

太赫兹感知通信一体化波形设计与信号处理

余显斌^{1,2}, 吕治东¹, 李涟漪¹, Nazar Muhammad Idrees¹, 张鹿¹

(1. 浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 之江实验室, 浙江 杭州 311121)

摘 要: 太赫兹波段感知通信一体化技术能够在提高数据传输速率和感知分辨率的同时, 有效降低硬件资源和频谱资源的消耗。首先, 简要介绍了感知通信一体化及太赫兹通信、感知的现状。然后, 分别从感知和通信的角度讨论了一体化波形设计及优化策略, 同时分析了两类信号接收机的信号处理算法, 并实验展示了一种 97 GHz 基于 OFDM 信号的一体化系统, 对系统的距离、速度和通信等性能进行了测试。最后, 总结和展望了太赫兹感知通信一体化的技术难题和未来研究方向。

关键词: 太赫兹; 感知通信一体化; 波形设计; 信号处理算法

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022015

Waveform design and signal processing for terahertz integrated sensing and communication

YU Xianbin^{1,2}, LYU Zhidong¹, LI Lianyi¹, Nazar Muhammad Idrees¹, ZHANG Lu¹

1. College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China

Abstract: Integrated sensing and communication (ISaC) in the terahertz band can efficiently reduce the consumption of hardware and spectrum resources, while improving the transmission data rate and sensing resolution. Firstly, the development status of ISaC, terahertz communication and sensing were briefly introduced. Then, the strategy of waveform design and optimization for ISaC and the receiving signal processing algorithms were presented. As an example, an OFDM ISaC system operating at 97 GHz was experientially demonstrate, and the performance of ranging, speed and communication were all evaluated in the experiment. Finally, the key issues and research directions of future terahertz ISaC development were discussed.

Keywords: terahertz, integrated sensing and communication, waveform design, signal processing algorithm

0 引言

随着现代信息技术的快速发展, 人工智能、大数据等技术与传统的电子信息领域深度融合, 催生出沉浸式体验、全息传送、拓展现实、数字孪生等一系列新兴业务^[1], 这些新兴业务的实现往往依赖于多种传统的信息技术手段。业务量的增加本质上

是对带宽资源需求的扩张, 而在频谱拥塞问题日益严重的今天, 更好地推进信息技术需要发展一体化技术。得益于先进的数字信号处理技术, 雷达感知和无线通信系统可以采用相似的架构实现, 这使感知通信一体化成为可能^[2]。该技术通过共享收发系统, 实现更有效、更紧凑的硬件设计, 能够显著提升资源利用效率, 因此受到了许

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2021-11-24

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1805700); 国家自然科学基金资助项目 (No.62101483); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LQ21F010015); 之江实验室重大基金资助项目 (No.2020LC0AD01)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1805700), The National Natural Science Foundation of China (No.62101483), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LQ21F010015), The Foundation of Zhejiang Lab (No.2020LC0AD01)

多研究机构的关注^[3-4]。

同时, 新兴业务的服务质量和频谱资源需求压力的缓解需要提高雷达和通信系统的载波频率。太赫兹波段, 即频率在 0.1~10 THz 的电磁波, 能够提供几十 GHz 的超大带宽, 可以满足许多新兴业务的带宽需求^[5]。近年来, 研究人员开展了很多有关太赫兹感知^[6]与太赫兹通信^[7]领域的研究, 太赫兹波在感知方面能够对目标的距离、速度进行毫米级的高分辨率估计, 在通信方面具有 Tbit/s 的超高速数据传输能力^[8]; 同时太赫兹波的波长更小, 能够在相同尺寸内集成更多的天线, 更适合小型一体化部署。最近, 得益于太赫兹技术领域的快速发展, 以及太赫兹波在一体化系统中的潜在优势, 面向太赫兹频段的感知通信一体化正成为下一个研究热点^[9-10]。

感知通信一体化作为提供感知互联, 兼具高智能化和高共享度的技术, 是智慧家庭、智慧城市的关键技术之一^[11], 该领域的研究包括通信体系架构、信息基础理论、数字信号处理算法等^[12]。发送端波形设计方面, 雷达和通信波形通过时分复用^[13]、频分复用^[14]、码分复用^[15]和空分复用^[16]等方式可以实现功能的一体化, 这类波形往往实现简单, 但会产生额外的资源开销并造成探测盲区、通信和雷达信号相互干扰等问题。另一类波形设计的思路是直接设计一体化波形, 按照应用场景可分为面向感知的一体化波形^[17]和面向通信的一体化波形^[18]。这类波形往往从已有的波形出发进行设计, 但可能无法满足特定场景下的性能需求, 可通过编码增加波形自由度^[10]或通过求解优化问题设计新的波形以满足某些约束条件^[19-20]等手段改善波形性能。接收端信号处理方面, 需要消除雷达和通信数据之间、不同用户和不同系统之间的干扰, 同时要考虑如何提升探测性能并降低误码率^[21]。

太赫兹波与感知通信一体化技术的融合, 被认为是未来信息技术发展的重要方向。与已有综述研究工作相比^[10,22-23], 本文从太赫兹频段信号损伤严重、传播衰减严重、通信容量和距离受限等问题出发, 对一体化波形设计和接收端信号处理等技术进行分析。波形设计将分别从基于已有雷达波形、基于已有通信波形, 以及感知-通信性能优化等方面展开讨论。接收端信号处理主要考虑雷达和通信的信号恢复和干扰消除, 以提升一体化系统性能。作为实验验证的例子, 本文搭建了工作在 97 GHz 频

段的 16-QAM 正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 一体化系统, 该系统能够实现 0.042 m 的距离分辨率和 0.79 m/s 的速度分辨率, 且通信误码率低于软判决前向纠错 (SD-FEC, soft-decision forward-error correction) 阈值。最后简要分析了太赫兹频段感知通信一体化技术发展面临的技术难题和下一阶段的主要研究方向。

1 面向感知的一体化波形设计

感知通信一体化的应用场景之一是利用通信辅助感知服务, 考虑到雷达是感知的一种主要形式, 因此本文主要讨论雷达感知, 相关理论基本适用于其他感知场景。以雷达波形作为通信调制信号的载波, 能够在尽可能保证雷达性能的前提下实现一体化设计^[24]。一般地, 通信信息的调制会影响雷达波形的自相关特性^[25], 同时会增大旁瓣功率^[26], 由于现有太赫兹雷达系统受限于功率, 这种影响是极为显著的, 可通过编码等策略, 牺牲一定的传输效率获得更好的模糊函数图和主瓣旁瓣功率比。此外, 单载波波形设计方案往往频谱利用效率较低, 不能够满足某些场景下对传输速率的需求, 采用多载波传输可以改善上述问题^[27]。

1.1 基于现有雷达信号的波形设计

1.1.1 单载波波形设计方案

线性调频 (LFM, linear frequency modulation) 脉冲波形具有恒定包络、高距离-多普勒分辨率等特性, 在太赫兹雷达系统中已经得到了广泛的应用^[6]。基于现有雷达信号的波形设计主要以 LFM 信号为基础, 通过调制或编码加载通信信号, 实现感知通信一体化。

