

# 认知雷达及其关键技术研究进展

黎 湘, 范梅梅

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 认知雷达系统能够通过感知复杂多变的环境而自适应的调整雷达收发系统以适应当前的环境, 因此可大幅提升雷达系统性能. 本文在简要回顾认知雷达发展历程的基础上, 逐步深入的揭示了认知雷达的本质特征及系统构成, 讨论了认知雷达的关键技术, 对目前的研究成果进行了分析与总结, 并指出了存在的问题. 最后讨论了认知雷达的未来发展方向.

**关键词:** 认知雷达; 背景感知; 波形最优化; 自适应雷达; 智能信号处理

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1863-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.025

## Research Advance on Cognitive Radar and Its Key Technology

LI Xiang, FAN Mei-mei

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Cognitive radar can adaptively and intelligently reconfigure its transmission and reception system based on the knowledge about the current environment to improve its performance. This paper reviews the development of cognitive radar first, and then reveals its essential character and framework; after that, the key technologies are presented in detail and research advances are discussed; at last, the prospects of cognitive radar are pointed out.

**Key words:** cognitive radar; background sensing; waveform optimization; adaptive radar; intelligent signal processing

## 1 引言

Simon Haykin 教授于 2006 年正式提出了认知雷达的概念<sup>[1]</sup>, 并明确指出具有认知功能是新一代雷达系统的重要标志<sup>[2]</sup>. 认知雷达将脑科学和人工智能融入雷达系统<sup>[2]</sup>, 赋予了雷达系统感知环境、理解环境、学习、推理并判断决策的能力<sup>[3]</sup>, 使雷达系统能够适应日益复杂多变的电磁环境, 从而提高雷达系统的性能: 比如通过调整发射波形有效避开干扰频谱以提高雷达的抗干扰能力; 通过发射波形自适应调整以在更短的时间内实现给定的性能要求, 从而大大减少雷达被发现和攻击的可能性; 通过认知雷达网络有效对抗各种隐身飞行器等等.

同时, 认知雷达适应了雷达智能化的趋势, 在人与雷达构成的闭环系统中逐渐弱化操作人员的作用, 逐步增加雷达本身的智能, 在战场环境下可有效减少人员伤亡<sup>[4]</sup>. 因此认知雷达一经提出便掀起了雷达系统研究领域内的新热潮, 引起了国内外学者的广泛关注. Baker<sup>[4]</sup>、Guerci<sup>[3]</sup>和 Wicks<sup>[5]</sup>分别在 2010 的 IEEE 国际雷达会议和认知信号处理国际研讨会上发文, 从不同的角度

探讨了认知雷达研究的必要性及其基本结构和关键技术. 同年, Guerci 出版了关于认知雷达的专著, 讨论了 MIMO 体制下具有自适应最优发射及基于知识的处理的认知雷达技术<sup>[6]</sup>. 国内的黄培康院士也曾指出认知雷达是雷达系统发展的一个重要方向<sup>[7]</sup>.

尽管目前仍没有认知雷达系统问世, 但是, 各种先进的软硬件处理技术为认知雷达提供了技术支撑, 比如: (1) 相控阵天线技术; (2) 大规模信号处理技术; (3) 任意波形产生技术等<sup>[1]</sup>; (4) 现代数字技术和超大规模集成电路 (VLSI) 技术的发展为直接数字合成 (DDS) 波形奠定了基础<sup>[8]</sup>. 这些技术的发展使认知雷达系统的构建成为可能.

## 2 认知雷达概述

### 2.1 认知雷达的前世今生

认知雷达能够迅速在雷达界掀起热潮并非偶然, 在这一概念提出之前, 人们已经在探讨如何通过改变雷达工作的模式提高性能的方法和技术, 并取得了很多成果, 这些技术的发展为认知雷达的实现奠定了坚实的基础.

### 2.1.1 匹配照射-接收技术

1965年 H.V. Trees 提出发射信号的设计更有利于提高雷达性能,指出理想的雷达系统应该能够连续的测量目标的散射函数,并根据环境自适应的调整发射信号的形状和接收机以适应当前的环境<sup>[9]</sup>.这一理想系统掀起了二十世纪六七十年代对于最优波形设计的研究热潮.早期的工作主要是在目标检测阶段通过确定最优的发射信号与滤波器对以最大化信号与杂波及干扰的功率比,其主要方法为特征值迭代法.1990s 和 2000s Garren 和 Guerci 等人针对扩展目标的检测与识别问题继承了以上的特征值迭代方法<sup>[10,11]</sup>.

然而,这种特征值迭代方法遭到了 Sibul、Kay 等人的质疑,他们认为点目标检测问题中最优接收机的性能可以由最优信号及通道特性决定<sup>[12]</sup>,即仅需要求得最优匹配照射信号,然后根据 Neyman-Pearson 准则确定最优接收机.随后 Romero 等人又将 Kay 的思想推广到扩展目标的问题中<sup>[13]</sup>.不管是匹配照射-接收技术还是匹配照射技术,使雷达系统的收发部件与目标及环境相适应都是其需要解决的关键问题.

