

雷达技术发展规律和宏观趋势分析

杨建宇*

(电子科技大学 成都 611731)

摘要: 该文着眼于历史、现实和未来的时间尺度,从目标、环境和任务等外因与方式、能力和资源等内因相互作用的视角,对雷达技术的发展动因和阶段特征进行分析寻证后认为,在通道构型、视角覆盖和信号维度等方面,实现由低维度探测向高维度探测的阶梯式演进,是雷达技术发展的基本规律,而改变信息获取方式、提升实现能力和增大资源利用,是雷达技术创新的主要途径。文中还据此推演了未来雷达技术的发展方向和主要特征,并提出了促进创新发展的建议。

关键词: 雷达技术; 发展动因; 发展规律; 宏观趋势

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)01-0019-09

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20010

Development Laws and Macro Trends Analysis of Radar Technology

Yang Jian-yu

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Viewing from the interaction between external and internal causes on the time scale of history, present and future, this paper analyzes and demonstrates the developing motivation and stage characteristics of radar technology. The external causes are interpreted as target, environment and mission, and the internal causes as information acquisition pattern, realization ability and resource utilization. The fundamental law of radar development is revealed as evolving stepwise from lower into higher dimension of detection through the aromorphosis of channel configuration, viewing angle and signal dimensionality, while the main innovation strategies of radar technology are summarized as modifying information acquisition pattern, enhancing realization ability and increasing utilized resources. Furthermore, the developing trends and main characteristics of future radar technology are deduced, and proposals for promoting future innovation and development are also presented.

Key words: Radar technology; Developing motivation; Developing law; Macro trends

1 引言

雷达技术已经走过了70多年的发展历程,先后经历了二次世界大战、冷战军备竞赛、新军事革命等不同历史因素的促进并经受了考验,雷达技术的体制、理论、方法、技术和应用都已得到很大的发展^[1]。进入新世纪前后的10多年间,雷达技术面临的目标、环境、任务,以及支撑雷达系统研制生产的相关技术,都发生了深刻的变化。当今雷达技术仍在高速地发展和演变,从而衍生出许多新的概念、体制和技术^[2],以适应未来全球资源竞争对雷达技术提出的严峻挑战。

目前已有许多综述性文献,在不同的历史时期,分别从特定历史阶段^[3-4]、多种系统体制^[5-11]、不同应用领域^[12-15]、特定国家和机构^[16-20]等角度,对雷达技术的发展进行了回顾和分析,剖析重点装备和

技术、分析历史阶段划分、透视装备发展主线、归纳技术发展动向。这些工作对于促进当时的雷达技术发展,起到了重要的推动作用。

本文试图从宏观的视角和大的时间尺度,认识雷达技术发展的内外因素和物理实质,分析雷达技术创新和变革的源动力,探讨雷达技术发展的规律和主要表现形式,剖析不同发展阶段的主要技术特征,推演预测未来发展的方向和特征,透视制约雷达技术发展节奏的内外因素。以期把握雷达技术发展的时代脉络和宏观趋势、契合需求和引领创新、推动发展和促进应用,提供新的观察视角和思考方法。

2 雷达系统技术发展的外因

目标、环境和任务,是促成雷达体制、频段、理论和技术不断发展演变的3个主要外部因素。其中,对雷达技术发展推动作用最大的是目标多样化,其次是环境复杂化和任务多元化。

目标多样化是指目标的种类构型、运动特性、

活动空间、散射特性、极化特性、频谱特性等方面呈现多样化的趋势。例如,目标的种类构型由常规的空中飞机逐渐扩展为战术导弹、弹道导弹、巡航导弹、掠海导弹、无人飞机、浮空平台、临近空间平台、空天飞机、碎片卫星、潜艇舰船、海面地表、山川地形、地下建筑、跑道机场、桥梁建筑、道路工事、营房部队、发射井架、火力单元、车辆装甲、输电线路、信息装备等。而目标的特征属性逐渐由常规目标扩展为隐形、隐蔽、遮蔽,静止、时敏、慢速、高速、机动、变轨,低空、高空、空间、临近空间等。

环境复杂化是指雷达的工作环境、生存环境、电磁环境,以及目标的周边环境变得更加复杂。例如,除传统的气象、云雨、地海杂波外,雷达还要面临山地、城市、海浪、海面蒸发等引起的强杂波、仙波;除了平坦地物背景中的目标探测,还需对山川、河谷、城市、建筑环境中的目标进行探测。

任务多元化是指雷达的作战使命出现多向分化和范围扩展的趋势,以满足现代信息化战争,以及应对多种威胁和遂行多样化任务的需要。例如,除了传统的警戒、引导、火控、制导等任务外,雷达还需要在对地侦察、精确打击、防空防天、反导反卫等军事任务,以及反恐维稳、灾难救援、危机控制等任务中起到预警探测、跟踪制导、侦察监视、目标识别、打击评估、环境感知、目标搜索等作用。

正是以上 3 个方面外部因素的共同作用,促使了雷达技术的进步和体制的多样化发展。例如:

在更复杂的周边环境中,获取更加精细的目标信息,以实现目标的成像与识别的需求,促使雷达体制演化、极化利用、频段拓展、带宽增大。因此出现了双多基地 SAR(Synthetic Aperture Radar)、3 维 SAR、极化干涉 SAR、太赫兹雷达等新的雷达技术。

在更复杂的目标环境中,以更高数据率,实现多样化目标的探测与跟踪的需求,促进了雷达向多功能、数字化方向发展,平台向临近空间和空间平台延伸。因此出现了数字相控阵雷达、MIMO(Multiple Input Multiple Output)雷达、临近空间雷达和天基预警雷达等新的雷达技术。