文献[28]将幅值键控 (ASK, amplitude shift keying) 与 LFM 信号结合, 然而 ASK 调制严重破坏了 LFM 信号的恒包络特性, 同时对信噪比要求较高。为获得更好的一体化性能, 文献[29]将最小相位频移键控 (MSK, minimum frequency shift keying) 信号调制到 LFM 脉冲上。MSK-LFM 一体化波形产生框架如图 1 所示, 差分编码后的通信数据经串并转换 (S/P, serial/parallel) 得到同相 (I, in-phase) 和正交 (Q, quadrature) 信号, 分别对两路信号调制后再将其加载到 LFM 载波上, 相加得到 MSK-LFM 波形。

实验表明, MSK-LFM 一体化信号不会造成距离-多普勒分辨率的损失, 但会面临功率泄露^[30]、带间干扰^[31]等问题。Chen 等^[30]讨论了雷达接收机

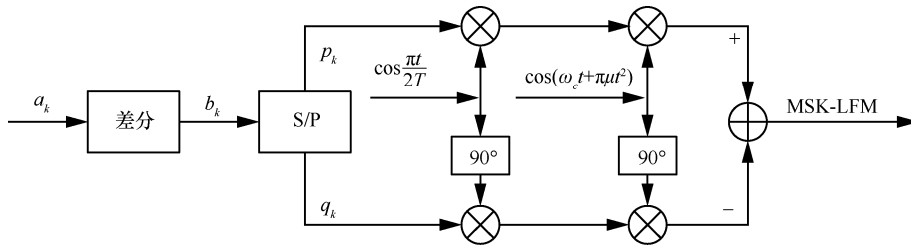


图 1 MSK-LFM 一体化波形产生框架

带宽近似于发射信号带宽时，MSK-LFM 信号功率泄露与调制数据的关系，提出了牺牲一定信道容量以消除功率泄露的方法。Alabd 等^[31]通过在 LFM 信号的某一时间段上调制 MSK 信号降低带间干扰，相比于在整个脉冲持续时间上调制，更能保证整体性能。

上述方法中的通信信号均来自低阶调制，通信速率不高。为提高通信速率，文献[32]将 LFM 信号作为多进制正交幅度调制 (QAM, quadrature amplitude modulation) 信号的载波。仿真结果表明，当通信信号满足零均值条件时，MQAM-LFM 信号的模糊函数比 LFM 信号更接近“图钉形”。由于 QAM 信号在一定程度上会影响 LFM 信号的恒包络特性，研究人员基于 OFDM 提出将一系列频率正交项作为 LFM 信号的相位^[33-34]以提高通信速率。

将通信数据通过相移键控 (PSK, phase shift keying) 调制到 LFM 信号实现一体化的技术同样受到研究人员的关注^[35]。这是由于 PSK-LFM 具有很好的恒包络特性，能够有效利用高功率放大器产生太赫兹一体化信号且不易造成非线性失真。文献[34]结合减相位角 PSK 和 M 序列实现扩频相位离散，得到相关特性好的一体化波形。文献[35]设计了基于连续相位调制 (CPM, continues phase modulation) 的 CPM-LFM 信号，解决因 PSK-LFM 相位不连续所导致的频谱效率降低问题。此外，Sahin 等^[36]在 CPM-LFM 每个符号内部调制通信信号以提高通信速率，但这种方法会造成主瓣旁瓣功率比下降。文献[37-38]分别采用低密度奇偶检验码和预编码技术设计 CPM-LFM 一体化波形，进一步提高了频谱利用率。

1.1.2 多载波波形设计方案

上述单载波波形设计方案难以在兼顾感知性能的同时获得高数据传输速率和频带利用率，在新型汽车雷达^[39]等对传输速率和频谱效率要求较高的场景下，可采用多载波设计方案进行改进。文献[40]提出了一种基于步进频率 (SF, stepped

frequency) 的一体化波形。SF 信号易于产生，可以提供大带宽和高分辨率^[41]，但可用参数缺少随机性，且难以保证雷达性能不受通信数据的影响^[42]。为解决上述问题，文献[43]通过引入伪随机序列，提高频谱利用效率、降低设备间干扰。

另一类多载波波形设计方案是利用分数阶傅里叶变换 (FrFT, fractional Fourier transform)。FrFT 将信号表示为 LFM 信号的代数和，在目标检测^[44]、成像^[45]等领域得到了广泛的应用。FrFT 一体化信号产生框架如图 2 所示。文献[46]利用 FrFT 产生一系列伪正交子载波实现多载波传输，通过加入保护序列和交织解决信道间干扰 (ICI, inter-channel interference)，设计自适应子载波持续时间算法提高频带利用率。文献[46]提出的波形与 LFM 信号具有相近的探测概率和虚警概率，虽然存在轻微的分辨率损失，但通信性能与 OFDM 相当。文献[47]通过将特定阶的 FrFT 分给指定的用户实现了多信宿通信。

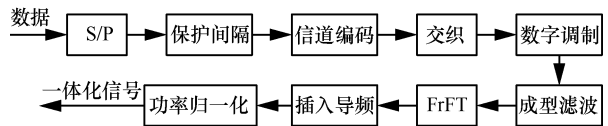


图 2 FrFT 一体化信号产生框架

1.2 感知性能优化的波形设计

基于现有雷达信号设计的一体化波形性能受限于波形体制、调制方式等，一般只能在某一个指标上取得较好的效果，而在以感知为主的应用场景下，需要兼顾雷达接收端信号与干扰加噪声比 (SINR, signal to interference plus noise ratio)^[48]、雷达互信息 (MI, mutual information)^[49]、信号截获概率^[50]、克拉美罗下界 (CRLB, Cramér-Rao lower bound)^[51]等指标。这类问题常通过最优化理论进行建模，其关键在于目标函数和约束条件的选择，以及优化问题的求解。

文献[48]以接收信号 SINR 以及目标冲激响应

和接收信号的 MI 作为目标函数,把发射信号功率和通信信道容量作为约束条件设计一体化波形,但求解复杂度较高。为提高计算效率,Kang 等^[52]采用分步求解的方式,首先在雷达功率的约束条件下最小化 SINR 并求得最优解,再以该解为起点搜索满足信道容量约束的解,实现了更低的计算复杂度。

雷达发射功率是影响太赫兹感知通信一体化系统应用场景的关键指标。文献[50]考虑在信号杂波和高斯噪声的影响下获得低截获概率,给定可接受的 SINR 阈值并最小化发射功率。上述工作是基于系统能够获得目标精确谱的假设,Shi 等^[53]假设系统不能获得目标的精确谱,以 MI 和信道容量为约束条件,考虑目标对通信信号的不同散射强度,优化波形以达到最小化最坏情况雷达发射功率。

CRLB 与信道容量相对应,可以表征雷达系统的性能。文献[54]讨论了雷达目标定位的费歇耳信息矩阵(FIM, Fisher information matrix)和 CRLB。Liu 等^[51]以最小化 CRLB 为目标函数,同时保证每个用户具有预定义的 SINR。对于单用户场景,文献[51]推导了点目标和拓展目标的最优闭式解;对于多用户场景,利用半定松弛方法将其转化为半定规划,并证明了解的存在性。

2 面向通信的一体化波形设计

除了面向感知的一体化波形设计研究之外,许多场景也需要实现以通信为主、感知为辅的功能。目前此方向的研究大多是基于 OFDM 波形,或者在 OFDM 基础上做出一定的改进。在一定雷达功能约束的条件下,如何设计波形来优化太赫兹一体化系统的频带利用率、通信速率、信号与干扰加噪声比等通信性能,在以通信为主的场景下至关重要。