### 2.1.2 波形分集技术

2002 年在美国的大学-研究所-政府三方会议中首次对“波形分集”进行了如下定义:“动态的、协作的利用一个或多个平台的多个收发信号集以实现信息的交互与获取”<sup>[14]</sup>.基于波形分集的概念,目标的特性及外部环境信息以交互的方式获取,雷达可以在改变自身发射波形的基础上更好地获取信息,实现在目标特性及外部环境发生改变的时候,优化雷达在检测、跟踪和抗干扰等方面的性能.从敌方来说,由于雷达采用波形分集技术,大大降低了雷达波形被截获的可能性,使得敌方的电子侦察及干扰更为困难,甚至雷达可以通过自适应的方式避开敌方的电子干扰.波形分集技术极大地增强了雷达系统对目标和环境信息获取能力及对复杂战场环境的适应能力,对于未来有效提高雷达性能和生存能力有着重要的理论和实际意义<sup>[15]</sup>.

### 2.1.3 基于知识的/智能信号处理技术

美国空军最早将人工智能引入到自适应雷达领域中,其空军实验室(AFRL)一直致力于智能信号处理方面的研究,并取得了很多进展.其早期的研究主要在专家系统恒虚警处理(ES CFAR),此后分别开展了基于知识的空时自适应处理技术(KB STAP)和基于全美地形调查得出的数字地图信息的空时自适应处理(KBMap-STAP)研究项目,建立了基于知识的环境数据库,并结合匹配照射技术和波形分集技术开展了基于知识的匹配照射和基于知识的波形分集技术.在 2001 年 AFRL 又联合美国国防先进研究计划署(DARPA)资助了知识辅助的传感器信号处理和专家推理系统(KASSPER),主

要研究如何利用外部数据源通过动态改变雷达信号处理来提高性能.近年来,美国国防部开展了两个关于波形自适应的项目:其一是 DARPA 的波形捷变感知项目——复杂海上环境下低视角小 RCS 目标检测的自适应波形设计;其二是空军科学研究办公室(AFOSR)负责的全谱域的自适应波形设计项目<sup>[16]</sup>.这两个项目为具有发射波形自适应结构的雷达构建了系统原型,并在信号处理算法上取得了一系列创新.此外,美国多个著名大学和 Raytheon 公司共同组成了一个多学科联合的的大学研究组织(MURI)进行自适应波形设计方面的理论和工程研究<sup>[17]</sup>.MURI 同时受到美国空军和海军实验室的资助,进行了相关雷达的改造和实验.

自适应和智能处理(专家系统,基于知识的,知识辅助)算法是通过模拟雷达信号处理各领域的专家以实现各部分功能(滤波,CFAR 检测,轨迹处理,判决和分类)性能最优.随着各项技术的不断发展,智能处理部分数目和算法的不断增多,为智能处理提供知识的信息源也越来越丰富,如何高效的利用这些数据、信息和知识,并使这些智能处理过程通力合作?单独的自适应和智能处理已不能完成这项复杂而艰巨的任务,需要认知的处理.

## 2.2 认知雷达的本质及基本结构

“cognitive”一词揭示了认知雷达(cognitive radar)的本质.根据牛津英语词典,cognition 是一种获悉、感知并兼有主动的思考、推理和分析的一种行为.而美国的国家健康协会(NIH),国家精神健康学会(NIMH)对 cognition 的定义为:“认知是一种意识的心理活动,它使人们获悉其所处的环境.认知的行为包括感知,理解,推理,判断,记忆和解决问题”<sup>[6]</sup>.根据认知的定义认知雷达必须具有:(1)感知环境的能力;(2)智能信号处理(专家系统,基于规则的推理,自适应算法和运算等)的能力;(3)存储器和环境数据库,或者一种保存雷达回波中信息成分的机制(比如贝叶斯方法);(4)从接收机到发射机的闭环反馈.因此用一句话总结认知雷达的本质:通过与环境不断的交互而理解环境并适应环境的闭环雷达系统.

Haykin 给出了典型的认知雷达闭环反馈结构,如图

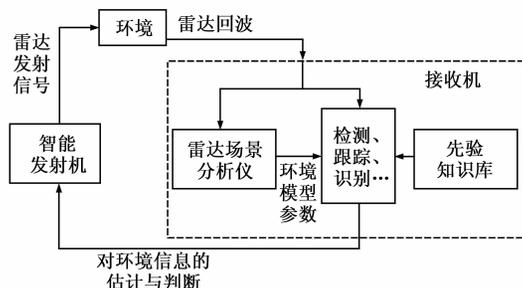


图1 认知雷达的基本结构

1 所示.可见,认知雷达是一个循环结构,该循环从发射机辐射周围环境开始;雷达回波进入接收机后同时反馈到雷达场景分析仪和雷达信号处理机制(检测、跟踪、识别等),雷达信号处理机制利用场景分析仪及先验知识提供的信息提高性能;对处理结果进行分析用以指导下一次的发射波形.图 1 为认知雷达的实现提供了一个基本的框架,也是目前关于认知雷达研究的基础.

