

· 雷达系统与技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.09.007

雷达通信波形一体化发展综述

伍光新*, 姚元, 祁琳琳

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:近年来,雷达通信一体化技术在军用和民用领域发挥着愈加重要的作用,其本质是在统一共用的硬件平台上同时实现雷达与通信功能。文中通过对现有雷达波形、通信波形以及雷达通信一体化波形的研究总结,剖析了雷达通信频谱共享项目,总结了雷达通信波形一体化未来可能的发展趋势,为进一步完善该领域相关概念和研究以及将其应用于适当的场景提供参考。

关键词:雷达通信一体化;波形设计;多输入多输出;正交频分复用;雷达通信频谱共享

中图分类号:TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2021)09-0037-09

引用格式:伍光新, 姚元, 祁琳琳. 雷达通信波形一体化发展综述[J]. 现代雷达, 2021, 43(9): 37-45.

WU Guangxin, YAO Yuan, QI Linlin. An overview on radar-communication integration of waveform[J]. Modern Radar, 2021, 43(9): 37-45.

An Overview on Radar-communication Integration of Waveform

WU Guangxin*, YAO Yuan, QI Linlin

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Integration of radar and communication has played an increasingly important role in the military and civilian fields for decades. Its essence is to realize radar and communication functions on a unified hardware platform. The respective development trends of radar waveforms, communication waveforms and integrated waveforms are presented in this paper. The state-of-the-art of SSPARC project is also discussed. Compared to previous summaries, this paper reviews the entire trends that drive the development of integrated radar communication design, providing references for further improving related concepts and research in this field and applying to appropriate scenarios.

Key words: radar communication integration; waveform design; multi-input multi-output (MIMO); orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); shared spectrum access for radar and communications(SSPARC)

0 引言

雷达和通信是现代电子设备系统中广泛配备的两种典型功能,分别肩负着目标探测跟踪和设备间信息传输的任务。从传统发展模式来看,二者基于不同的使命功能和工作频段,秉承着各自独立的发展路线。但是随着电子技术的发展,结合雷达和通信两种功能的一体化设计成为近年来的研究热点,以满足现代电子设备多功能一体化的发展需求。

进行多功能一体化设计的需求点在哪里?原因可以追溯到平台数量巨大、种类繁多的电子设备系统身上。电子系统的不断增多进一步强化着现代军队信息化作战的能力,但是依照传统的发展模式来看,不断堆叠的各类电子设备所带来的问题和挑战也愈加突出:

(1)频谱资源调度紧张。随着电子设备以及数据流量指数性增长,有限频谱资源的争夺日益激烈,现有的频谱分配与优化方案难以实现频谱资源利用率最大化;

(2)电磁环境恶劣,设备干扰严重^[1]。日益复杂的电磁干扰使单个雷达的功能严重受限,多部雷达需要通过通信技术建立组网实现对大批量检测数据的融合;

(3)未来网络化、智能化的战争形态。基于网络信息体系的智能化战争要求多种作战功能完成更为紧密的互联、互通,实现武器资源与信息资源的一体化,构建基于网络信息体系的联合作战能力。

为了满足平台发展的新需求,探索现代电子设备系统的多功能一体化应用迫在眉睫。雷达和通信作为作战平台广泛配备的两个功能系统,二者的综合化利用之路势在必行^[2-4]。对两类电子设备信号波形的复

用优化与融合设计,是实现目标探测和数据通信两种功能集成的重要节点。

本文首先分析了雷达波形和通信波形各自特点和发展趋势,说明了实现雷达通信波形一体化的必要性以及可行性;其次,从波形复用和波形共用两个角度总结了现有的雷达通信波形一体化的相关研究成果与技术进展,得到了多功能一体化发展对波形设计的要求;然后,基于美国提出的雷达通信频谱共享计划(SSPARC),完成共存、合作处理、协作设计和融合实现四个层面的项目内容解读;最后,从时空频码几个维度对雷达通信波形一体化未来的发展趋势进行讨论。

1 一体化设计的必要性

1.1 雷达发展对波形的要求

雷达系统通常发送的是已知的波形或信息,通过检测来自环境(信道)的响应来实现对目标的探测、识别和跟踪。用于发送的信号是已知的,而目标信道是未知的,并且期望被感知(估计)。目前大多数雷达采用的是脉冲体制,波形选择的第一主旨是保证足够的“目标能量”,使得在接收端获得最大化的探测信噪比(SNR),可利用长时间多脉冲积累技术累积目标能量。同时考虑到距离分辨率、估计精度、最大无模糊距离等性能,设计时对应到波形上的主瓣宽度、主旁瓣比、自相关函数以及多普勒频移等指标。