在更复杂的生存环境中,实现多样化目标的探测与跟踪,并获得更高的作战性能的需求,促使雷达提高生存能力、加强隐蔽性,改善低截获、抗干扰和反隐身性能,因此出现了无源、被动、外辐射源、双多基地、栅栏、分布式、网络化等雷达体制。

3 雷达系统技术发展的内因

“方式”、“能力”和“资源”是雷达体制、频

段、理论和技术不断发展和演变的 3 个主要内部因素。其中,对雷达技术创新最具推动作用的是“方式”,其次是“能力”和“资源”。

“方式”是指雷达系统获取信息的方式,包含运动、布设、配置、构型等实现途径。

“能力”是指相关技术进步对雷达系统运动、布设、配置、构型,信号产生、发射、接收、记录和处理等方面提供的实现能力。

“资源”是指雷达系统对平台、波形、频带、极化等资源的利用程度。

以上 3 个方面的内部因素,以不同形式,从不同侧面,在历史、现实和未来的时间尺度上,始终是推动雷达体制演化与创新的内在动力。

3.1 获取信息方式的改变是雷达体制创新的源泉

雷达获取目标信息的占据、运动、配置、构型等几何方式的改变,将引起回波中目标信息存在的形式与规律的显著变化,从而导致目标信息提取方法、雷达系统体系结构和实现技术的深刻变化,也会使雷达具备新的能力,适应新的作战任务需要。例如:

雷达占据的空间位置,由最初的一点布局,逐渐衍生为一条直线、两条直线乃至两条相互缠绕的曲线,从而实现了由方位低分辨的对空警戒雷达向方位高分辨的 SAR、干涉 SAR 和分布式 SAR 2 维对地成像的衍生,并且正在进一步向多条平行直线等面状布局形态拓展,形成真正具有高程分辨能力的 3 维 SAR 成像。同时,雷达站占据的空间位置,也由最初的一点布局,逐渐衍生出双点、多点布局,从而形成了双多基地雷达。可以预期,未来还将进一步向多点分布式雷达和多点立体网格雷达演化。

雷达占据的等效空间位置,也可以利用目标相对于雷达转动引起的观察视角变化来实现。例如,利用目标平动产生的观察视角 1 维变化,已发展出了 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 2 维成像技术。可以预期,利用目标平动和转动产生的观测视角 2 维变化,未来还可能发展出 ISAR 3 维成像技术。

雷达通道占据空间位置的配置方式,由具有周期、平面、连续特征的传统阵列,逐步衍生为单发多收、端发多收、多发多收、随机和共形阵列等多种不同形态,演绎出不同的信息获取能力,从而产生了数字波束形成、数字阵列雷达和共形阵列雷达。可以预期,未来还将进一步向具有间断多组形态的分布式阵列方向衍生。

这些例子都从不同角度表明,改变获取信息方式是雷达体制创新的源泉。

3.2 获取信息能力的增强是雷达体制变革的基础

产生、发射、接收、记录、处理等基础技术和承载平台等相关工程实现技术的进步，可以为雷达系统提供新的技术能力。例如：

飞机使雷达具备了运动能力，能够以运动的方式获取目标信息，从而构成了合成孔径雷达诞生的硬件基础，雷达技术产生了革命性的进步。飞机、卫星、飞艇等承载平台，也使雷达获得了登高望远的能力，承载于飞机和卫星的雷达系统，由于视距范围显著增加、观测范围增大，可以大大拓展雷达的探测距离和覆盖范围，实现早期预警和广域监视。

收发相参技术的突破，使得雷达具备了相位控制和相位信息利用的能力，从而构成了上世纪60年代相控阵、合成孔径和脉冲多普勒三大体制同时诞生的技术基础，也使雷达技术产生了划时代意义的飞跃。

有限极化控制和利用能力，已经使雷达取得相当的效益。如利用极化在警戒雷达中对抗有源/无源干扰、在合成孔径雷达中进行地物分类，在极化干涉SAR中反演植被高度等等。随着极化控制和极化信息利用能力的增强，可以预期，雷达技术有望获得新的发展机遇。例如，如果采用类似相位调制和控制的方式对极化进行控制和利用，有可能为雷达提供新的能力，从而产生新的体制变革。

多通道同时记录能力、多波形产生和控制能力，使传统相控阵雷达得以衍生出接收DBF (Digital Beam Forming)、数字阵列和正交波形MIMO雷达，从而获得了同时多波束、波束3维空变的能力，以及更高的数据率、更多的功能、更强的环境适应能力、更好的低截获和抗干扰能力。

这些例子都从不同角度表明，新技术的利用和集成，是雷达体制不断演变发展重要的技术和物质基础。

3.3 获取信息资源的利用是雷达体制演化的重要途径

随着相关技术领域的进步和经济可承受能力的增加，雷达系统对已有资源所提供信息的利用程度逐渐提高，雷达系统可利用的资源种类和数量也逐渐增多，从而引起体制和能力上的显著变化。

对雷达系统现有资源进行优化配置，并增加信号处理的空间维数，从而在更高维的信号空间中扩大和鉴别目标与背景的差异，实现目标信息的充分挖掘和利用，是雷达性能提升的重要途径。例如，在运动的雷达中寻求地面运动杂波与空中运动目标回波差异的努力，带来了重频提高和信号空间维度增加，从而促进了脉冲多普勒体制的诞生和发展。