### 3 认知雷达的关键技术研究进展及相关问题

认知雷达的提出受到了蝙蝠这种回声定位生物

启发.但是如何模拟蝙蝠的回声定位行为,使雷达具有认知的功能?除了仿生学领域的研究外,雷达界也在思考与探讨这一问题.尽管图 1 给出了认知雷达的基本框图,但是人们仍然不是很清楚认知雷达到底为何物?经过几年的思考与研究,认知雷达的雏形初见端倪,图 2 给出了 AFRL 的 Wicks 博士对认知雷达的基本构想<sup>[5]</sup>.

根据人们对认知雷达的期望与构想,认知雷达的实现可以从场景的感知与描述、波形最优化技术、自适应机制、自治操作与管理四项关键技术着手,以下分别讨论目前这四项技术的研究进展及存在的问题.

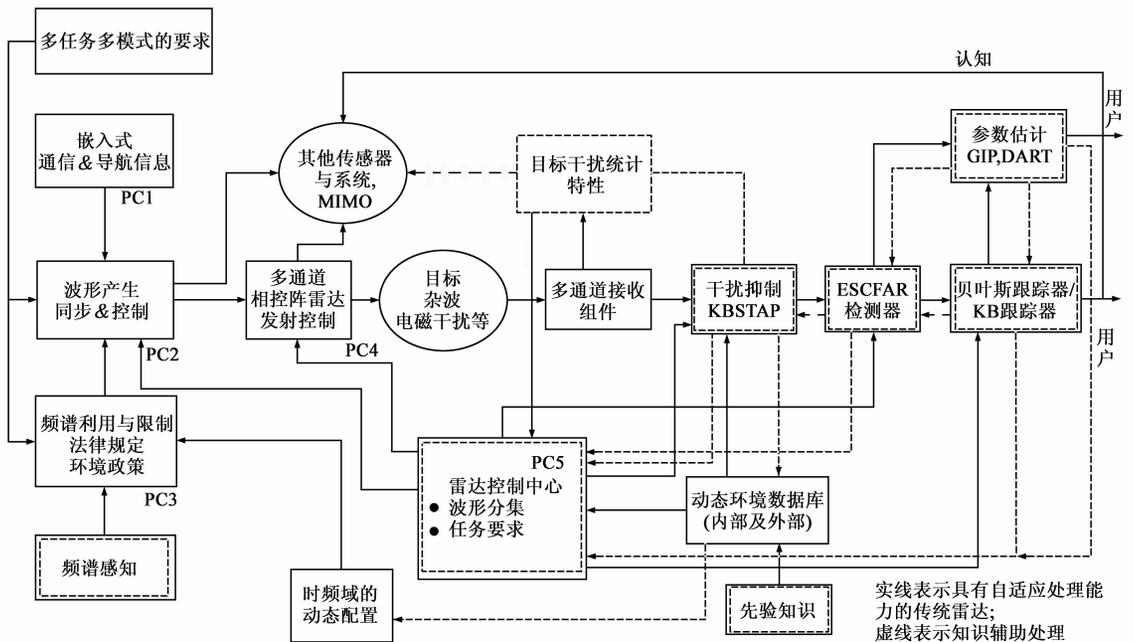


图2 一种认知雷达结构

#### 3.1 场景感知与描述

前文提到,雷达场景分析仪是认知雷达的一个重要组成部分,其功能是为接收机提供关于环境(包括目标和雷达工作环境)的信息,因此对接收机对可能存在的感兴趣的目标进行判决起着至关重要的作用.雷达场景分析仪提供给接收机的信息主要来自于两种渠道:一种是雷达回波,即环境对雷达本身发射信号的反应;另一种是其他传感器提供的关于雷达环境的其他信息,比如温度、湿度、气压、海情等.雷达对回波提供的信息进行处理要基于一定的数学描述,即首先要确定雷达场景分析仪获得的信息的模型.

目标与环境信息的感知根据雷达的体制和任务有很大的区别,随着目前各种信号处理技术的发展,雷达所能提取的信息越来越全面<sup>[15]</sup>.雷达传感器对环境的感知主要包括以下两个方面:

##### 3.1.1 杂波模型及背景感知方法

Bakker 等人针对相参雷达的检测问题研究了海平面上单个运动目标场景下目标及杂波的统计模型<sup>[18,19]</sup>;李杨针对海面动目标检测问题,利用距离多普勒谱中 Bragg 峰的位置和特征信息来描述背景杂波<sup>[15]</sup>;王彬通过观测的状态空间表示实现对环境的描述,各个状态描述了每个距离多普勒单元内的目标数目<sup>[20]</sup>.