目前雷达常用波形有多种,大致可以分为表1中的几类,分别是调频(FM)波、相位编码、多载波、以及超宽带(UWB)雷达波。FM波中最常见的就是线性调频波(LFM),其显著的优势在于硬件易实现、多普勒容限高。通过对LFM波形削减幅度可得非线性调频波(NLFM),可实现低副瓣,但分辨率受影响。另一大类常用波形为选择伪随机序列或随机序列作为编码信号的相位编码波形,此类波形的关键是“最优码型”的寻找与优化。多载波相位编码(MCPC)结合了相位编码与OFDM技术,具有低截获、抗干扰、频谱利用率高等优点。UWB雷达波形具有短脉宽、大瞬时带宽的特点,充分满足雷达需要足够SNR进行探测的原始诉求,距离分辨率可达厘米数量级。

表1 雷达常用波形分类及特点

波形类目	特点
LFM	硬件易实现、多普勒容限高
NLFM	低副瓣、分辨率受影响
相位编码	抗干扰、时延多普勒分辨率高
MCPC	抗干扰、频谱利用率高
UWB	高距离分辨率、电磁穿透力强

现今雷达的任务已经不限于预警探测,而是扩展到雷达成像、动目标显示和识别,以及利用雷达组网实现战场态势感知等多种功能。面对不断拥挤的电磁环境以及复杂多变的现实作战环境,雷达的体制在不断的革新,波形也越来越多样化。雷达波形设计是雷达系统设计的重要环节,关系到雷达系统的探测距离、精度以及杂波抑制等多方面的指标。综合来看,目前雷达波形主要朝以下几个方面发展:

(1) 具有大瞬时带宽的波形。此类调频/调相波形具有较大脉冲压缩比,有利于提升目标检测、识别以及抗干扰等性能。

(2) 采用复杂调制形式的波形。例如高阶多项式相位信号、非线性调制特征函数信号以及各类经典雷达波形组合得到的复合调制信号,此类信号能够有效增强雷达系统的抗干扰、抗侦收性能。

(3) 具有多种功能实现、多样频段工作、多部雷达协同的组网雷达波形。对比单部雷达作战的局限性,雷达组网系统能够最大化利用空间、时间以及频谱资源,自如应对侦查、干扰、探测等不同任务,是雷达装备体系的进一步完善。

1.2 通信发展对波形的要求

通信系统通常在假设传播信道已知或者预先估计过的情况下发送未知的信号,接收端通过接收信号的不确定性得到信息熵,实现数据传递功能。一般而言,通信系统以数据率、误码率、多普勒容限等为波形评估准则。表2通过波形携带信息的能力指标和关键技术对每一代无线通信技术进行了定义。

第一代通信的频分多址(FDMA)关键技术,仅支持语音服务;第二代发展为时分多址(TDMA),可提供数字语音和低速数据功能;码分多址(CDMA)是第三代无线通信的波形技术代表,能够为多个用户提供具有不同峰值数据速率的多媒体数据服务;第四代移动通信系统采用正交频分多址(OFDM),可实现每个用户100 Mbps~1 Gbps峰值速率的宽带数据服务;移动通信技术的不断

断进步带来的挑战也愈加突出,用户对通信速度、容量以及保密性等方面的需求爆炸性增强,促使通信系统带宽不断扩展,频谱资源逐渐拥挤;第五代无线通信技术被认为是解决这些问题的有效方案,其关键性能指标由国际电信联盟定义如下:(1)与4G相比,频谱效率有望提高5~15倍;(2)链接目标密度是4G的10倍,至少 $10^6/\text{km}^2$;(3)有望满足低时延(无线等待时间 $\leq 1\text{ ms}$)、低成本($\geq 4\text{ G}$ 成本效率的100倍)。

表2 无线通信1~5代关键技术

通信系统	波形变化、关键技术及特点
第一代	FDMA,仅支持语音服务
第二代	TDMA,数字语音和低速数据
第三代	CDMA,多个用户、不同峰值数据率
第四代	OFDM,多个用户、宽带数据服务
第五代	F-OFDM、DFT-OFDM、MIMO,高效、高频谱效、安全、高速率

结合5G技术的指标,通信的波形设计近年来的发展方向主要可以总结为以下几个方面:

(1) 高频段,大带宽的信号。能够支撑移动通信海量数据的高速传输。

(2) 抗干扰性、安全性更强的信号。采用扩频体制或者自适应波束等,可以提升通信设备抗干扰能力和信息安全性,以应对多功能、智能化的通信对抗系统。

(3) 低时延、高可靠的信号^[5]。尤其某些新兴自动化应用场景,对时延以至于对时延的抖动都有一定的要求。

总结来看,主旨为在保障高吞吐量和多链接的同时尽可能提高通信的可靠性。

纵观雷达和通信的波形发展趋势可以看出,二者的信号形式在工作带宽的选择、抗干扰性能的增强、可靠性的提升等方面的发展方向均有不同程度的交叉重叠,在对波形的选择以及信号的检测和估计中采用的处理技术也趋于统一。可见两个系统信号之间的鉴别边界越来越模糊,无形中为统一波形的设计提供了技术上的支撑。另一方面,传统上由模拟硬件设备实现的雷达信号处理模块已经被数字设备取代,而数字通信系统已经应用了数十年。因此,雷达和通信在硬件结构和系统组成上均具有很强的相似性。

