

· 专题一:双清论坛“电磁空间信息资源的认知与利用” ·

电磁空间分布式一体化波形设计与信息获取

刘永军 廖桂生* 李海川 陈毓锋 姜孟超

西安电子科技大学 雷达信号处理国家级重点实验室, 西安 710071

[摘 要] 分布式多功能一体化波形设计与信息获取是电磁环境认知与资源利用的重要途径,是掌握电磁空间主动权的关键,对我国社会经济发展和国防安全具有重要战略意义。目前,国内外在多功能一体化波形设计和信息获取方面已取得一定的进展,但仍存在电磁资源利用率不高、互干扰抑制能力不足、系统性能受限等问题。为解决这些问题,本文立足于分布式多功能一体化系统,分析现有一体化波形设计和处理的优缺点,探究分布式多功能一体化系统的关键科学问题,探讨其所面临的挑战并给出相关建议。

[关键词] 电磁空间;分布式;多功能;一体化波形;信息获取

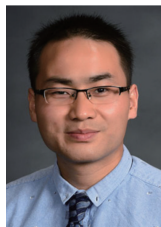
1 电磁空间分布式多功能一体化波形设计与信息获取的重要意义

随着现代科技的发展、社会需求的增加以及战争形态的变化,不同类型的信号源越来越多,其所辐射出的各种电磁信号,在整个电磁频谱上相互交织在一起,形成了复杂多变的电磁环境。在现代生活中,各种电子产品在社会生产和生活中已不可或缺,而随着电子产品的增多,电磁环境将愈发复杂多变,如果不能对其精确感知和控制,将造成各电子产品相互干扰、甚至无法正常工作,影响正常的生产和生活,以及社会经济的发展^[1]。此外,在现代战争中,电磁环境更加复杂多变,其对战场环境感知、作战指挥与控制、各兵种间协同作战、打击效能评估等各作战环节产生了广泛而重大的影响。为此,电磁空间已成为与陆、海、空、天并列的第五维作战空间,是未来信息化作战的重要战场。另外,在未来战争中,谁能对电磁空间进行快速感知、精确信息获取、最优利用以及灵活控制,谁就能掌握战场的主动权,以及未来战争胜利的关键。

为了掌控未来信息作战的战场主动权,需要侦察、干扰、探测、通信等各种不同功能的电子装备,而



廖桂生 西安电子科技大学雷达信号处理国家级重点实验室教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,入选首批“新世纪百千万人才工程国家级人选”,国家自然科学基金委员会创新研究群体负责人,教育部“长江学者奖励计划”创新团队“雷达信号处理”带头人。长期致力于雷达领域空时自适应处理(STAP)、阵列信号处理等基础理论与应用研究。



刘永军 博士,西安电子科技大学雷达信号处理国家级重点实验室讲师,主持有国家自然科学基金、国防基础科研项目等,至今发表学术论文 20 余篇,获得授权发明专利 6 项,主要研究方向为一体化的波形设计与处理、目标检测、参数估计、阵列信号处理等。

为了提高不同功能电子装备的性能,通常需要增大工作带宽,带宽的增加势必导致电磁频谱冲突加重,各设备间的互干扰加重。此外,随着单一作战平台对多功能需求的增加,不同平台上简单累加不同功能的设备,将造成装备冗余、体积增大、重量加重、操作复杂、机动性降低等问题,将严重影响作战平台的整体性能。此外,随着隐身飞机、高超声速飞行器、反辐射导弹等武器的出现,严重威胁到了我国的国

收稿日期:2021-02-09;修回日期:2021-06-03

* 通信作者,E-mail: liaogs@xidian.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(62001352,61621005)和中央高校基本科研业务费(XJS200211)的资助。

土安全,对我国国土防御提出了重大挑战。传统的单站系统的发射功率、天线孔径、信号带宽等受限,造成探测覆盖范围小、精度低、抗干扰能力差等问题,难以满足日益复杂的电磁环境和作战任务需求。