频谱感知是认知雷达对背景感知的一项关键内容.对于人为的电磁干扰的感知,可通过光学器件检测出干扰频率<sup>[21]</sup>.认知无线电中的多种频谱感知方法<sup>[22]</sup>也可用于认知雷达中.对于杂波等背景感知的方法,目前文献中讨论的不多.Sira 等人针对强海杂波环境下低 RCS 的点目标检测问题,每次设计最优信号前利用 LFM 信号实现对杂波统计特性的在线估计<sup>[23]</sup>.Salemo 提出用 Ozturk 算法识别雷达回波数据的概率密度函数和相关的分布参数<sup>[24]</sup>.

##### 3.1.2 目标模型

在认知雷达中采用何种目标模型取决于雷达的任务、场景假定及信号带宽等因素,可分别从目标的距离扩展特性和多普勒扩展特性进行描述.

目标的距离扩展特性取决于信号的带宽.点目标模型适用于窄带雷达,其回波信号幅度为一复高斯随机变量<sup>[25]</sup>,包络为瑞利随机变量;对于宽带雷达,应该考虑散射点场的干扰和谐振效应,目标相对于雷达信号可视为一个线性时不变系统,并以目标的冲激响应来描述.此时,回波信号为发射信号与一个复高斯随机过程的卷积输出.雷达每次照射目标时,冲激响应为该随机过程的一个样本函数.若可以通过某种手段估计出该样本函数,目标的冲激响应可视为确定已知的<sup>[26,27]</sup>;如果不能获得目标冲激响应的先验信息,需要将目标冲激响应视为一个高斯随机过程<sup>[27]</sup>.

目标的多普勒扩展特性取决于目标的运动形态.目标的匀速运动引起回波信号的尺度变化; Bakker 等人通过一个方差为  $\sigma^2$  的高斯分布的加速度来描述单个目标的捷变运动特性<sup>[18,19]</sup>; Kay 用一个均匀分布的随机变量描述运动目标的未知多普勒特征<sup>[28]</sup>.

模型的建立和场景感知对于认知雷达系统的构建至关重要,是认知雷达实现的基础.建立准确的模型是回答的雷达感知什么、感知的信息如何表示的问题.现有文献中所用到场景的模型主要分为两类:一种是直接假定环境的统计模型,难以在实际应用中获得较好的性能;另一种是针对某个实际的场景,通过理论分析和大量的实测数据分析,建立适当的模型,目前所建立的也只有为数不多的几种海杂波模型.尽管有些学者已经研究了在线估计杂波模型的方法,但都是在统计模型假定的基础上,估计模型的某些参数.

事实上,利用雷达回波感知场景信息的知识获取方式属于一种“outside in”型认知,其优势在于可以获得环境当前的信息.理论上讲,先进的在线学习方法有望摆脱人工控制,同时在线学习方法不需要存储与当前操作无关的数据,对存储器没有过多要求,但是对初始状态估计的精度和系统的实时性要求较高.与之对应,认知雷达的另外一种认知过程为“inside out”,即图 1 中的先验知识库部分.这种认知过程通过离线学习实现,需要人工干预,通过离线学习构建的知识库具有容量大、内容丰富的特点.这要求认知雷达解决两个问题:①接收机系统要包含大容量的存储器,以存储各种类型的先验知识;②雷达接收机要具有根据当前雷达的工作模式及环境标识快速搜索与之匹配的先验信息的能力.以上两点对雷达的硬件配置及软件算法都提出了挑战.

### 3.2 波形最优化技术

波形最优技术包括最优化选择与最优化设计:波

形选择要求在雷达工作前设计好一组波形或波形参数,建立波形库.雷达工作时基于当前的工作环境从波形库里自适应的选择某个波形或波形参数的值;波形设计问题是根据当前环境实时的设计波形或计算波形参数.波形选择的缺点是波形或波形参数的库必须在工作前设计好,在雷达工作时,波形选择算法必须在整个库内搜索最优波形从而获得最优性能.而波形设计比波形选择更加灵便,能够更好的利用动态变化环境的信息,然而,在现有技术条件下,波形自适应设计与雷达实时性探测的要求存在矛盾<sup>[29]</sup>.当然如果波形库很大,也会造成很大的运算负担.

#### 3.2.1 准则函数

事实上,波形最优化是在一定的系统限制条件下最大化系统的性能.系统性能表现为不同的性能标准函数(或称代价函数),最优化过程中根据这些目标函数形成一定的性能准则,作为调整波形的依据<sup>[30]</sup>.性能准则函数的选取根据雷达系统的任务和工作模式而定,而波形设计的约束条件则由信号处理技术和硬件实现水平限制.表 1 总结了目前文献中常用的性能函数及求解最优波形的限制条件.