2.1 基于现有通信信号的波形设计

2.1.1 基于传统正交频分复用波形

OFDM 凭借其抗多径衰落、调制效率高、频带宽等优点被广泛应用于太赫兹通信领域,成为太赫兹雷达通信一体化共用波形的设计焦点之一^[55]。

文献[55]提出基于 OFDM 的一体化系统,通过对回波通信信息进行补偿和解相干处理,并利用子空间投影,实现对目标的距离和速度联合高分辨率估计。文献[56]通过动态星座扩展,调整星座点位置,以减小相同相位出现的概率,降低 OFDM 峰均比。此外,文献[57]采用混沌相位编码调制方式,

从混沌序列中获取相位码,实现了较低水平的峰值平均包络功率比和较低的旁瓣电平,同时保持了较高的雷达分辨率和抗干扰能力。由于不同子载波上的随机通信信息会影响模糊函数,从而降低感知性能,文献[58]提出通过预调制的方式保证不同通道间通信信息的良好自相关性和互相关性,从而削弱了通信对于感知的影响。

OFDM 在通信和雷达中有不同的状态,一般在通信中是连续的,在雷达中是不连续的脉冲状,所以在 OFDM 通信雷达一体化系统对发射天线和接收天线之间的距离有很高的要求。多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)天线结构的系统在分集增益、自由度和通信速率等方面都有良好的表现,同时太赫兹频段的波长更短,在相同设备尺寸下能够集成更多的天线,有潜力充分发挥 MIMO 的技术优势,近年来,太赫兹 MIMO OFDM 越来越多地被应用于通信感知一体化系统的设计^[59-61]。

基于 MIMO 和 OFDM 融合的一体化系统在文献[62]中初步实现,利用 MIMO 雷达发射的波束主瓣进行目标感知、利用副瓣强度进行通信,相当于幅度调制。此外,文献[63]用不同的加权向量实现相位调制。在上述 2 种一体化系统中,一个通信符号由若干雷达脉冲表示,所以通信速率较低,且只能实现雷达的测距功能。为保证不同天线间的正交性,文献[64]设计了多天线步进频率 OFDM 通信信号,并提出了感知目标距离和角度的精估计算法。MIMO OFDM 一体化系统中保证不同天线间的正交性是必不可少的;文献[65]中通过对时频块资源的随机选取,保证同频带不同天线间的正交性。在与太赫兹技术结合方面,Yuan 等^[59]基于宽带太赫兹信道模型,设计了一种考虑各子载波信道状态信息的码本搜索算法,该算法在接收信号微弱的情况下能够实现更低的计算复杂度。

2.1.2 基于改进的正交频分复用波形

恒包络正交频分复用(CE-OFDM, constant envelope-orthogonal frequency division multiplexing)就是在恒包络信号的相位中植入 OFDM 信号,在接收端可以通过接收信号相位提取到通信数据。文献[66]表明 CE-OFDM 波形可以改善由传统 OFDM 带来的峰值平均功率比高、高功率放大器出现非线性失真等问题,提出的一体化系统实现了多径信道中的高速率数据传输,并且具有较高的检测分辨率。

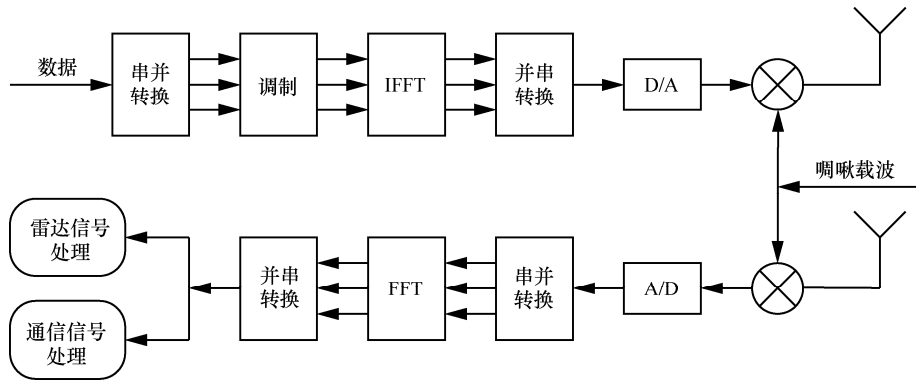


图 3 OFDM 一体化信号处理流程

MIMO OFDM 太赫兹通信雷达一体化系统中，为保证较高方位分辨率，要求波形具有恒定包络且正交。文献[67]提出将发射信号经 OFDM 调制，然后与线性调频信号混频后到达发射天线；接收端采用与发射端相同的信号进行混频，然后通过快速傅里叶变换（FFT, fast Fourier transform）处理和解星座获得数据，其信号处理流程如图 3 所示。但雷达需要对整个一体化信号进行匹配处理，然而调制数据的随机性会对模糊函数性能造成影响，文献[67]通过平均模糊函数对损失的雷达性能做出了评估。该方法要求 OFDM 载波间隔等于线性调频信号带宽，由于调频连续波的频谱并不发生重叠，因此频谱利用率很低，需要进行进一步的优化。

文献[68]提出了多斜率键控调制的调频连续波一体化系统，感知的目标信息由差拍处理后的频率值来获得，目标速度由相邻脉冲相位差进行估计。通过不同斜率的相关处理解调得到通信数据。正交啁啾分复用（OCDM, orthogonal Chirp division multiplexing）类似于 OFDM，将不同的 Chirp 信号进行复用，不同的是 OFDM 以傅里叶变换为基础，OCDM 以菲涅尔变换为基础，通过比较 2 个变换的核心公式可以得到，OCDM 系统可以在 OFDM 系统的基础上增加 2 个附加相位模块来实现^[69]。OCDM 系统原理如图 4 所示，其中 θ_i ($i=1,2$) 为菲涅尔变换相比于傅里叶变换的附加相位矩阵， θ_i^{-1} ($i=1,2$) 为对应的逆矩阵。

文献[70]提出的 OCDM 通信雷达一体化系统是复用方式的一体化，可以进行通信数据获取和雷达图像生成，与传统 OFDM 一体化系统相比，有更低的误码率值，但计算复杂度要求和旁瓣电平更高。文献[69]分析了能够提高雷达分辨率精度的周期图和多信号分类（MUSIC, multi-signal classification）

雷达信号处理算法，OCDM 感知通信一体化复用系统信号处理过程如图 5 所示。仿真结果证明，MUSIC 更适合于高信噪比场景，而周期图方法更适用于太赫兹系统的低信噪比场景。

