面向6G通感一体化的OTFS技术综述

廖勇，陈锦洋
（重庆大学微电子与通信工程学院，重庆 401331）

摘要：第六代移动通信系统（sixth-generation mobile communication system，6G）在高速移动和复杂时变信道中，既需保证数据可靠传输，也要完成较高精度的环境感知，通感一体化（integrated sensing and communication，ISAC）因此成为未来无线通信的一个重要研究方向。正交时频空（orthogonal time frequency space，OTFS）调制把通信信道和感知回波放在时延-多普勒域中描述，使高动态场景中的通感联合处理可以采用共同的参数表示方式。本文综述面向6G的OTFS-ISAC研究，首先介绍系统模型、通信与感知性能和评价指标；随后重点讨论OTFS-ISAC关键技术，包括波形设计与资源分配、通感联合接收、网络协同与安全保障以及学习型通感技术；最后结合典型高动态应用场景，梳理当前技术挑战并展望后续发展趋势。

关键词：第六代移动通信系统；通感一体化；正交时频空；高移动通信
中图分类号：TN929.5
文献标志码：A

A Survey of OTFS Technologies for 6G Integrated Sensing and Communication

LIAO Yong, CHEN Jinyang
School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China

Abstract: Sixth-generation mobile communication systems (6G) must support reliable data transmission and high-precision environmental sensing in high-mobility environments with complex time-varying channels. Integrated sensing and communication (ISAC) has therefore become an important research direction for future wireless communications. Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation represents communication channels and sensing echoes in the delay-Doppler domain, providing a common parameter representation for joint communication and sensing processing in highly dynamic scenarios. This paper reviews OTFS-ISAC research for 6G. It first introduces system models, communication and sensing performance, and evaluation metrics. It then focuses on key OTFS-ISAC technologies, including waveform design and resource allocation, joint communication and sensing reception, network cooperation and security, and learning-based ISAC technologies. Finally, it discusses current technical challenges and outlines future research directions in the context of representative highly dynamic application scenarios.

Key words: sixth-generation mobile communication system, integrated sensing and communication, orthogonal time frequency space, high-mobility communication

0 引言

第六代移动通信系统（sixth-generation mobile communication system，6G）正由传统数据传输网络向融合通信、感知与智能的综合信息系统演进，需要在高动态环境中实现可靠数据传输和环境感知。通感一体化（integrated sensing and communi-

收稿日期：XXXX–XX–XX；修回日期：XXXX–XX–XX
通信作者：廖勇，liaoy@cqu.edu.cn
基金项目：重庆市自然科学基金（CSTB2023NSCQ-MSX0025）
Foundation Items：The Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2023NSCQ-MSX0025)

cation，ISAC）通过共享频谱、波形、射频和计算资源，在同一系统中完成通信、目标检测、定位与参数估计，已成为6G重要技术方向[1]。

正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing，OFDM）的标准和硬件实现已较为成熟。双选择信道中，由于多普勒扩展较大，子载波正交性会被破坏，进而产生载波间干扰（inter-carrier interference，ICI），导致信号检测和感知参数提取更难处理[2]。

正交时频空（orthogonal time frequency space，OTFS）调制先在时延-多普勒（delay-Doppler，DD）域放置信息符号，再用二维变换扩展至时频域，使每个符号能够利用一帧内的时频分集。快时变信道可由相对紧凑且稀疏的DD域关系表示[3-4]。复增益、时延和多普勒既是信道的路径参数，也能描述运动目标的感知特征，因此两项任务可采用统一的时延-多普勒参数表示[5-6]。

OTFS-ISAC中的通信与感知主要涉及三类关系。两项任务共享波形、功率和空间自由度，会造成资源耦合，因此发射端需要进行波形设计与资源分配。接收信号同时受到数据符号、通信路径及目标参数的影响，形成观测耦合，接收机需要联合完成检测和参数估计。通信路径、感知目标还与运动状态相关联，相关结果可以在不同任务及相邻帧之间复用。围绕这些问题，现有研究逐渐形成波形设计与资源分配、通感联合接收、网络协同与安全保障的技术框架，且由于机器学习与深度学习的快速发展，学习型通感技术逐渐占据主流，展现出广阔的研究前景。

OTFS-ISAC的研究已涉及车联网、低空网络等高动态场景。车辆和轨道交通的高速运动、低空网络的三维机动，以及卫星链路中的大多普勒和长时延，给系统带来的影响有所不同，可据此考察OTFS在这些环境中的适应情况；在各类场景下，连续参数估计、资源配置、状态预测和多节点协同也是需要处理的问题[7-9]。

已有综述已经从不同角度介绍了OTFS及OTFS-ISAC，为理解OTFS-ISAC模型与技术体系提供了参考。文献[4,10]侧重调制原理、收发机设计、通信性能和应用进展；文献[11]系统梳理OTFS-ISAC的系统模型、波形与代表性方案；文献[12]总结了资源优化和工程问题；文献[13-14]关注帧结构、标准接口与原型验证。然而，现有综述对波形原理、算法设计和工程实现各有侧重，模型假设、处理条件与性能结论尚缺少贯通分析，资源分配、联合接收和网络协同如何共同应对高动态场景中的通感耦合问题，也有待系统梳理。

因此，本文从系统模型、性能分析、关键技术及典型应用方面总结现有研究进展，全文框架如图1所示。首先概述OTFS-ISAC系统模型，随后分析其通信与感知性能、适用条件和评价指标；第三章介绍波形设计与资源分配、通感联合接收、网络协同与安全保障三类关键技术，并专题总结学习型通感技术；第四章介绍车联网、高铁、低空及卫星应用；最后分析技术挑战与发展趋势。

1 OTFS-ISAC系统模型

1.1 单基站基础模型

图2展示典型单基地OTFS-ISAC架构。基站以同一射频前端发射承载通信信息的OTFS信号，并接收目标回波以估计距离、径向速度和散射特性。通信终端接收通信信号，基站感知接收机处理往返回波；两类观测通过共同发射信号和传播参数结构相联系。

以下以共享发射信号为起点，说明传播与观测关系、非理想因素及模型扩展。考虑一个包含N个多普勒维网格和M个时延维网格的OTFS帧，符号间隔为T，子载波间隔为Δf，通常满足$T\Delta f=1$。设DD域待发送数据符号为$x[k,l]$，其中$k=0,1,\cdots,N-1$和$l=0,1,\cdots,M-1$分别表示多普勒索引与时延索引。发射端通过逆辛有限傅里叶变换（inverse symplectic finite Fourier transform，ISFFT）将DD域符号映射至时频（time-frequency，TF）域，可写为：

$$X[n,m]=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{k=0}^{N-1}\sum_{l=0}^{M-1}x[k,l]\exp\left\{j2\pi\left(\frac{nk}{N}-\frac{ml}{M}\right)\right\} \tag{1}$$

再经海森堡变换和发射脉冲$g_{\mathrm{tx}}(t)$得到连续时间基带信号：

$$s(t)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}X[n,m]\,g_{\mathrm{tx}}(t-nT)\,e^{j2\pi m\Delta f(t-nT)} \tag{2}$$