1.3 多功能一体化对波形的要求

多功能一体化系统经历了“分立式”“联合式”“综合式”“协同一体化”四个不同阶段^[6]。系统实现的共

享资源内容依次从同一平台延伸至控制/显示部分,再融入信号处理部分,最后叠加通道和射频前端部分等。现阶段美空军的机载综合航空电子系统、“协奏曲”机载多功能综合射频系统(CONCERTO)以及海军的“先进多功能射频概念”(AMRFC)、“集成式上层建筑”(InTop)等均是此类系统中具有代表性的一体化项目。通过上述计划的路线来看,未来多功能电子一体化发展的重点为从“综合化”“信息化”到“网络化”。

(1) 综合化。即将平台中的探测、通信、导航、电子战等设备进行集成,实现天线孔径、射频前端、信息/数据处理、显示等资源的综合化。

(2) 信息化。从提高平台信息/数据的搜集、传输、处理和应用的能力出发,充分发挥高度综合平台系统的整体效能。

(3) 网络化。此概念的提出基于“网络中心战”的作战形态,指利用平台系统中的传感器、数据链、协议等相关设备,更高效、更广泛的共享各平台的硬件和信息资源,从而提升系统的战场态势感知能力、协同作战能力以及战场生存能力等。

多功能一体化包含对硬件结构、信号处理、波形、射频前端等多方面的设计,本文探讨多功能一体化对波形设计方面的要求,总结为以下两点:

(1) 兼容性。波形需要满足在统一的平台架构上实现多种功能的复用,因此波形在硬件结构、信号处理、频段等方面的兼容性至关重要。以雷达和通信频谱兼容为例,可以采取预先感知对方频段进而回避以及频段复用两种方式来实现波形在频域的兼容性。

(2) 性能折中。一种波形应用于多种功能对比于单一波形应用于单一功能的劣势在于无法有针对性兼顾单一功能的所有需求,即对于各个功能的某方面性能可能存在一定影响,需要进行适当的折中选择。对雷达和通信一体化而言,雷达的高功率、低副瓣、强指向性和抗干扰等特点与通信的低时延、高速率和易实现等优势,如何进行取舍,需要针对不同的应用场景在相应的性能选择上需要有所倾斜。

2 一体化的方式

2.1 兼容复用波形

目前,在信号范畴内基于雷达通信一体化(Rad-

com)概念的波形设计可以大致分为两类:一类是利用复用的方法将雷达波形和通信波形组合成为一体化波形,复用的方式涵盖时空频码等多个维度;另一类是通过重新设计新型的单一波形来同时实现雷达探测和通信传输功能。

雷达和通信功能的复用可以依据某一或多个维度的正交性来实现,雷达和通信分别拥有独立的波形。此类波形的主要特点是:雷达和通信波形设计容易,对相互性能的影响小,实现简单。目前常见的波形复用类型包括时分复用、空分复用、频分复用以及码分复用。

(1) 时分复用

时分复用即雷达和通信分别在不同的时间段里实现各自的功能,不同时间段发射不同波形。此类型设计简单,雷达常用波形和通信常用波形不需要改动,只需考虑时间间隙合理划分的问题,同时两种功能在时域交替,不存在相互干扰问题。另外可以通过选通开关实现天线和收发设备的复用。如图1所示,雷达波束扫描并跟踪到通信目标时,进行通信信息传输,结束后再次进入探测模式。但是该模式由于分时复用雷达软硬件资源,通信优先的体制导致传输数据时不能兼顾雷达功能,即存在探测盲区。目前此类一体化应用很多集中在智能交通系统以及车联网这种近距离探测和通信方面^[7-8]。

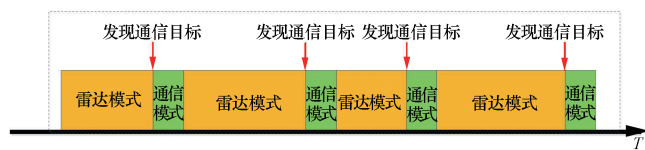
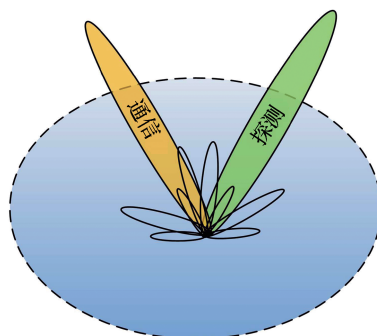


