

雷达通信一体化研究现状与发展趋势

肖博 霍凯* 刘永祥

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘要: 雷达通信一体化通过一套共用的硬件设备实现雷达探测与通信传输, 相比于传统单一的雷达或者通信设备, 更易集成化、小型化和高效利用频谱。该文系统地介绍了雷达通信一体化的原理与特点, 指出了一体化研究中亟需解决的问题, 从典型的基于线性调频(LFM)的雷达通信一体化信号出发, 全面梳理了国内外针对雷达通信一体化的相关研究, 着重归纳了正交频分复用(OFDM)与多入多出(MIMO)技术在雷达通信一体化波形设计、信号处理、一体化系统设计等几个重点方向的研究进展, 并分析了雷达通信一体化未来的可能发展趋势及其在军事领域和民用智能交通领域的重要应用前景。

关键词: 雷达通信一体化; 正交频分复用; 多入多出; 波形设计

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0739-12

DOI: 10.11999/JEIT180515

Development and Prospect of Radar and Communication Integration

XIAO Bo HUO Kai LIU Yongxiang

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

Abstract: Radar communication integration realizes radar detection and communication transmission via shared hardware equipment, the integration is easier to be integrated, miniaturized and utilize effectively spectrum compared with traditional individual radar and communication devices. This paper systematically introduces the principles and characteristics of radar communication integration, presents the urgent problems need to be solved within integration investigation, starting from typical radar communication integration signal based on Linear Frequency Modulation (LFM), this paper reviews comprehensively the related research on radar communication integration and primarily summarizes the research developments of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Multi-Input Multi-Output (MIMO) techniques in critical directions including waveform design, signal processing and integrated system conception. Finally, the potential developing trend and significant application scenario in military and civilian intelligent transportation field of radar communication integration is analyzed.

Key words: Radar communication integration; Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Multi-Input Multi-Output (MIMO); Waveform design

1 引言

雷达传感和无线通信作为现代无线电技术中最常见也是最为重要的两个应用, 是按照不同的功能和频段独立进行设计开发的, 其中, 雷达主要用于目标的探测和识别, 而通信的目的是实现设备间的信息传输, 但随着无线设备数量的指数增加和高速数据传输要求更高的带宽需求, 导致了电磁频谱的过度拥挤; 在军事应用场合, 面对日益增多的武器

平台威胁和复杂电磁环境, 单一电子装备之间的对抗已不能满足未来战场作战形式多样化的需求, 而雷达通信一体化正是解决以上问题的有效途径。

雷达与通信在功能和工作频段上存在诸多差异, 但在硬件构造与工作原理上也存在相似性, 随着雷达与通信技术的不断发展, 雷达与通信在工作频段与系统组成上的差异在逐渐减小, 用于通信传输的工作频段与雷达使用频率存在部分重合, 使得雷达与通信一体化成为可能。特别地, 雷达与通信一体化具备简化结构, 降低成本, 缓解雷达与通信间的电磁干扰的优势, 在减小雷达散射截面积的同时可以提高系统频谱效率, 此外, 同时执行雷达和通信功能收发联合设计的雷达通信网络, 可显著提高整个系统的工作效率, 因此针对雷达通信一体化

收稿日期: 2018-05-25; 改回日期: 2018-11-23; 网络出版: 2018-12-05

*通信作者: 霍凯 huokai2001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501481)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61501481)

的研究引起了军事领域广泛的关注。其中,美、德、英、法、荷兰相继展开了对雷达通信一体化的深入探讨与研究,并针对雷达通信一体化的实现提出了相应理论与技术方法。

本文全面总结了雷达通信一体化的研究现状与进展,梳理了相关的理论成果与技术方法,将从雷达通信一体化的概念与特点、波形设计、信号处理、一体化系统研究等方面进行详细阐述,并对雷达通信一体化未来的发展趋势展开讨论。

2 雷达通信一体化概念及特点

雷达通信一体化就是在统一共用的硬件平台上实现雷达功能与通信功能,在目标探测与跟踪的同时实现无线设备间的信息数据传输。雷达获取的目标信息需要采用通信系统进行传输,基于架构的高度相似性,可以实现从天线到接收部分的共享,而只需关注信号的处理与生成,随着信号处理方法的高性能与多样化发展,更为雷达与通信一体化提供了可能。目前对于雷达通信一体化研究方法按照时域、空域和频域大致可以分为时间共享、子波束共享与一体化信号共享3类。

时间共享是实现雷达通信一体化的最简单方案,只需加载一个转换开关就可实现天线、发射端与接收端的共用;子波束方法通过设计不同子阵列组合配置方法或孔径灵活实现不同的系统功能。与前述两种方法不同,一体化信号共享方法中,雷达和通信部分在时域或空域上无明显分离,通信数据以叠加或调制的方式加载于雷达信号,实现频域上的雷达通信一体化。目前对于一体化信号共享方法大致可以分为3类:

(1)频分多载波信号:考虑到单载波Chirp信号的数据传输速率较低,采用不同载频的Chirp多载波信号组以充分利用雷达信道,Chirp信号彼此之间的准正交性可以提高信道利用率和数据传输速率^[4]。其信号可以表示为

$$s_k(t) = \exp(j2\pi f_k t + j\pi \mu t^2) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中, $f_k = f_0 + k\Delta f$ 为第 k 个Chirp子载波的载波频率, $\text{rect}(t/T)$ 为矩形窗函数。

(2)扩频信号:采用频率远高于有效信号的伪随机序列调制有效信号,作为原始通信数据,将有效信号的频谱扩展至高频带从而增加信道容量。直接序列扩频与跳频扩频是最为常见的两类扩频方法。在多样的扩频码中,如Frank码、PN码与Op-permann码的多相码具有良好的伪随机性与非周期

自相关特性,可以较好地满足雷达通信一体化需求实际中需根据需求选择扩频码保证雷达探测与通信性能。

(3)正交频分复用信号(OFDM):最早应用于无线通信领域,因其测距精度高、实现简单、抗干扰能力强,也受到了雷达领域的广泛关注。采用OFDM的一体化信号具备较好的测距与测速精度,可实现高效的数据传输,其可以表示为

$$s_{\text{OFDM}}(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} d(mN+k) \cdot \exp(j2\pi f_k t) \text{rect}\left(\frac{t-mT}{T}\right) \quad (2)$$

其中, $d(mN+k)$ 为第 m 个OFDM符号在第 k 个子载波的加载数据。

理论上来说,雷达通信一体化具有相互增强的潜力。在军事应用中,雷达的高功率放大器和定向辐射增加了最大有效通信范围并提高了信息传输安全性;此外,通信数据调制在脉冲或相干处理间隔(CPI)之间引入发射波形的差异,可为雷达功能提供更高的自由度。因此雷达通信一体化信号具有以下特点:

(1)多参数灵活设计:雷达通信一体化结合了雷达信号特性与通信传输特性,在设计的一体化信号中可调参数既包括了脉冲形式、脉宽、脉冲重复频率等雷达典型特征参数,又包含了通信独有的功率分配、数据加载、编码调制等传输参数。在设计雷达通信一体化信号时,可根据实际需要,灵活地对一体化信号中涉及参数进行选择与调整,在实现一体化信号高效的频谱资源配置与管理的同时,设计具有低旁瓣特性、高多普勒容限和强干扰抑制能力的一体化波形。