表 1 常用性能准则函数及限定条件

雷达任务	性能准则函数	限定条件
目标检测	SNR, SINR, SCR, 检测概率, 检测时间, 信号与杂波间的相关性, 多普勒频率上的平均偏差系数	能量限制
目标识别	目标类别间的距离测度 ( $L_2$ 范数、马氏距离、欧式距离、KLIN 等), 目标与回波信号间的互信息, 对目标冲激响应的估计误差	带宽限制 时宽限制 恒模限制
目标跟踪	各种形式的跟踪误差, 回波与目标状态间的互信息	SNR 限制
成像	重构的与真实目标散射函数间的最小距离, 克拉美罗限	模糊函数限制

#### 3.2.2 最优波形求解方法

根据表 1 给出的性能准则函数和限制条件,人们研究了很多求解最优波形的方法以适应各自的环境想定,主要归结为以下三种:

##### (1) 特征值法

特征值法获得的最优波形对应目标响应的某种表示的特征值.对于信号的连续形式,最优波形为 Fredholm 积分核的最大特征值对应的特征向量;对于信号的离散表示,最优波形为目标自相关矩阵最大特征值对应的特征向量.该方法适用于噪声环境下扩展目标的检测<sup>[10,27,31,32]</sup>和识别问题<sup>[10,11,31,32]</sup>.利用特征值法求解最优波形要求目标的冲激响应确定且已知,当冲激响应不能通过一定的先验信息获得时无法应用该方

法; 冲激响应估计不准确也会造成最优波形的性能下降.

## (2) 注水法

前文提到, 应用特征值法求解最优波形要满足两个条件: 一是没有杂波信号, 二是目标冲激响应确定且已知. 当以上条件不能满足时, 无法利用特征值法求解最优波形. 如果能将最优波形求解问题转化为凸规划问题, 就可以利用拉格朗日乘子技术进行求解. 此时, 最优波形将能量分配在由环境描述的能量曲线上低于某一数值的范围内, 就像往洼地里注满水一样, 如图 3 所示. 因此这种波形称为注水波形, 把求解这种波形的的方法统称为注水法.

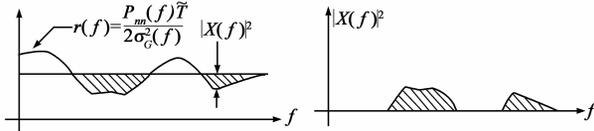


图3 注水法说明

注水法可用于解决多个场景下的最优波形求解问题: ①杂波环境下的高点目标检测问题<sup>[33]</sup>; ②扩展目标识别<sup>[26, 27, 34~36]</sup>: 根据率失真理论, 随机目标冲激响应与回波信号间的互信息越大, 对目标的估计越准确, 则对其分类识别性能越好. 以最大互信息为目标函数, 在能量约束条件下可利用注水法获得最优波形能量谱<sup>[27]</sup>; 严格上来讲, 以最大互信息为准则求解最优波形的的方法要求目标回波、杂波和噪声均服从高斯分布. 但 Goodman 的研究表明, 在多类具有确定性冲激响应的目标识别问题中, 由于目标类别的不确定性, 随机目标识别的最优波形求解方法仍然适用<sup>[26]</sup>; ③随机扩展目标跟踪. 对扩展目标冲激响应的估计越准确, 跟踪的均方误差越小, 因此, 针对随机扩展目标跟踪的最优波形可以通过求解估计性能最优的波形获得<sup>[37]</sup>; 另一种方法是将目标冲激响应的估计问题作为一个解卷积过程, 以 MMSE 为准则, 在能量限制条件下仍然得到了注水波形<sup>[38]</sup>.

## (3) 搜索寻优法

波形最优化的目标函数通常和雷达的任务及场景有关, 有些时候目标函数比较复杂, 且约束函数不满足线性条件, 使得直接获得最优波形的解析解非常困难, 此时需要借助现代最优化理论的成果确定最优波形. 在恒模的限定条件下, 纠博针对目标识别问题利用遗传算法搜索最优波形相位的最优解<sup>[39]</sup>; Sira 利用 Newton-Raphson 方法确定最优信号的相位调制方式, 使其具有期望的自相关函数<sup>[23]</sup>.

### 3.2.3 最优信号谱的时域合成方法

在频域利用特征值法只能获得最优波形的幅度谱, 利用注水法求解最优波形通常也只能获得幅度谱

的平方, 都缺乏相位信息. 因此, 需要研究产生具有最优谱的时域信号的方法. Kay 利用 Durbin 方法合成具有最优谱的最小相位信号, 信号主要能量集中在信号的前端, 使得信号的幅度有大的起伏<sup>[33]</sup>. 蒋飞根据连续混沌调频信号的动力学模型, 设定时间尺度变换函数, 调制处于正弦振荡的 Colpitts 电路频率, 可实现任意频谱结构的目标波形输出<sup>[40]</sup>.