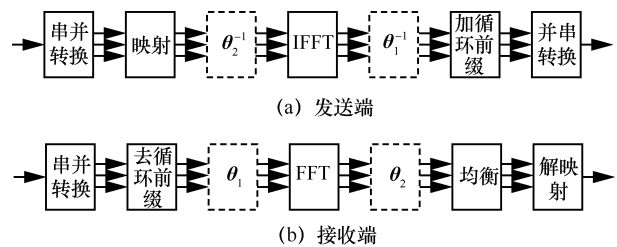


图 4 OCDM 系统原理

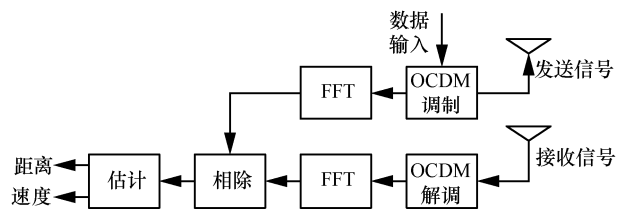


图 5 OCDM 感知通信一体化复用系统信号处理过程

2.2 通信性能优化的波形设计

雷达和通信系统之间共享频谱资源是解决频谱拥塞的一个重要方法。上文所述 CE-OFDM 一体化波形可以改善传统 OFDM 峰均比过大的问题，但其通常以牺牲频谱资源为前提。所以在保证感知功能的前提下，如何提高频谱资源成为一体化波形设计中的重要问题。文献[68]中调制斜率的改变会导致信号带宽改变，损失系统频带利用率。文献[71]中通过相位调制以及相关系统参数调节，对信号峰均比和频谱效率进行折中处理，分析了调制指数对 2 个性能指标的影响。文献[72]提出通过干扰对齐预编码实现多雷达系统和多通信系统之间的频谱共享。

SINR 作为通信系统中重要的技术指标,也是通信雷达一体化设计中优化的关键问题。文献[73]通过预编码技术最大化 SINR;文献[74]在 MIMO 通信雷达一体化系统中利用交替迭代算法实现 SINR 最大化,其中通信运用随机单位波形矩阵处理信号,雷达运用欠奈奎斯特采样矩阵处理信号。为解决优化过程中出现的非凸问题,文献[75]采用深度学习和半正定规划方法设计恒模 MIMO OFDM 波形,该波形能够在低信噪比条件下得到更高的 SINR。

通信速率也是衡量通信质量的重要指标,文献[76]采用雷达回波辅助波束成形,相比传统的基于纯通信协议的波束跟踪,能够大幅减少导频的影响,提升通信速率。文献[77]开发的共用雷达波形,实现了较大的频谱利用率和通信速率。文献[78]在文献[77]的基础之上采用连续频谱算法,在提高波形设计计算效率的同时,使最优通信速率大幅提升。文献[79]通过复合速率衡量一体化系统中的通信性能,复合速率反映雷达产生干扰的间歇性,在雷达 SINR 的约束下设计雷达波形和通信系统编码矩阵实现复合速率最大化。太赫兹 MIMO OFDM 具有明显的波束斜视效应,即不同的子载波传播方向不同,采用传统的编码技术会造成严重的增益损耗^[60-61]。文献[60]设计了稀疏天线结构以及模拟/数字混合预编码实现通信速率最大化。文献[61]验证了在波束斜视效应下传统的空间稀疏预编码性能下降,提出利用基向量逼近最优预编码/组合器,以减轻波束斜视效应。

3 接收端信号处理技术

3.1 通信信号接收处理技术

在本文讨论的一体化波形共用的场景中,接收端雷达回波和通信信号共存,接收机需要对同时接收到的雷达回波和通信信号进行分离,并且在通信接收端需要抑制雷达回波的干扰,从而降低通信接收端的误码率。根据雷达和通信系统是否共享相对位置、传输波形和信道状态等信息,可以将通信接收端分为协作和非协作 2 种模式。

针对协作模式,雷达干扰是高幅度窄脉冲的周期性干扰,所以可以将这种情况下的雷达干扰看作加性信号。文献[80]基于单载波系统,研究雷达系统对通信接收机性能的影响,并进一步考虑了脉冲干扰相位的不确定性,设计的二维信号星座能够更

好地处理未知雷达干扰,在不同的条件约束下实现了传输速率最大化、误码率最小化。文中验证了低功率雷达干扰优化设计的星座趋向于同心六边形,高功率情况下趋向于非等间距脉冲幅度调制(PAM, pulse amplitude modulation)形状,而中等功率情况下介于二者之间。这些结果的发现对通信雷达的协同有重要作用。

针对非协作模式,文献[73]基于多未知雷达干扰通信接收端的模型,提出基于压缩感知和原子范数约束的优化算法,实现了在雷达信号稀疏情况下,恢复通信原始信号并消除雷达干扰的目的。文献[73]还提出了联合波形估计和解调的 2 种算法,分别基于并网压缩感知技术和压缩感知技术实现了更好的误码率性能。文献[81]介绍的 2 种算法利用了干扰的适当表示以及包含了数据块误差的向量的稀疏性,同样提高了通信性能。

同时,通信速率提升要求接收机性能的提升,为应对太赫兹一体化信号特别是高阶调制信号在产生和传输中的信号损伤,通信信号的接收需要精度更高、失真更小的数字估计和补偿技术,以克服信号畸变,提升传输性能。常用数字下变频、I/Q 补偿、信道均衡、载波信号恢复算法链实现高性能数字接收^[7,82]。

3.2 雷达信号接收处理技术

雷达接收端常通过数字信号处理方法降低通信信号和各类杂波干扰对感知性能的影响,实现对探测目标参数的高分辨估计。

降低干扰方面,雷达接收端的干扰主要包括一体化波形中的通信信息、其他一体化系统的干扰以及传输过程中的各类杂波。文献[81]将杂波视为加性噪声,讨论了杂波干扰对雷达估计速率的影响。文献[83]采用相关接收机近似发射信号以去除杂波,显著降低了噪声水平。同时,也有很多针对多用户^[47]和多系统^[84]场景下降低干扰的研究。上述讨论是基于干扰强度低于信号强度的情形,当干扰信号过强时,传统的滤波算法存在信号失真的风险^[84],可用 CLEAN 算法和匹配追踪等贪心算法,通过投影、迭代的方式消除干扰分量,当干扰在时域、频域或空域满足稀疏条件时,能够十分有效地去除干扰^[85-86]。此外,交叉方向乘法(ADMM, alternating direction method of multipliers)在 SF 雷达超分辨干扰去除中效果显著,Johnston 等^[87]讨论了 MPSK-SF 一体化波形干扰去除问题,基于机器

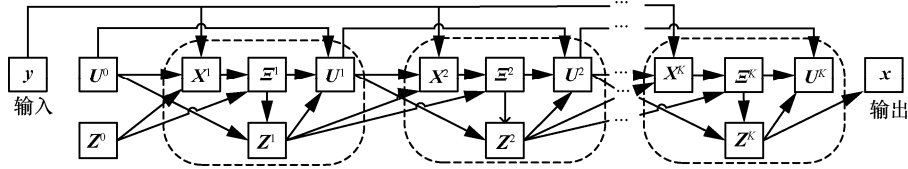


图 6 ADMM 网络数据流

学习思想设计了 ADMM 网络。ADMM 网络数据流如图 6 所示，其中 y 表示输入序列， U^k 表示双更新层， X^k 表示重建层， E^k 表示松弛层， Z^k 表示非线性变换层， $k=1,2,\dots,K$ ， x 表示输出序列。该网络将传统的 ADMM 迭代算法展开为一系列神经层，利用已有数据和基于梯度的方法对网络系数和超参数进行更新，结果表明，其计算误差和成本明显低于传统 ADMM 算法。