图1 时分复用雷达通信系统

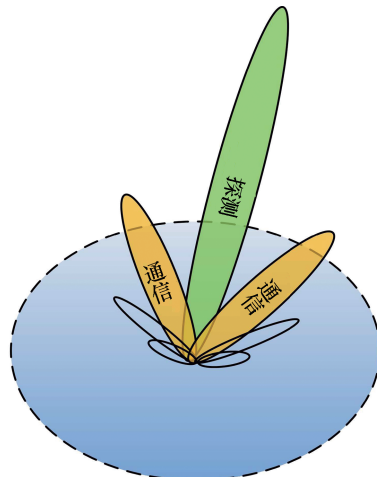
(2) 空分复用

空分复用指在不同的空域分别实现雷达探测功能和通信数据传输功能,可以理解为相控阵雷达常用的“多波束”体制,利用数字阵的多个子阵进行组合,在不同的波束方向分别实现探测和通信功能,如图2a)所示,每个子阵面具有独立的工作模式,通过对其不同组合实现不同功能^[9]。此类型方案的雷达和通信波形与时分复用类似,设计灵活,但容易存在相互干扰严重的问题,而且本质上并没有加强系统硬件共享率。另外一种空分复用模式为 HASSANIEN 等学者^[10]提

出的采用雷达主瓣实现探测性能,而对指向通信方向的雷达波形的旁瓣进行调制以实现数据的传输,类似于常规制导雷达的副载频调制机制,如图2b)所示。此类型方法可高效缓解雷达旁瓣和通信旁瓣之间的干扰,但是波形限制多且两种功能实现的区域受限。



a) 不同波束分别实现雷达、通信功能



b) 主波束探测、旁瓣通信

图2 雷达通信一体化空分复用

(3) 频分复用

频分复用即雷达和通信分别在不同的频域进行各自功能波形的设计,二者叠加之后同时发射。国外学者 REICHAPD L 等^[11]采用雷达信号频谱的第一零点处的频点作为通信信号的载频,频段复用示意可参见图3。RAVENSROFT 等人利用调频噪声雷达谱的间隙传递 OFDM 信号。国内学者李晓柏等人采用多个正负调频率的 Chirp 信号形成的多载波信号(图4)。信息传输和目标探测在频域上进行交叉实现,正负调频率保证了两种功能的隔离度,探测性能的提升可通过减小带宽重叠率实现^[12],硬件的共享可通过 FDA-MIMO 技术实现。频分复用的方法系统时间资源可以实现共享,但是为避免干扰,两种功能在频带中需要一定的频点间隔,导致了频谱利用率下降。

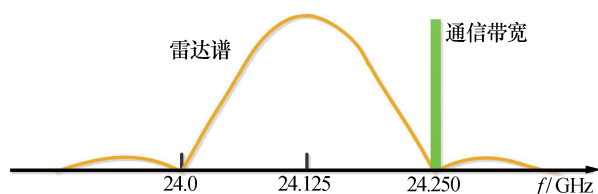


图3 雷达通信工作频谱划分

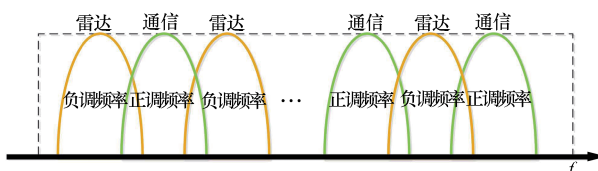


图4 正交多载波 Chirp 信号频谱图

(4) 码分复用

码分复用即雷达和通信分别采用不同的正交(伪随机)码对信号进行调制,叠加合成一体化信号。雷达信号和通信信号可实现对相同的时隙和相同频段的占用。由于不同伪随机序列之间具有良好的正交性特点,因此波形抗干扰性能很强,同时扩频技术可增强信号的低截获性。JAMIL M 等人^[13]提出采用 Oppermannn 多相码作为复值的加权脉冲序列码来区分雷达与通信信号。Oppermannn 序列同时具有较大的自相关域与较小的互相关域,TAKAES H^[14]采用的完全互补码组也具有类似性能。此外,扩频技术还可与 UWB 雷达进行结合以实现一体化,通过不同的伪噪声序列扩展雷达和通信的频谱,避免相互干扰。

由于时隙、空间以及频谱资源的受限性,复用波形解决的主要问题是雷达和通信两种功能的兼容性,进而完成系统性能的提升。复用的方式实质上就是从不同维度消除雷达和通信之间干扰的协调方案,雷达和通信两个系统在波形信息上没有任何交互。

2.2 一体化波形

通过时空频码复用的方式进行一体化波形设计能够在某几维度实现雷达和通信的兼得,而且两种信息隔离度较高,波形设计灵活度也很高。但是从系统资源利用率的角度看,此类波形的一个固有缺点是存在其他维度资源的浪费。为了能够实现系统资源的最大化利用,另一种一体化程度更高的综合化波形成为研究的热点方向。采用单一的共用波形来实现目标探测和数据传输功能,是一种新设计的综合化波形,而非利用复用技术融合而成的雷达或通信波形。一般来讲,目标探测通过波形本身实现,信息传输通过波形的某方面的差异性来进行携带。

根据雷达和通信两者综合化的方式,总结共用波形一体化设计方向大致可以分为三类:

(1) 基于雷达波形的一体化

基于雷达的一体化波形指以雷达波形为主,在其上调制通信数据而得。一般针对雷达经典波形 LFM 信号进行深入的一体化设计,脉冲的起始频率、步进频率、相位、脉冲宽度、重复频率等参数均可被用来表征通信信息。