为解决上述问题,实现对电磁空间的精确感知与信息获取,分布式多功能一体化系统成为有效的解决途径之一,也是未来电子系统的发展趋势。分布式多功能一体化系统可打破传统利用单功能设备进行粗放式累加实现侦察、干扰、探测、通信等多种功能的方式,而是通过多个分布式节点协同产生多功能一体化波形,并通过协同处理实现对电磁空间信息的获取,完成侦察、干扰、探测、通信等多种任务。为了实现分布式多功能一体化系统,其关键在于如何设计分布式多功能一体化波形以及如何从复杂多变的电磁环境中精确提取所需信息,这对于夺取复杂电磁环境下电磁空间感知、控制与利用的主导权具有重要研究价值和战略意义。

2 多功能一体化波形设计与信息获取现状

雷达探测、信息传输、电子对抗等功能的实现均以电磁波为物理基础,这就为探测、通信、干扰等发射波形的一体化奠定了物理基础。然而,探测、通信、干扰等对发射波形的要求各不相同,使得可实现多种功能的一体化波形难于设计。此外,在接收信号中,不仅包含了期望功能的信息,而且也包含了其他功能的信息,以及无用信息,如杂波、噪声等。不同功能的信息与其他无用信息相互交织在一起,难以获得所期望的功能信息。针对这些问题,国内外学者开展了广泛而深入的研究工作。目前的研究工作主要集中在两个方面:一是雷达通信一体化波形设计和处理^[2-5];二是雷达干扰一体化波形设计与处理。

2.1 雷达通信一体化波形设计与处理现状

在雷达通信一体化波形设计方面^[4, 5],目前的设计方法主要分为两大类:一类是基于复用技术的雷达通信一体化设计方法,另一类是基于传统雷达和/或通信波形的雷达通信一体化共用波形设计方法。基于复用技术的雷达通信一体化设计方法一般分别对雷达和通信波形进行设计,然后利用时分复用、频分复用、码分复用、空分复用等复用技术实现雷达和通信波形的一体化。

利用时分复用技术实现雷达通信一体化的方式如图 1 所示,其在不同的时隙分别实现雷达和通信



图 1 时分复用雷达通信一体化示意图

功能。例如,Cager 等介绍了最早的基于时分复用技术的雷达通信一体化系统^[6],该系统工作在 Ku 波段,当作为双向通信系统工作时,其前向链路的数据率可达 216 kb/s,当作为低脉冲重复频率的脉冲多普勒跳频雷达工作时,可跟踪有源和无源目标。Han 和 Borky 等研究了智能交通应用场景下的时分复用雷达通信一体化波形设计方法,在雷达周期段,信号采用梯形调频连续波的调制方式,通过比较收发信号的时频特性实现对目标距离和速度的估计;在通信周期段,采用诸如频移键控、相移键控等通信调制方式实现通信信息的传输^[7, 8]。时分复用方式易于实现雷达和通信的一体化,而且可有效降低雷达和通信之间的干扰,雷达和通信也可采用传统的处理方法进行处理,但实时性差,时间资源的利用效率低。

利用空分复用实现雷达通信一体化的方法如图 2 所示,该方法通常采用空域加权的方式在不同的方向形成雷达和通信波束。如 Nusenu 等提出一种基于频率分集阵列的雷达通信多波束形成方法,将通信与雷达波束投影到对方波束的零陷位置,从而利用空间正交性,削弱雷达与通信信号之间的干扰^[9]。Hassanien 等利用雷达的主瓣实现探测功能,并对指向通信方向的雷达旁瓣进行调制,实现传递通信信息的功能^[10, 11]。

采用频分复用技术实现雷达通信一体化的方式如图 3 所示,其中雷达和通信分别在不同的频段工作。如 Winkler 等通过在脉冲体制雷达发射信号功率谱密度低的频带发射通信信号,实现车辆间的通信^[12]。Surender 等利用频域陷波器滤除掉超宽带

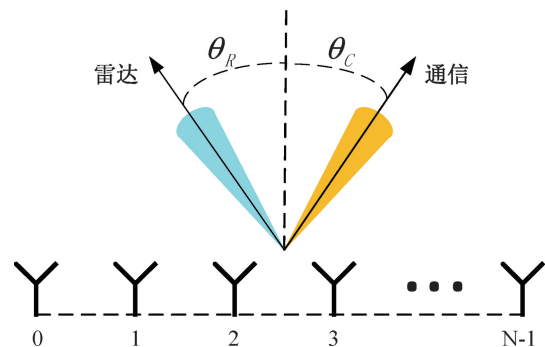


图 2 空分复用雷达通信一体化示意图

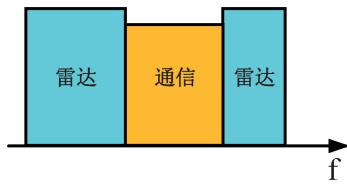


图 3 频分复用雷达通信一体化示意图

随机噪声信号中的一段频谱,然后在该段频谱内加入采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制的通信信号,从而构成一个具有雷达和通信功能的一体化信号^[13]。