目标参数估计方面，文献[88]考虑多普勒频移较低的情形，选择 OFDM 一体化波形的部分子载频进行处理，实现时延和多普勒估计。文献[89]证明了基于 FFT 的脉冲压缩方法与匹配滤波等效，有效地提取目标的距离和速度信息。为进一步提高分辨率，文献[55]将接收回波投影到子空间，实现对目标参数的超分辨估计。基于数据符号的圆周相关能够有效抑制模糊函数、拓展雷达探测距离^[90]，Mercier 等^[91]讨论了接收端常用提高探测性能的各类滤波器，结果表明基于圆周相关的滤波器总体表现更好。将机器学习方法用于一体化系统的目标参数估计也受到研究人员的关注^[92-93]，这类方法能够有效降低太赫兹传输中面临的信号损伤、非线性干扰等问题，但往往对信噪比有一定的要求。文献[92]将分层深度学习的方案用于一体化信号识别与处理，接收信号经傅里叶同步压缩变换 (FSST, Fourier synchro-squeezing transformation) 和卷积神经网络 (CNN, convolutional neural network) 处理后，能够提取 OFDM 波形的前缀长度、子载波数、子载波间隔等参数。文献[93]利用残差注意力多尺度累积卷积网络 (RamNet, residual attention multiscale accumulation convolutional network) 提取更丰富的一体化信号特征，实验结果表明 RamNet 能够在严重信道损伤的情况下识别波形参数，更适合在太赫兹一体化系统中应用。Wu 等^[94]设计了一种两级多任务的神经网络功率接收机用于目标参数估计，该接收机能够有效降低太赫兹一体化系统的非线性噪声。

4 感知通信一体化系统设计与实现

本节展示一种 97 GHz 基于 OFDM 信号的感知

通信一体化系统，系统实现了 0.042 m 的距离分辨率和 0.79 m/s 的速度分辨率，通过 16-QAM 加载通信数据，在 8.08 Gbit/s 的传输速率下，实现了低于 SD-FEC 阈值的误码率。该一体化实验验证系统为下一步太赫兹频段一体化系统的设计与实现提供了思路。

OFDM 一体化系统实验原理如图 7 所示，系统实验参数如表 1 所示。对 16-QAM OFDM 基带波形进行上采样后通过 I/Q 混频器得到 3 GHz 的中频信号，之后将中频信号输入 120 GSa/s 采样率的任意波形发生器 (AWG, arbitrary waveform generator)。在辐射到自由空间前，利用 W 波段混频器与 94 GHz 信号混频得到 97 GHz 的信号，通过 20 dB 增益的 W 波段放大器将信号功率抬升到 0 附近。收发端采用一对增益为 30 dBi 的锥形喇叭天线实现信号的辐射与接收。接收天线接收到的回波使用与发送端相同的 W 波段混频器降至中频，对数字采样示波器 (DSO, digital sampling oscilloscope) 按照 16 GSa/s 采样率得到的数字信号进行重采样、I/Q 混频处理，得到目标运动参数或通信数据，采用插入导频的方式在频域进行信道估计，利用信道矩阵实现对目标距离和速度的估计。

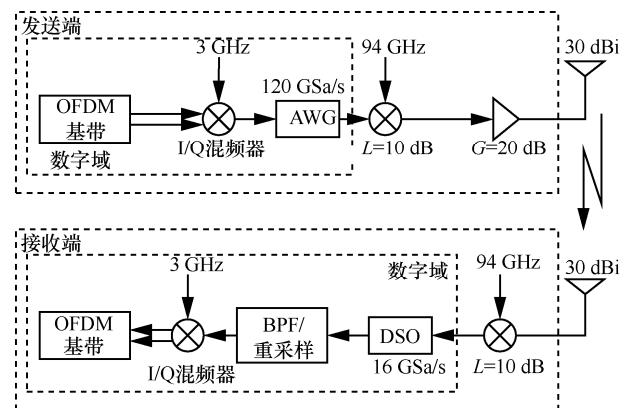


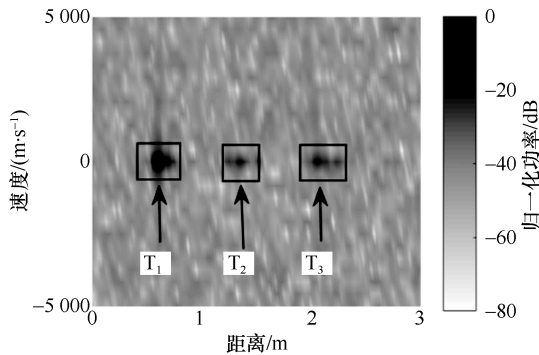
图 7 OFDM 一体化系统实验原理

雷达感知性能测试结果如图 8 所示，其中图 8(a) 为单一静止目标测试结果，图 8(b) 为运动目标和静止目标同时测试结果。将目标放置在距天线 0.605 m 处

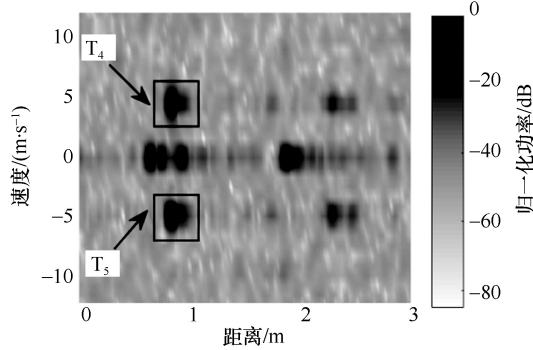
得到图 8(a)所示的测试结果,其中 T_1 为目标的真实距离像, T_2 和 T_3 分别由目标的二次反射和墙壁反射产生。通过传送带让目标 (0.015 m×0.02 m) 以 5 m/s 的速度做匀速运动得到图 8(b)所示的结果,由于接收端使用混频器同时产生了正负边带,因此出现了 T_4 和 T_5 这 2 个对称的速度像,可通过使用 W 波段 I/Q 调制器或外加滤波器消除运动方向的不确定性。

表 1 OFDM 一体化系统实验参数

参数名	参数值
采样频率 F_s /GHz	6
载波频率 f_c /GHz	97
子载波间隔 Δf /MHz	11.718 75
有源子载波数 N_{ac}	300
带宽 B /GHz	3.9
有源子载波带宽 /GHz	3.51
带宽利用率	90%
OFDM 符号持续时间/ μ s	0.106 6
循环前缀	128 个点, 0.021 3 μ s
上采样因子	20
距离分辨率/m	0.042
速度分辨率/($m \cdot s^{-1}$)	0.79



(a) 单一静止目标测试结果



(b) 运动目标和静止目标同时测试结果

图 8 雷达感知性能测试结果

归一化信号频谱与通信接收端星座图如图 9 所示,其中深色代表收发端相距 0.6 m 时的实验结果,浅色代表不考虑实验空间墙体反射影响的仿真结果。实验结果表明,系统在 8.08 Gbit/s 比特率下的误码率为 0.01,低于 SD-FEC 的阈值 1.5×10^{-2} ,而在没有背景反射的情形下,仿真误码率能够达到 3.6×10^{-4} 。