共享发射信号经过传播后产生终端通信观测和基站感知观测。在高移动环境中，信道同时具有时

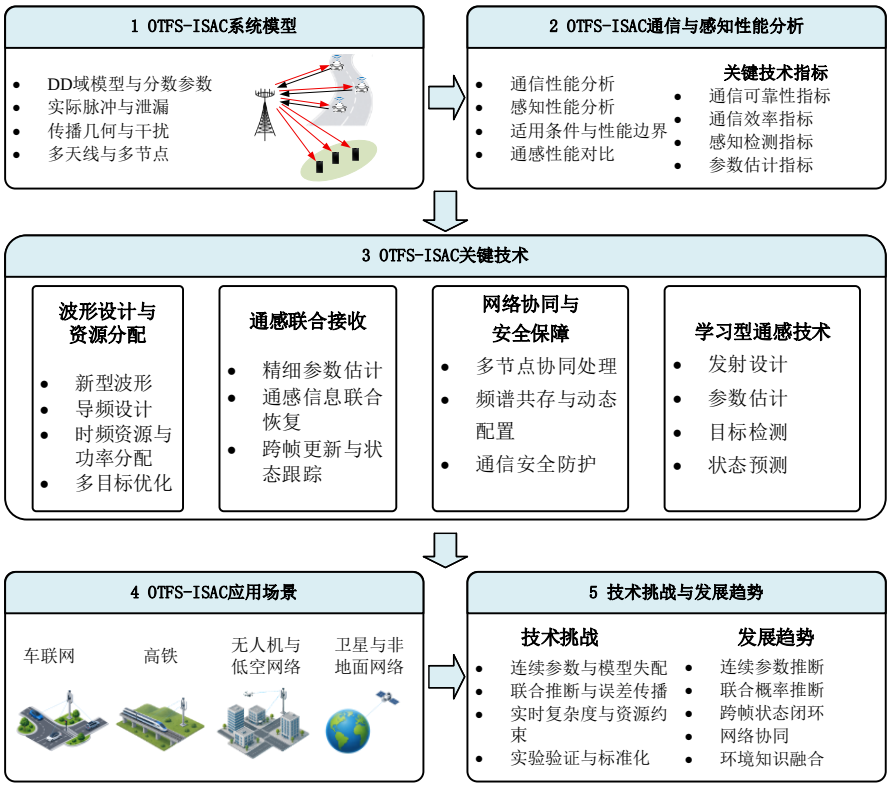


图1　全文整体架构

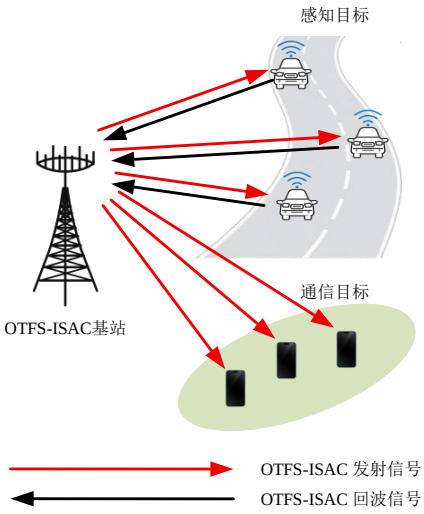


图2　OTFS-ISAC 单基地系统模型

延扩展和多普勒扩展。若存在P条有效传播路径，则DD域信道可建模为稀疏散射函数：

$$h(\tau,v)=\sum_{p=1}^{P}h_p\delta(\tau-\tau_p)\delta(v-v_p) \tag{3}$$

其中h_p、τ_p和v_p分别为第p条路径的复增益、传播时延和多普勒频移。相应接收信号为：

$$r(t)=\iint h(\tau,v)s(t-\tau)e^{j2\pi v(t-\tau)}d\tau dv+w(t) \tag{4}$$

接收端经匹配滤波、TF域采样及辛有限傅里叶变换（symplectic finite Fourier transform，SFFT）恢复DD域信号。在理想双正交脉冲且路径参数位于整数DD网格上的条件下，输入输出关系可近似写为稀疏二维移位叠加：

$$\begin{aligned}y[k,l]=&\sum_{p=1}^{P}h_p e^{j\phi_p(k,l)}\\&x\left([k-k_p]_N,[l-l_p]_M\right)+w[k,l]\end{aligned} \tag{5}$$

其中，k_p与l_p分别为离散多普勒和时延索引，$\phi_p(k,l)$为调制、脉冲成形及循环边界引入的相位项。该模型描述了OTFS信道在DD域中的稀疏性及局部耦合，结构化检测可用其稀疏移位关系作为基准；考虑连续参数和实际脉冲时，需要使用有效DD域信道矩阵，把泄漏与相位耦合计入模型。采用循环前缀（cyclic prefix，CP）时，其长度与插入方式也应计入帧边界处理。

同一发射信号照射环境后，单基地感知接收机接收到往返回波。以下采用远场、窄带、帧内参数近似不变的点目标模型，设感知区域内存在Q个目

标，第q个目标的等效复散射增益、距离和径向速度分别为β_q、R_q和v_q。β_q包含目标散射、往返传播损耗及固定相位，不等同于通信路径复增益。不计高阶运动项时，目标的往返时延与多普勒频移可分别写为：

$$\tau_q = \frac{2R_q}{c} \tag{6}$$

$$v_q = \frac{2v_q f_c}{c} \tag{7}$$

其中，c为光速，f_c为载波频率。记由共用DD符号向量$\mathbf{x}$生成的发射信号为$s_{\mathbf{x}}(t)$，则给定发射帧的基带回波为：

$$\begin{aligned} r_{\mathrm{s}}(t\left|\mathbf{x}\right.) = &\sum_{q=1}^{Q} \beta_q s_{\mathbf{x}}(t-\tau_q) e^{j2\pi v_q (t-\tau_q)} \\ &+ c_{\mathrm{s}}(t;\mathbf{x}) + i_{\mathrm{SI}}(t;\mathbf{x}) + w_{\mathrm{s}}(t). \end{aligned} \tag{8}$$

其中，$c_{\mathrm{s}}(t;\mathbf{x})$为静态或动态杂波，$i_{\mathrm{SI}}(t;\mathbf{x})$为残余自干扰及其他干扰，二者通常与发射信号有关，不能一律并入独立白噪声。为区分原始DD解调观测与匹配滤波输出，记$z_{\mathrm{s}}(\tau,v\left|\mathbf{x}\right.)$为$r_{\mathrm{s}}$与本地已知波形$s_{\mathbf{x}}$的匹配输出，定义给定数据帧的模糊函数：

$$A_{\mathbf{x}}(\Delta\tau,\Delta v) = \int s_{\mathbf{x}}(t) s_{\mathbf{x}}^{*}(t-\Delta\tau) e^{-j2\pi\Delta v t} \mathrm{d}t. \tag{9}$$

采用匹配核$s_{\mathbf{x}}^{*}(t-\tau)e^{-j2\pi v t}$，并在完整回波支撑上积分，匹配输出可写为：

$$\begin{aligned} z_{\mathrm{s}}(\tau,v\left|\mathbf{x}\right.) = &\sum_{q=1}^{Q} \beta_q e^{-j2\pi v\tau_q} A_{\mathbf{x}}(\tau-\tau_q, v-v_q) \\ &+ \tilde{c}_{\mathrm{s}} + \tilde{i}_{\mathrm{SI}} + \tilde{w}_{\mathrm{s}} \end{aligned} \tag{10}$$

式(10)中的附加项为杂波、自干扰及噪声经过同一匹配处理后的输出；实际有限窗口需计入截断，DD格点仅是对该连续响应的采样。通信与感知经采样、接收变换后的原始观测则分别写为：

$$\mathbf{y}_{\mathrm{c}} = \mathbf{H}_{\mathrm{c}}(\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{c}})\mathbf{x} + \mathbf{w}_{\mathrm{c}}. \tag{11}$$

$$\mathbf{y}_{\mathrm{s}} = \mathbf{H}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{s}})\mathbf{x} + \mathbf{c}_{\mathrm{s}}(\mathbf{x}) + \mathbf{i}_{\mathrm{SI}}(\mathbf{x}) + \mathbf{w}_{\mathrm{s}}. \tag{12}$$

其中，$\mathbf{H}_{\mathrm{c}}$与$\mathbf{H}_{\mathrm{s}}$分别是通信和感知有效DD矩阵，包含实际脉冲、帧边界及传播参数；$\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{c}}$描述单程通信路径，$\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{s}}$描述往返几何与目标散射，二者通过共享发射帧及可能关联的物理路径联系，但通常不相等。$\mathbf{c}_{\mathrm{s}}$和$\mathbf{i}_{\mathrm{SI}}$允许具有相关结构。式(12)对给定散射参数关于$\mathbf{x}$呈线性，仅是条件观测关系；未知数据与未知路径系数同时恢复时会形成双线性耦合，时延、多普勒估计还具有非线性[15-16]。

单基地发射端通常已知本机发射帧，故可按式(10)匹配；双基地或被动感知若无参考通道、共享数据或可靠解码结果，不能直接使用真实$A_{\mathbf{x}}$。此时需利用导频、解码软信息或联合推断处理未知符号；统计上可将未知符号边缘化，得到：

$$p(\mathbf{y}_{\mathrm{s}}\left|\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{s}}\right.) = \sum_{\mathbf{x}} p(\mathbf{y}_{\mathrm{s}}\left|\mathbf{x},\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{s}}\right.) p(\mathbf{x}) \tag{13}$$

对于扩展目标，可将式(8)中的每个目标回波写成多个散射中心回波之和，中心参数由整体运动与局部运动共同决定，局部时变相位用于描述微多普勒。强杂波可由相关散射分量及其协方差描述，目标重叠及多径反射则需结合参数可辨识性与路径关联，不能把每个DD峰都视为独立目标[16-17]。

上述模型把传播参数放在整数DD栅格上，但实际路径时延和多普勒通常与离散网格有偏差，因此需要采用连续参数模型。对于有效带宽$M\Delta f$和有效帧长NT的OTFS帧，可把整数时延及多普勒索引分别扩展成连续形式：

$$\tau_p = (l_p + \epsilon_p)/(M\Delta f) \tag{14a}$$

$$v_p = (k_p + \zeta_p)/(NT) \tag{14b}$$

其中，l_p和k_p为整数格点索引，ϵ_p和ζ_p为相应分数偏移；在分数偏移的条件下，一条路径的响应就会分布到多个DD格点上。对于这些非理想因素，接收机可用连续参数推断进行处理，发射机也可通过脉冲设计减轻影响。硬件非理想可通过收发链中的相应算子扩展上述模型。相位噪声作为乘性相位项，功放采用幅度和相位传输函数，阵列互耦以耦合矩阵修正导向矢量。定时与载频偏差分别表现为附加时延和频移，采样时钟误差则可以建模为时间尺度偏差。