(2)高分辨特性:雷达系统的距离(或延迟)分辨率与发射信号带宽成反比,而雷达通信一体化信号中利用LFM以及扩频的方法可实现一体化信号的大带宽需求,获得较好的距离分辨率特性,并且采用OFDM技术的雷达通信一体化信号中各子载波具有良好的正交性,同时其子载波的数量与频率间隔可灵活调整,理想情况可以得到“图钉形”的模糊函数,改善距离-多普勒的模糊性,可满足对通信传输效率较高要求下的动目标检测与高分辨成像。

(3)通信技术的优势利用:OFDM技术在通信中可有效抵抗多径衰落,易于同步与均衡,实现高效的信息传输与频带利用,在采用OFDM技术的新体制雷达中,结合相位编码方案所设计的发送波形也具有更好的低旁瓣特性、高多普勒容限和反截获

能力,同时可针对系统设计需求灵活调整参数,以满足目标探测的距离与速度分辨率要求。受通信中MIMO(Multi-Input Multi-Output)技术启发的MIMO雷达在收/发端均采用多阵元天线,发射端采用波形分集,增大信息传输容量的同时,形成对目标的多个观测通道,有效提高雷达信息处理的自由度,从而改善系统观测性能。

雷达通信一体化信号考虑雷达与通信参数的波形设计,在进行雷达目标探测的同时实现通信数据的高效传输,并且具有较高的距离与多普勒分辨能力,引入无线通信技术在提高雷达检测性能的同时改善了频谱利用效率,为雷达通信一体化的研究带来了新发展与新突破,但若一体化信号设计不当,将影响后续接收信号的处理,导致雷达与通信性能下降。

现有的雷达通信一体化信号存在以下问题:

(1)非线性失真:在实现雷达通信一体化信号的设计方法中,扩频或OFDM技术都存在非恒定包络的问题,而雷达系统的功率放大器为动态范围较小的非线性放大器,一般为饱和放大,发射效率高,当设计的一体化OFDM信号通过功率放大器时会产生一定程度的非线性失真,导致雷达发射机效率的降低,OFDM的峰值均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)过高,使得一体化信号经过非线性区域时频谱出现畸变,导致雷达与通信性能下降。为减小非线性失真带来的影响,还需要设计动态范围更大的线性放大器,但在一定程度上增加了系统设计复杂度。

(2)传输速率较低:通信中的OFDM波形一般是连续的,而脉冲雷达不连续。若雷达通信一体化系统采用连续OFDM波形,发射和接收天线需要很好地分离,这在工程实践中难以实现,特别是在收发天线彼此接近的情况下。然而,使用脉冲OFDM波形时,因雷达占空比一般为10%,对于通信而言会降低数据速率。在通信中利用MIMO技术使用发射天线的空间维数,可有效提高数据速率以及信噪比。在雷达应用中,MIMO技术可以增大虚拟孔径,同时形成多波束。

(3)相互间的干扰:加载通信信号会使得一体化信号频谱拓宽,超过雷达的原始带宽,但原始带宽之外的频谱可能已经被分发给其他用户,同时随着无线电子设备的指数增长与电磁环境日益复杂,会造成严重的带外干扰,导致通信和检测性能降低。因此必须采取相应的方法限制一体化信号频谱,以利用现有的自适应滤波等方法来处理带外干扰。

3 雷达通信一体化研究现状

美国海军研究实验室针对雷达通信一体化的研

究起步最早,在1999年就开始了一体化波形的相关研究。美国Raytheon公司与Northrop Grumman公司于2005年展开了将有源相控阵雷达(Active Electronically Scanned Array, AESA)应用于宽带通信数据链的研究;2006年Northrop Grumman公司完成了相控阵雷达传输通信数据的一体化系统验证;并在2007年实现了AESA雷达高速率通信的功能。

OFDM与MIMO技术因在信号设计与处理过程中具备独特的优势^[2],自1998年和2004年先后引入雷达系统至今,美、德、英、法、荷兰等多个国家的大学或研究机构均开展了相应的雷达通信一体化相关技术研究,内容涉及波形设计、信号处理、雷达通信一体化系统等各个方面,而国内在这方面的研究仍处于起步阶段,电子科技大学、清华大学、国防科技大学、空军预警学院等单位也针对雷达通信一体化进行了积极探索,但相关文献发表较少。

下面从波形设计、信号处理、系统设计3个方面分别介绍雷达通信一体化研究现状。

3.1 波形设计

雷达通信一体化波形设计研究大致经历了3个阶段,本节将分别从LFM一体化波形设计、OFDM一体化波形设计与MIMO一体化波形设计进行阐述。

3.1.1 LFM一体化波形设计

Shannon等人^[3]分析了波形设计需要考虑的因素,包括波形种类、波形指标、带宽考虑、波形分集、模糊函数等,在利用LFM信号和扩频信号进行一体化波形设计方面,大部分文献研究了采用传统雷达波形结合常用通信技术,从模糊函数、相关函数、正交性等角度出发,实现雷达通信一体化的发送波形设计。

为获得具有较好模糊函数性能的一体化波形,以实现较高的距离分辨率与速度分辨率,Lin等人^[4]通过脉冲位置调制加载通信数据至时跳超宽带雷达脉冲上,实现了具有“图钉形”模糊函数的雷达通信波形;Liu等人^[5]采用MSK调制的LFM设计了一体化波形,其模糊函数相比于传统的LFM信号具有更好的测距和测速精度;Li^[6]基于OFDM的思想提出了正交频分的LFM(OFD-LFM)信号,实现单个LFM脉冲的多通信码元加载,提高了数据传输速率,其模糊函数性能相比较于单个码元的OFD-LFM波形几乎没有恶化;杨瑞娟等人^[7]利用频分准正交多载波Chirp信号设计了一体化波形,并研究了带宽重叠率对于模糊函数的影响;Cenk等人^[8]则研究了连续相位编码与多相调频雷达波形生成的一体化波形的模糊函数与功率谱。

针对一体化波形的相关函数,文献[9–11]结合减相位角BPSK和基于伪随机噪声序列的信道化扩频离散相位,利用IMOP(Intentional Modulation On Pulses)方法将调制信号与M序列的LFM雷达脉冲结合,进一步利用伪随机噪声的M序列对获得了高自相关与低互相关性能的一体化信号;Li等人^[12]在调制后的多载波相位编码脉冲的基础上引入完全互补码,得到了具有良好相关函数性能的一体化信号。

而对于保持一体化波形正交性,以减少带内互相干扰或带外干扰方面,文献[13]基于正负调频率来保证LFM信号的近似正交,结合 $\pi/4$ 的QPSK调制实现雷达通信信号一体化;Zhang等人^[14,15]基于线性调频和连续相位调制(LFM-CPM)设计了由3部分组成的改进一体化波形,通过修改通信符号映射码本抑制了雷达系统的带外干扰;Xu等人^[16]为减少雷达通信一体化信号的互相干扰,采用直接序列扩频(DSSS)技术发射两种不同的PN码并采用正交载波调制保证雷达信号与通信信号的正交性。

上述大部分研究都是针对传统雷达波形采用调相方式的雷达通信一体化实现,存在难以保证一体化信号正交性,参数调整不灵活,通信传输速率不高的问题。采用OFDM技术的雷达通信一体化波形具有更好的低旁瓣特性、高多普勒容限和信息传输能力。受OFDM技术广泛应用于通信领域的启发,大量学者也针对OFDM在雷达领域的结合进行了积极探索。