通过增加平台、相位、极化、频段、带宽、波形、信源、先验信息等资源的种类或数量，可以构成多波段多极化SAR、极化干涉SAR、正交波形MIMO雷达、多波段多极化警戒雷达、多平台联合预警雷达等。可以预期，随着经济可承受能力的增强，未来将允许采用更多的系统资源，构成形态更为复杂的立体网络雷达等探测系统。

由此看出，资源的增加和利用是雷达体制演化的重要途径。

4 雷达系统技术发展的规律

根据以上对雷达技术发展外因、内因的分析，结合雷达技术发展演进历史的重大事件，可以初步归纳出雷达技术发展演变的物理实质和基本规律。雷达系统的发展也像其它事物的发展演变一样，遵循着由简单到复杂、由低级到高级的普遍规律。总的来说，其发展规律是由低维度探测逐步向高维度探测演进，如图1所示。



图1 雷达系统技术发展规律与趋势

从长远来看，雷达技术目前仍处于其发展历程的中级阶段，其发展节奏取决于应用需求与综合能力的契合。相关技术的革命是雷达系统飞跃发展的推动力，新概念和基础理论的突破是雷达新能力形成的先导，基础技术的变革为雷达性能提升带来新的机遇。

4.1 占据更大谱宽是雷达体制创新的物理实质

在雷达技术发展和体制多样化的表象后面，隐藏着贯穿其发展脉络的两条重要线索：即占据更宽的频谱，以获得高的纵向分辨能力和定位精度；占据更大的空间谱^[21-23]，以获得更高的横向分辨能力和定位精度。

目标散射场在空间球面上形成空间谱，传统单站、双多基地、分布式雷达，2维和3维SAR及ISAR，

相控阵、数字阵、分布式相控阵和未来的立体网络雷达等,均可以在空间谱球面上找到其对应的形态。

4.2 雷达系统逐步由低维度向高维度探测演进

雷达系统的维度主要体现在探测器的构型、观测视角的覆盖和信号空间的维度^{*} 3 个方面,基本遵循由“少”到“多”的渐进演变规律。同时,雷达系统的资源消耗呈逐渐增多的趋势。

4.2.1 探测器的构型

雷达构型由单探测器(单一收/发系统)构型向多探测器(多个收/发组件)构型方向演化,以增强雷达对波束形态、扫描性能和覆盖范围的控制能力,从而提高雷达的目标探测能力和抗干扰能力。

例如,预警、警戒、制导、火控雷达已经由单一收/发系统演化出具有多个收/发组件的 1 维电扫和 2 维电扫相控阵雷达。正进一步由周期、平面、模拟和连续阵列演化为随机、共形、数字和分布式阵列等复杂高维构型。

4.2.2 观测视角覆盖

对目标的观测视角由单一视角向多视角方向演化,以增大观测视角范围,获取更多的目标空间谱信息,从而得到更高的横向分辨能力和定位精度,同时增强系统的抗干扰能力。

观测视角的增大,可以由雷达相对于目标的横向运动(SAR)、目标相对于雷达的横向运动(ISAR),目标与雷达之间的相对横向运动(即 SAR 和 ISAR 的结合)以及雷达系统站点的横向布局形态(多基地、分布式、网络化等)等多种方式来实现。这几种情况,已经、正在和将要向更高的维度演变。

例如,由传统警戒雷达的单视角点状观测,已经演化出基于目标直线运动的逆合成孔径 2 维成像,形成了等效线状观测。可以预期,未来还可能向基于目标运动和自旋的逆合成孔径 3 维成像方向发展,形成等效面状观测。同时,由点状观测已经演化出合成孔径雷达的线状观测,正进一步演变为线阵合成孔径 3 维成像的面状观测。

此外,值得密切关注的是,目前雷达系统的布局方式已经发展到网络化雷达的类平面布局。可以预期,随着相关技术进步、经济能力的提升和对雷达系统探测方式的重新认识,未来还可能进一步向立体网格布局方向发展。

4.2.3 信号空间维度

目标检测、跟踪与识别的信号空间由低维度向高维度演化,以利用高维空间中目标与背景之间更

大的差异性,改善雷达发射隐蔽性、增强抗干扰能力,增强复杂背景中微弱目标的探测能力。其表现是,雷达系统的回波输入维度和处理维度呈逐步增加的趋势。

处理维度增加的表现是,目标检测与跟踪的信号空间由早期的时域 1 维检测,已经演化出时-频域 2 维检测(动目标显示 MTI、动目标检测 MTD、脉冲多普勒 PD 等)和检测后跟踪(DBT),正进一步向距离-方位-扫描周期构成的 3 维跟踪后检测(TBD)演变。可以预期,未来还可能向更高维的检测与跟踪方向发展。同时,运动目标分类识别的信号空间由传统的运动特征识别,正在向 1 维和 2 维成像识别方向拓展,并将进一步向基于运动特征、雷达截面积起伏、质阻比、微多普勒、极化等特征构成的多维空间综合识别方向发展。

输入维度增加的表现是,雷达系统由早期的窄带、单频、单极化逐步向宽带、多频段、多极化演变。采用频率捷变、多频段、极化捷变、多极化等技术,可以在更宽频域范围和多极化域中更加有效地观测目标与环境的差异,以改善雷达的目标检测、低仰角跟踪、反侦测抗干扰等性能;采用瞬时宽带、正交多波形等技术,以改善雷达分辨率、截获概率和空域凝视覆盖等性能。可以预期,未来还将更多地利用包括目标和环境先验信息及其它传感器信息等在内的多种资源,使雷达系统在更加复杂环境中具备更高的探测性能。