1.2 多天线多节点扩展模型

多输入多输出（multiple-input multiple-output，MIMO）OTFS把角度与空间自由度加入DD参数空间，对于发射节点b和接收节点r，在远场窄带阵列条件下，若路径参数在帧内近似不变，可将矩阵值散射函数写为：

$$\mathbf{H}_{b,r}(\tau,v) = \sum_{p} \mathbf{A}_{p,b,r}\, \delta(\tau-\tau_{p,b,r})\delta(v-v_{p,b,r}) \tag{15a}$$

$$\mathbf{A}_{p,b,r} = \alpha_{p,b,r}\mathbf{a}_r(\theta_{p,b,r})\mathbf{a}_t^{H}(\phi_{p,b,r}) \tag{15b}$$

其中，a_r和a_t分别为接收与发射阵列导向矢量，α为复增益，θ和φ分别为到达与离开方向。角度辨

识和通信速率受阵列孔径、波束及各天线格点分配共同影响；近场、宽带波束偏斜或阵列互耦条件下，应采用相应阵列响应替代上述导向矢量。

双基地与多基地系统的回波时延取决于发射节点到目标、再到接收节点的路径长度之和，多普勒取决于两段路径长度的变化率，距离与速度需根据节点位置和目标运动求解。多个发射节点的DD域观测可概括为：

$$\mathbf{y}_r = \sum_b \mathbf{H}_{b,r}\mathbf{x}_b + \mathbf{c}_r + \mathbf{i}_r + \mathbf{w}_r \tag{16}$$

其中，$\mathbf{H}_{b,r}$表示相应发射—接收链路的有效DD矩阵，包含空间响应及传播与同步参数；$\mathbf{c}_r$、$\mathbf{i}_r$和$\mathbf{w}_r$分别为接收节点的杂波、干扰与噪声。时延和多普勒会分别受到节点间时间偏差、载频偏差的影响；相位误差影响相干叠加，坐标系不一致时，角度及位置融合也会受到影响。多天线系统要分配空间信号资源，同时估计高维参数，而多个节点参与时，还需要进行同步校准，确定路径关联，再完成分布式信息融合。

2　OTFS-ISAC通信与感知性能分析

OTFS在DD域参数化通信传播路径和感知回波，具有在高移动、双选择信道中利用路径结构及复用通感信息的潜在优势，其收益还取决于路径稀疏性、帧内参数稳定性、接收机结构以及导频和保护资源开销。因此，本节分别分析OTFS-ISAC的通信与感知性能边界，并结合相关文献对OTFS、OFDM和仿射频分复用（affine frequency division multiplexing，AFDM）进行综合分析。

2.1　OTFS通信性能分析

OFDM虽然已形成成熟的帧结构、信道估计及基于快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）的均衡方法，但是当多普勒扩展相对子载波间隔增大后，符号内信道变化变得明显，按子载波独立处理的近似逐步失效，需要更多计算开销[18]。

OTFS用二维变换把DD域信息符号铺展到帧内时频资源上，信道响应主要由少数主导路径构成。接收机可按路径支撑估计信道，再处理路径引起的符号耦合[19]。符号在时频域展开后还会经历不同衰落状态，可减弱局部深衰落对数据恢复的影响。

符号在时频域上的扩展可以形成分集，但能够达到的分集阶数，还会受到符号映射、编码和检测方式的影响。以$P_e(\gamma)$表示信噪比（signal-to-noise ratio，SNR）为γ时的误码概率，渐近分集阶数可表示为：

$$d = -\lim_{\gamma\to\infty}\frac{\log P_e(\gamma)}{\log\gamma}, \tag{17}$$

Surabhi等[20]证明，在所分析的无编码OTFS模型中，未采用专门相位旋转时的渐近分集阶数为1，但在有限SNR范围内可表现出较高阶分集特征；适当的相位旋转则可实现满分集。有限SNR下的误码改善与渐近满分集属于不同层次的结论，DD域稀疏结构本身不足以保证满分集。误码率（bit error rate，BER）、符号错误率（symbol error rate，SER）及其高SNR斜率，分别用于描述有限SNR可靠性与渐近分集。

评价通信效率时，还需计入训练与保护资源。Gaudio等[21]为DD域稀疏信道设计OFDM和OTFS的导频及信道估计方法，并在可达速率比较中考虑保护间隔、非理想信道信息和符号检测。此外，OTFS的实际速率收益还受接收机处理能力和帧结构开销共同影响[15,22]。

AFDM在离散仿射傅里叶变换域承载信息符号，同样可以进行信道的结构化表示，使其能够适配高动态传播环境[23]。发射峰值功率也是比较常规AFDM与OTFS设计时需要考虑的约束。Rou等[18]讨论的OTFS设计具有较低的峰均功率比（peak-to-average power ratio，PAPR），可减轻功放回退与非线性失真，对同时受高动态传播和功放线性范围限制的系统具有吸引力。若数据检测与感知处理还需围绕二维DD参数展开，OTFS可提供直接的模型接口，不过二维保护区、迭代和缓存开销也应计入。干扰抵消、跨域检测及酉近似消息传递（unitary approximate message passing，UAMP）等方法，可用于实现结构化检测[19,24-26]。综上所述，对于多普勒显著、主导路径有限、帧内参数近稳定且接收机具备结构化处理能力的链路，OTFS往往具有一定优势。

2.2　OTFS感知性能分析

通感一体化波形既要承载数据，也要保留用于目标检测和参数估计的回波信息。传统雷达波形主要用于感知，即使嵌入通信信息，数据传输效率通常也不高。OFDM感知通常依据已知通信符号去除数据调制，再通过二维傅里叶处理估计时延和多普

勒。面对高多普勒环境时，ICI 会使逐符号独立处理的近似不再成立，进而影响目标响应和参数估计[15,27]。

OTFS 能够在 DD 域保留高动态回波的二维耦合信息，因此有利于感知参数的联合估计。Gaudio 等[15]分析了实际矩形脉冲下的连续参数估计和精度边界。Keskin 等[28]将符号间干扰（inter-symbol interference，ISI）与 ICI 计入回波模型，利用可辨识的干扰信息扩大常规处理的无模糊距离和速度范围。这些结果说明，完整回波建模与联合处理可使 OTFS-ISAC 应对显著多普勒，以及常规简化模型难以描述的回波。

上述处理收益应与感知分辨尺度分别评价。对于单基地系统，目标距离 r 与往返时延 τ 满足 $r = c\tau/2$，径向速度 v 与多普勒频移 ν 满足 $v = \lambda\nu/2$。对于有效带宽为 B、相干观测时长为 T_{obs} 的单基地系统，名义距离和径向速度分辨率可近似表示为：

$$\Delta r \approx \frac{c}{2B} \tag{18}$$

$$\Delta v \approx \frac{\lambda}{2T_{\text{obs}}} \tag{19}$$

其中，c 为光速，λ 为载波波长。带宽和相干观测时长相同时，OFDM、AFDM 与 OTFS 均受这一基本尺度约束。连续参数估计可使单目标估计误差低于离散格点间距，但相邻目标的可分性还取决于目标间隔、信噪比、响应相关性及观测可辨识性。因此，应从高动态回波的信息利用与处理效果分析 OTFS 的感知优势；DD 域表示本身不会改变带宽和观测时长确定的基本分辨尺度[15,29]。

评价参数估计精度时，还可采用克拉美－罗下界（Cramér－Rao lower bound，CRLB），设待估实参数向量为 $\boldsymbol{\theta}$，费舍尔信息矩阵为 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$，满足常规正则条件、该矩阵可逆时，无偏估计器的协方差矩阵和各参数方差满足以下关系：

$$\mathrm{Cov}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) \geqslant \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \tag{20}$$

$$\mathrm{var}(\hat{\theta}_i) \geqslant [\mathbf{J}^{-1}]_{ii} \tag{21}$$

带宽、观测时长和能量相同时，发射波形的相关特性与未知参数耦合仍会影响估计下界；完整、可逆且与参数无关的接收变换则保留费舍尔信息。波形的二维相关特性可用模糊函数表示。式(22)对应给定发射帧的实现：

$$\chi(\tau,\nu) = \int s(t)s^{*}(t-\tau)e^{-j2\pi\nu t}dt \tag{22}$$

主瓣和旁瓣分别影响目标分离，以及强目标邻域中的弱目标检出。Correas-Serrano 等[27]比较不同波形与接收机组合后指出，采用同类接收机时，OFDM 与 OTFS 具有相似的多普勒容限，联合 DD 处理的收益也可通过相应设计用于 OFDM。Rou 等[30]在统一离散帧和匹配滤波设置下比较归一化模糊函数，结果表明 OFDM、OTFS 与 AFDM 在时延和多普勒主瓣宽度及旁瓣指标上各有侧重。因此，均方根误差（root mean square error，RMSE）、CRLB 及旁瓣指标的改善不仅取决于波形本身，也与信道估计、检测及参数估计等处理方法有关。