基于雷达的一体化波形设计从信息调制方式的角度来看可以分为两类:第一类主要针对脉间编码进行调制完成通信信息的加载,包括文献[15-16]中采用的调制频率、脉冲重复频率等,这类波形参数携带信息效率低,通信速率很难达到实际传输需求。第二类主要针对脉内编码调制而言,脉内编码将脉冲分割为多个子脉冲,进而进行幅度、相位或者频率调制。文献[17]采用将最小频移键控调制与线性调频信号相结合,得到的 LFM-MSK 一体化信号具有更好的测距和测速性能。文献[18-19]基于(非)线性调频和连续相位调制(NLFM/LFM-CPM)对一体化波形进行改进。其他波形包括 LFM-BPSK^[20], LFM-QPSK^[21]以及 LFM-16QAM^[22]均属于此类型范畴,中心思想是把雷达常用 LFM 波形作为通信信号的载频,便于实现目标探测的前提下兼顾信息的调制,并进行算法改进以保证探测性能、提升通信速率。此类波形普遍存在通信信息分割发射功率的问题,且在接收端对两者信号的分离较为困难。

(2) 基于通信波形的一体化

基于通信的一体化波形指以通信波形为主,利用其或将其改造成为可进行雷达探测的波形。目前研究成果集中在基于通信常用波形——OFDM 信号改造而成的各种一体化波形。对比采用传统雷达波形进行调相方式的一体化实现,基于 OFDM 技术的雷达通信一体化波形具有更好的低旁瓣特性、高多普勒容限和高信息传输能力。目前研究方向大多注重对 OFDM 一体化波形的模糊函数、自相关函数以及峰均包络比、峰均功率比(PAPR)等性能的优化改进。主旨是在兼顾雷达性能与通信速率的同时,降低旁瓣电平并提高多普勒容限。2009-2016 年间,美国多所大学研究了将 OFDM 调制的通信数据嵌入到超宽带噪声中^[23],后续 GAGLIONE D 等人提出了基于分数阶傅里叶变换的综合化波形,通过不同的时频比将通信数据嵌入到 LFM

子载波中。STRUM C 等人^[24]采用 N_s 个 OFDM 符号构成一个脉冲的脉冲发射体制一体化办法,每一脉冲是通信的一帧或者复帧,模式如图 5 所示。TIAN 等人^[25]利用通信数据与循环移位 M 序列进行映射,将其加载到相位编码 OFDM 信号中形成一体化信号。上述研究均是通过对通信波形进行一定的改动以达到提高探测性能的目的,但容易造成不同程度的通信性能的下降。另外针对 OFDM 一体化波形固有存在的高 PAPR 问题,不少学者^[26]提出采用格雷码编码进行改善。此类波形调制之后一般非恒包络,而雷达发射机往往工作在非线性放大区,容易造成信号失真严重。

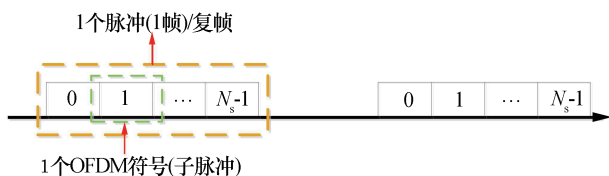


图5 OFDM 雷达通信一体化发射波形

(3) 新型的一体化波形设计

新型的一体化波形一般设计思路为雷达和通信两正交信号各自独立产生,对合成波形加以改造,形成共享信号。这里的合成不同于 2.1 节的复用波形的简单叠加,而是真正的“合二为一”,即发射端产生的信号既能实现雷达功能,又能进行通信。两类信号可采用频域正交、波形正交等多种正交方式。

文献[10]中将信息嵌入到多个正交波形中,并通过优化方法控制目标方向上各个波形与参考波形的相位,信号的调制方式相当于相移键控。文献[27]将相位频移键控(PSK)信号嵌入到跳频信号中实现功能兼得。文献[28]在 OFDM-LFM MIMO 雷达的基础上,通过改变每个阵元发射信号的初始频率实现雷达通信一体化,可以满足全空域同时通信和波束覆盖。FAN L 等^[29]提出的基于 MIMO 雷达通信一体化系统可实现单台多天线发射机与下行蜂窝用户通信,同时完成雷达目标检测。

表 3 罗列了几种波形一体化技术及其各自特点。

表 3 一体化波形设计对比分析

波形体制	特点
LFM LFM-MSK LFM-CPM	现有平台易实现; 接收端分离困难、数据率低
OFDM	低副瓣、高多普勒容限、 高数据率;高 PAPR
扩频 DSSS DS-UWB	高可靠性、抗干扰性强; 传输速率低、严苛正交性
MIMO-OFDM	空间分集和波形分集、大时间带宽积、 低副瓣、低 PAPR