3.1.2 OFDM一体化波形设计

首先,从OFDM一体化波形的模糊函数角度考虑,代尔夫特理工大学^[17]发现在某种程度上,OFDM雷达相较于传统LFM雷达的距离-多普勒模糊性更好,同时还可以保留性能特征;Cheng等人^[18]基于直接序列扩频和Chirp信号的恒包络特点,设计了直接序列扩频编码OFDM的Chirp信号,并对比了不同长度Walsh-Hadamard编码序列下一体化波形的自相关函数与模糊函数性能。Tian等人^[19]利用通信数据控制时间移位的循环移位M序列,将其加载到相位编码OFDM(PC-OFDM)信号后形成一体化波形的测距性能与误码率性能;Jin等人^[20]不同于传统的互相关方法设计波形,而是采用了OFDM-IDM(交织多分复用)的方法实现多用户接入,接收端采用独立于发送数据的基于调制符号的方法实现峰值旁瓣更低的模糊函数。

其次,对于OFDM一体化波形的PAPR, PMEPR或PSLR也出现了相应的研究。Levanon^[21]在OFDM体制雷达中采用多频补偿相位编码(MCPC)波形,发现同时针对多个频率调整可以极大地降低

旁瓣水平;Wang等人^[22]在传统OFDM子载波信号中加载Chirp信号,与传统OFDM信号每个子载波采用相同频率相比,可以有效改善其峰均功率比(PAPR)性能;Li等人^[23]针对OFDM信号存在高峰均包络功率比(PMEPR)与低峰值旁瓣比(Peak to Side-Lobe Ratio, PSLR)的缺陷,提出了采用格雷码编码降低PMEPR,同时针对通信数据类型设计了最优循环序列改善PSLR,证明了利用这两种方法得到了高PMEPR与高PSLR的一体化波形,同时其具有“图钉形”的模糊函数与较好的多目标检测能力。

上述研究都是针对一体化波形模糊函数与自相关函数的性能研究,但在特定的雷达通信一体化场合,对其模糊函数、自相关函数、PMEPR、PSLR、距离与多普勒分辨率都提出了更高的要求,而以上设计波形往往难以满足,因此如何优化波形调制方式,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成为OFDM一体化波形设计的重要内容。

针对OFDM一体化波形模糊函数的优化设计,Sebt等人^[24]为了得到“图钉形”的模糊函数,运用Least-Squares方法来合成OFDM编码信号的模糊函数,设计了迭代的相位分配算法选择合适的编码来合成OFDM信号,以减小模糊函数的旁瓣。文献^[25]研究了杂波背景下目标检测的OFDM雷达波形自适应设计,提出了一种波形优化算法自适应设计下一时刻的发射波形,以改善其模糊函数的测距与测速精度。Jiang等人^[26]考虑实际的调制参数如保护间隔、导频符号等对所设计OFDM雷达通信一体化波形的模糊函数进行了研究,提出了在不同PSL条件和误码率要求下保护间隔的选取方法。

在改善OFDM一体化波形的PMEPR以及自相关函数性能方面,Sebt等人^[27]提出了MCPC连续波和脉冲串信号设计的一种新方法,该方法中所有载频采用相同序列调制,其相位和幅度进行加权来减小PMEPR和旁瓣高度。John等人^[28,29]提出了基于格雷码编码的MCPC序列优化算法,从而减小设计波形自相关函数的旁瓣水平。Mussa等人^[30]考虑OFDM信号存在PAPR过高的缺点,结合LFM信号恒定包络的特点,提出了恒定包络的OFDM信号波形,从而改善OFDM波形的PAPR使其具有更好的模糊函数性能。

3.1.3 MIMO一体化波形设计

相比于常规体制雷达与相控阵雷达,MIMO雷达具有空间分集与波形分集的独特优势,在缓解衰落、提升分辨率以及抑制干扰等方面具有重大潜力。MIMO技术应用于通信系统,在提供分集增益

的同时可以极大地提高通信信道容量，因此针对MIMO新体制雷达与通信领域的融合交汇也获得了持续关注与研究。

对于实际的MIMO雷达通信一体化信号设计，在利用MIMO阵列波形分集的基础上，还需考虑MIMO雷达体制的波束形成、旁瓣水平和数据加载方式。文献[31]介绍了数字波束成形雷达与MIMO通信的联合一体化，其中MIMO天线阵列可以作为虚拟天线阵列波形的自适应生成，用于方向增强和干扰抑制。Wang等人[32]通过发射天线阵列上的空间频率编码来发射通信数据，利用子阵级波束形成技术，可实现MIMO雷达的广域探测和主瓣协同目标的定向通信；Hassanien等人[33]提出了4种MIMO雷达通信一体化工作模式，并针对不同信息加载方法的测距性能与误码率性能进行对比，文献[34]设计了基于PSK调制的跳频编码的正交MIMO一体化波形，文献[35]利用发射波束成形权值向量组，加载到MIMO雷达波形中实现定向雷达探测，通信信息映射到特定波束指向而实现雷达通信一体化；文献[36–38]利用MIMO雷达的波形分集特性，利用发射波束成形技术实现主瓣用于雷达探测，旁瓣用于定向通信的雷达通信一体化波形。

3.2 信号处理

在根据不同功能需求对一体化信号进行处理前，要保证接收一体化信号的同步以降低多普勒频偏和时延对雷达与通信性能造成的影响，在实际雷达通信一体化应用场景中，需要根据数据加载模式、脉冲压缩、干扰抑制、目标检测等需求对处理方法灵活选择，准确地提取出从发送端到接收端的通信数据，同时实现雷达目标探测与成像的功能。

3.2.1 同步处理

采用OFDM技术的一体化信号对频率偏移与时延等同步问题非常敏感，而符号定时的不同步以及接收信号的多普勒频移都会带来符号定时偏差(STO)或者载频偏差(CFO)，造成接收信号的相位失真，导致码间串扰(ISI)或者载波间串扰(ICI)，破坏OFDM子载波间的正交性，导致系统性能的下降，为保证OFDM雷达通信一体化系统性能，接收端需要采用同步技术估计消除STO或CFO带来的影响。主要方法有基于循环前缀的时域STO估计与CFO估计，以及利用相位旋转特性的频域STO估计方法与基于训练符号的频域CFO估计。

3.2.2 一体化信号通信处理

为实现雷达通信一体化的信息数据准确接收，需对一体化接收信号做相应的通信信号处理，以降低数据传输误码率。对于雷达通信一体化中加载的

通信数据处理方法而言，需要考虑信道衰落与码间或载波间串扰，可基于信道估计的信道均衡、最大似然比译码、最大比合并解调等方法，提高接收端输出信号信噪比以改善误码率性能。

针对一体化信号在传输过程中的信道估计问题，文献[29]中存在信道衰落与ICI的条件下，基于多普勒估计方法提出了信道均衡矩阵，对比了差分二进制相移键控与差分正交相移键控调制的MCPC序列接收的误码率性能；文献[39]通过优化预编码矩阵，采用局部滤波算法重构接收一体化信号的干扰信道矩阵，降低雷达信号对通信处理时的干扰，改善通信误码率性能；Huang等人[40]根据邻近天线差异及相关性建立了基于射线-杂波的稀疏信道模型，提出了稀疏自适应匹配追踪(SAMP)算法解决信道的稀疏恢复问题，改善解调数据的MSE性能。Tian等人[41]研究了M序列的相位编码OFDM一体化信号，通过权值加窗对接收数据进行FFT变换以及解调后得到解调数据，降低了峰值旁瓣并改善了信噪比；Shadhrack等人[42]利用扩频序列的方法，分析了基于BPSK的时间调制频分(TMFD)MIMO阵列的一体化信号处理，并推导出了误码率与接收机方向和距离的关系；Momin等人[43]提出了一种元启发式算法，用以实现雷达通信一体化接收信号的自相关与互相关的最小化，同时使得解调数据的均方相关值最小化。