采用码分复用技术实现雷达通信一体化的方式如图 4 所示,其中雷达和通信通常采用不同的伪随机码实现各自的功能。如 Xu 等利用伪随机码实现对雷达和通信数据的谱扩展,并采用码分多址技术抑制雷达和通信之间的相互干扰^[14]。

基于复用技术的雷达和通信一体化信号设计方法简单,易于实现,雷达和通信通常也可采用传统的处理方式,而且雷达和通信之间的互干扰也较小,但是这类方法的某些电磁资源难以实现共享,导致电磁资源利用率低,雷达和通信性能受限。

雷达通信一体化共用波形设计的基本思想是利用单一波形上的差异性改变产生通信信息,并由共用信号完成雷达探测功能,从而同时实现雷达和通信功能。雷达通信一体化共用波形设计方法可分为两类:一类是在传统的雷达波形上调制通信信息,实现通信信息传输功能的雷达共用波形;另一类是直接利用通信波形或对其进行一定的改动,实现雷达功能的通信共用波形。

在雷达共用波形设计方面,Mealey 等研究了利用地面导弹测距雷达发射一组雷达脉冲,并根据脉冲组中不同位置处脉冲的有无表示不同的信息,其中,一组雷达脉冲只能表示 1 bit 的信息^[15]。Chen 等采用最小频移键控将通信数据调制到线性调频信号上,从而实现雷达和通信波形的一体化^[16]。Wang 等将雷达的一个发射脉冲划分成多个子脉冲,其中每个子脉冲为一个单频信号,利用子脉冲间不同的频率排列组合来表征不同的通信信息,从而

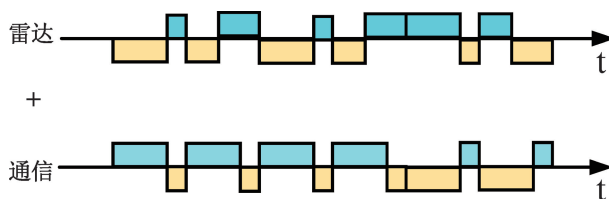


图 4 码分复用雷达通信一体化示意图

同时实现雷达探测与通信信息传输^[17]。Eedara 等通过对 MIMO 雷达波形进行 PSK 调制实现通信功能^[18]。Zhang 等基于循环编码阵对线性调频信号的相位进行通信信息调制,实现在雷达信号上携带通信信息^[19]。采用雷达共用波形设计方法,可有效提升电磁资源的利用率,但是通信的数据率较低,雷达功能会对通信的信息解调造成干扰,需要设计新的解调方式,而且所调制的通信信息也会对雷达造成干扰,降低雷达的性能。

在通信共用波形设计方面,Zhou 等通过在传统相位调制的通信信号上引入微小的相位扰动来改善该信号的雷达距离脉压旁瓣性能,从而使所设计的波形能够同时满足雷达与通信功能的需求^[20]。Zhang 等对基于恒模 OFDM 波形的权系数进行设计,达到调制雷达和通信性能的作用^[21]。Donnet 等将多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术与 OFDM 技术相结合,实现雷达和通信波形的一体化^[22]。Sturm 等提出了基于 OFDM 雷达通信一体化波形的符号域距离和速度联合估计算法^[23]。Shi 等通过对 OFDM 雷达通信一体化波形上的功率进行最优分配,实现探测和通信两种功能,并降低了一体化波形的被截获概率^[24]。Dokhanchi 等在车载雷达通信一体化场景下,提出了基于相位调制连续波和 OFDM 雷达通信一体化波形的波达方向与多普勒估计方法^[25]。在基于 OFDM 实现雷达通信一体化方面,Liu 等提出了自适应的雷达通信一体化波形设计方法,提升了雷达的检测性能和通信的数据率^[26]。Liu 等提出了基于信息论的 OFDM 雷达通信一体化波形设计方法,提升了雷达目标的分类性能和通信信道容量^[27]。Liu 等提出了稳健的 OFDM 雷达通信一体化波形设计方法,增强了 OFDM 雷达通信一体化信号对目标和通信信道散射特性误差的鲁棒性^[28]。Liu 等提出了多目标优化的 OFDM 雷达通信一体化波形设计方法,提高了雷达的参数估计精度和通信信道容量^[29]。此外,Liu 等研究了 MIMO-OFDM 雷达通信一体化系统架构,并在该系统架构的基础上,提出了距离和角度联合估计算法^[30-32]。刘永军等提出了基于 OFDM 雷达通信一体化波形的超分辨率距离和速度估计方法^[33]。为了降低运算复杂度,Liu 等利用 OFDM 雷达通信一体化信号在距离和速度维的旋转不变特性,实现对距离和速度的快速超分辨率估计^[34]。刘永军等提出通信信息预调制的方法,提升了 OFDM 雷达通信一体化波形的模糊函数特性,以