AFDM 利用有效信道响应提取时延和多普勒，并通过啁啾配置实现高动态感知。Bemani 等[31]比较了 AFDM 与 OTFS 的距离、速度估计，在所研究配置下得到相近的 RMSE。然而，通信与感知均需获取稀疏路径参数，并用于数据检测或状态更新时，二维 DD 模型使 OTFS 能够为两项任务提供共同的参数与处理接口。传播几何关联可信、路径参数变化较缓时，时延和多普勒候选及其不确定性可继续用于信道恢复与感知推断，减少重复估计。Zak-OTFS 的研究给出了相应理论依据。Gopalam 等[32]联系最优通信接收与雷达匹配滤波，说明接收端可以恢复数据检测所需的充分统计量，并在满足晶化及窗口条件时达到与标准雷达处理相当的感知表现。由此可建立通感共同前端。对于同时要求高动态数据传输、连续参数获取和跨任务复用，且有联合处理预算的系统，OTFS 提供了有理论依据的实现方式。不过，目标重叠、强杂波、分数泄漏及路径突变仍会增加估计与关联成本[15,32]。

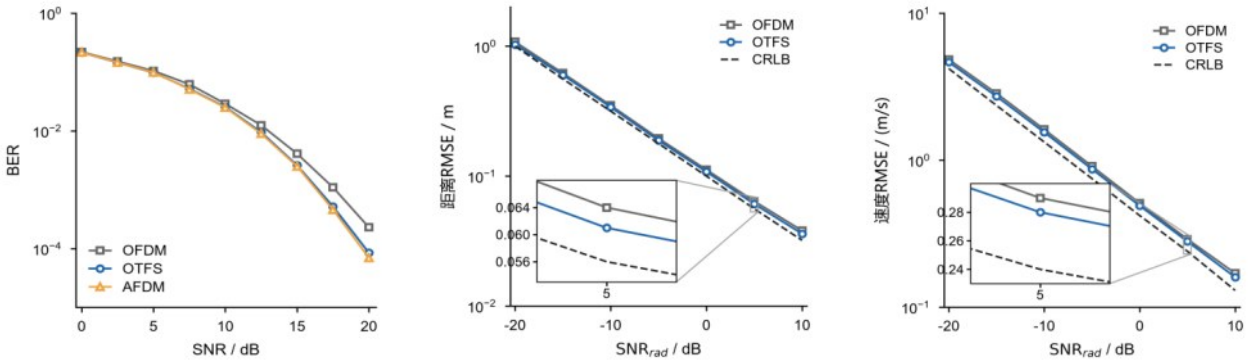
图 3 和表 1 汇总了代表性文献的定量比较结果。通信方面，文献[23,33]表明，在所设双选择信道和同类线性检测条件下，OTFS 与 AFDM 的误码性能接近，均优于 OFDM，体现了 OTFS 用于高速移动通信的优势。感知方面，文献[29]中 OTFS 的距离、速度估计精度与 OFDM 相当，并在所用帧级处理配置下获得更大的无模糊距离，说明其在承载通信数据的同时，也能有效支持目标参数估计。结合 OTFS 在 DD 域中对通信路径与感知目标的共同参数表示，这些结果为进一步开展参数共享、联合接收和状态跟踪提供了依据，体现了 OTFS-ISAC 在高动态场景中兼顾可靠传输与目标感知的研究价值

和发展潜力。

三者的对比需结合波形结构及实现条件综合理解。OFDM的帧结构和接收实现较成熟，显著多普勒下需要增加干扰处理；AFDM通过啁啾配置分离路径，其效果受参数覆盖范围约束；OTFS便于在DD域组织通信与感知参数，但分数泄漏、二维保护及块处理会增加实现负担。表2归纳了三类波形的主要特点及适用条件。

2.3　关键技术指标

比较OTFS-ISAC方案时，需要看数据传输是



（a） 通信误码率比较　　（b） 距离RMSE与CRLB　　（c） 速度RMSE与CRLB

图3　通信与感知性能比较[29,33]

表1　　通信与感知性能定量比较

文献	比较对象	信道与帧配置	接收处理与资源开销	主要结果
[23]	OFDM、AFDM、OTFS	4 GHz，三径；最大归一化时延、多普勒均为2；256个符号，OTFS为16×16	理想信道状态信息（channel state information，CSI），线性最小均方误差检测；另比较嵌入导频及保护开销	BER（25 dB）：AFDM、OTFS均约2×10^{-5}；OFDM约4×10^{-4} 导频与保护开销：所用方案中OTFS约为AFDM的2倍
[33]	OFDM、AFDM、OTFS	24 GHz，3.072 MHz；扩展车载A型九径，540 km/h；1024个符号，OTFS为32×32	相同比特与信道实现；理想CSI，最小均方误差检测；另核算导频保护资源	BER（20 dB）：OFDM约2.3×10^{-4}；AFDM、OTFS约$(0.7\sim0.9)\times10^{-4}$ 导频保护资源：AFDM为161个，OTFS为289个
[29]	OFDM、OTFS	5.89 GHz，10 MHz；64个子载波、50个时隙；单目标	相同带宽与观测时长，最大似然估计；OFDM循环前缀1.6 μs	估计精度：距离、速度RMSE及对应CRLB基本重合 无模糊距离：OFDM约240 m，OTFS约960 m
[30]	OFDM、AFDM、OTFS	144个符号，OTFS为12×12；全1符号；时延、多普勒维均采用4倍插值	匹配滤波；比较时延与多普勒维主瓣宽度	归一化3 dB主瓣宽度（时延/多普勒）： OFDM：0.0058 / 1.8021 AFDM：0.0058 / 0.0056 OTFS：0.0493 / 0.0740

表2　OFDM、AFDM与OTFS的主要特点及适用条件

对比维度	OFDM	AFDM	OTFS
高移动适应	低多普勒下均衡简便；高多普勒需处理ICI[18,21]	啁啾配置支持路径分离，受扩展范围约束[18,23]	可利用稀疏DD结构，分数参数增加耦合[19-20]
感知特点	常规处理受ICI影响[27]	可采用全帧或导频感知[31]	便于DD搜索与连续参数估计[15,28]
资源与实现代价	循环前缀和导频占用资源[21]	特定导频布局的保护开销较低[23]	二维导频保护及块处理、缓存开销[15,34]
适用条件	低多普勒、处理预算有限、兼容要求高[18,21]	扩展范围可覆盖，重视训练效率[18,23]	高动态、路径稀疏、帧内近稳定，允许结构化处理[15,19]

否可靠、感知参数估计是否准确，以及资源使用情况。本节整理通信、感知和通感综合效用指标，作为不同技术方案的比较依据[35]。

通信性能可用BER/SER/块错误率（block error rate，BLER）、可达速率及频谱效率等指标评价，具体任务还需考察覆盖、中断概率、时延和能量效率；对于接收端，还要看信道估计归一化均方误差（normalized mean square error，NMSE），以及导频和保护区所占比例、算法复杂度。

感知性能应分别评价检测和估计任务。第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project，3GPP）技术规范TS 22.137将位置与速度估计精度、置信水平、感知分辨率、漏检概率及虚警概率列为无线感知的关键性能指标[36]。目标检测指标定义如下：

$$P_{\mathrm{d}} = \Pr\left\{\Lambda > \eta \middle| \mathcal{H}_1\right\} \tag{23}$$

$$P_{\mathrm{fa}} = \Pr\left\{\Lambda > \eta \middle| \mathcal{H}_0\right\} \tag{24}$$

其中，Λ为检测统计量，η为判决门限；$\mathcal{H}_1$和$\mathcal{H}_0$分别表示目标存在和目标不存在假设。评价距离、速度和角度时，可一起使用RMSE、CRLB及可分性指标。

综合指标需要反映共享资源的通感收益及代价，通信与感知指标的量纲不同，可按业务需求归一化，再用加权效用表示，一般形式如下：

$$U = w_{\mathrm{c}}\bar{Q}_{\mathrm{c}} + w_{\mathrm{s}}\bar{Q}_{\mathrm{s}} \tag{25}$$

其中，$\bar{Q}_{\mathrm{c}}$和$\bar{Q}_{\mathrm{s}}$分别表示归一化通信与感知性能，权重和反映具体场景的业务优先级。在给定带宽、观测时长和总能量下，各可行设计对应的通信速率与感知代价形成可行域；若不存在另一可行设计使通信速率不降低、感知代价不增加，且至少一项严格改善，则该点位于帕累托前沿。帕累托前沿反映了给定资源条件下通信与感知性能之间的权衡，可用于根据业务需求选择工作点。

在线性高斯信道、感知端已知发射帧且目标参数具有先验分布的条件下，Xiong等[37]以对发射帧平均的条件贝叶斯CRLB表征感知代价，分析感知最优与通信最优两个端点，并构造速率—CRLB区域的内外界。该研究揭示了信号随机性与通感子空间资源分配共同形成的折中，可作为OTFS-ISAC边界分析的理论参照，具体边界还取决于DD信道、帧结构及目标参数模型。在MIMO-OTFS系统中，调整通信与感知的功率分配，可获得不同的通信速率与雷达SNR组合；DD资源分配也会影响两类任务的性能[16,38]。因此，评价OTFS-ISAC方案时，应结合通信与感知指标，说明相应的资源配置及开销。表3归纳了主要指标及评价重点。