3.2.3 一体化信号雷达处理

针对OFDM新体制雷达的一体化信号处理方法，现有文献研究了多普勒处理、脉冲压缩、干扰抑制等处理方法，以实现目标检测、测距测速、成像、数据传输等多种功能。就OFDM雷达通信一体化信号的多普勒处理而言，Yoke等人[44–47]主要针对所设计的OFDM一体化波形接收端处理时的杂波重构与分离，实现独立于发送端数据的时延-多普勒估计算法，以克服相关处理方法存在的缺陷；Tiger等人[48]利用OFDM一体化波形的多载波架构，设计了一种载波随机相位调制的多普勒补偿方法，消除OFDM一体化波形的多普勒模糊性；文献[49,50]分析了OFDM脉冲串信号的频率捷变特性和多普勒处理能力，指出当多普勒较小时，可选择一部分子载频进行多普勒处理，剩下的子载频用来实现频率捷变，他们还研究了OFDM脉冲串窄带和宽带情况下的多普勒处理能力[51]；刘永军等人[52]基于通信信息补偿，采用子空间投影方法实现对目标的距离与多普勒的超分辨估计；Tigrek等人[53]指出OFDM雷达可以同时进行距离和多普勒处理；Duan[54]提出了OFDM信号3种多普勒处理方法，更好地估

计目标的径向速度。

在OFDM雷达通信一体化信号的脉冲压缩研究方面, Mohseni等人^[55,56]针对OFDM相位编码信号的特点, 提出了一种新的脉冲压缩方法, 该方法基于FFT且等效于匹配滤波; Gabriel等人^[57]基于OFDM波形中的子载波相位和已知的相位编码序列, 在相位编码序列中加入了预设等价序列可以更好地实现脉冲压缩后的距离-多普勒成像; 顾陈等人^[58]研究了OFDM雷达的信号处理及目标检测方法, 与单载波调制雷达相比, 在测量高速目标时, OFDM雷达具有更优的脉冲压缩性能和更高的检测概率。

针对OFDM雷达通信一体化信号的干扰抑制方法中, 文献^[45-47]研究了多径多用户场景下的OFDM雷达通信一体化信号的应用扩展, 雷达动态范围因SIR(Signal-to-Interference Ratio)较小须考虑采用干扰抑制策略, 图1考虑了光线追踪算法多径信道模型, 仿真对比了图1(a)无干扰、图1(b)存在干扰与图1(c)采用光线追踪算法对干扰进行抑制情形下的多目标检测结果。与图1(a)中无干扰情形对比, 图1(c)因光线追踪算法提出了一种相位和频率偏移估计的SCA算法实现干扰信号的准确重构而从雷达信号中分离出干扰信号, 在干扰条件下成功实现了多目标的检测, 从而验证了光线追踪算法的有效性。文献^[59]考虑了远距天气雷达在OFDM干扰一

体化信号的性能衰减, 比较了相干与非相干雷达处理方法的性能差异, 采用陷波滤波器对1阶干扰消除的有效性; 文献^[60]研究了欺骗式干扰情况下OFDM-SAR的成像性能, 证明了随机子载频的OFDM编码信号优良的抗干扰性能。

结合MIMO技术的一体化发射端采用波形分集, 在提高信息传输速率和信道容量的同时, 可形成对目标的多个观测通道, 有效增加信号处理的自由度。但同时也存在从多条路径、多个通道进入的杂波与各种电子干扰, 在接收MIMO雷达通信一体化回波信号的过程中, 对于干扰的抑制能力直接决定着MIMO雷达通信一体化系统目标探测与通信接收性能的好坏。

在探索可行的MIMO雷达通信一体化信号处理方法之前, 文献^[61]研究了MIMO雷达杂波抑制方法和杂波信号分离方法, 研究了地面动目标显示(GMTI)情形下MIMO-SAR的干扰抑制技术, 其原理如图2所示, 图2(a)中通过接收端设置多个天线为正交波形分集的多收发通道, 采用DPCA和顺轨干涉的联合处理算法实现杂波消除与噪声抑制, 与图2(b)对比, 从图2(c)中可以看出采用文献^[61]方法有效消除了杂波与噪声, 从而利用双干涉处理方法可估计动目标横向速度, 在文献^[62,63]中考虑有杂波的MIMO雷达通信场景, 在通信速率与功率存

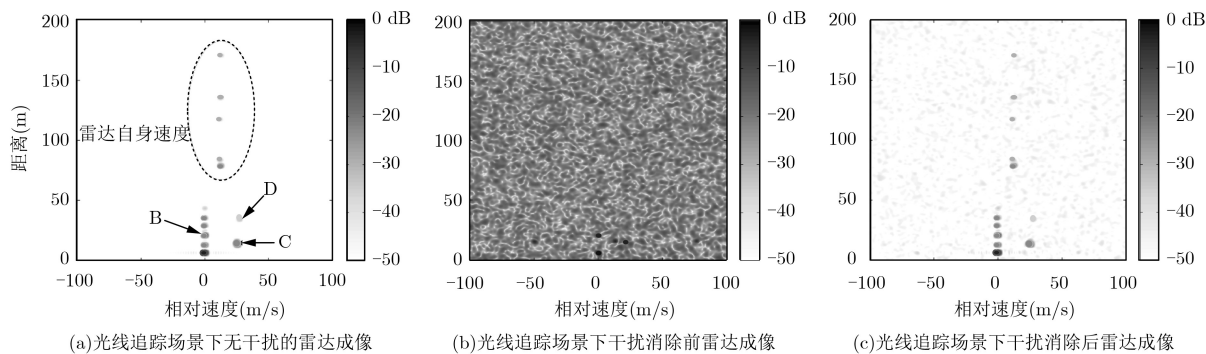


图1 光线追踪场景及其仿真结果

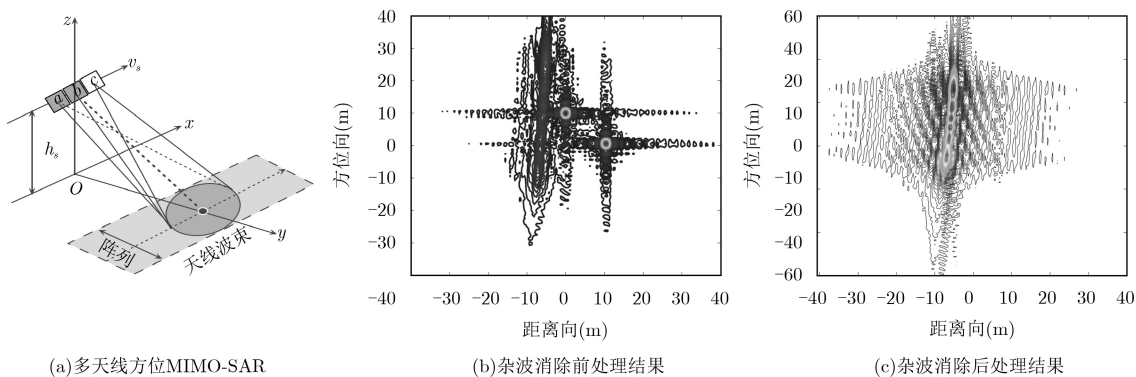


图2 MIMO-SAR雷达通信一体化的杂波消除应用仿真

在约束的条件下实现接收端SINR最大化，提出了2阶锥规划方法与半定规划方法，分别实现雷达与通信发送预编码的协方差矩阵的优化设计，从而实现杂波抑制以最大化SINR。