从长远来讲,雷达系统的视角覆盖将由单视角点状布局向 1 维多视角布局、2 维多视角布局演化,最终趋于 3 维多视角布局。雷达系统的探测器构型将逐渐由单探测器构型向多探测器简单构型、多探测器共形构型演化,最终趋于多探测器复杂构型;而雷达系统的回波信号空间将由最初的 1 维信号空间逐步向 2 维信号空间、多维信号空间演化,最终趋于高维信号空间。在未来发展中产生的新体制雷达,将是现有体制雷达体系的有益拓展,它们相互依存,共同发挥体系探测的作用。

雷达系统的观测视角、通道构型、信号维度 3 个重要方面的不同演化层次,也是雷达发展进程阶段划分的重要依据。

4.3 雷达技术还处于发展历程的中级阶段后半期

根据以上对雷达系统技术发展演变规律的分析和发展趋势的推演,结合国际公认的一些划分方法,可以初步推断,若将雷达技术的整个发展划分为初级、中级和高级 3 个阶段,则目前的雷达技术仍然处于其发展历程的中级阶段后半期,如图 2 所示。

^{*} 或简称“通道构型”、“视角覆盖”、“信号维度”

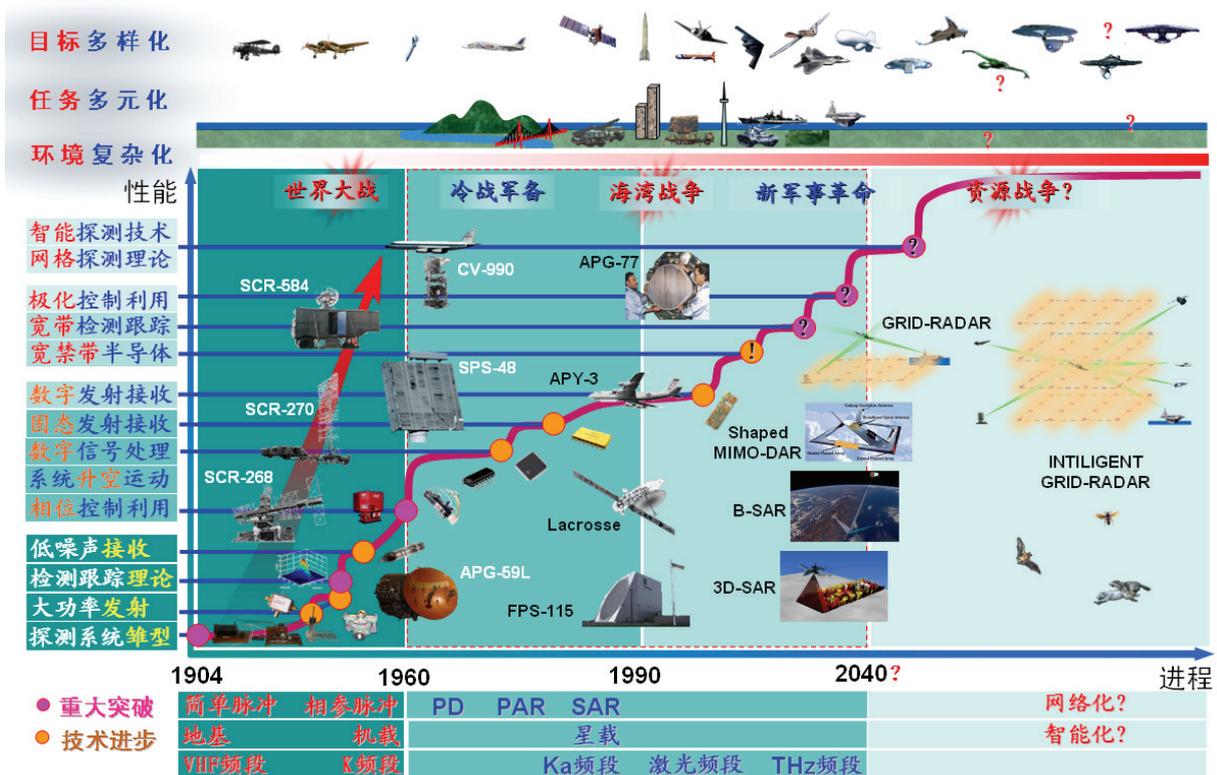


图 2 雷达技术发展历程与未来

整个中级阶段将以目前 3 种主流体制(相控阵、合成孔径、脉冲多普勒)的诞生和发展、演变和完善,以及智能化、网络化的萌芽为主要标志。因此,雷达技术依然有相当大的发展空间,也还有相当漫长的发展历程。因此,在雷达的理论、体制和技术的创新和新型装备的发展方面,依然长路漫漫、大有可为。

初级、中级和高级这 3 个阶段的持续时间将呈逐渐拉长的趋势。这是因为,根据事物发展的普遍规律,在雷达技术发展逐渐趋于其终极目标的过程中,技术进步将必然放缓。

4.3.1 初级阶段(上世纪前半叶,约 50 年)

从 20 世纪初出现的基于电磁波发射接收和金属物体反射的探测系统专利(1904 年,德, Huelsmeyer)算起,到第二次世界大战结束和 20 世纪 60 年代的相控阵雷达(1960 年代,美, AN/SPS-48^[24])、合成孔径雷达(1966 年,美, CV-990 机载 SAR^[25])和脉冲多普勒雷达(1959 年,美, AN/APG-59^[26])诞生之前的这一段时期^[27-30],可算作雷达发展的初级阶段。