标准化方面，3GPP在Release 19的TS 22.137中规定通感业务需求，Release 20的TR 38.765进一步研究新空口通感问题；电气与电子工程师协会已发布802.11bf-2025，规定无线局域网感知相关的媒体接入控制及物理层接口增强，国际电信联盟无线电通信部门的M.2160建议书将通感列为面向2030年及以后的国际移动通信的使用场景[36,39-41]。欧洲电信标准协会在GR ISC 002中，已从信道建模、测量和评估方法等方面研究ISAC规范化问题，雷达散射截面、微多普勒和典型场景参数也被纳入考虑[17]。这些文件可为场景选择、测量流程及性能评价提供参考。目前，OTFS尚未被3GPP正式采纳为6G标准波形，其规模化工程应用与标准化仍需进一步验证与推进[13-14]。

3　OTFS-ISAC关键技术

通信路径和感知目标均可由OTFS的DD域参数描述，两项任务可使用相同的信息表示方式，但即使共享了信号、观测和运动状态，系统仍要处理

表3　OTFS-ISAC关键指标体系

指标类别	代表性指标	评价重点
通信可靠性	BER、SER、BLER、中断概率	数据恢复正确性与链路稳健性
通信效率	可达速率、有效吞吐率、频谱/能量效率	计入循环前缀、导频、保护区与功率开销
信道获取	信道估计NMSE、导频占比	DD信道估计准确度与训练开销
感知检测	P_{d}、P_{fa}、检测SNR	目标存在性与弱目标检出能力
参数估计	距离/速度/角度RMSE、CRLB	估计精度及其与理论下界的差距
分辨与模糊	距离/速度分辨率、3 dB主瓣宽度、峰值旁瓣比、积分旁瓣比、无模糊范围	相邻目标可分性与感知动态范围
通感综合	加权效用、速率－CRLB/雷达SNR帕累托前沿、资源效率	相同带宽、功率、观测时长及训练开销下的通感权衡

资源耦合、观测耦合与状态关联，才能完成通感协同。

通信和感知使用同一带宽、功率、DD资源及空间自由度，波形设计和资源分配需要考虑资源耦合，协调两项任务的性能。接收信号还受通信数据、信道路径和目标回波共同影响，参数估计、数据检测及跨帧更新需要结合处理。以下先介绍波形设计与资源分配、通感联合接收，再扩展至网络协同与安全保障；由于学习型通感技术发展迅猛，因此作为专题集中讨论其在发射配置、接收处理及网络协同中的作用。

3.1　波形设计与资源分配

通信速率、感知可辨识性和实现成本共同约束波形设计与资源分配。帧结构、导频、空间扩展、旁瓣优化及连续脉冲决定通感响应，DD格点、功率、波束和网络自由度的联合配置则决定资源的使用方式。

（1）波形设计

时宽-带宽积和模糊函数是波形设计的基本约束。增加有效带宽可改善时延/距离分辨率，延长相干观测时间可改善多普勒/速度分辨率，代价是更大的采样、缓存和处理开销。随机通信数据还会产生随序列变化的主瓣外旁瓣。因此，OTFS-ISAC需要在有限时频资源下兼顾主瓣、旁瓣、通信互信息与峰值功率。多目标检测尤其关注强目标附近的弱目标，此时局部旁瓣比全局平均旁瓣更直接地影响检出能力，局部加权积分旁瓣电平优化也由此展开。

嵌入导频及保护区能够抑制训练与数据的互扰，可用于结构复用，但分数多普勒较明显时，所需保护范围也会扩大。随机填充和循环结构减少零片段，使更多能量用于感知，同时还要满足序列相关性和接收匹配条件；嵌入导频主要用于获取OTFS信道，可为共享导频接收提供训练，随机填充方案则比较通感波形性能，把训练布局设计用于双功能任务[34,42]。

把调频连续波（frequency-modulated continuous wave，FMCW）与OTFS叠加，可同时进行数据传输和低复杂度参数估计[43]。雷达成分比随机数据更容易用于提取参数，但它需要分配功率或正交资源，连续波和OTFS脉冲之间也会互相干扰，设计中仍需处理这些影响。

通过阵列扩展/解扩，系统可在空间维度上扩展，同时处理DD参数和角度参数，并用感知结果安排预编码与功率；共享/私有格点方案把少量格点留给特定天线，由此形成虚拟阵列，虽然会减少数据传输的自由度，但可扩大感知孔径[44-45]。采用这些方法时，需要做好阵列标定，保证空间响应可靠，私有格点还要从通信资源中划出。

PAPR会影响功放回退和非线性失真，混合叠加导频采用高功率中心、低功率边缘，并通过两阶段迭代降低保护及峰值开销，已有结果主要用于OTFS信道估计和数据恢复。低PAPR、低开销方案可支持OTFS-ISAC发射端，但在双功能任务中，感知旁瓣、弱目标检测及联合收益还要结合导频安排、功率分配和接收处理来评价[46]。

旁瓣与通感干扰是响应优化需要处理的内容。Zhang等[47]将发射信号和接收滤波器共同优化，采用主化—最小化及交替优化方法，减小局部加权旁瓣，同时约束SNR损失；Karimian-Sichani等[48]采用相位矩阵调整峰值旁瓣，两项工作都需处理非凸优化问题，其中前一项考虑了局部感知任务与收发耦合，后一项着重调整与相位有关的响应。对于约束处理和求解方法，还可参考一般ISAC中的联合

收发滤波、多目标公平恒模设计；将这些设计用于OTFS时，则要把DD映射、实际脉冲和分数参数引起的二维耦合考虑进去[49-50]。

通用优化方法用于OTFS时，也要满足波形本身的约束，发射信号变化会同时改变通信有效信道和回波模糊响应，接收滤波器变化则会影响噪声增益、旁瓣及数据干扰。恒模或低PAPR约束可改善功放工作条件，但可用波形会减少；局部旁瓣权重可以突出指定感知区域，实际效果仍与目标位置和响应失配有关。因此，信号、滤波和功率需要在同一有效信道及回波模型下共同设计，使优化目标能够对应检测、估参和数据传输任务[47-50]。文献[47]利用FFT计算互相关，并以收发序列的相对变化作为停止依据；这类主化—最小化方法在相切上界逐步下降、目标有下界的条件下可保证目标值收敛。

连续脉冲设计是Zak-OTFS的主要内容，处理流程见图4。Mohammed等[51]讨论了晶化条件下可预测的有效输入输出关系，Ubadah等[52]分析脉冲局部化与通信、感知及PAPR的关系，Mehrotra等[53]则同时考虑DD局部化、格点正交和频谱效率；这些结构上的收益，需要DD周期覆盖有效扩展范围，有限时宽、带宽和脉冲实现条件也会限制其效果。

不同设计采用的通感信息获取方式有所区别，结构复用及FMCW融合增加可预测的照射成分，使数据不确定性减小；空间扩展提供更多独立阵列观测，有助于辨识角度，旁瓣和Zak脉冲设计则改变已有观测中的信息分布。结构复用、FMCW融合及空间扩展主要需要训练、功率或私有格点资源，响应优化还需付出求解、滤波和脉冲实现的成本。

（2）资源分配

DD格点、发射功率及空间自由度由OTFS-ISAC的通信和感知共同使用，增加感知导频、保护区或专用格点，有利于获取参数，但数据可用空间会减少；提高感知照射功率或改变波束，还会影响通信用户的有效信道与干扰。因此，格点、功率和预编码需一并分配，在满足感知质量要求的同时，保证通信速率或用户公平性。信干噪比（signal-to-interference-plus-noise ratio，SINR）、估计误差等约束使两项任务相互关联，配置能否使用，还需看求解时延和更新成本。

为说明变量之间的关系，以下以独立、单位能量数据流和单位范数波束为基准，p_u表示第u个用户流的实际平均功率，$\mathbf{B}$描述DD资源映射，$\mathbf{W}=[\mathbf{w}_1,\cdots,\mathbf{w}_U]$描述空间预编码。给定接收结构和传播模型，典型联合优化问题可概括为：

$$\begin{aligned}&\max_{\mathbf{p},\mathbf{B},\mathbf{W}} \sum_{u=1}^{U}\omega_u R_u(\mathbf{p},\mathbf{B},\mathbf{W}) - \mu\mathcal{L}_{\text{sen}}(\mathbf{p},\mathbf{B},\mathbf{W})\\ &\text{s.t.}\quad \gamma_q^{\text{sen}}(\mathbf{p},\mathbf{B},\mathbf{W}) \geqslant \Gamma_q, \forall q\\ &\quad R_u(\mathbf{p},\mathbf{B},\mathbf{W}) \geqslant R_u^{\min}, \forall u\\ &\quad p_u \geqslant 0, \forall u\\ &\quad \sum_{u=1}^{U} p_u \leqslant P_{\max}\\ &\quad \mathbf{B}\in\mathcal{B},\quad \mathbf{W}\in\mathcal{W}\end{aligned} \tag{26}$$