及相参积累性能^[35, 36]。采用通信共用波形设计方法,能够使电磁资源得到高效利用,通信数据率也较高,而且一般可采用传统的通信解调方式,然而,与传统通信相比,通信数据率一般会有所下降,而且所调制的通信信息会对雷达造成干扰,降低雷达的性能。

2.2 雷达干扰一体化波形设计与处理现状

在雷达干扰一体化波形设计和处理方面,国内外公开发表的研究相对较少,其大致可分为两类:一类是基于传统干扰波形的方法;一类是基于传统雷达波形的设计方法。基于传统干扰波形的方法通常直接利用干扰波形或者对干扰波形进行一定的改进以满足雷达探测的需求。唐晓东提出了基于噪声干扰波形的P波段雷达干扰一体化系统概念^[37]。朱峰等通过卷积的方式,设计出类噪声波形以同时满足雷达探测和干扰的需求^[38]。石林等研究了噪声调频干扰波形的雷达探测性能,并通过试验验证了该波形的同时多目标探测与干扰性能^[39]。基于传统雷达波形的设计方法通常对雷达波形进行一定的改进以满足干扰的要求。Zhang等对雷达中经典的线性调频信号进行噪声调制使其同时具有较好的干扰和探测性能^[40]。杨丹丹等将噪声波形和线性复合频率调制波形相结合设计出可同时满足雷达探测和干扰需求的一体化波形^[41]。温帅等通过对雷达发射脉冲进行随机调频以实现干扰功能,并提出迭代加权最小二乘方法实现目标探测功能^[42]。

由以上分析可以看出,多功能一体化波形设计和信息获取局限于利用传统的雷达、通信、干扰等波形,或者对它们进行改进以满足多功能需求,但是所设计的多功能一体化波形同时实现的功能种类有限。此外,针对所设计的多功能一体化波形,获取不同功能信息的手段局限于传统的处理方式,未能从接收信号中完全挖掘出不同功能的信息,而且未能充分利用不同功能之间信息共享的优势,促使不同功能的性能相互增强。另外,分布式系统具有更高的设计自由度、抗干扰性能、信息获取能力,但其在多功能一体化波形设计与信息获取方面的研究还未见报道。为了对电磁空间进行充分感知、控制与利用,上述问题亟待解决。

3 分布式多功能一体化波形设计与信息获取关键科学问题

为了设计出分布式多功能一体化波形并从复杂电磁环境中精确获取所需信息,需要解决分布式多

功能一体化互干扰这一关键科学问题。

分布式多功能一体化互干扰问题体现在三个方面:一是分布式多功能一体化波形设计;二是分布式多功能一体化信息获取;三是分布式相参栅瓣和高旁瓣。

在分布式多功能一体化波形设计方面,分布式多功能一体化系统需要通过发射单一波形(分布式多功能一体化波形)以同时兼顾雷达、通信和干扰性能需求。然而,雷达、通信和干扰对发射波形的要求各不相同。雷达通常要求发射波形尽量保持不变,以便在接收端获取相干积累增益,提高接收信噪比;通信要求发射波形进行差异性的改变,从而携带尽量多的通信信息;欺骗式干扰要求发射波形与被干扰目标所发射的波形具有相似性,遮盖性干扰要求发射波形具有类噪声特性,以遮盖或淹没有用信号。此外,雷达波形通常是脉冲波形;通信通常为连续波形;干扰一般需要进行连续干扰。这些相互对立的要求,造成在分布式多功能一体化波形设计中,雷达、通信、干扰等功能之间的相互制约,同时也增加了分布式多功能一体化波形设计难度。