在这个阶段,飞机的发明和大规模应用于世界性战争,对飞机实现远距探测和告警的急迫需求,极大地刺激和推动了雷达系统、雷达理论和基础技术

的高速发展,使雷达得以在实战中用于警戒、搜索和火控,并在相当程度上影响了战争的进程和结局。

这一时期,雷达体制由最初的双基地连续波、单基地脉冲发展为单基地相参脉冲体制;工作频段由 VHF 频段扩展至 K 频段;承载平台由地基扩展至机载;大功率发射、低噪声接收技术和信号处理理论^[1]都得到极大发展。

这一时期主流雷达装备的主要特征是单视角点状布局(单站,未合成孔径)、单探测器构型(非相控阵)和 1 维信号空间处理(时域 1 维检测)。

4.3.2 中级阶段(前半期,上世纪 60 至 90 年代,约 30 年)

从 20 世纪 60 年代相控阵雷达、脉冲多普勒雷达、合成孔径雷达出现,至固态有源相控阵雷达(1980 年代,美, AN/FPS-115“铺路爪”^[31])、有源相控阵脉冲多普勒雷达(1995 年,美, AN/APG-77^[5])列装,合成孔径雷达(1988 年,美, Lacrosse 星载 SAR^[32]; 1991 年,美, E-8A 的 AN/APY-3 机载 SAR^[30])用于上世纪 90 年代的海湾战争的这一段时期^[28,30],可算作雷达发展中中级阶段的前半期。

在这个阶段,与雷达相关的基础技术不断取得重大突破,高速喷气飞机、中远程导弹、军用卫星的出现并大规模应用于冷战军备竞争,使得雷达技

术得以继续保持高速发展,并广泛应用于预警、警戒、制导、火控、侦察和监视等领域^[33]。

这一时期,雷达技术的主流发展方向是相控阵、合成孔径,脉冲多普勒体制的诞生和发展;其中,相控阵由无源发展为有源^[34],合成孔径雷达观测地面目标的能力由静止扩展至动目标^[35],脉冲多普勒雷达改善了下视能力。雷达工作频段由 K 频段扩展至 Ka 频段,承载平台由空基扩展至天基。固态器件、计算机、微波集成电路、数字集成电路等基础技术的成果被大量用于雷达系统,固态发射、低副瓣天线、数字处理、自动检测、自动跟踪等技术也得到极大发展。

这一时期主流雷达装备的主要特征是 1 维多视角布局(单站, SAR, ISAR, 1 维线状布局)、多探测器简单构型(单站, 模拟相控阵、平面相控阵)和 2 维信号空间处理^[36-37](MTD, PD, SAR, ISAR, 距离-多普勒 2 维处理, 距离-方位 2 维跟踪)。

4.3.3 中级阶段(后半期, 上世纪 90 年代至本世纪 40 年代, 约 50 年)

从 20 世纪 90 年代海湾战争前后, 固态有源相控阵雷达、有源相控阵脉冲多普勒雷达列装, 合成孔径雷达投入实战使用之后, 到大约本世纪 30 年代, 共形数字相控阵雷达^[34]、双多基合成孔径雷达^[38]、下视 3 维合成孔径雷达^[39]、扁平网络化雷达^[40]等新体制形成装备的时期, 可算作雷达发展的中级阶段的后半期, 也是目前正经历的发展阶段。

本阶段已发生的历次高技术局部战争, 昭示了以信息主导和远程精确打击为主要特征的新军事革命的到来, 同时, “911” 等事件还让世界各国深刻认识到必须认真考虑如何应对多种威胁和完成多样化作战任务。因此, 雷达技术发展的外部因素有了极大的改变, 目标多样化、环境复杂化和任务多元化成为本阶段雷达技术面临的严峻挑战^[41-42]。同时, 平台多样化、基础技术突破和经济能力增长, 也为雷达的发展带来新的机遇。

这一时期, 相控阵雷达、合成孔径雷达、脉冲多普勒雷达 3 大主流体制已经、正在和将要进一步演化, 而协同探测/分布式/网络化雷达体制也将开始逐渐登上历史舞台; 工作频段将由 Ka 频段扩展至太赫兹和激光频段; 承载平台将由天基扩展到临近空间等平台; 与雷达相关的微波集成电路和数字处理等基础技术已取得很大成就, 并孕育着宽禁带半导体等新的重大突破, 也将为雷达技术的进一步发展提供新的空间。

本阶段主流雷达装备的主要特征将是 2 维多视

角布局(扁平网络化多站雷达, 近 2 维面状布局; 干涉 SAR^[43]、双多基 SAR、3 维 SAR、3 维 ISAR, 近 2 维面状布局)、多探测器共形构型(单站, 数字相控阵, 共形相控阵)和多维信号空间处理(TBD, 距离-方位-时间 3 维跟踪检测; 3 维 SAR、3 维 ISAR, 距离-方位-多普勒 3 维处理; 多站、多波段、多极化、多波形等构成的多维信号空间)。

4.3.4 高级阶段(未来大约 40 年以后)

到大约本世纪 40 年代, 共形数字相控阵雷达、双多基 SAR、3 维 SAR、扁平网络化多站雷达等新体制雷达形成装备并经过实战检验后的时期, 可称为雷达技术发展的高级阶段。