其中，$\mathbf{p}=[p_1,\cdots,p_U]^{\mathrm{T}}$，$R_u$为用户速率，$\omega_u$为业务权重，$\mathcal{L}_{\text{sen}}$为感知损失，$\mu$为非负权衡系数，$\gamma_q^{\text{sen}}$为第$q$个目标在指定接收处理下的感知SINR，$\Gamma_q$为其最低要求，$R_u^{\min}$为最低用户速率，$P_{\max}$为总功率预算。三类变量共同改变有效通信信道、目标照射及干扰，因此目标函数和性能约束均显式依赖$\mathbf{p},\mathbf{B},\mathbf{W}$。

可行集$\mathcal{B}$包含DD格点占用、导频和保护区限

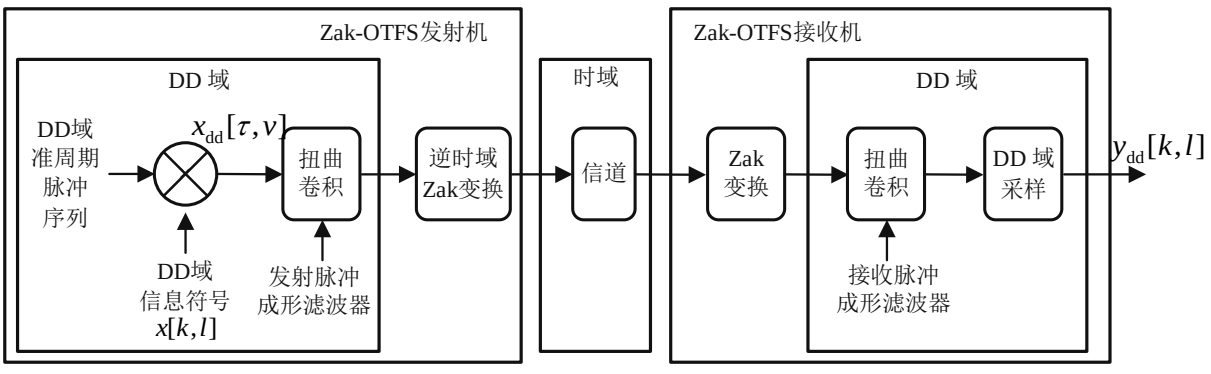


图4 Zak-OTFS系统信号处理流程

制。正交映射可取 $B_{g,u} \in \{0,1\}$ 且 $\sum_u B_{g,u} \leqslant 1$，其中，$g$ 为 DD 资源格点索引，$B_{g,u}=1$ 表示该格点分配给用户 u。非正交多址（non-orthogonal multiple access，NOMA）需按允许复用层数放宽，并使用含残余干扰的速率模型。$\mathcal{W}$ 包含 $\|\mathbf{w}_u\|_2=1$ 及天线维数限制，混合阵列需满足相关约束。多接入点（access point，AP）系统应增加各 AP 功率约束，可重构智能表面（reconfigurable intelligent surface，RIS）需另列相位变量及单位模约束。最低速率用于保障用户服务，强调最差用户公平时可改用最大最小速率目标。

单帧 DD 资源分配可依据用户路径和目标回波的参数分布，安排数据、导频与保护区域，时延-多普勒资源块（delay-Doppler resource block，DDRB）方案按这些参数设置共享格点。路径重叠或分数参数泄漏会扩大耦合范围，保护开销及干扰处理成本也会增加，因此 DD 资源的可复用程度，还要结合实际响应的集中情况和接收机的分离能力来判断[38]。

在 TF/DD 域中放置非正交数据流，可以提高资源复用程度。多域 NOMA 让数据流在不同域内传输，并通过迭代抵消减小流间干扰。与格点隔离相比，这种方式降低了对资源正交性的要求，却需要接收端具备更强的干扰抵消能力[54]。

空间资源分配除 DD 格点外，还包括天线、波束和节点功率。单基地 MIMO-OTFS 通过空间维度及 DD 复用，协调通信和多目标任务，系统结构见图 5。共享格点增加了复用机会，也使空间响应、用户干扰与目标可辨识性互相影响[16]。

RIS 可以调整相位，使传播响应发生变化，从而为功率分配和波束配置提供更多选择。将 RIS 用于 OTFS-ISAC 时，系统要先获得级联信道，再及时调整相位，恒模约束下的相位设置还需与发射配置配合；天线或接入点数量的增加可提供更多空间资源，而 RIS 是通过调整传播条件来改善已有资源的使用。实际能获得多少收益，还受到信道估计误差、配置时延和传播环境的影响[55]。

无人机（unmanned aerial vehicle，UAV）方案根据感知位置和速度预测三维拓扑，之后分配 NOMA 功率，在配置中考虑 CSI，以保持鲁棒性[9]。高动态环境下，资源配置需要随状态改变而更新，但感知状态可能存在估计误差，从预测到执行也有时间间隔，这期间状态还会变化；所以，配置能否取得预期效果，也与预测是否及时、接入干扰有多大有关。

OTFS 的 DD 参数结构可以用于按传播路径分配通感资源，路径稀疏、参数获取可靠且配置能及时更新时，这种方法更容易发挥优势。路径重叠、分数泄漏及快速状态变化，则会减少复用收益，增加训练、保护和接收处理开销。DDRB 主要配置格点与保护区域，NOMA 用更强的干扰处理换取复用，MIMO 调整空间及 DD 自由度，RIS 改变传播响应，UAV 预测辅助动态配置。

3.2　通感联合接收

OTFS-ISAC 接收机需要从有效 DD 观测中恢复

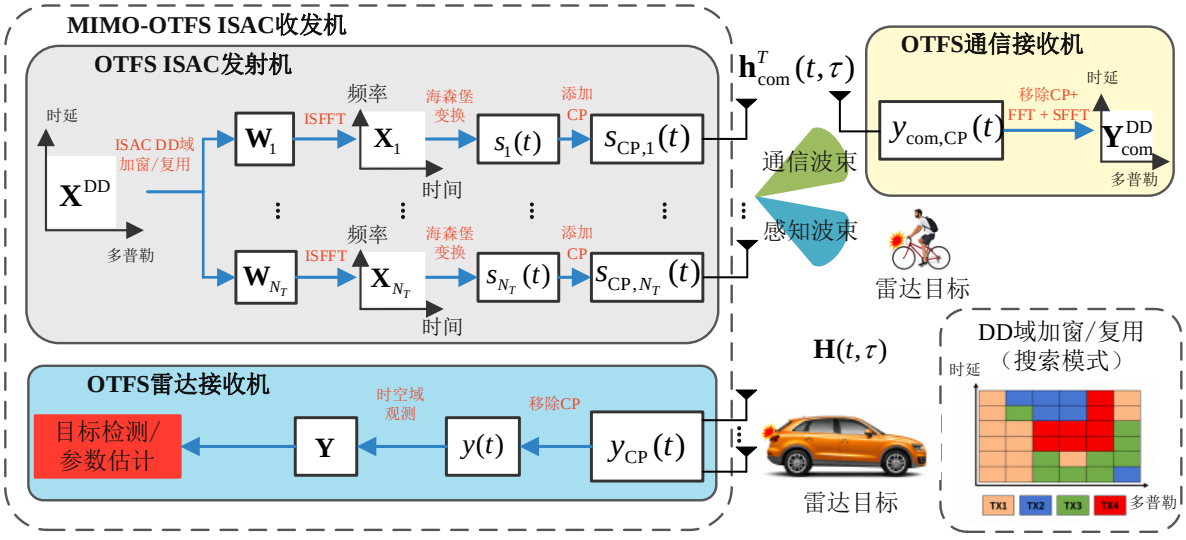


图 5　MIMO-OTFS ISAC 系统框图[16]

通信数据、传播路径和目标参数，采用哪种处理方式，要看发射数据是否已知，以及能够使用哪些观测。单基地感知使用已知发射帧，处理时主要面临分数参数、目标重叠和非理想脉冲等问题。部分双基地或被动接收机并不知道通信数据，此时符号不确定性还会影响感知性能。通信终端和感知接收机往往分布在不同节点，节点协作条件又限制了观测共享、联合推断。因此，参数提取、数据检测和信息交换的安排，需要根据实际系统结构确定。

（1）精细参数估计

参数估计要在精度和搜索开销之间作出取舍。实际时延与多普勒经常偏离格点，若直接进行高维连续搜索，会造成较大的计算开销。常见的处理方式是先用匹配滤波或低分辨率谱搜索生成候选，再进行连续参数精修。

候选搜索通过压缩观测或近似结构来降低整体计算开销。DD谱匹配先产生粗候选，随后作局部谱近似，减少穷举次数；低维矩阵和狄利克雷核方法则保留有效响应元素，以缩小观测维数[56-57]。单音结构和离散Zak变换也可降低OTFS信道中路径参数的估计维度，其算法思路可为联合接收中的候选生成提供参考[58-59]。