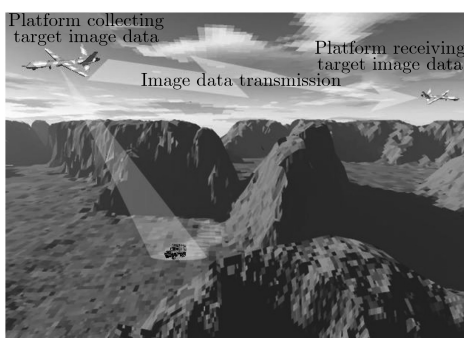
在对MIMO雷达通信一体化信号处理的研究中，Li等人^[64-68]对于MIMO雷达通信一体化波形的干扰抑制技术研究较为系统，其中文献^[66,67]研究了MIMO通信与MIMO-MC(Matrix Completion)雷达一体化条件下的SINR最大化问题，其中通信采用随机单位波形矩阵，雷达采用欠奈奎斯特采样矩阵，通过所设计的交替迭代优化算法实现了接收端信号的SINR最大化；文献^[68]基于稀疏感知的MIMO-MC雷达与MIMO通信的互干扰最小化原则，提出了MIMO-MC雷达采样策略与通信发送端协方差矩阵的联合优化方法，进一步减小有效干扰功率。Qian等人^[69]研究了MIMO雷达在杂波条件下与MIMO无线通信系统共存的情况，对雷达空时发射码、雷达空时接收滤波器和通信空时发射协方差矩阵的联合优化提出了一种最大化SINR的迭代方法。Liu等人^[70]利用MIMO雷达和下行MU-MISO通信共存的优化波束成形方法，分析了基站干扰情况下MIMO雷达通信一体化的探测概率，揭示了雷达与通信性能之间的折中关系。文献^[71]设计了一种基于MIMO雷达与改进OFDM通信信号的一体化波形，为充分利用系统带宽和阵列孔径，提出了对应的距离和角度估计方法。

3.3 系统设计

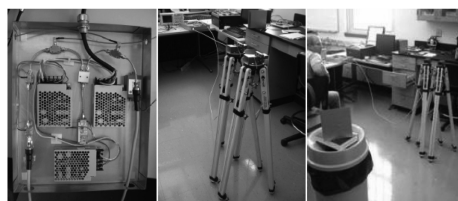
在雷达通信一体化系统研究方面，国外已经搭

建了实验平台，取得了一些研究成果。美国迈阿密大学研制了超宽带SAR，并使其成为通信雷达一体化系统^[72]，图3为其假想的应用场景，描述了多个无人机组成的侦察雷达网络，对复杂地形的目标进行探测与识别，将收集到的目标图像数据在无人机平台间进行传输，实现雷达侦察与通信一体化的目的，同时展示了他们在实验室研制的OFDM超宽带SAR试验系统。文献^[73,74]研究了OFDM雷达通信一体化系统，图4展示了由多辆汽车组成的MIMO-OFDM雷达通信一体化验证网络，其目的为验证在干扰条件下雷达通信一体化系统的数据传输与探测性能，图5是中心载频为24 GHz条件下的实况路测与试验结果，利用所设计的雷达通信一体化系统对多个标记目标进行探测，从实验结果可以看出所设计一体化系统可形成对多个标记目标较为清晰的距离-速度像。Li等人^[75]针对组网雷达通信一体化系统(RCIS)进行了研究，提出了一种名为SBA-RA的定向邻近节点发现算法，其可充分利用RCIS平台获得的邻近节点近似位置信息，加速邻近节点的发现过程，扩大扫描范围和共享信息，保证雷达和通信系统平台性能的提高。芬兰的Aalto大学Marian等人^[76]研究了雷达与通信系统共存和频谱共享问题，提出了一种基于最大似然方法的多载波雷达时延估计器，解决了合作场景中的目标参数估计问题。

综合上述分析，在OFDM雷达通信一体化研究方面，结合OFDM体制在通信系统中的成熟应用，近10年来，美国迈阿密大学、华盛顿大学、Hopkins大学、英国爱丁堡大学、法国ONERA、荷兰



(a)雷达通信一体化应用场景



(b)雷达通信一体化试验系统

图3 迈阿密大学雷达通信一体化应用场景及试验系统

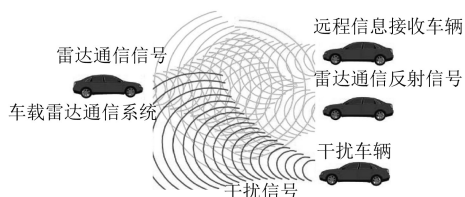
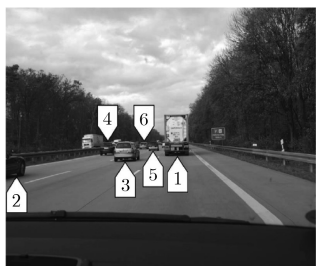
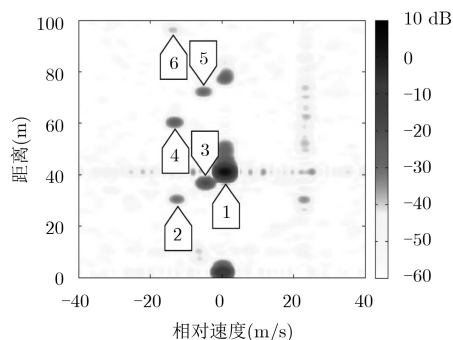


图4 德国通信雷达一体化系统的应用场景

Delft理工大学等单位主要研究了OFDM信号波形设计、多普勒及脉冲压缩处理方法、目标检测、多功能新体制雷达等内容，揭示了OFDM雷达信号的波形设计灵活、数字化处理、多功能等优点，在抗干扰、超宽带成像、多功能一体化等发展方向上均有很大的潜力。因此，未来可通过对编码信号设



(a)实际道路场景图像



(b)实际场景(a)的雷达成像结果

图5 德国通信雷达一体化系统的实况路测与试验结果

计、频偏估计、目标回波处理方法、一体化系统设计等关键问题开展研究,为雷达通信一体化系统的实现与应用提供技术支撑。

4 雷达通信一体化发展趋势

本文通过对雷达通信一体化在国内外研究现状的较为全面的总结与分析,指出了目前雷达通信一体化中存在非线性失真、传输速率低与相互间干扰的问题,揭示了雷达通信一体化在通信传输与雷达探测多功能一体化发展中的巨大潜力,但目前雷达通信一体化还未形成完整的研究体系,在实现雷达通信一体化的成熟应用前还有许多亟需解决的理论与技术难题,未来可以围绕波形优化设计、信号高效处理方法、一体化验证系统与测试平台,结合前沿通信的新体制雷达技术等几个方面开展研究。

随着雷达通信一体化研究的不断向前推进与深入,结合现有的实际民用需求与军事应用,雷达通信一体化势必向着高度一体化、智能化、多样化发展。未来雷达通信一体化发展可能具有以下几个趋势:

(1)一体化程度越来越高:对于波形设计而言,采用LFM或扩频技术的一体化波形传输效率不高,引入OFDM技术可有效提高传输效率,但OFDM雷达通信一体化信号存在PAPR与PMEPR较高的问题,目前通过加权与相位编码的方法可有效缓解,却导致了脉冲压缩后旁瓣较高,因此需要综合考虑传输效率、PAPR与PMEPR水平、脉压旁瓣抑制等问题,从优化OFDM一体化信号的相位编码角度出发,考虑多参数联合优化设计的自适应方法,采用最佳通信编码与调制技术,改善一体化波形的模糊函数性能,降低PMEPR与PAPR,抑制一体化波形旁瓣与带外干扰,探索可满足实际应用需求的OFDM雷达通信一体化信号,而结合MIMO技术的雷达通信一体化波形在利用波形分集时还需要考虑波束成形与相位补偿等问题,以实现高效的雷达通信一体化。

针对一体化信号处理,存在一体化信号频偏的

同步估计,通信中的信道衰落与载波间串扰,OFDM雷达处理中的脉冲压缩,多普勒处理与干扰抑制等难点问题,对于同步估计可采用基于循环前缀的STO与CFO估计方法,而基于信道估计的信道均衡、最大似然比译码、最大比合并解调技术可以缓解通信中信道衰落与ICI的问题,对于OFDM一体化信号中的雷达处理,传统的脉冲压缩与多普勒处理不再适用,需研究更高效的脉冲压缩与多普勒频偏估计方法解决OFDM一体化信号雷达处理中速度补偿,旁瓣抑制以及多普勒频偏引起的子载频串扰等问题,尽可能减小因处理方法不当而带来的性能损失。随着雷达与通信朝着集成化、小型化发展及信号处理算法的创新,为高度雷达通信一体化提供了可能。

(2)系统智能化发展趋势明显:协同组网雷达通信一体化系统对无人机(UAV)和无人驾驶飞行器(UVS)等无人驾驶平台形成侦察网络进行数据传输与目标探测侦察尤为适用。在无人机集群编队飞行系统中,智能协同自组织是无人机集群的重要发展方向,要实现智能协同自组织,需要设计先进的即时通信网络和可靠的智能感知算法,使集群中每个无人机都能实时感知周围的环境和目标,智能化的实现也将为未来军事无人机协同作战提供巨大潜力。另外,智能交通、智能驾驶系统的发展同样以感知周围环境并进行信息交互为基础,通过设计智能化的雷达通信一体化系统,将为推进智能城市的建设提供有力支撑。

(3)MIMO-OFDM新体制:MIMO-OFDM雷达通信一体化拓展了单一雷达与通信的功能,为实现多功能一体化系统提供了新体制、新概念与新方法。基于OFDM体制的MIMO雷达通信一体化为雷达通信一体化的设计提供了更多灵活性,采用MIMO主阵结合数字子阵的方式可实现MIMO-OFDM一体化波形设计,MIMO阵列发送不同编码的OFDM波形以获取更优的自相关函数性能,结合

OFDM-Chirp的宽带信号可用于MIMO-SAR的高精度成像, 通过优化MIMO-OFDM雷达通信一体化波形, 可实现具有大时宽带宽积、低互相关旁瓣与低峰均比的一体化信号。采用MIMO-OFDM技术的雷达通信一体化结合了OFDM与MIMO技术的独特优势, 可抵抗多径效应, 提高频谱效率, 灵活设计波束, 增加系统分集, 在实现数据高效传输的同时可以有效抑制干扰, 提高接收信号SINR, 是宽带成像、目标跟踪、组网侦察等应用的研究热点与关键技术。

随着雷达朝着多通道、阵列化、数字化发展, 相位编码OFDM信号适合与MIMO体制相结合, 得到的相位编码MIMO-OFDM信号体制波形设计灵活、易于数字化, 也适用于通信系统, 在雷达通信一体化的实现中具有巨大潜力。

5 结束语

本文对于雷达通信一体化这一研究热点展开了详细论述, 介绍了雷达通信一体化的基本概念及其在时域、空域与频域的典型一体化方法, 指出了雷达通信一体化信号的特点和研究中亟需解决的问题, 并总结了雷达通信一体化的研究现状与进展, 其中对基于LFM、扩频信号以及OFDM的雷达通信一体化波形设计进行了简要介绍, 着重梳理了引入OFDM与MIMO技术的雷达通信一体化信号在波形设计、信号处理、一体化系统研究等方面的相关理论成果与技术方法, 在未来随着雷达通信一体化程度越来越高、智能化的发展和MIMO-OFDM新体制的引入, 将使得雷达通信一体化在未来军事领域或民用智能交通领域都具有巨大的发展潜力。

参 考 文 献

- [1] 杨瑞娟, 陈小民, 李晓柏, 等. 雷达通信一体化共享信号技术研究[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(1): 39–43. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2013.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2013.01.010).
YANG Ruijuan, CHEN Xiaomin, LI Xiaobai, et al. Study of signal sharing technologies for integration of radar and communication systems[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2013, 27(1): 39–43. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2013.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2013.01.010).
- [2] GUPTA A and JHA R K. A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies[J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 1206–1232. doi: [10.1109/ACCESS.2015.2461602](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461602).
- [3] SHANNON D B and ERIC L M. Overview of radar waveform diversity[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(11): 2–42. doi: [10.1109/MAES.2016.160071](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.160071).
- [4] LIN Zhiyuan and WEI Ping. Pulse position modulation time hopping ultra wideband sharing signal for radar and communication system[C]. CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2007: 4–7. doi: [10.1109/ICR.2006.343260](https://doi.org/10.1109/ICR.2006.343260).
- [5] LIU Zhipeng, ZHANG Wenkang, and XU Shanfeng. Implementation on the integrated waveform of radar and communication[C]. International Conference on Communication, Circuits and Systems, Chengdu, China, 2013: 200–204. doi: [10.1109/ICCCAS.2013.6765318](https://doi.org/10.1109/ICCCAS.2013.6765318).
- [6] LI Qingyu, ZHANG Yu, PAN Changyong, et al. Waveform design for high speed radar-communication integration[C]. CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2016.S059295](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.S059295).
- [7] 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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00567](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00567).
LI Xiaobai, YANG Ruijuan, and CHENG Wei. Integrated radar and communication based on multicarrier frequency modulation Chirp signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 406–412. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00567](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00567).
- [8] CENK S, JOHN J, PATRICK M M, et al. A novel approach for embedding communication symbols into physical radar waveforms[C]. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1498–1503. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944444](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944444).
- [9] MICHAEL J N, ZHANG Zhiping, QU Yang, et al. Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[C]. Military Communications Conference, Baltimore, USA, 2016: 918–923. doi: [10.1109/MILCOM.2016.7795447](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2016.7795447).
- [10] ZHANG Zhiping, QU Yang, DESSOURCES D A, et al. Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 28–35. doi: [10.1109/MAES.2016.150236](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150236).
- [11] MACHAEL J N, ZHANG Zhiping, LORENZO L, et al. Mixed-modulated linear frequency modulated[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(2): 313–320. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0249](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0249).
- [12] LI Xiaobai, YANG Ruijuan, ZHANG Zunquan, et al. Research of constructing method of complete complementary sequence in integrated radar and communication[C]. IEEE 11th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2012, 3: 1729–1732. doi: [10.1109/ICoSP.2012.6491914](https://doi.org/10.1109/ICoSP.2012.6491914).
- [13] ZHANG Chaozhu and CHEN Qiang. Design of signal-sharing for radar and communication[C]. International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer(MEC), Shenyang, China, 2013: 1250–1253. doi: [10.1109/MEC.2013.6885258](https://doi.org/10.1109/MEC.2013.6885258).
- [14] ZHANG Yu, LI Qingyu, HUANG Ling, et al. A modified waveform design for radar-communication integration based on LFM-CPM[C]. Vehicular Technology Conference (VTC