未来的雷达探测技术将突破现有思路的束缚, 由目前集中式的信息获取、基于设备的探测模式、单频段单极化的系统构成、目标失配的信号波形、预先设定的工作模式、基于统计的检测方法, 向分布式信息获取^[44]、基于体系的探测模式、多频段多极化的系统构成、目标匹配的信号波形、自适应及智能化的工作模式^[45-46]、环境知识辅助的检测方法^[47]等方向拓展。同时, 利用天基和临近空间等平台的雷达探测技术, 将得到更加广泛的重视。这些努力将最终演化出实现电子信息获取的全新一代的雷达探测体制、装备、系统和体系。

这一时期新型雷达装备的主要特征将可能是 3 维多视角布局(例如, 立体网格雷达, 3 维体状布局; 多站分布式/网络化 SAR, 多外辐射源 SAR, 近 3 维体状布局)、多探测器复杂构型(例如, 多站分布式共形数字相控阵)和高维信号空间处理(例如, TBD, 距离-方位-多普勒-时间等多维跟踪检测; 全频段、全极化、多波形、多信息源等构成的多维信号空间)。

4.4 雷达技术的发展节奏受到内外因素的制约

雷达技术的发展一直受到目标、环境和任务 3 个外部因素的牵引制约。同时, 方式、能力和资源 3 个内部因素所涉及的认识问题和可行性问题也是影响雷达技术发展节奏的关键因素。内外因素的相互作用和矛盾主体的转化, 共同决定雷达技术发展的节奏和进程。

4.4.1 发展节奏取决于应用需求与综合能力的契合

科学技术带来新的进步, 新的进步产生新的需求, 新的需求促进科学技术发展, 这是一个循环往复的过程。雷达技术正是在这一过程中诞生和发展、演变和完善的, 而其发展节奏却取决于应用需求与综合能力的契合。

应用需求与综合能力的契合, 是指雷达发展的内外因素构成的“想得到”(方式)、“做得到”(能力、资源)、“用得上”(目标、环境、任务)3 个要素的

否齐备，当其中一个或两个要素已经具备时，其余的要素则成为制约雷达技术发展的主要矛盾。从雷达技术发展的历史进程来看，在不同历史时期，这些要素的地位和具备与否，又是相互转化的，3 个要素的地位在时间尺度上大体上遵循的是一个倒序排列。

雷达诞生的初期，发展相对较慢，主要制约要素是第 3 个要素；随后受到战争等需求的强烈刺激，取得了大的发展，主要制约要素转化为第 2 个要素；当雷达发展到高级阶段，将主要受制于第 1 个要素，同时，第 2 个要素中的个别因素仍将起到相当的制约作用。

雷达技术正在向更加复杂的高维度探测系统发展。中后期的 2 维多视角布局、多探测器共形构型和多维信号空间处理，乃至下一阶段的 3 维多视角布局、多探测器复杂构型和高维信号空间处理，无疑将会消耗更多的平台和系统资源。但是，更为困难的问题是如何科学合理地聚合这些资源，并有效而充分地发挥它们的综合作用。例如，以立体网格雷达探测系统为代表的多平台复杂探测系统，必然将会涉及到探测方式、回波模型、信息提取、系统构型、任务分配、资源调度、实现技术、探测效能等一系列复杂的理论、机理、方法、技术等问题。这些问题，本质上是一个认识问题，遵循实践-认识-实践的认识规律，需要有一个相当漫长的历史过程，而在这个过程中还受到需求和投入的影响。因此，可以预期，“想得到”这个要素将成为雷达技术发展的中级阶段的后半期和高级阶段中制约技术发展的根本因素。

4.4.2 基础理论与技术的进步是雷达技术发展的基石

新概念和基础理论对雷达系统新能力的形成起着决定性的先导作用，这是雷达发展历程中不断被证实的规律。例如，首先是观察到电磁波的发射、接收和反射的现象，发现反映电磁波规律的麦克斯韦方程组，随后才有了雷达技术的萌芽和具有现代雷达基本特征的雷达系统的诞生；而紧随其后的匹配滤波、模糊函数、最佳检测、卡尔曼滤波等基础理论，奠定了雷达波形设计、信号与数据处理的理论基础，从而显著地改善了雷达的性能。波束形成与控制、合成孔径成像处理、脉冲多普勒处理等新概念和基础理论对现代相控阵雷达、合成孔径雷达、脉冲多普勒等雷达的诞生也曾经起到过先导和奠基作用。

基础技术的变革可以为雷达性能的提升提供新的机遇，也是雷达发展历程中被多次证实的规律。例如，磁控管的发明导致了微波雷达的问世，显著增大了雷达的探测威力。随后的行波管、固态发射

等技术显著改善了雷达的运动目标探测能力，也为合成孔径雷达和脉冲多普勒雷达的实现提供了可能。石英晶振、锁相环路等技术为雷达波形高性能产生，提供了重要的硬件基础；超外差接收等技术为雷达实现低噪声接收提供了必要的技术条件。单脉冲跟踪、脉冲压缩、动目标显示、机载动目标显示、机载地面动目标显示等技术，为实现有效和充分的目标信息提取，起到了重要作用。集成电路、数字处理等技术，为实现脉冲压缩、成像处理、自动检测、自动跟踪以及雷达系统的数字化，提供了关键的技术手段。

可以预期，新的概念、基础理论和基础技术今后仍将为雷达技术的发展和探测性能的提高，起到不可或缺的重要作用。例如，超低副瓣自适应阵列天线技术、空时 2 维自适应处理将是新一代脉冲多普勒机载预警雷达中提高下视能力的核心技术；宽禁带半导体可以显著增大固态器件功率，极大提高雷达系统的探测威力和可靠性；超常电磁材料、纳米电子技术、微机电技术可能孕育着雷达系统新的变革。智能化探测和网格化探测的基础理论，将为可能出现的智能雷达和立体网格雷达的发展起到先导作用。