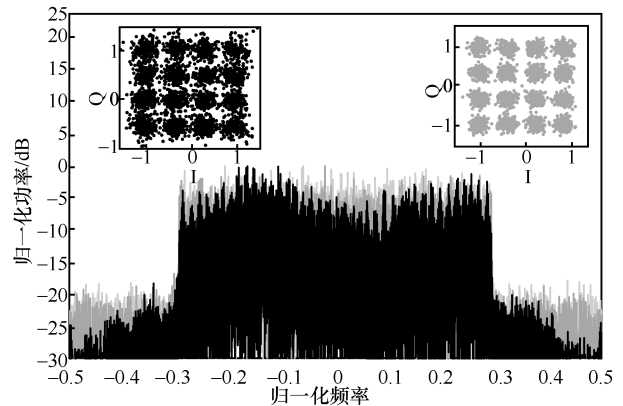


图 9 归一化信号频谱与通信接收端星座图

5 结束语

本文综述了近些年感知通信一体化的研究进展,重点关注波形设计和接收端信号处理技术;分别基于感知和通信 2 个方面,阐述了国内外一体化波形的典型设计与优化方案;从提高一体化整体性能出发,介绍了雷达和通信接收端信号处理技术;最后展示了一种 97 GHz 基于 OFDM 信号的一体化系统测试结果。

感知通信一体化系统的研究正在不断地向前推进,结合在不同领域的实际运用情况,未来的感知通信一体化系统具有以下发展趋势。

1) 工作频段向更高频段发展。典型地,太赫兹波具有丰富的带宽资源,支持 Tbit/s 的通信速率,被认为是 6G 重要的备选方案,同时支持毫米级分辨率成像,能更有效地服务于未来感知通信一体化功能。

2) 单功能向多功能转变。过去对于一体化系统功能的实现主要集中在大容量高速通信、距离和速度感知。未来研究将在优化已有功能的基础上,增加更多功能,如角度感知、隐蔽性通信等。

3) 融合度不断提高。一体化波形设计工作将由复用波形设计转向共用波形设计,同时在接收端,雷达回波处理过程和通信信号处理过程也需要融

表 2 太赫兹感知通信一体化的关键技术挑战

技术挑战	解决方案	优点	缺点	时间	文献
信号传播损伤严重	码本搜索算法	高频谱效率, 低计算复杂度	信道良好时计算成本高	2018 年	文献[59]
	数字接收机算法链	有效应对信号损伤, 高精度低失真补偿	非实时处理	2020 年	文献[82]
	ADMM-Net	有效降低各类干扰, 计算误差和成本低于传统 ADMM 算法	要求干扰稀疏	2021 年	文献[87]
	FSST+CNN	提取特征丰富	计算量较高, 要求信噪比高	2020 年	文献[92]
	RamNet	提取特征丰富, 对信噪比要求不高	计算量高	2021 年	文献[93]
	Ku 波段通信+毫米波感知	硬件利用效率高, 信号频域分离降低处理难度	信号功率低	2021 年	文献[95]
信号功率衰减严重	MPSK-LFM	实现简单, 采用高功率放大器	通信速率不高, 功率泄露明显	2020 年	文献[35]
	最小化最坏情况系统发射功率	显著降低对系统发射功率要求, 对不同场景具有一定的稳健性	难以实现联合最优, 优化问题求解复杂	2018 年	文献[53]
	OCDM	通信速率高, 相比 OFDM 误码率更低	实现复杂度较高, 模糊函数旁瓣较高	2018 年	文献[66]
	利用深度学习和半正定规划设计恒模波形	有效求解非凸问题, 低 SNR 条件下实现高 SINR	计算量较高	2017 年	文献[74]
波束斜视效应明显	模拟/数字预编码	减轻波束斜视, 提高传输速率	需要特定天线结构	2021 年	文献[60]
	基向量逼近最优预编码/组合器	有效减轻波束斜视	只能实现渐进最优	2021 年	文献[61]

合, 进一步节省系统资源。

4) 结合机器学习方法。在干扰中正确分离雷达回波信号和通信信号是保证一体化系统性能的关键。机器学习可以统计雷达信号和通信信号特性上的不同, 进行准确分类, 从而更好地从干扰中分离信号。

综合相关研究进展可以看出, 在感知通信一体化领域, 尤其在太赫兹频段, 仍然存在许多技术挑战和难点亟待解决。

1) 太赫兹频段自身的技术难点。由于各类噪声和分子吸收效应, 太赫兹信号会产生严重的路径损耗和传播损伤, 此外, 太赫兹信号还面临着波束斜视效应明显等问题。表 2 展示了太赫兹感知通信一体化的关键技术挑战和典型解决方案的优缺点。

2) 雷达和通信之间干扰严重。雷达回波和通信信号共享频谱, 接收端在已知通信信号模型时可以较好地分离出感知信息, 但当通信信息模糊时, 就会造成相互干扰。同时, 在一体化系统中处理通信信号会面临频谱扩展的问题, 当扩展的频谱超过雷达带宽时, 会对带宽之外的其他用户造成干扰。

3) “不失真”的矛盾。雷达是对信道信息的探测, 通信是对信源信息的探测, 都有“最大化”且

“不失真”获取信息的要求。通信和雷达都可以通过提高信噪比和带宽来实现最大化。但在不失真方面, 雷达要求模糊函数的旁瓣低, 否则高旁瓣和伪峰都会造成感知虚假目标, 而通信为标定或补偿信道, 常常在通信信号中加入导频、循环前缀等信号, 导致产生过多的伪峰。

4) 一体化性能评估的基础研究。在以往一体化系统的研究中, 对雷达和通信系统分别采用不同的指标评估系统性能, 目前虽然有工作在研究一体化评估指标, 如复合速率, 以期兼顾两方面的功能, 但这类一体化指标与检测概率、均方误差等常用指标之间的关系并不明确, 需要进一步研究。

随着社会信息化程度的不断深化, 感知通信一体化程度必将越来越高, 功能也越来越丰富, 未来有望得到广泛应用, 并发挥重要作用。

参考文献:

[1] ZHANG Q X, SUN H, WEI Z Q, et al. Sensing and communication integrated system for autonomous driving vehicles[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1278-1279.

[2] STURM C, WIESBECK 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.

[3] BAQUERO B C, RIIHONEN T, TURUNEN M, et al. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: challenges, solutions,

