaranari, D., Barbieri, S., Biscarini, M., Capozzi, V., *et al.* (2023) Overview on Weather Radar Applications. 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, 26-31 March 2023, 1-5. <https://doi.org/10.23919/eucap57121.2023.10133034>
 - [65] Sokol, Z., Szturc, J., Orellana-Alvear, J., Popová, J., Jurczyk, A. and Céleri, R. (2021) The Role of Weather Radar in Rainfall Estimation and Its Application in Meteorological and Hydrological Modelling—A Review. *Remote Sensing*, **13**, Article 351. <https://doi.org/10.3390/rs13030351>
 - [66] Fan, W., Xu, Z., Liu, J., Wang, Y. and Mo, W. (2022) Application Analysis of New Technology of Weather Radar in Disaster Prevention and Mitigation Service of Power Grid. *Journal of Physics: Conference Series*, **2248**, Article 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2248/1/012020>
 - [67] Elshaboury, N., Mohammed Abdelkader, E., Al-Sakkaf, A. and Zayed, T. (2023) A Critical Review and Bibliometric Analysis on Applications of Ground Penetrating Radar in Science Based on Web of Science Database. *Eng*, **4**, 984-1008. <https://doi.org/10.3390/eng4010059>
 - [68] Benson, A. (1995) Applications of Ground Penetrating Radar in Assessing Some Geological Hazards: Examples of Ground-water Contamination, Faults, Cavities. *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 177-193. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)00029-n](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)00029-n)
 - [69] Zhao, Z.H. (2002) The Application of Ground Penetrating Radar to the Investigation of Geologic Hazard. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, **13**, 100-102.
 - [70] Nan, Y.L., Han, X.L. and Ye, F.C. (2009) Application of Ground Penetrating Radar in Advanced Geological Forecasting for Expressway Tunnel. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, **7**, Article 132.
 - [71] Cui, F., Chen, Y., Zhang, Y. and Du, Y. (2021) Research on Application of Ground Penetrating Radar Array Method Based on Plane Beam Signal in Different Geological Models. *Acta Geophysica*, **69**, 2241-2260. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00684-5>
 - [72] Guo, L., Cai, L. and Chen, D. (2022) Research on Ground-Penetrating Radar Denoising Algorithm Based on CEEMD and Permutation Entropy. 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Beijing, 3-5 October 2022, 263-268. <https://doi.org/10.1109/iaeac54830.2022.9929797>
 - [73] Tan, S., Qian, P. and Wang, R.X. (2023) Application Research of 3D Geological Radar Detection Technology in Urban Road Disease Survey. *Journal of Physics: Conference Series*, **2651**, Article 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2651/1/012048>
 - [74] Yang, F., Jiang, Z., Ren, J. and Lv, J. (2022) Monitoring, Prediction, and Evaluation of Mountain Geological Hazards Based on InSAR Technology. *Scientific Programming*, **2022**, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2022/2227049>
 - [75] Zheng, X., Fang, S., Chen, H., Peng, L. and Ye, Z. (2023) Internal Detection of Ground-Penetrating Radar Images Using Yolox-S with Modified Backbone. *Electronics*, **12**, Article 3520. <https://doi.org/10.3390/electronics12163520>
 - [76] Staderini, E.M. (2002) UWB Radars in Medicine. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, **17**, 13-18. <https://doi.org/10.1109/62.978359>
 - [77] Neely, R., Naishadham, K., Sharma, A. and Bing, K. (2012) Electromagnetic Human Body Modeling with Physiological Motion for Radar Applications. 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, 7-11 May 2012, 818-823. <https://doi.org/10.1109/radar.2012.6212250>
 - [78] Marimuthu, J., Bialkowski, K.S. and Abbosh, A.M. (2016) Software-Defined Radar for Medical Imaging. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **64**, 643-652. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2015.2511013>
 - [79] Maier, M., Stapelfeldt, F. and Issakov, V. (2022) Design Approach of a K-Band FMCW Radar for Breast Cancer Detection Using a Full System-Level EM Simulation. 2022 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBiOC), Suzhou, 16-18 May 2022, 251-253. <https://doi.org/10.1109/imbioc52515.2022.9790275>
 - [80] Islam, S.M.M., Boric-Lubecke, O., Lubecke, V.M., Moadi, A. and Fathy, A.E. (2022) Contactless Radar-Based Sensors: Recent Advances in Vital-Signs Monitoring of Multiple Subjects. *IEEE Microwave Magazine*, **23**, 47-60. <https://doi.org/10.1109/mmm.2022.3140849>
 - [81] Islam, S.M.M. (2022) Radar-Based Remote Physiological Sensing: Progress, Challenges, and Opportunities. *Frontiers in Physiology*, **13**, Article 955208. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.955208>
 - [82] Giordano, M., Islamoglu, G., Potocnik, V., Vogt, C. and Magno, M. (2022) Survey, Analysis and Comparison of Radar Technologies for Embedded Vital Sign Monitoring. 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Glasgow, 11-15 July 2022, 854-860. <https://doi.org/10.1109/embc48229.2022.9871847>
 - [83] Shome, S., Chakraborty, M., Dara, B., Bera, R. and Maji, B. (2021) Modern Radar Topology for Bio-Medical Applications. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, 89-97. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6393-9_11
-