- Spring), Sydney, Australia, 2017: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2017.8108563](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108563).
- [15] ZHANG Yu, LI Qingyu, HUANG Ling, *et al.* Waveform design for joint radar-communication with nonideal power amplifier and outband interference[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925543](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925543).
- [16] XU Shaojian, CHEN Bing, and ZHANG Ping. Radar-communication integration based on DSSS techniques[C]. International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2006: 142–144. doi: [10.1109/ICOSP.2006.346041](https://doi.org/10.1109/ICOSP.2006.346041).
- [17] FRANKEN G E A, NIKOOKAR H, and GENDEREN P V. Doppler tolerance of OFDM-coded radar signals[C]. IEEE Radar Conference, Manchester, UK, 2006: 108–111. doi: [10.1109/EURAD.2006.280285](https://doi.org/10.1109/EURAD.2006.280285).
- [18] CHENG Shengjuan, WANG Wenqin, and SHAO Huaizong. Spread spectrum-coded OFDM chirp waveform diversity design[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5694–5700. doi: [10.1109/JSEN.2015.2448617](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2448617).
- [19] TIAN Xuanxuan and SONG Zhaohui. On radar and communication integrated system using OFDM signal[C]. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 318–323. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944220](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944220).
- [20] JIN Shengcai and WU Wen. Joint communication and radar system based on multi-carrier interleave-division multiplexing[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2015, 11(2): 727–734. doi: [10.12733/jcis13161](https://doi.org/10.12733/jcis13161).
- [21] LEVANON N. Multifrequency complementary phase-coded radar signal[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(6): 276–284. doi: [10.1049/ip-rsn:20000734](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20000734).
- [22] WANG Wenqin, ZHENG Zhi, and ZHANG Shunsheng. OFDM chirp waveform diversity for co-designed radar-communication system[C]. 18th International Radar Symposium, Prague, Czech Republic, 2017: 1–9. doi: [10.23919/IRS.2017.8008139](https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008139).
- [23] LI Cong, BAO Weimin, XU Luping, *et al.* Radar communication integrated waveform design based on OFDM and circular shift sequence[J]. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 18(7): 1–10. doi: [10.1155/2017/9840172](https://doi.org/10.1155/2017/9840172).
- [24] SEBT M A, NOROUZI Y, SHEIKHI A, *et al.* OFDM radar signal design with optimized ambiguity function[C]. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 448–452. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720801](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720801).
- [25] SATYABRATA S and ARYE N. Target detection in clutter using adaptive OFDM radar[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(7): 592–595. doi: [10.1109/LSP.2009.2020470](https://doi.org/10.1109/LSP.2009.2020470).
- [26] JIANG Yicheng and GUO Sai. Spaceborne radar-communication integration signal design for moving target detection[C]. IET International Radar Conference, Hangzhou, China, 2015: 1–6. doi: [10.1049/cp.2015.1148](https://doi.org/10.1049/cp.2015.1148).
- [27] SEBT M A, SHEIKHI A, and NAYEBI M M. Orthogonal frequency-division multiplexing radar signal design with optimised ambiguity function and low peak-to-average power ratio[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(2): 122–132. doi: [10.1049/iet-rsn:20080106](https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20080106).
- [28] JOHN E, ZHANG Zhiping, MICHAEL W, *et al.* Multi-carrier radar waveforms for communications and detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(3): 444–452. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0244](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0244).
- [29] JOHN E, ZHANG Zhiping, WU Zhiqiang, *et al.* Dual-use multicarrier waveform for radar detection and communication[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1265–1278. doi: [10.1109/TAES.2017.2780578](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2780578).
- [30] MUSSA A D, HAO Huan, WANG Xi, *et al.* Constant envelope chirped OFDM for power efficient radar communication[C]. IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2016: 298–301. doi: [10.1109/ITNEC.2016.7560369](https://doi.org/10.1109/ITNEC.2016.7560369).
- [31] CHRISTIAN S and WERNER W. Joint integration of digital beam-forming radar with communication[C]. IET Radar Conference, Guilin, China, 2009: 1–4. doi: [10.1049/cp.2009.0482](https://doi.org/10.1049/cp.2009.0482).
- [32] WANG Zhaofeng, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. A novel radar waveform based on space-frequency coding compatible with directional communication[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–5. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059314](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059314).
- [33] ABOULNASR H, MOENESS G A, YIMIN D Z, *et al.* Signaling strategies for dual-function radar communications: An overview[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 36–45. doi: [10.1109/MAES.2016.150225](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150225).
- [34] ABOULNASR H, BRAHAM H, and BRIAN D R. A dual-function MIMO radar-communications system using frequency-hopping waveforms[C]. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1721–1725. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944485](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944485).
- [35] ABOULNASR H, MOENESS G A, YIMIN D Z, *et al.* Phase-modulation based dual-function radar communications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(8): 1411–1421. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0484](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0484).
- [36] ABOULNASR H, MOENESS G A, YIMIN D Z, *et al.* Dual-function radar-communications: Information embedding using sidelobe control and waveform diversity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(8): 2168–2181. doi: [10.1109/TSP.2015.2505667](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2505667).
- [37] ABOULNASR H, MOENESS G A, YIMIN D Z, *et al.* A dual function radar-communications system using sidelobe