实际的雷达系统中, 为了充分利用雷达发射机的效率, 常常要求雷达系统发射包络恒定的信号. 传统的方法有驻定相位法, 但是当信号的谱存在明显的起伏时, 驻定相位法合成信号的谱在信号阻带内与最优信号相差较大<sup>[41]</sup>. 由于信号的幅度平方谱给定时, 可调节的参数仅为信号相位, 因此, 包络恒定约束下的最优时域信号合成问题可转化为时域信号相位恢复问题. 通常采用迭代传输算法解决此类问题. Jackson 利用交互投影原理, 设计迭代传输算法, 实现恒定包络的时域信号的谱与最优幅度谱之间的最佳逼近<sup>[41]</sup>. Patton 证明了 Jackson 的方法为一种误差减小算法, 并研究了频域样本数与时域样本数不等时的波形合成方法<sup>[9]</sup>.

通过本节分析可以看出, 波形最优化技术已经取得了许多成果, 为认知雷达的实现提供了必要的技术支撑, 但仍然存在一些问题. 比如目前关于最优波形的研究成果主要集中在任意波形, 尽管目前硬件水平的发展使得任意波形产生成为可能, 但是现有的天线馈送和发射系统还难以做到任意波形的无失真传输和发射; 目前的波形设计方法主要以提高某一方面的性能为基础, 而没有兼顾其他方面的性能, 是否应该设计一个满足多方面性能要求的波形, 还是不同性能优势的波形交替发射? 这些问题都值得我们进一步探讨和研究.

## 3.3 自适应机制

波形最优化技术已经有了半个世纪的发展历史, 形成了一些比较成熟的理论与方法. 认知雷达通过自适应的作用重新赋予波形最优化技术生机与活力. 见诸文献的自适应更新方法主要有以下几种:

(1) 贝叶斯方法: 贝叶斯方法被广泛应用于针对目标检测<sup>[18, 19]</sup>、跟踪<sup>[42]</sup>和识别<sup>[26, 35]</sup>的波形自适应设计中, 其优势在于无需存储大量的数据就可以保留先前获得的信息. 在小目标检测和跟踪问题中, 该方法被用于更新目标状态的概率; 在目标识别问题中, 该方法被用于更新各类目标假设的概率<sup>[26, 35]</sup>.

(2) 滤波理论: Sira 等人针对海杂波环境下的低 RCS 目标检测问题, 根据本次的回波信号利用期望最大值方法估计出斑点的协方差矩阵, 用于下一次照射的杂波抑制及检测<sup>[23]</sup>; 在快变的海杂波环境中, Li 等人又提出基于前一次的估计协方差矩阵计算预测协方差矩

阵,用于求解下一次最优波形的代价函数<sup>[43]</sup>.此外,Sameh等人在针对两类目标分类的最优波形选择过程中,在每次接收到回波信号后更新其协方差矩阵,并根据该协方差矩阵与目标二维散射函数的关系选择下一次发射的最优波形<sup>[44]</sup>.

(3)Q学习:将自适应波形选择问题建模为随机动态规划模型,针对目标的真实状态一般未知,且雷达目标转移概率未知的场景,利用Q学习的方法自适应的选择最优波形<sup>[20]</sup>.

### 3.4 自治操作与管理

雷达作为远程感知的重要手段,要实现认知功能成为一个能够独立工作的系统,自治操作与管理是一项关键技术.一方面,在认知雷达的很多模块内都会引入自适应算法(STAP、CFAR、GIP等)和智能算法(专家系统,知识辅助等),但是这些算法独立工作不可能实现期望的性能<sup>[5]</sup>.各个独立的功能之间要彼此合作,并且有效的工作才能够进一步的提高性能,因此需要研究如何实现各智能处理环节的协调合作的技术.另一方面,我们希望在人与雷达组成的一个工作系统内人的作用越来越小,甚至将来完全被雷达取代而由雷达本身成为一个闭环系统<sup>[4]</sup>,就要求雷达具有推断、决策等能力.这要求认知雷达能够自主完成任务部署与转换,并能够重新配置资源.而目前对于认知雷达中自治操作与管理技术的研究见诸文献的较少.

## 4 认知雷达未来发展方向

尽管目前关于认知雷达的技术研究取得了一定的进展,但是由于至今没有认知雷达系统问世,人们对认知雷达的认识仍然比较模糊.认知雷达将以一种什么样的形式出现?与现有的哪种形式的雷达系统结合最有可能?根据认知雷达能够自主判断、决策,并能够自适应调整发射信号的特点,预计认知雷达最有可能向多功能、网络化发展.

对于认知多功能相控阵雷达,实现资源的合理分配与管理是其中的一项关键问题.目前相控阵天线技术已有了较大的发展,在计算机控制下,可以在微秒量级上进行波束捷变,从而可以实现多目标探测、跟踪、制导等多种工作方式.面对复杂的环境,如何实现多功能相控阵雷达任务的有效调度与系统资源优化是一项重要的研究课题<sup>[45]</sup>.具有认知能力的多功能相控阵雷达在资源管理方面将发挥更大的优势,其对于环境的感知能力、对事件的判决推理能力将为资源的有效分配提供保障.此外,传统雷达中对任务的评判标准(虚警概率、检测概率等)对于认知雷达已经不完全适用,需要探索新的评判准则.