3 雷达通信频谱共享项目

有关雷达传感器和无线通信两者集成的项目研究最早可以追溯到 20 世纪 70 年代美国国家航空航天局(NASA)的航天飞机计划,2015 年,美国国防高级研究计划局启动了 SSPARC 项目,推动雷达通信一体化系统的最新发展,同时为未来一段时期雷达和通信的一体化设计提供了可参考的方向。该项目旨在 S 波段实现军用雷达和军用通信,以及军用雷达和民用通信之间的频谱共享技术。SSPARC 依据不同的一体化方式类别和时间阶段将项目任务划分为三类:

(1) 共存式(Coexistence)雷达通信一体化系统。

基于现有雷达和通信设备,研究新方法及新型技术对两者加以合理改进、友好共存,包括雷达和通信各自通过自适应滤波等手段去除对方造成的干扰,最大化保证自身性能的实现,同时缓解频谱资源短缺的困境。

(2) 协同设计式(Co-design)雷达通信一体化系统。此阶段致力于开发全新型的融合雷达和通信功能为一体的综合系统。不少学者将项目任务延伸解读为三个层次的一体化协同设计,分别合作处理(Cooperation)阶段,协同设计(Co-design)阶段以及融合实现(Collaboration)阶段^[30]。

(3) 理论性能极限分析。此类研究为基于信息论的理论研究,主要目的是确定频谱共享的雷达通信一体化系统的性能界限。

Coexistence 式的一体化系统中,雷达和通信是相互隔离、相互独立的,互相对双方而言是干扰的存在,如 2.1 节提到的时分复用、频分复用等类似的设计均属于消除干扰方案的共存类型一体化系统,另外有部分研究学者^[31]考虑采用蜂窝网络实现雷达和通信子系统的共存问题;第二阶段 Cooperation 的一体化系统中,雷达和通信作为两个独立的系统可以在同一维度发挥作用,不再视对方为干扰源,并且能够利用双方的集成来提升自身性能,Cooperation 可以看作是一体化波形设计的初始阶段,主要解决一体化系统中探测和数据传输两种功能的折中问题,以评估合作系统中的约束关系;第三阶段 Co-design 展现了一个完整的一体化系统,采用现代集成技术,如信号、波形、编码等对发射波形进行重新设计。2.2 节中一体化波形大多属于此范畴;第四阶段 Collaboration 不同于前三个阶段的单纯注重雷达和通信基础功能的实现与联结,其目的

在于建立多基探测、实时通信的组网式一体化系统,是下一代雷达通信一体化系统建立的方向。

图6展示了SSPARC项目对雷达通信在频谱共享方面的效果评价准则。图6a)为雷达和通信两系统独立存在时各自的性能参数。对雷达系统而言,由给定的发现概率 P_D 、虚警概率 P_{FA} 和RCS为 1 m^2 的稳定目标,雷达性能可通过探测距离 R 来衡量;对通信系统而言,通信链路性能可通过距离 R 情况下的数据吞吐量 T 来衡量。图6b)为基于SSPARC的雷达通信一体化性能评价准则的建立过程。保持 P_D 、 P_{FA} 、目标特征、 D 不变,当雷达可探测距离 $R \geq 0.9 S * R$,数据吞吐量 $T' \geq 0.95 * T$ 时,得到的雷达和通信之间的最小距离为基准距离 S_{BASELINE} 。当采用SSPARC技术并满足上述 T' 和 R' 的条件时,得到的 S_{SSPARC} 一定小于 S_{BASELINE} 。归一化的评价准则公式为

$$\text{Standoff Reduction} = S_{\text{BASELINE}} / S_{\text{SSPARC}}$$

比值越大证明频谱共用性能越好。针对不同的一体化设计,项目给出不同的系数标准,部分罗列如下:

雷达性能 $R' \geq 0.95 * R$;

通信性能 $T = k * T$;

对于共存式雷达通信一体化设计,要求 $k = 0.5$ 。

对于协同设计式雷达通信一体化设计,要求 $k = 0.8$ 。

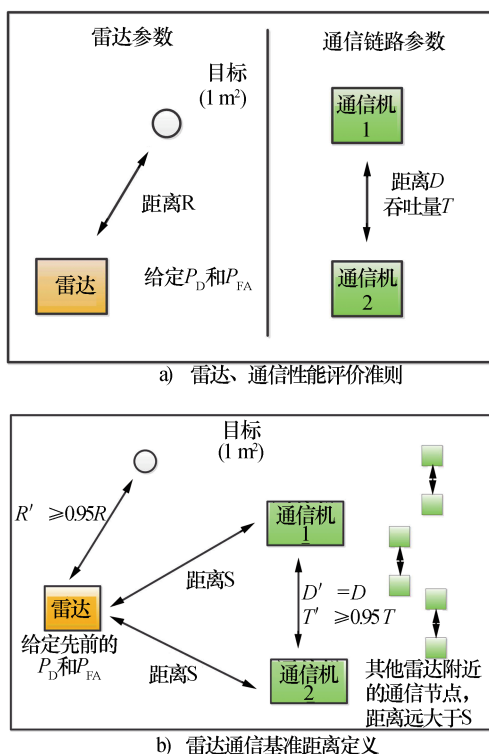


图6 SSPARC项目基于频谱共享的效果评价准则

4 雷达通信一体化未来发展趋势

对于未来战场而言,单平台的多功能一体化是系统发展必经之路,是实现跨平台合作、多源信息融合的先驱途径之一。结合实际需求及目前的研究现状来看,未来雷达通信波形一体化的发展趋势可能存在以下几个方面:

(1) 时频域方面,加强时间细化、扩大瞬时带宽。多目标的高精度测距和无线通信的高速增长两方面需求驱动着一体化波形瞬时带宽的不断提高。系统具有大瞬时带宽意味着可发射更多种类、更加复杂的波形,能更加充分的在时、空、频多维度调度系统资源,有利于提高系统抗截获、抗干扰能力。目前通过对宽带LFM雷达、通信一体化收发射频前端进行设计,叠加时分复用的方式来实现雷达通信功能共享已有部分研究成果。随着超宽带、OFDM、载波聚合等技术的蓬勃发展,未来基于宽带相控阵的一体化波形设计系统将更加完善。

(2) 空域方面,MIMO体制持续发展。在雷达领域内,相控阵系统因其优越特性通常被赋予多种类型的探测任务,同时在通信领域也早有应用。数字化的相控阵天线为通信系统提供了波束赋型能力,满足MIMO通信系统的实现条件。结合频域要求,大瞬时带宽的MIMO阵列将是满足雷达、通信、电子对抗等多种功能一体化的有效途径。将MIMO体制和OFDM技术相融合形成的MIMO-OFDM新型体制具有抗多径衰落、高频谱利用率、波形多样性灵活度高等特点,通过对MIMO-OFDM一体化波形进行优化,可以得到具有大时间带宽积、低互相关旁瓣和低PAPR的雷达通信一体化波形,可用于目标跟踪、宽带成像、高速数据传输等多个领域,是雷达通信一体化信号的热点研究方向之一。

(3) 码域方面,采用高阶的复杂编码调制波形。频率编码、相位编码和码型捷变的应用使得波形复杂度较高,大大增加了敌方侦测信号的难度,改善了设备的低截获性能。另外在频谱资源有限的情况下,采取高阶调制可有效增大系统容量,进一步强化一体化系统的抗截获、抗干扰性能。结合OFDM技术和多载波相位编码形成了雷达通信一体化的框架,通过对码序列的自相关以及互相关性能的比较,筛选出合适的编

码类型和参数是此类波形未来持续的研究重点。

(4) 未来一体化波形可实现根据任务和环境在时空频码多维自由度之间自适应选择折中波形。建立面向应用的多样化波形库,可依据探测/通信范围、杂波/干扰强度或搜索/识别/多址通信等功能需求进行动态选取。同时具备支持时、空、频、码波形的能力,以提升作战应用的灵活性。对于多任务的工作平台来讲,没有“最好的波形”,只有“最合适的波形”。即一体化系统依据平台的任务、所观测的目标及其所处环境的特性来自适应选择发射信号波形。使波形与目标及环境特性达到最佳匹配,对目标进行匹配照射、精准传输,从而实现在复杂快变作战环境下的对抗能力提升和任务使命完成。

5 结束语

本文对雷达通信波形一体化这一研究热点进行了论述,通过对雷达和通信现有波形以及发展趋势的分析,概括了两者进行波形一体化设计的必要性和优越性,介绍了雷达通信一体化在时空频码域的典型复用波形以及基于雷达和通信的共用波形设计,总结了雷达通信波形一体化的研究现状与进展。针对最新的SSPARC计划进行解读,将雷达通信波形一体化的最新发展方向梳理为共存、合作处理、协作设计以及融合实现四个层面。随着未来军事领域和民用智能交通领域对智能化程度要求越来越高,MIMO-OFDM和认知雷达体制的陆续投入使用,雷达通信一体化将显现出巨大的发展潜力。