- control and waveform diversity[C]. IEEE Radar Conference, Arlington, USA, 2015: 1260–1263. doi: [10.1109/RADAR.2015.7131188](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7131188).
- [38] ABOULNASR H, SERGIY A V, and ARASH K. Transmit radiation pattern invariance in MIMO radar with application to DOA estimation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1609–1613. doi: [10.1109/LSP.2015.2417220](https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2417220).
- [39] ANASTASIOS D, LI Bo, MATHEW C, *et al.* Spectrum sharing between radar and communication systems: Can the privacy of the radar be preserved[C]. 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2017: 1285–1289. doi: [10.1109/ACSSC.2017.8335560](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2017.8335560).
- [40] HUANG Ling, ZHANG Yu, LI Qingyu, *et al.* Phased array radar-based channel modeling and sparse channel estimation for an integrated radar and communication system[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 15468–15477. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2731398](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2731398).
- [41] TIAN Xuanxuan, ZHANG Tingting, ZHANG Qinyu, *et al.* Waveform design and processing in OFDM based radar-communication integrated systems[C]. IEEE International Conference on Communications in China (ICCC), Qingdao, China, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICCCChina.2017.8330462](https://doi.org/10.1109/ICCCChina.2017.8330462).
- [42] SHADDRACK Y N, WANG Wenqin, and ABDUL B. A time-modulated FD-MIMO array for integrated radar and communication systems[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(6): 1–4. doi: [10.1109/LAWP.2018.2829729](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2829729).
- [43] MOMIN J, HANS Z, and YANG Xinshe. Sequence optimization for integrated radar and communication systems using meta-heuristic multiobjective methods[C]. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 502–507. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944255](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944255).
- [44] YOKE L S, CHRISTIAN S, LARS R, *et al.* The OFDM joint radar-communication system: An overview[C]. International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Budapest, Hungary, 2011: 69–74. doi: [10.1109/SPACOMM.2011.5960632](https://doi.org/10.1109/SPACOMM.2011.5960632).
- [45] YOKE L S, CHRISTIAN S, and THOMAS Z. Interference cancellation for dynamic range improvement in an OFDM joint radar and communication system[C]. The 8th European Radar Conference, Manchester, UK, 2011: 333–336.
- [46] YOKE L S, LARS R, CHRISTIAN S, *et al.* Extension of the OFDM joint radar-communication system for a multipath, multiuser scenario[C]. IEEE Radar Conference, Kansas City, USA, 2011: 718–723. doi: [10.1109/RADAR.2011.5960632](https://doi.org/10.1109/RADAR.2011.5960632).
- [47] YOKE L S, CHRISTIAN S, and THOMAS Z. One-stage selective interference cancellation for the OFDM joint radar-communication system[C]. The 7th German Microwave Conference, Ilmenau, Germany, 2012: 1–4. doi: [10.1109/GeMiC.2012.6185152](https://doi.org/10.1109/GeMiC.2012.6185152).
- [48] TIGREK R F, WIM J A, and PIET V G. OFDM signals as the radar waveform to solve doppler ambiguity[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 130–143. doi: [10.1109/TAES.2012.6129625](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129625).
- [49] BOUQUET E, SYLVAIN H, HAMED D, *et al.* An innovative and low complexity PAPR reduction technique for multicarrier systems[C]. The 9th European Conference on Wireless Technology, Manchester, UK, 2006: 162–165. doi: [10.1109/ECWT.2006.280460](https://doi.org/10.1109/ECWT.2006.280460).
- [50] LELLOUCH G, TRAN P, PRIBIC R, *et al.* OFDM waveforms for frequency agility and opportunities for Doppler processing in radar[C]. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 432–437. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720798](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720798).
- [51] LELLOUCH G, TRAN P, and PATRICK V G. Wideband OFDM pulse burst and its capabilities for the Doppler processing in radar[C]. IEEE International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2008: 531–535. doi: [10.1109/RADAR.2008.4653981](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4653981).
- [52] 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[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(2): 425–433. doi: [10.11999/JEIT150320](https://doi.org/10.11999/JEIT150320).
- LIU Yongjun, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *et al.* A super-resolution design method for integration of OFDM radar and communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 425–433. doi: [10.11999/JEIT150320](https://doi.org/10.11999/JEIT150320).
- [53] TIGREK R F, HEIJ W J A, and VAN G P. Multi-carrier radar waveform schemes for range and Doppler processing[C]. IEEE Radar Conference, Pasadena, USA, 2009: 1–5. doi: [10.1109/RADAR.2009.4976986](https://doi.org/10.1109/RADAR.2009.4976986).
- [54] DUAN Junqi. Multicarrier coherent pulse shaping for radar and corresponding signal processing[C]. The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an, China, 2007: 843–847. doi: [10.1109/ICEMI.2007.4351049](https://doi.org/10.1109/ICEMI.2007.4351049).
- [55] MOHSENI R, SHEIKHI A, and MASNADI S. A new approach to compress multicarrier phase-coded signals[C]. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 442–447. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720800](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720800).
- [56] MOHSENI R, SHEIKHI A, and MASNADI S. Compression of multicarrier phase-coded radar signals with low sampling rate[C]. IEEE International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2008: 718–721. doi: [10.1109/RADAR.2008.4654014](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4654014).
- [57] GABBIEL L, AMIT M, and MICHAEL I. Impact of the Doppler modulation on the range and Doppler processing in OFDM radar[C]. IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 803–808. doi: [10.1109/RADAR.2014.6875700](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.6875700).
- [58] 顾陈, 张劲东, 朱晓华. 基于OFDM的多载波调制雷达系统信

- 号处理及检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1298–1300. doi: [10.3724/SP.J.1146.2008.00876](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2008.00876).
- GU Chen, ZHANG Jindong, and ZHU Xiaohua. Signal processing and detecting for multicarrier modulated radar system based on OFDM[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1298–1300. doi: [10.3724/SP.J.1146.2008.00876](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2008.00876).
- [59] BRIAN D C, SARAH A S, and LAWRENCE C. Electromagnetic interference to radar receivers due to in-band OFDM communications systems[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Denver, USA, 2013: 72–75. doi: [10.1109/ISEMC.2013.6670384](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2013.6670384).
- [60] JONATHAN S and DMITRIY G. Multifrequency OFDM SAR in presence of deception jamming[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 10(3): 1–13. doi: [10.1155/2010/451851](https://doi.org/10.1155/2010/451851).
- [61] WANG Wenqin. Multichannel SAR using waveform diversity and distinct carrier frequency for ground moving target indication[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(11): 5040–5051. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2485166](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2485166).
- [62] MECCA V F, RAMAKRISHMAN D, and KROLIK J L. MIMO radar space-time adaptive processing for multipath clutter mitigation[C]. IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, USA, 2006: 249–253. doi: [10.1109/SAM.2006.1706131](https://doi.org/10.1109/SAM.2006.1706131).
- [63] WANG Zhaofeng, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Space-frequency modulation radar-communication and mismatched filtering[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 24837–24845. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2829731](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2829731).
- [64] LI Bo and ATHINA P. Radar precoding for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system[C]. IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, Orlando, USA, 2015: 737–741. doi: [10.1109/GlobalSIP.2015.7418294](https://doi.org/10.1109/GlobalSIP.2015.7418294).
- [65] LI Bo and ATHINA P. MIMO radar and communication spectrum sharing with clutter mitigation[C]. IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2016.7485158](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.7485158).
- [66] LI Bo and ATHINA P. Joint transmit designs for co-existence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(6): 2846–2864. doi: [10.1109/TAES.2017.2717518](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2717518).
- [67] LI Bo and ATHINA P. Spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Brisbane, Australia, 2015: 2444–2448. doi: [10.1109/ICASSP.2015.7178410](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2015.7178410).
- [68] LI Bo, ATHINA P, and WADE T. Optimum co-design for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(17): 4562–4575. doi: [10.1109/TSP.2016.2569479](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2569479).
- [69] QIAN Junhui, MARCO L, ZHENG Le, et al. Joint system design for coexistence of MIMO radar and MIMO communication[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(13): 3504–3519. doi: [10.1109/TSP.2018.2831624](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2831624).
- [70] LIU Fan, CHRISTOS M, LI Ang, et al. MIMO radar and cellular coexistence: A power-efficient approach enabled by interference exploitation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(14): 3681–3695. doi: [10.1109/TSP.2018.2833813](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2833813).
- [71] LIU Yongjun, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems[C]. CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059539](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059539).
- [72] DIMITRIY G, JONATHAN S, KYLE K, et al. Wideband OFDM system for radar and communications[C]. IEEE Radar Conference, Pasadena, USA, 2009: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2009.4977024](https://doi.org/10.1109/RADAR.2009.4977024).
- [73] CHRISTIAN S, THOMAS Z, and WERNER W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Barcelona, Spain, 2009: 1–5. doi: [10.1109/VETECS.2009.5073387](https://doi.org/10.1109/VETECS.2009.5073387).
- [74] CHRISTIAN S and WERNER W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236–1259. doi: [10.1109/JPROC.2011.2131110](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2131110).
- [75] LI Jiming, PENG Laixian, YE Yilei, et al. A neighbor discovery algorithm in network of radar and communication integrated system[C]. 17th International Conference on Computational Science and Engineering, Chengdu, China, 2014: 1142–1149. doi: [10.1109/CSE.2014.224](https://doi.org/10.1109/CSE.2014.224).
- [76] MARIAN B and VISA K. Delay estimation method for coexisting radar and wireless communication systems[C]. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1157–1161. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944455](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944455).
- 肖 博: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为雷达与通信波形设计与信号处理。
- 霍 凯: 男, 1983年生, 讲师, 研究方向为雷达波形设计与信号处理等。
- 刘永祥: 男, 1976年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为目标微动特性分析与识别等。