网络化也是未来雷达发展的一个重要方向.多部

雷达相互合作可实现远超过单部雷达的远程感知能力.认知雷达网络可以有两种形式:一种是分布式的,即每部雷达都具有认知能力;另一种是集中式的,即设置一个中心基站,只有该基站雷达具有认知能力.集中式的认知雷达网络可以充分利用传统雷达组成网络的结点,提高雷达系统的综合能力的同时降低了成本.而网络节点上的单部雷达可以是传统的雷达,也可以是仅具有接收系统的被动雷达.何时选择哪部雷达进入网络工作?如何有效的处理并利用各工作雷达站发出的数据?如何根据现有雷达的几何关系调整各雷达的发射信号?对于被动接收的雷达节点,如何有效的选择辐射源?这些都是实现认知雷达网络需要考虑的问题.

### 参考文献

- [1] S Haykin. Cognitive radar: A way of the future[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1): 30 - 40.
- [2] S Haykin. New generation of radar systems enabled with cognition[A]. IEEE Radar Conference 2010[C]. Washington DC: IEEE Press, 2010.
- [3] J R Guerci. Cognitive radar: A knowledge-aided fully adaptive approach[A]. Proceedings of IEEE Radar Conference [C]. Washington DC: IEEE Press, 2010. 1365 - 1370.
- [4] C J Baker. Intelligence and radar systems[A]. Proceedings of IEEE Radar Conference [C]. Washington DC: IEEE Press, 2010. 1276 - 1279.
- [5] M Wicks. Spectrum crowding and cognitive radar[A]. 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing[C]. IEEE Press, 2010. 452 - 457.
- [6] J R Guerci. Cognitive Radar: The Knowledge-Aided fully Adaptive Approach [M]. Boston/London: Artech House, 2010.
- [7] 黄培康. 遥感目标的特征提取与反演[R]. 长沙: 国防科技大学, 2011.  
Huang Pei-kang. Feature Extraction and Inversion for Remote Sensing Target[R]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 费元春, 苏广川, 等. 宽带雷达信号产生技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Fei Yuan-chun, Su Guang-chuan, et al. Generation Technology of Wideband Radar Signal[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2002. (in Chinese)
- [9] L K Patton. On the Satisfaction of Modulus and Ambiguity Function Constraints in Radar Waveform Optimization for Detection[D]. Dayton: Wright State University, 2009.
- [10] J R Guerci, S U Pillai. Theory and application of optimum transmit-receive radar [A]. Proceedings of IEEE Internal Radar Conference [C]. Alexandria: IEEE Press, 2000. 705 -