参考文献

- [1] CHEN Z, MA X Y, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. China Communication, 2019, 16(2): 1-35.
- [2] FENG Z Y, FANG A X, WEI A Q, et al. Joint radar and communication: A survey [J]. China Communications, 2020, 17(1): 1-27.
- [3] 肖 博, 霍 凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 236-247.
XIAO Bo, HUO Kai, LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(3): 236-247.
- [4] STRUM C, WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communication and radar sensing[J]. Proceeding of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [5] PARVEZ I, RAHMATI A, GUVENC I, et al. A survey on low latency towards 5G; RAN, core network and caching solutions [J]. IEEE Communications Survey & Tutorials, 2018, 20(4): 3098-3130.
- [6] MOLNAR J A, CORRETJER I, TAVIK G. Integrated top-side-integration of narrowband and wideband array antennas for shipboard communication[C]// 2011-Milcom 2011 Military Communications Conference. Baltimore, MD: IEEE Press, 2011: 1802-1807.
- [7] LIANG H, WU K. 24 GHz integrated radio and radar system capable of time-agile wireless communication and sensing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 619-631.
- [8] LIANG H, WU K. Multifunctional transceiver for future intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(7): 1879-1892.
- [9] MAIAS J A. F-22 radar development[J]. Processing of the IEEE Aerospace and Electronics Conference. Dayton, OH: IEEE Press, 1997: 831-839.
- [10] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Dual function radar-communications using phase-rotational invariance[C]// 2015 23rd European Signal Processing Conference. Nice, France: IEEE Press, 2015: 1346-1350.
- [11] REICHAPD L, STURM C, GRUNHAUPT F, et al. Demonstrating the use of the IEEE 802.11p Car-to-Car communication standard for automotive radar[C]// 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EU-CAP). Prague, Czech Republic: IEEE Press, 2012: 1576-1580.
- [12] 李晓柏, 杨瑞娟, 程 伟. 基于频率调制的多载波 Chirp 信号雷达通信一体化研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 406-412.
LI Xiaobai, YANG Ruijuan, CHENG Wei. Integrated radar and communication based on multicarrier frequency modulation chirp signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 406-412.
- [13] JAMIL M, ZEPERNICK H J, PETERSSON M I. On integrated radar and communication systems using oppermann sequences[C]// IEEE International Conference on Military Communication. San Diego, CA: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [14] TAKAES H, SHINRIKI M. A dual-use radar and commu-

- nication system with complete complementary codes[C]// 11th IEEE Radar Symposium. Vilnius, Lithuania: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [15] 李晓柏, 杨瑞娟, 陈新永, 等. 基于分数阶傅里叶变换的雷达通信一体化信号共享研究[J]. 信号处理, 2012, 28(4): 487-494.
- LI Xiaobai, YANG Ruijuan, CHEN Xinyong, et al. The sharing signal for integrated radar and communication based on FRFT[J]. Signal Processing, 2012, 28(4): 487-494.
- [16] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system[J]. IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry, 1963, 9(2): 37-42.
- [17] WILLIAN H F, DONALD W C. Radar-compatible data link system[P]. U. S. A US7298313 B1. 2007-11-20.
- [18] 刘志鹏. 雷达通信一体化波形分离算法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(5): 481-485.
- LIU Zhipeng. Separation algorithm research of radar-communication integrated waveform[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2013, 8(5): 481-485.
- [19] 姜孟超, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种 NLFM-CPM 雷达通信一体化信号设计[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 9(1): 35-42.
- JIANG Mengchao, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, et al. Signal design for integrated radar and communication based on NLFM-CPM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 9(1): 35-42.
- [20] ZHANG Y, LI Q Y, HUANG L, et al. Waveform design for joint radar-communication with non-ideal power amplifier and outband interference[C]// 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco. CA: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [21] 贺占权, 李晓青, 倪远涵. 基于变速率的高吞吐量 LFM-BPSK 一体化波形[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 114-117.
- HE Zhanquan, LI Xiaoqing, NI Yuanhan. High throughput LFM-BPSK integrated waveform based on variable rate[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(5): 114-117.
- [22] NOWAK M J, ZHANG Z, LOMONTE L, et al. Mixed-modulated linear frequency modulated radar-communications[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 11(2): 313-320.
- [23] 曾 浩, 吉利霞, 李 凤, 等. 16QAM-LFM 雷达通信一体化信号设计[J]. 通信学报, 2020, 41(3): 182-189.
- ZENG Hao, JI Lixia, LI Feng, et al. 16QAM-LFM waveform design for integrated radar and communication[J]. Journal on Communications, 2020, 41(3): 182-189.
- [24] STRUM C, ZWICK T, WIESBECK W. An OFDM system concept for joint radar and communication operations[C]// IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona, Spain: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [25] TIAN X X, SONG Z H. On radar and communication integrated system using OFDM signal[C]// 2017 IEEE Radar Conference. Seattle, WA: IEEE Press, 2017: 318-323.
- [26] JOHN E, ZHANG Z P, MICHAEL W, et al. Multicarrier radar waveforms for communications and detection[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(3): 444-452.
- [27] HASSANIEN A, HIMED B, RIGLING B D. A dual function MIMO radar-communications system using frequency-hopping waveforms[C]// 2017 IEEE Radar Conference. Seattle WA: IEEE Press, 2017: 1721-1725.
- [28] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于 OFDM-LFM 信号的 MIMO 雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 801-808.
- LIU Binfan, CHEN Baixiao. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 801-808.
- [29] LIU F, ZHOU L F, CHRISTOS M, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: optimal waveform design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(16): 4264-4279.
- [30] CHIRIYATH A R, PAUL B, BLISS D W. Radar-communications convergence: coexistence, cooperation, and co-design[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 3(1): 1-12.
- [31] BISWAS S, SINGH K, TAGHIZADEH O, et al. Coexistence of MIMO cellular systems with considerations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 11(17): 7281-7294.

作者简介:

伍光新 男, 1980 年生, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为雷达总体技术;

姚 元 男, 1986 年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷达信号处理;

祁琳琳 女, 1994 年生, 硕士, 助理工程师, 研究方向为雷达波形设计。