连续参数估计利用物理响应或谱结构恢复离栅格偏移。Zegrar等[60]从物理脉冲和导频旁瓣中提取分数参数；Yang等[61]使用高阶谱和重心校准，对分数偏移作进一步修正，这些方法提高了有限观测下的连续参数精度。需要注意的是，局部精修无法恢复粗检测时遗漏的弱目标，因此候选数量和精修范围需统一考量。

（2）通感信息联合恢复

联合处理需要可共享的观测。共享导频既可恢复信道，也可估计距离和速度，被动感知生成的候选还可用于同帧信道恢复。前者依赖导频响应，后者取决于候选是否准确[62-63]。Zak最优接收把相关解调、DD扭曲卷积脉冲与雷达匹配滤波放在同一关系中，为共享充分统计量提供依据[32]。一般MIMO-OTFS信道估计利用DD—角度稀疏性减少训练开销，可用于获取空间路径，但通信路径与回波目标是否对应，还需根据传播几何及关联模型确定[64]。

用户状态精化和参数关联用于提高观测解释的可靠性。Shi等[65]由粗角度估计出发，构造嵌套阵列低维观测，再精化角度、时延和多普勒；Yang等[66]将参数归属、信道估计和数据检测放在一起处理，以减轻多用户关联的不确定性。Li[67]在Turbo双基地OTFS雷达中，把解调与感知得到的软信息相互交换，通过迭代减少未知数据的影响。此类反馈更新同一接收过程中的符号与目标信息，适用于式(12)含未知数据的情形。

感知参数能够缩小信道搜索范围，也可用于建立等效信道，减少对大规模导频的依赖，但目标与通信路径的对应关系，还要根据传播几何判断。遮挡、散射突变或标定误差会使映射不准确，需用导频进行校准验证[68-69]。

环境反演是由传播参数求解几何状态，通信DD参数可用于推断目标状态，发射机位置和目标状态都未知时，可用加权最小二乘、半定松弛联合求解几何关系，减少单独获取环境信息的测量需求[70-71]。单程与双程传播的几何约束不同，散射体、通信路径及回波目标也可能是多对多关系，参数复用因此需要可靠的路径关联，并考虑几何可观测性；加权最小二乘中的权重反映前级估计的可靠程度，最终定位、测速精度则由参数误差、节点几何及关联正确性共同决定。

感知辅助通信把状态映射成链路参数，用来配置通信，主要受预测过期及映射偏离影响；通信辅助感知则从传播参数求解环境状态，主要需处理几何歧义和错误关联。DD表示便于交换物理参数，但可靠使用这些参数，还要明确传播对应关系，即使单项参数误差不大，错误关联或不利的节点几何，也可能使配置和定位出现较大偏差。

（3）跨帧更新与状态跟踪

感知辅助通信利用位置、速度预测链路变化，再调整拓扑、波束及搜索范围，车联网方案由回波得到运动状态，预测后续通信条件，从而缩小波束和DD参数候选范围，减少训练与搜索开销。预测和几何映射是否准确，会影响这些收益，状态误差可能使波束指向偏移，预测过期也会使配置与实际链路不符；使用感知状态时，需要同时考虑估计精度，以及从获取到执行的时间间隔[72]。

Wei等[73]用参数继承（parameter-inherited，PI）初始化稀疏贝叶斯学习（sparse Bayesian learning，SBL）和UAMP，利用相邻OTFS块DD响应变化较缓的特点减少重复获取，并完成软件无线电

（software-defined radio，SDR）验证，因子图见图6。图中括号下标(k)表示第k个OTFS块；$\mathbf{r}$为变换后的导频观测，$\mathbf{h}$为DD信道，$\mathbf{z}=\boldsymbol{\Phi}\mathbf{h}$为辅助变量，$\boldsymbol{\Phi}$由导频及酉变换构成，$\boldsymbol{\alpha}$、$\beta$分别为稀疏精度和噪声精度，后者并非目标增益。圆节点表示变量，方节点表示观测似然、线性约束及各级先验；折叠图合并同类标量节点，保留相同依赖关系。继承框中$\mathbf{p}_{(k)}$、$\mathbf{q}_{(k)}$分别为观测均值和伪观测均值消息，$\hat{\mathbf{h}}_{(k)}$、$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{(k)}$为当前块信道及稀疏精度估计。接收机按噪声水平筛除弱响应，经$\mathrm{res}(\cdot)$重排、$f_n(\cdot)$八邻域扩展及$\mathrm{vec}(\cdot)$向量化形成下一块初值，再结合$\mathbf{r}_{(k+1)}$更新估计与消息；块间箭头表示初值传递[73]。该方法继承的是估计器初值，随后仍使用新块观测迭代更新，进行跨帧信道参数更新。在文献[73]采用的块循环结构下，设DD网格维数为$D=MN$，基于期望最大化的SBL、UAMP-SBL与PI-SBL每次迭代复杂度分别为$O(D^3)$、$O(D^2)$和$O(D\log D)$。二维FFT降低单次更新开销，参数继承改善初始化，总运算量还取决于迭代轮数及路径变化。

除参数值以外，反馈信息还应包含不确定性和时间记录，可用参数方差、路径存在概率及更新时间判断先验的可靠程度，再把稳定路径与待确认候选区分开。若相关信息被重复使用，后验置信度可能偏高；有路径消失或新路径出现时，历史先验也未必适用。减少训练资源仍要以信息可靠为前提，系统若过于依赖过去的先验，面对高动态环境的突变，就可能难以及时作出调整。

3.3　网络协同与安全保障

多节点协同使OTFS-ISAC由单链路处理扩展到网络运行。如图7所示，多个通感基站面向各区域内的终端和目标提供通信与感知服务，并通过云端协同网络共享信息、协调资源，从而支持多AP联合配置、多基地感知融合及多小区干扰协调。同时，非授权接收机也可能利用通感信号获取通信内容或目标信息，因此，网络协同还需兼顾通信保密与感知信息保护。

（1）多节点协同处理

无小区OTFS由多个AP协作，在各AP功率及感知SINR约束下优化最差用户SINR，兼顾网络覆盖与用户公平[74]。Singh等[75]则在通信服务质量（quality of service，QoS）和各AP功率预算下最大化感知SNR，并比较采用或不采用专用感知信号的目标检测表现。两项直接OTFS-ISAC研究分别从通信公平和感知检测出发，表明增加节点后仍需明确功率与任务优先级，不能仅把空间增益归因于节点数量。文献[74]采用二次变换与迭代凸优化求解功率分配，并依据分式优化理论给出其特定问题在相应条件下的收敛结论。

网络干扰还包括小区间照射、通信波束与回波

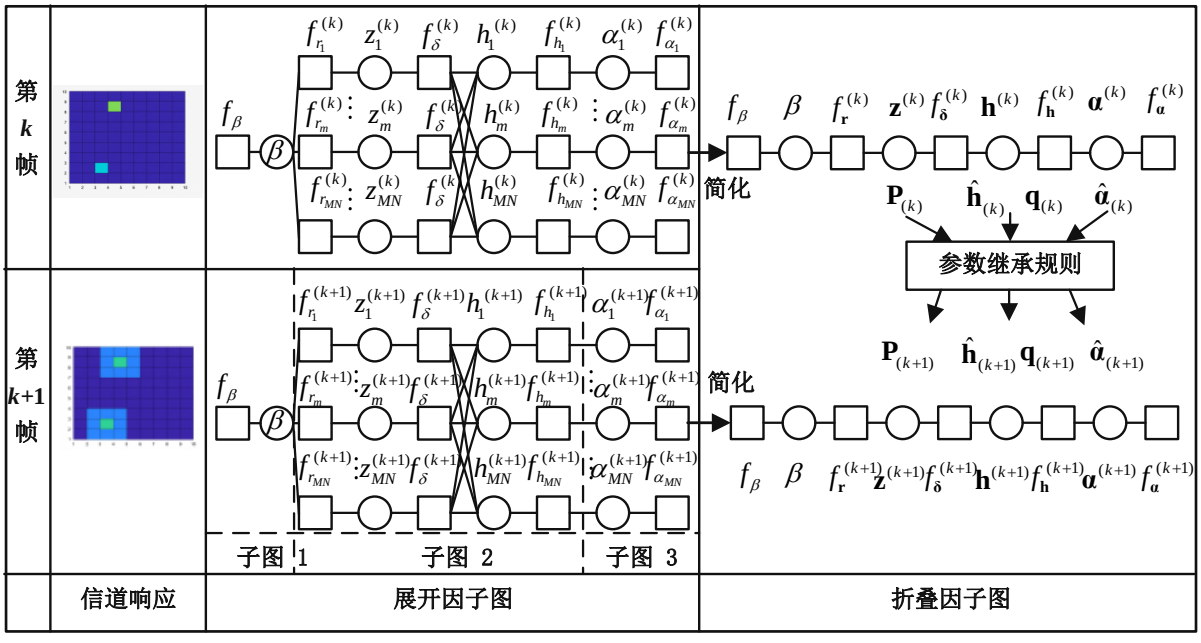


图6　PI-SBL展开及折叠因子图与相邻OTFS块参数继承机制[73]