- 710.
- [11] D A Garren, et al. Optimal transmission pulse shape for detection and identification with uncertain target aspect [A]. Proceedings of IEEE Radar Conference [C]. Atlanta: IEEE Press, 2001. 123 – 128.
- [12] S Kay, J H Thanos. Optimal transmit signal design for active sonar/radar [A]. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Orlando, FL: IEEE Press, 2002. 1513 – 1516.
- [13] R A Romero, J H Bae, N A Goodman. Theory and application of SNR and mutual information matched illumination waveforms [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 912 – 927.
- [14] A Drozd. Waveform diversity and design [OL]. <http://www.emcs.org/acstrial/newsletters/summer06/coverstory.pdf>, 2012-4-6.
- [15] 李杨. 高频地波雷达背景感知与目标检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
Li Yang. Study on Background Cognition and Target Detection Techniques for High Frequency Surface Wave Radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] P S Antonia, A Nehorai, R Calderbank. Waveform-agile sensing and processing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(1): 10 – 11.
- [17] A Nehorai. Adaptive waveform design for full spectral dominance [OL]. [signal.ese.wustl.edu/MURI/kickoff/overview.pdf](http://signal.ese.wustl.edu/MURI/kickoff/overview.pdf), 2005-6-2.
- [18] R Bakker, et al. Adaptive radar detection: A bayesian approach [A]. IEE Workshop Nonlinear Non-Gaussian Signal Processing [C]. Peebles, Scotland: IEEE Press, 2006.
- [19] R Bakker, G Lopez, S Haykin. Bayesian Rpproach to the Direct Filtering of Radar Targets in Clutter [R]. Hamilton: Adaptive Systems Laboratory, McMaster University, 2002.
- [20] 王彬, 汪晋宽, 等. 认知雷达中基于 Q 学习的自适应波形选择算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1007 – 1012.  
Wang Bin, Wang Jin-kuan, et al. Adaptive waveform selection algorithm based on Q-learning in cognitive radar. [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(5): 1007 – 1012. (in Chinese)
- [21] R W Brandsetter, J Schwarz, A Seidon. Adaptive spread spectrum radar [P]. US: 4679048, 1987.
- [22] 赵知劲, 郑仕链, 等. 认知无线电中频谱感知技术 [J]. 现代雷达, 2008, 30(5): 65 – 69.  
Zhao Zhi-jin, Zheng Shi-lian, et al. Spectrum sensing technologies for cognitive radios [J]. Morden Radar, 2008, 30(5): 65 – 69. (in Chinese)
- [23] S P Sira, et al. Adaptive waveform design for improved detection of low-RCS targets in heavy sea clutter [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 56 – 66.
- [24] S Salerno. A Matlab-Based Ozturk Algorithm Implementation [R]. Wright Pantterson: AFRL, 2006.
- [25] H Trees. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part III: Radar-Sonar Processing and Gaussian Signals in Noise [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [26] N A Goodman, P R Venkata, Neifeid M A. Adaptive waveform design and sequential hypothesis testing for target recognition with active sensors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 105 – 113.
- [27] M R Bell. Information theory and radar waveform design [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1993, 39(5): 1578 – 1597.
- [28] S Kay. Optimum radar signal for detection in clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1059 – 1065.
- [29] D Cochran, et al. Waveform libraries-measures of effectiveness for radar scheduling [J]. IEEE Signal Process Magazine, 2009, 26(1): 12 – 21.
- [30] S Haykin, Currie B, Kirubarajan T. Literature Search on Adaptive Radar Transmit Waveforms [R]. Ottawa: Defence R&D, 2002.
- [31] S U Pillai, Oh H S, et al. Optimum transmit-receiver design in the presence of signal-dependent interference and channel noise [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2000, 46(2): 577 – 584.
- [32] D A Garren, et al. Enhanced target detection and identification via optimized radar transmission pulse shape [J]. IEE Proc-Radar, Sonar Navigation, 2001, 148(3): 130 – 138.
- [33] S Kay. Optimal signal design for detection of Gaussian point targets in stationary Gaussian clutter/reverberation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 31 – 41.
- [34] R Romero, N A Goodman. Information-theoretic matched waveform in signal dependent interference [A]. IEEE Radar Conference [C]. Rome: IEEE Press, 2008. 1 – 6.
- [35] R A Romero, Goodman N A. Waveform design in signal-dependent waveform design in signal-dependent interference and application to target recognition with multiple transmissions [J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2009, 3(4): 328 – 340.
- [36] 纠博, 刘宏伟, 等. 一种基于互信息的波形优化设计方法 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2008, 35(4): 678 – 684.  
Jiu Bo, Liu Hong-wei, et al. Method for waveform design based on mutual information. [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(4): 678 – 684. (in Chinese)
- [37] A Leshem, O Naparstek, A Nehorai. Information theoretic adaptive radar waveform design for multiple extended targets [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,

2007, 1(1): 42 – 55.

- [38] F Z Dai, et al. Adaptive waveform design for range-spread target tracking[J]. Electronics Letters, 2010, 46(11): 793 – 794.
- [39] 纠博, 刘宏伟, 等. 针对目标识别的波形优化设计方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2585 – 2590.  
Jiu Bo, Liu Hong-wei, et al. A method of waveform design for the recognition of radar targets [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(11): 2585 – 2590. (in Chinese)
- [40] 蒋飞, 刘中, 等. 任意频谱结构的连续混沌调频雷达波形设计[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2195 – 2198.  
Jiang Fei, Liu Zhong, et al. Waveform design of arbitrary spectrum structure for continuous-chaos frequency-modulating radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2195 – 2198. (in Chinese)
- [41] L Jackson, S Kay, N Vankayalapati. Iterative method for non-linear FM synthesis of radar signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 910 – 917.
- [42] S Bruno, F Moura. Multiframe detector/tracker: Optimal performance[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 925 – 944.
- [43] Ying Li, M William, et al. Adaptive waveform design in rapidly-varying radar scenes[A]. International WD&D Conference[C]. Kissimmee: IEEE Press, 2009. 263 – 267.

- [44] S M Sowelam, A H Tewfik. Waveform selection in radar target classification[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(3): 1014 – 1029.
- [45] 卢建斌, 胡卫东, 等. 多功能相控阵雷达实时任务调度研究[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 732 – 736.  
J B Lu, W D Hu, et al. Study on real-time task scheduling of multifunction phased array radars[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 732 – 736. (in Chinese)

#### 作者简介



**黎 湘 男**, 1967 年出生于湖南浏阳. 国防科学技术大学教授、博士生导师、电子学会高级会员. 现为 973 技术首席, 863 专家组专家. 入选教育部“新世纪优秀人才资助计划”, 获中国科协“求是杰出青年奖—实用工程奖”, 入选“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 获杰青资助. 主要研究方向为雷达系统与信号处理、非线性信号处理、雷达自动目标识别与模糊工程.



**范梅梅 女**, 1984 年 1 月生于河北衡水. 分别于 2005 年和 2008 于军械工程学院获学士学位和硕士学位. 现于国防科技大学攻读博士学位. 目前主要从事雷达目标识别、认知雷达波形设计、等领域的工作.

E-mail: fmmsunshine@sina.com