- and measurements[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(10): 4042-4054.
- [4] JUNIOR M M, GUO B, ZHANG C J, et al. Interference cancellation based spectrum sharing for massive MIMO communication systems[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3584.
- [5] SARIEDDEEN H, ALOUINI M S, AL-NAFFOURI T Y. An overview of signal processing techniques for terahertz communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(10): 1628-1665.
- [6] WANG S W, LU Z J, IDREES N, et al. Photonic generation and de-chirping of broadband THz linear-frequency-modulated signals[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 881-884.
- [7] LIU K X, JIA S, WANG S W, et al. 100 Gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350-GHz band with extended reach[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(11): 1064-1067.
- [8] ZHANG H Q, ZHANG L, WANG S W, et al. Tbit/s multi-dimensional multiplexing THz-over-fiber for 6G wireless communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5783-5790.
- [9] CHACCOUR C, SOORKI M N, SAAD W, et al. Seven defining features of terahertz (THz) wireless systems: a fellowship of communication and sensing[J]. *arXiv Preprint*, arXiv:2102.07668, 2021.
- [10] MAO T, CHEN J, WANG Q, et al. Waveform design for joint sensing and communications in the Terahertz band[J]. *arXiv Preprint*, arXiv:2106.01549, 2021.
- [11] JIANG H B, CAI C, MA X Q, et al. Smart home based on WiFi sensing: a survey[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 13317-13325.
- [12] LIU F, MASOUIROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3834-3862.
- [13] WANG Y Y, DONG Z, DING J J, et al. Photonics-assisted joint high-speed communication and high-resolution radar detection system[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(24): 6103.
- [14] JIA S, WANG S W, LIU K X, et al. A unified system with integrated generation of high-speed communication and high-resolution sensing signals based on THz photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4549-4556.
- [15] 杨慧婷, 周宇, 谷亚彬, 等. 参数调制多载波雷达通信共享信号设计[J]. *雷达学报*, 2019, 8(1): 54-63.
- YANG H T, ZHOU Y, GU Y B, et al. Design of integrated radar and communication signal based on multicarrier parameter modulation signal[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 54-63.
- [16] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Signaling strategies for dual-function radar communications: an overview[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 36-45.
- [17] HUANG T Y, SHLEZINGER N, XU X Y, et al. MAJoRCom: a dual-function radar communication system using index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3423-3438.
- [18] ZHANG J A, CANTONI A, HUANG X J, et al. Framework for an innovative perceptive mobile network using joint communication and sensing[C]//*Proceedings of 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [19] YAO Y, ZHAO J H, WU L N. Adaptive waveform design for MIMO radar-communication transceiver[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1957.
- [20] YUAN X, FENG Z Y, ZHANG J A, et al. Spatio-temporal power optimization for MIMO joint communication and radio sensing systems with training overhead[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 514-528.
- [21] SIT Y L, NUSS B, ZWICK T. On mutual interference cancellation in a MIMO OFDM multiuser radar-communication network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3339-3348.
- [22] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望[J]. *雷达学报*, 2021, 10(3): 467-484.
- LIU F, YUAN W J, YUAN J H, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: overview and prospect[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 467-484.
- [23] 杨超, 张逸格, 郑霖. 基于波形共用机制的雷达通信一体化研究进展[J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(2): 131-140.
- YANG C, ZHANG Y G, ZHENG L. Research progress on shared waveform designing for joint radar communication[J]. *Radio Communications Technology*, 2021, 47(2): 131-140.
- [24] DWIVEDI S, BARRETO A N, SEN P, et al. Target detection in joint frequency modulated continuous wave (FMCW) radar-communication system[C]//*Proceedings of 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 277-282.
- [25] KUMARI P, CHOI J, GONZÁLEZ-PRELCIC N, et al. IEEE 802.11ad-based radar: an approach to joint vehicular communication-radar system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3012-3027.
- [26] TANG L, ZHANG K, DAI H P, et al. Analysis and optimization of ambiguity function in radar-communication integrated systems using MPSK-DSSS[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(6): 1546-1549.
- [27] SADDIK G N, SINGH R S, BROWN E R. Ultra-wideband multifunctional communications/radar system[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, 55(7): 1431-1437.
- [28] NIE H J, ZHANG F Z, YANG Y, et al. Photonics-based integrated communication and radar system[C]//*Proceedings of 2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [29] CHEN X B, WANG X M, XU S F, et al. A novel radar waveform compatible with communication[C]//*Proceedings of 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 177-181.
- [30] CHEN X B, LIU Z P, LIU Y M, et al. Energy leakage analysis of the radar and communication integrated waveform[J]. *IET Signal Processing*, 2018, 12(3): 375-382.
- [31] ALABD M B, NUSS B, WINKLER C, et al. Partial chirp modulation technique for chirp sequence based radar communications[C]//*Proceedings of 2019 16th European Radar Conference (EuRAD)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 173-176.
- [32] MA Q C, LU J B, YI M X. Integrated waveform design for 64QAM-LFM radar communication[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1615-1625.
- [33] LI Q Y, ZHANG Y, PAN C Y, et al. Waveform design for high speed radar-communication integration[C]//*Proceedings of 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [34] GU Y B, ZHANG L R, ZHOU Y, et al. Embedding communication

- symbols into radar waveform with orthogonal FM scheme[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(21): 8709-8719.
- [35] UYSAL F. Phase-coded FMCW automotive radar: system design and interference mitigation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(1): 270-281.
- [36] SAHIN C, JAKABOSKY J, MCCORMICK P M, et al. A novel approach for embedding communication symbols into physical radar waveforms[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference (Radar-Conf)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1498-1503.
- [37] LI Q Y, DAI K R, ZHANG Y, et al. Integrated waveform for a joint radar-communication system with high-speed transmission[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(4): 1208-1211.
- [38] LIU Y, CAO N, MAO M H, et al. Novel radar and communication integration waveform based on shaped octal phase-shift keying modulation[J]. *Physical Communication*, 2020, 38: 100985.
- [39] AL-HOURANI A, EVANS R J, MORAN B, et al. Efficient range-Doppler processing for random stepped frequency radar in automotive applications[C]//*Proceedings of 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [40] 王诏丰, 廖桂生, 杨志伟. 一种步进 MFSK 调制的雷达通信共享信号设计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(8): 1758-1763.
WANG Z F, LIAO G S, YANG Z W. Signal design method for integrated radar and communication based on step multi-frequency shift keying[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1758-1763.
- [41] HU F, CUI G L, YE W, et al. Integrated radar and communication system based on stepped frequency continuous waveform[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1084-1087.
- [42] HAN T, SENANAYAKE R, SMITH P, et al. Combined radar and communications with phase-modulated frequency permutations[J]. *arXiv Preprint*, arXiv:2107.14396, 2021.
- [43] SKARIA S, AL-HOURANI A, EVANS R J, et al. Interference mitigation in automotive radars using pseudo-random cyclic orthogonal sequences[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(20): 4459.
- [44] CHEN X L, GUAN J, BAO Z H, et al. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1002-1018.
- [45] ZHANG X W, WANG K Z, GAO Y S, et al. Optimal waveform design oriented toward cognitive radar in fractional Fourier domain[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [46] GAGLIONE D, CLEMENTE C, ILIOUDIS C V, et al. Waveform design for communicating radar systems using fractional Fourier transform[J]. *Digital Signal Processing*, 2018, 80: 57-69.
- [47] STRIANO P, ILIOUDIS C V, CLEMENTE C, et al. Fractional Fourier transform based joint radar communication system for multi-user automotive applications[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Radar Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [48] HUANG K W, BICÁ M, MITRA U, et al. Radar waveform design in spectrum sharing environment: Coexistence and cognition[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1698-1703.
- [49] YANG Y, BLUM R S. MIMO radar waveform design based on mutual information and minimum mean-square error estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 330-343.
- [50] SHI C G, SALOUS S, WANG F, et al. Low probability of intercept-based adaptive radar waveform optimization in signal-dependent clutter for joint radar and cellular communication systems[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016, 2016(1): 111.
- [51] LIU F, LIU Y F, LI A, et al. Cramér-Rao bound optimization for joint radar-communication beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 70: 240-253.
- [52] KANG B, RANGASWAMY M. Radar waveform design under communication sum capacity constraint[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 2795-2806.
- [53] SHI C G, WANG F, SELLATHURAI M, et al. Power minimization-based robust OFDM radar waveform design for radar and communication systems in coexistence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(5): 1316-1330.
- [54] HE Q, WANG Z, HU J B, et al. Performance gains from cooperative MIMO radar and MIMO communication systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(1): 194-198.
- [55] 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.
LIU Y J, LIAO G S, YANG Z W, 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.
- [56] YANG Y J, MEI J J, HU D P, et al. Research on reducing PAPR of QAM-OFDM radar-communication integration sharing signal[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(21): 8042-8046.
- [57] ZHAO J J, HUO K, LI X. A chaos-based phase-coded OFDM signal for joint radar-communication systems[C]//*Proceedings of 2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1997-2002.
- [58] TIAN X X, SONG Z H. On radar and communication integrated system using OFDM signal[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 318-323.
- [59] YUAN H, YANG N, YANG K, et al. Hybrid beamforming for MIMO-OFDM terahertz wireless systems over frequency selective channels[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [60] ZHANG R Z, HAO W M, SUN G C, et al. Hybrid precoding design for wideband THz massive MIMO-OFDM systems with beam squint[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(3): 3925-3928.
- [61] WAN Q, FANG J, CHEN Z, et al. Hybrid precoding and combining for millimeter wave/sub-THz MIMO-OFDM systems with beam squint effects[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 8314-8319.
- [62] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. A dual function radar-communications system using sidelobe control and waveform diversity[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference (Radar-Conf)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1260-1263.
- [63] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Phase-modulation based dual-function radar-communications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(8): 1411-1421.
- [64] YATTOUN I, LABIA T, PEDEN A, et al. A Millimetre communication system for IVC[C]//*Proceedings of 2007 7th International Conference*