在分布式多功能一体化信息获取方面,由于所发射的多功能一体化波形已经不是传统的雷达、通信和/或干扰波形,传统的雷达、通信和/或干扰处理方式已经不再适用。此外,在接收到信号中,包含有雷达、通信、干扰等不同功能所需信息,这些信息相互交织在一起,难以从某一维度对其进行有效分离,如果不能对不同功能信息进行有效的分离,必将导致雷达、通信、干扰等功能之间的互干扰,使得不同功能的性能下降。

在分布式相参栅瓣和高旁瓣方面,由于分布式多功能一体化系统的天线阵列是由多个小孔径的天线阵列(子阵)构成,这些小孔径阵列分散在空间的不同位置,且子阵间的间距通常远大于半波长。子阵间的稀疏分布,将导致分布式相参时空栅瓣和高旁瓣的出现,发射能量难以有效聚集,造成发射能量损失。此外,由于空间栅瓣和高旁瓣的存在,在接收端源自不同空间角度的雷达、通信、干扰等功能所需信息将交织在一起,造成不同功能信息之间的相互干扰,导致不同功能性能下降。

通过以上分析可知,如何解决分布式多功能一体化互干扰是有待解决的关键科学问题。

4 分布式多功能一体化波形设计与信息获取研究展望与建议

由以上分析可以看出,为了能够有效的对电磁

空间进行感知、控制与利用,分布式多功能一体化波形设计和信息获取仍然面临着一些挑战。主要包括以下四个方面。

4.1 分布式多功能一体化波形设计

分布式多功能一体化波形需要同时满足雷达、通信、干扰等不同功能的需求,而这些功能对发射波形的需求各不相同,此外,在不同的应用场景下,不同功能对波形的需求也会发生改变,这对分布式多功能一体化波形设计提出了极大挑战^[43]。为了解决该问题,可在系统各功能性能需求的约束下,最小化分布式多功能一体化波形所占用的电磁资源^[44]。基于此思路,首先,对分布式多功能一体化波形进行参数化建模,对所占用的电磁资源进行参数化表征;其次,根据建立的分布式多功能一体化波形数学模型,确定不同功能性能与电磁资源之间的映射关系;然后,根据不同应用场景和性能需求确定分布式多功能一体化波形中的参数约束;最后,通过最小化所占用的电磁资源,优化设计分布式多功能一体化波形中的参数,从而设计出分布式多功能一体化波形。

4.2 广域分布式协同解模糊

分布式多功能一体化系统的一个显著特征是不同子阵分布在空间不同位置,对于广域分布式系统而言,不同子阵间的间距远大于半波长,在进行相参处理时,会造成空间模糊,导致栅瓣和高旁瓣的出现,降低系统性能^[45]。为解决该问题,需要打破空间模糊特性。为此,可对子阵内的阵元位置和子阵间的间距进行联合优化设计,通过非规则的阵元间和子阵间的间距打破空间模糊。此外,可在空域设计自由度的基础上,联合时域设计自由度,即对发射波形和阵元位置进行联合优化设计,打破空间模糊,抑制栅瓣和高旁瓣,使发射能量得到高效利用。

4.3 分布式多功能一体化处理

在接收端所接收到的信号中,不同功能所需信息相互交织在一起,难以从单一维度对其进行有效的分离,如果不能对不同的功能信息进行有效的分离,不同功能之间将导致相互干扰,造成系统性能下降。在低维空间中,不同功能所需信息之间的差异性较小,难以进行有效区分。为此,可充分利用时间、空间、频率等多维自由度,在高维空间中,突出不同功能所需信息之间的差异性,然后,利用高维正交投影或者斜投影的方式^[46],从相互交织耦合的信息中,分离出不同功能信息。