4.4.3 相关技术的革命是雷达技术飞跃发展的推动力

工作平台是雷达赖以存在的几何空间，是决定雷达获取信息方式的基本要素，也是雷达技术发展和体制创新的重要途径之一。新平台的合理利用，有可能使得雷达的探测方式、回波模型、信息提取、系统构型、实现技术、探测效能等方面发生根本性变化，进而为雷达技术的发展、提供新的动力和新的机遇。

例如，飞机、导弹、卫星的出现，使得雷达系统可以安装在高速飞行的空中和空间平台上，雷达系统探测方式发生了根本性改变，从而诞生了全新体制的合成孔径雷达和脉冲多普勒雷达，为雷达提供了高性能的对地侦察、机载火控和机载预警等新的能力，使雷达技术产生了飞跃式的发展。

由此推演，天基预警雷达将是今后雷达技术发展的必然趋势。而无人机、浮空平台、临近空间平台、空天飞机、空间站等新和次新的平台，也可能带来雷达探测方式的根本性改变，使雷达探测的概念和体制发生极大的变化，从而再次使雷达技术产生新的飞跃，为雷达提供广域监视、不间断实时监控等新能力，有效地应对雷达面临的现实和未来的挑战。

此外，现代仿生学、现代通信导航技术、纳米电子技术、量子技术等相关技术，以及磁探测技术、

重力场探测技术和其它基于新的物理机理的探测技术,也将可能为雷达探测技术提供有益的借鉴或新的,甚至革命性的发展机遇。

5 结束语

对雷达技术发展趋势的分析,可以从多种不同角度来进行。从需求角度进行分析,可以提供关于体系、装备和技术需求的全面认识。从技术角度进行分析,则可以提供有关雷达技术发展演变规律的理解、对雷达技术前沿与未来的深刻认识,以及对雷达技术未来能力的预测,是把握雷达技术发展主线、实现技术推动、产生新概念装备并形成新能力的利器,也是谋划雷达技术长远发展不可或缺的重要依据。

从技术角度的分析,主要是在“新”和“透”上面做文章。首先是要“追新”和“创新”,即从形成新技术的角度,从概念、机理、体制、频段、平台等方面着手,为雷达探测提供新的能力。其次要将原有技术“做透”、“见底”,即从形成新方法的角度,在途径、精细等方面着手,为雷达探测提供更高的性能。

对雷达技术进行认识演变规律、归纳发展趋势、推演技术远景、遴选重点方向的研究和分析,关键是认清四类技术(已经发展、正在发展、亟待发展、将要发展),区分两种状态(可想、可做、可用;可想、暂不可做、可用),以便在雷达技术领域准确地把握前沿与主流、区分现实与未来,并在不同的计划中开展相应的研究工作,从而为雷达技术的创新发展,确定未来若干年的分阶段目标,遴选出重点方向,进而制定出科学可行的规划。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M I. Fifty years of radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(2): 182-197.
- [2] 王小谟, 张光义. 雷达与探测: 信息化战争的火眼金睛[M]. 第2版, 北京: 国防工业出版社, 2008: 1-17.
Wang Xiao-mo and Zhang Guang-yi. Radar and Detection (2nd Edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1-17.
- [3] Trim R M. Air defense 1940-1970/military IFF and secondary radar—a historical review[J]. *Measurement and Control*, 2003, 36(8): 246-251.
- [4] Skolnik M. Radar in the twentieth century[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, 15(10): 27-46.
- [5] Northrop Grumman. AESA radar: revolutionary capabilities for multiple missions[OL]. www.es.northropgrumman.com/solutions/aesaradar/assets/review_aesa.pdf, 2009.
- [6] Griffiths Hugh. Multistatic, MIMO and networked radar: the future of radar sensors[C]. *European Microwave Week*, Paris, Sept. 2010: 81-84.
- [7] Glaser J I. Fifty years of bistatic and multistatic radar[J]. *IEE Proceedings, Part F, Communications, Radar and Signal Processing*, 1986, 133(7): 596-603.
- [8] 周万幸. 天波超视距雷达发展综述[J]. *电子学报*, 2011, 39(6): 1373-1378.
Zhou Wan-xing. An overview on development of skywave Over-the-Horizon Radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1373-1378.
- [9] 贲德. 机载有源相控阵火控雷达的新进展及发展趋势[J]. *现代雷达*, 2008, 30(1): 1-4.
Ben De. Latest status & development trends of airborne AESA fire-control radar[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(1): 1-4.
- [10] 周荫清, 徐华平, 陈杰. 分布式小卫星合成孔径雷达研究进展[J]. *电子学报*, 2003, 31(12A): 1939-1944.
Zhou Yin-qing, Xu Hua-ping, and Chen Jie. Research progress of distributed small satellites synthetic aperture radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 1939-1944.
- [11] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2006, 1(1): 11-16.
Wu Man-qing. The development of digital array radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2006, 1(1): 11-16.
- [12] 毛二可, 谭怀英, 郭建明. 美国导弹防御地基雷达的发展现状[J]. *兵器知识*, 2010, (2): 48-50.
Mao Er-ke, Tan Huai-yin, and Guo Jian-ming. The current status of U.S. missile defense radar[J]. *Ordnance Knowledge*, 2010, (2): 48-50.
- [13] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 2-6.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 2-6.
- [14] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 3-11.
Liu Yong-tan. Radar Imaging Technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003: 3-11.
- [15] 吴一戎, 洪文, 王彦平. 极化干涉 SAR 的研究现状与启示[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(5): 1258-1262.
Wu Yi-rong, Hong Wen, and Wang Yan-ping. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1258-1262.
- [16] William P Delaney and William W Ward. Radar development at Lincoln Laboratory: an overview of the first fifty years[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 147-166.
- [17] Clarke J, Davies Den, and Radford M F. Review of United Kingdom radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, AES-20(5): 506-520.
- [18] Barton D K. Recent developments in russian radar systems[C]. *IEEE Radar Conference*, Alexandria, VA, USA, 1995: 340-346.
- [19] Werner Muller. Ground Radar System of the Germany Luftwaffe to 1945[M]. Pennsylvania, USA, Schiffer Publishing Ltd, 2004: 1-52.