- on ITS Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-6.
- [65] LIU Y J, LIAO G S, YANG Z W. Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems[C]//Proceedings of 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [66] HUANG Y X, HU S, MA S Y, et al. Constant envelope OFDM Rad-Com fusion system[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018: 104.
- [67] WANG W Q, ZHI Z, ZHANG S S. OFDM chirp waveform diversity for co-designed radar-communication system[C]//Proceedings of 2017 18th International Radar Symposium (IRS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [68] FAN Y W, BAO J C, ALJUMAILY M S, et al. Communications via frequency-modulated continuous-wave radar in millimeter wave band[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [69] XING O Y, JIAN Z. Orthogonal chirp division multiplexing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3946-3957.
- [70] DE OLIVEIRA L G, ALABD M B, NUSS B, et al. An OCDM radar-communication system[C]//Proceedings of 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [71] DIDA M A, HAO H, WANG X, et al. Constant envelope chirped OFDM for power-efficient radar communication[C]//Proceedings of 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 298-301.
- [72] CUI Y H, KOIVUNEN V, JING X J. Interference alignment based spectrum sharing for MIMO radar and communication systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [73] ZHENG L, LOPS M, WANG X D. Adaptive interference removal for uncoordinated radar/communication coexistence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2018, 12(1): 45-60.
- [74] LI B, PETROPULU A P. Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2846-2864.
- [75] ZHONG K, ZHANG W J, ZHANG Q P, et al. MIMO radar waveform design via deep learning[C]//Proceedings of 2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [76] LIU F, YUAN W J, MASOUIROS C, et al. Radar-assisted predictive beamforming for vehicular links: communication served by sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7704-7719.
- [77] YUAN W J, LIU F, MASOUIROS C, et al. Bayesian predictive beamforming for vehicular networks: a low-overhead joint radar-communication approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(3): 1442-1456.
- [78] 赵玉振, 陈龙永, 张福博, 等. 一种基于 OFDM-chirp 的雷达通信一体化波形设计与处理方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 453-466.
- ZHAO Y Z, CHEN L Y, ZHANG F B, et al. A new method of joint radar and communication waveform design and signal processing based on OFDM-chirp[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 453-466.
- [79] CHIRIYATH A R, RAGI S, MITTELMANN H D, et al. Radar waveform optimization for joint radar communications performance[J]. Electronics, 2019, 8(12): 1498.
- [80] NARTASILPA N, SALIM A, TUNINETTI D, et al. Communications system performance and design in the presence of radar interference[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 4170-4185.
- [81] CHIRIYATH A R, PAUL B, BLISS D W. Joint radar-communications information bounds with clutter: the phase noise menace[C]//Proceedings of 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [82] JIA S, ZHANG L, WANG S W, et al. 2×300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(17): 4715-4721.
- [83] PALMER J E, HARMES H A, SEARLE S J, et al. DVB-T passive radar signal processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8): 2116-2126.
- [84] LI Y C, ZHENG L, LOPS M, et al. Interference removal for radar/communication co-existence: the random scattering case[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4831-4845.
- [85] BLISS D W. Cooperative radar and communications signaling: the estimation and information theory odd couple[C]//Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 50-55.
- [86] LI Y C, WANG X D, DING Z G. Multi-target position and velocity estimation using OFDM communication signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 1160-1174.
- [87] JOHNSTON J, LI Y C, LOPS M, et al. ADMM-net for communication interference removal in stepped-frequency radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 2818-2832.
- [88] LELLOUCH G, TRAN P, PRIBIC R, et al. OFDM waveforms for frequency agility and opportunities for Doppler processing in radar[C]//Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [89] PFEFFER C, FEGER R, STELZER A. A stepped-carrier 77-GHz OFDM MIMO radar system with 4 GHz bandwidth[C]//Proceedings of 2015 European Radar Conference (EuRAD). Piscataway: IEEE Press, 2015: 97-100.
- [90] SEARLE S, PALMER J, DAVIS L, et al. Evaluation of the ambiguity function for passive radar with OFDM transmissions[C]//Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1040-1045.
- [91] MERCIER S, BIDON S, ROQUE D, et al. Comparison of correlation-based OFDM radar receivers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(6): 4796-4813.
- [92] KONG G, JUNG M, KOIVUNEN V. Waveform classification in radar-communications coexistence scenarios[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [93] HUYNH-THE T, HUA C H, DOAN V S, et al. Accurate deep CNN-based waveform recognition for intelligent radar systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(9): 2938-2942.
- [94] WU Y Z, LEMIC F, HAN C, et al. Sensing integrated DFT-spread OFDM waveform and deep learning-powered receiver design for terahertz integrated sensing and communication systems[J]. arXiv Pre-

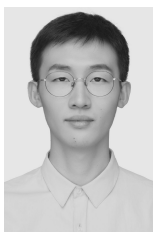
print, arXiv:2109.14918, 2021.

[95] LEI M Z, LI A J, CAI Y C, et al. Integrated wireless communication and mmW radar sensing system for intelligent vehicle driving enabled by photonics[C]//Proceedings of 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-3.

[作者简介]



余显斌 (1976-), 男, 湖北咸宁人, 博士, 浙江大学教授、博士生导师, 主要研究方向为太赫兹光子学、光纤通信、毫米波/太赫兹技术及其应用。



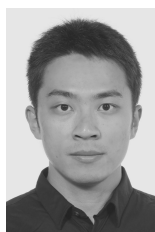
吕治东 (1998-), 男, 吉林临江人, 浙江大学硕士生, 主要研究方向为太赫兹感知通信一体化技术。



李涟漪 (1999-), 女, 吉林吉林人, 浙江大学硕士生, 主要研究方向为太赫兹感知通信一体化技术。



Nazar Muhammad Idrees (1979-), 男, 巴基斯坦人, 博士, 浙江大学在站博士后, 主要研究方向为太赫兹无线通信信号处理、基于 OFDM 的通信感知一体化等。



张鹿 (1993-), 男, 安徽亳州人, 浙江大学副研究员、博士生导师, 主要研究方向为光子太赫兹通信与感知、光子 AI 计算、光通信与光网络。