4.4 分布式多功能一体化综合效能评估

分布式多功能一体化系统可实现雷达、通信、干

扰等多种功能,而不同功能有不同的评价指标和方法,其中,多数指标具有不同的物理意义、尺度和量纲,难以对分布式多功能一体化系统进行严格的优劣(非零即一)划分,即对其难以用简单的好与不好进行评价。此外,由于评价等级之间的关系是模糊的,没有绝对明确的界限,因此,具有模糊性。模糊数学是研究和处理模糊性现象的一种数学理论和方法,是一种处理不确定性和不精确性问题的有效方法^[47]。为此,可从分布式多功能一体化系统效能评估本身所具有的不确定性和模糊性入手,利用模糊数学理论,以及模糊关系合成原理,将各功能的不同评价指标进行统一量化,最后通过模糊运算实现对分布式多功能一体化系统的模糊综合评价。

参 考 文 献

- [1] Zhang A, Rahman ML, Huang X, et al. Perceptive mobile network: cellular networks with radio vision via joint communication and radar sensing. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021;1—11.
- [2] Luong NC, Lu X, Hoang DT, et al. Radio resource management in joint radar and communication: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021;1—35.
- [3] Akan OB, Arik M. Internet of radars: sensing versus sending with joint radar-communications. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(9): 13—19.
- [4] Ma D, Shlezinger N, Huang T, et al. Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: combining two key automotive technologies. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2020, 37(4): 85—97.
- [5] Feng ZY, Fang ZX, Wei ZQ, et al. Joint radar and communication: a survey. *China Communications*, 2020, 17(1):1—27.
- [6] Cager R, Laflame D, Parode L. Orbiter Ku-band integrated radar and communications subsystem. *IEEE Transactions on Communications*, 1978, 26(11): 1604—1619.
- [7] Han L, Wu K. 24-GHz integrated radio and radar system capable of time-agile wireless communication and sensing. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(3): 619—631.
- [8] Boriky JM, Moghaddasi J, Wu K. Multifunctional transceiver for future radar sensing and radio communicating data-fusion platform. *IEEE Access*, 2016, 4: 818—838.

- [9] Nusenu SY, Shao HZ, Pan Y, et al. Dual-function radar-communication system design via sidelobe manipulation based on FDA butler matrix. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(3): 452–456.
- [10] Hassanien A, Amin MG, Zhang YD, et al. Signaling strategies for dual-function radar communications: an overview. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 36–45.
- [11] Hassanien A, Amin MG, Zhang YD, et al. Dual-function radar-communications: information embedding using sidelobe control and waveform diversity. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(8): 2168–2181.
- [12] Winkler V, Detlefsen J. Automotive 24 GHz pulse radar extended by a DQPSK communication channel. *Proceedings of the 4th European Radar Conference, Munich Germany, 2007*: 138–141.
- [13] Surender SC, Narayanan RM, Das CR. Performance analysis of communications & radar coexistence in a covert UWB OSA system. *Global Telecommunications Conference, Miami, 2010*: 1–5.
- [14] Xu SJ, Chen Y, Zhang P. Integrated radar and communication based on DS-UWB. *UWBUSIS 2006–2006 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2006*: 142–144.
- [15] Mealey RM. A method for calculating error probabilities in a radar communication system. *IEEE Transaction on Space Electronics and Telemetry*, 1963, 9(2): 37–42.
- [16] Chen X, Wang X, Xu S, et al. A novel radar waveform compatible with communication. *ICCP2011 Proceedings, 2011*: 177–181.
- [17] Wang X, Xu J. Co-design of joint radar and communications systems utilizing frequency hopping code diversity. *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), Boston; IEEE, 2019*: 1–6.
- [18] Eedara IP, Hassanien A, Amin MG, et al. Ambiguity function analysis for dual-function radar communications using PSK signaling. *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2018*: 900–904.
- [19] Zhang Q, Zhou Y, Zhang L, et al. Circulating code array for a dual-function radar-communications system. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(2): 786–798.
- [20] Zhou S, Liang X, Yu Y, et al. Joint radar-communications co-use waveform design using optimized phase perturbation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1227–1240.
- [21] Zhang Q, Zhou Y, Zhang L, et al. Waveform design for a dual-function radar-communication system based on CE-OFDM-PM signal. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(4): 566–572.
- [22] Donnet BJ, Longstaff ID. Combining MIMO radar with OFDM communications. *Proceedings of the 3rd European Radar Conference, 2006*: 37–40.
- [23] Sturm C, Wiesbeck W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236–1259.
- [24] Shi C, Wang F, Sellathurai M, et al. Low probability of intercept based optimal power allocation scheme for an integrated multistatic radar and communication system. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(1): 983–994.
- [25] Dokhanchi SH, Mysore BS, Mishra KV, et al. A mmwave automotive joint radar-communications system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1241–1260.
- [26] Liu YJ, Liao GS, Xu JW, et al. Transmit power adaptation for OFDM integrated radar and communication systems. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, 11(3): 1–17.
- [27] Liu YJ, Liao GS, Yang ZW, et al. Adaptive OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(10): 2174–2177.
- [28] Liu YJ, Liao GS, Yang ZW. Robust OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory. *Signal Processing*, 2019, 162: 317–329.
- [29] Liu YJ, Liao GS, Yang ZW, et al. Multiobjective optimal waveform design for OFDM integrated radar and communication systems. *Signal Processing*, 2017, 141: 331–342.
- [30] Liu YJ, Liao GS, Yang ZW, et al. Joint range and angle estimation for an integrated system combining MIMO radar with OFDM communication. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2019, 30(2): 661–687.
- [31] Liu YJ, Liao GS, Yang ZW, et al. Design of integrated radar and communication system based on MIMO-OFDM waveform. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(4): 669–680.
- [32] Liu YJ, Liao GS, Yang ZW. Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems. *2016 CIE International Conference on Radar, 2016*: 1–4.