- [20] Alberoni P P, Ferraris L, Marzano F S, *et al.*. The Italian radar network: current status and future developments[C]. Proceedings of ERAD, Delft, Netherlands, Nov. 2002: 339-344.
- [21] Goodman Joseph W. Introduction to Fourier Optics (2nd Edition)[M]. San Diego, Los Wises Press, 2005: 126-165.
- [22] Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore, and Fung Adrian K. Microwave Remote Sensing[M]. Dedham MA, Artech, 1986: 34-58.
- [23] Steinberg Bernard D. Microwave Imaging with Large Antenna Arrays[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983: 61-70.
- [24] Barton David K. A half century of radar[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1984, MTT-32(9): 1161-1170.
- [25] Lou Y, Kim Y, and Van Zyl J. The NASA/JPL airborne synthetic aperture radar system[C]. Sixth Annual Airborne Science Workshop, Pasadena, California, 2002: 51-56.
- [26] Perkins L C, Smith H B, and Mooney D H. The development of airborne pulse doppler radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1984, AES-20(3): 292-303.
- [27] Brown Louis. A Radar History of World War II: Technical and Military Imperatives[M]. Washington, Taylor & Francis, 1999: 1-35.
- [28] Ralph Strong. Radar: the evolution since World War II[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2005, 20(1): 19-24.
- [29] Gerhard Hepcke. The radar war[OL]. www.radarworld.org/radarwar.pdf, 2009.
- [30] Wolfgang Holpp. The century of radar[OL]. www.100-jahre-radar.de/vortraege/Holpp-The_Century_of_Radar.pdf, 2009.
- [31] Brookner E. Phased arrays for the new millennium[C]. IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, Dana Point, CA, USA, May 2000: 3-19.
- [32] Jeffrey Richelson. America's Secret Eyes in Space: the U.S. Keyhole Spy Satellite Program[M]. New York: Harper & Row, 1990: 5-10.
- [33] 王小谟, 匡永胜, 陈忠先. 监视雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 1-10.
Wang Xiao-mo, Kuang Yong-sheng, and Chen Zhong-xian. Surveillance Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 1-10.
- [34] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 31-35.
Zhang Guang-yi and Zhao Yu-jie. Phased Array Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 31-35.
- [35] Entzminger J N, Fowler Jr C A, and Kenneally W J. JointSTARS and GMTI: past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748-761.
- [36] Farina A. A review of CFAR detection techniques in radar system[J]. *Microwave Journal*, 1986, 29(9): 115-118.
- [37] Ausherman Dale A, Kozma Adam, Walker Jack L, *et al.*. Developments in radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, AES-20(4): 363-400.
- [38] Ender Joachim H G, Brenner Andreas R, Essen Helmut, *et al.*. Advances in radar imaging at Fraunhofer-FHR[C]. Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, Korea 2011: 84-85.
- [39] Klare J, Weiß M, Peters O, *et al.*. ARTINO: a new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, Colorado, NY, USA, July 2006: 3825-3828.
- [40] Chandrasekar V and Jayasumana A P. Radar design and management in a networked environment[C]. Proceedings of SPIE 4527, 2001: 142.
- [41] 鲁耀兵, 林品兴, 毛士艺. 超低空突防中地形跟随雷达几何误差仿真研究[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, (3): 55-61.
Lu Yao-bing, Lin Pin-xing, and Mao Shi-yi. Simulation of geometric error of terrain following radar in the very low altitude penetration[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1996, (3): 55-61.
- [42] 金林. 弹道导弹目标识别技术[J]. *现代雷达*, 2008, 30(2): 1-5.
Jin Lin. Technique of target recognition for ballistic missile[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(2): 1-5.
- [43] Gens R and Van Genderen J L. SAR interferometry—issues, techniques, applications [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(10): 1803-1835.
- [44] Atindra K Mitra, Philip Robinson, James LaRue, *et al.*. Multipath data analysis and exploitation for the design of distributed radar systems[C]. Proceedings of SPIE 6547, 2007: 1-9.
- [45] Guerci J R. Next generation intelligent radar[C]. IEEE Radar Conference, Waltham, MA, USA, April 2007: 7-10.
- [46] Haykin S. Cognitive radar: a way of the future[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 30-40.
- [47] Guerci J R and Baranoski E J. Knowledge-aided adaptive radar at DARPA: an overview [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 41-50.

作者简介



杨建宇(1963-), 男, 电子科技大学教授, 校科技委主任, 中国电子学会无线电定位分会信号与信息处理专委会主任委员, 主要研究方向为双基地侧视/前视 SAR 成像技术、毫米波成像探测技术、低可观测目标探测技术。