- [33] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种超分辨 OFDM 雷达通信一体化设计方法. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 425—433.
- [34] Liu YJ, Liao GS, Chen YF, et al. Super-resolution range and velocity estimations with OFDM integrated radar and communications waveform. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 11659—11672.
- [35] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. 基于 OFDM 的雷达通信一体化波形模糊函数分析. 系统工程与电子技术, 2016, 38(9): 2008—2018.
- [36] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. OFDM 雷达通信一体化波形相参积累研究. 信号处理, 2017, 33(3): 253—259.
- [37] 唐晓东. 干扰与雷达一体化系统及信号共享. 现代雷达, 2012, 34(7): 5—7, 11.
- [38] 朱峰, 阳洪灿. 对雷达和干扰机一体化信号的干扰研究. 舰船电子对抗, 2017, 40(3): 69—72.
- [39] 石林, 王宏, 周宇. 一种基于调频噪声干扰信号的协同探测定位技术. 舰船电子对抗, 2019, 42(2): 20—23.
- [40] Zhang XX, Chen TQ. Noise-linear frequency modulation shared waveform for integrated radar and jammer system. ICCAS 2007—International Conference on Communications, Circuits and Systems 2007, 2008: 644—648.
- [41] 杨丹丹. 雷达干扰一体化设计的共享信号研究. 无锡: 江南大学, 2011.
- [42] 温帅. 脉内随机跳频探测干扰复用信号研究. 北京: 中国舰船研究院, 2018.
- [43] Li J, Petre S. MIMO radar signal processing. New York: Wiley, 2009.
- [44] 何子述, 李军, 刘红明, 等. MIMO 雷达. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [45] Van Trees HL. Optimum array processing. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [46] 张贤达. 矩阵分析与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [47] 阎少宏. 模糊数学基础及应用. 北京: 化学工业出版社, 2018.

Distributed Integrated Waveform Design and Information Acquisition in Electromagnetic Space

Liu Yongjun Liao Guisheng* Li Haichuan Chen Yufeng Jiang Mengchao

National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071

Abstract Distributed multifunctional integrated waveform design and information acquisition is an important way to cognize the electromagnetic environment and exploit the resource. It is also the key to mastering the initiative in the electromagnetic space and has important strategic significance in social and economic development and national defense security. At present, progress has been made in multifunctional integrated waveform design and information acquisition in the domestic and overseas. However, these methods have low utilization efficiency in electromagnetic resources, poor ability in mutual interference suppression, limited system performance, and so on. To solve these problems, both the advantages and disadvantages of the existing integrated waveform design and processing methods are analyzed. Then, the key scientific problem of the distributed multifunctional integrated system is explored. Finally, the challenges of the distributed multifunctional integrated system are discussed and the corresponding suggestions are given.

Keywords electromagnetic space; distributed; multifunction; integrated waveform; information acquisition

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding author, E-mail: liaogs@xidian.edu.cn