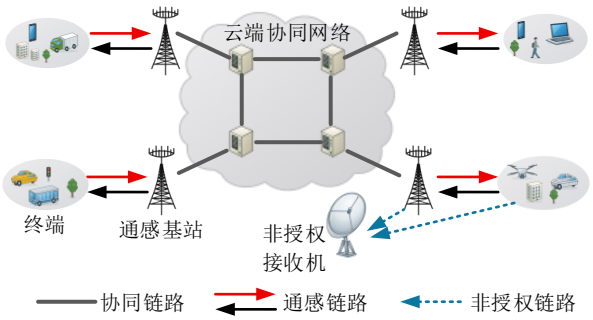


图7　OTFS-ISAC多节点协同与安全保障示意图

串扰及残余自干扰。一般ISAC研究中，Meng等[76]联合考虑协作簇、用户和目标数量及空间资源，分析干扰置零与复用、分集之间的取舍，相关结论可供OTFS-ISAC的研究参考。

文献[74]中各AP经前传链路连接中央处理单元（central processing unit，CPU），完成同步与协同处理，多节点部署并不等同于分布式求解。处理下沉至AP时，可交换原始观测、局部参数或后验，分别对应不同的前传负担与信息损失，实际运算代价还包括同步和迭代交换开销。

（2）频谱共存与动态配置

系统内部DD资源共享与外部业务的频谱共存对应不同问题。Abouelmaati等[77]针对一般半融合ISAC系统，联合分配通信专用、感知专用及融合业务的频谱与功率，并考虑业务优先级、杂波和QoS要求，可为共存配置提供参考。OTFS的DDRB与多域NOMA主要解决帧内复用，面向外部业务的动态配置还需增加频谱可用性和干扰限制等条件[38,54]。

（3）通信安全防护

通感共用信号既可能泄露通信数据，也可能使非授权接收机获取目标状态。Abushattal等[78]在OTFS车联网联合雷达通信中采用人工噪声，考虑不完美CSI下的保密性能、BER及雷达服务要求；这类方法保护通信内容，效果受窃听者能力与信道信息假设影响。Du等[79]进一步针对OFDM和OTFS，通过时频域幅相扰动及模糊函数设计降低非授权目标检测能力，并兼顾合法感知与通信性能。后者涉及感知信息泄露防护，不能由通信保密速率替代评价。

3.4　学习型通感技术

学习型方法通过数据训练或模型展开，辅助OTFS-ISAC中需要快速更新的配置与推断。本节按发射设计、参数估计、目标检测和状态预测四类任务梳理代表研究，说明学习介入的位置及通感作用[80]。

（1）发射设计

Wang等[81]将参数级信道预测与预均衡网络串联，利用预测CSI生成预均衡矩阵，以通信符号均方误差（mean square error，MSE）和感知参数CRLB的加权和为优化目标，由地面接入点承担均衡处理，减轻无人机接收端负担。Hassan等[82]利用Transformer生成波束功率、用户关联和DD资源调度方案，并通过可行性投影满足资源约束，在通信速率与感知效用之间作出权衡。前者着重物理层发射处理，后者着重多类资源配置，学习模块均需服从原有功率或资源约束。

（2）参数估计

数据驱动方法学习由观测到信道或参数的映射。模型驱动方法则保留物理约束或迭代结构，学习其中部分参数。Lin等[83]把DD域目标参数估计转为压缩感知问题，将交替方向乘子法（alternating direction method of multipliers，ADMM）展开为ADMM-Net，并比较估计精度与运行时间。此类方法显式利用稀疏模型，但仍依赖字典、噪声及训练设置，原算法性质也不能直接作为训练后网络的性能保证。

（3）目标检测

Méndez-Monsanto Suárez等[84]在叠加训练OTFS-ISAC中利用深度神经网络（deep neural network，DNN）学习目标检出判决，减轻传统门限设置对先验统计信息的依赖。Yan等[85]先对收发DD符号作二维相关，再用带注意力机制的残差网络判断目标数量，在1～6个目标的仿真设置中比较分类准确率。上述研究体现了学习型感知判决的两种思路：一类直接学习目标检出规则，减少对人工门限设置的依赖；另一类将DD域相关处理与网络特征提取结合，用于目标数量识别，为利用通感观测开展目标检测与识别提供了方法参考。

（4）状态预测

连续运行时，学习对象可由当前参数转向后续路径和状态变化。Cai等[86]在OTFS车联网上行感知中，先用多重信号分类（multiple signal classification，MUSIC）算法和门限法估计角度、时延及

多普勒，经几何关系得到位置，再以历史位置序列输入长短期记忆网络（long short-term memory network，LSTM），预测下一时刻位置，主要在单目标、随机加速度设置下评价轨迹RMSE。Yan等[87]针对无人机感知中的突发扰动，将实时预测与分数时延、多普勒估计结合，补偿干扰对动态感知的影响。Ying等[88]在高时延分辨率MIMO-OTFS通信中，以自编码器压缩信道特征，经循环网络预测有效路径索引，再用最小二乘重构系数，主要验证信道预测及BER，可为通感时序处理提供方法参考。上述研究将时序预测与参数估计、信道重构相结合，利用历史观测中的变化规律辅助后续处理，体现了学习方法在连续感知和时变信道处理中的应用潜力。表4汇总了第三节各方向的代表性研究。

表4　OTFS-ISAC代表性工作总结

方向	代表文献	系统模型	关键假设	通感目标	主要运算/代价	验证方式	优势与边界
波形设计	[42]	随机填充OTFS	循环结构；序列已知	BER、模糊函数	序列填充及匹配	仿真	提高能量利用；响应依赖序列
	[43]	OTFS-FMCW融合	已知啁啾；融合结构可分离	数据传输、距离/速度	异构叠加及参数提取	仿真	降低部分估参负担；额外功率/资源与互扰
	[45]	MIMO共享DD/私有TF格点	阵列标定；私有TF格点可区分	通信速率、角度分辨	虚拟阵列与DD/角度估计	仿真	增加孔径；私有格点占用数据资源
	[47]	OTFS联合收发设计	已知帧；局部权重；SNR损失约束	旁瓣、干扰与通信性能	主化—最小化/交替更新；FFT互相关，序列变化判停	仿真	局部旁瓣可控；非凸解及先验敏感
	[52]	Zak-OTFS脉冲设计	周期覆盖有效DD扩展	感知、BER/PAPR	脉冲成形、匹配及数据处理	理论/仿真	响应可预测；晶化和脉冲约束
资源分配	[38]	多用户MIMO-OTFS	DD路径可获取；格点共享	通信与感知权衡	DDRB配置；代价取决于用户/格点规模	仿真	参数驱动配置；泄漏及用户重叠限制
	[16]	单基地MIMO-OTFS	已知发射帧；显式ISI/ICI	目标发现/跟踪、通信速率	多维广义似然比检验及DD复用；候选数主导	仿真	扩展无模糊范围；搜索及动态范围代价
通感联合接收	[60]	OTFS距离—速度轮廓	已知导频；物理脉冲响应	连续距离/速度精度	脉冲/旁瓣精修；代价取决于候选数	仿真/实验	分数估计；失配、SNR及目标重叠限制
	[56]	OTFS谱匹配接收	已知帧；候选谱与模型匹配	检测、距离/速度	粗搜、三角/二次谱匹配	仿真	减少全局搜索；候选遗漏与近似误差
	[57]	低维OTFS雷达接收	已知发射帧；响应元素可筛选	距离/速度估计	低维矩阵及狄利克雷核筛选	仿真	减少处理维数；近似及弱目标遗漏风险
	[73]	PI-SBL	稀疏路径；相邻块参数缓变	信道估计与感知参数获取	二维FFT迭代$O(D\log D)$；跨帧初始化	仿真/SDR	继承估计初值；新路径、突变及误继承限制
	[72]	OTFS辅助车联网	几何与运动状态可映射	波束、训练及状态预测	状态预测与DD候选收缩	仿真	减少训练；几何失配与预测过期限制
	[71]	通信辅助环境反演	DD路径可关联；发射位置/目标待估	环境参数恢复	加权最小二乘、半定松弛	仿真	复用信道参数；几何歧义及前级误差
	[67]	双基地Turbo-OTFS雷达	未知通信数据；解调软信息可交换	解调与目标感知	解调/感知迭代；代价取决于轮次	仿真	减弱未知数据影响；误解调及反馈累积
网络协同与安全保障	[74]	无小区大规模MIMO	多AP信道获取与协同	最差用户SINR；感知SINR	二次变换/迭代凸优化；CPU协调	仿真	空间及公平收益；条件性收敛及同步、前传约束
	[75]	无小区MIMO-OTFS	各AP功率预算；通信QoS约束	感知SNR、目标检测概率	协同功率分配与目标检测	仿真	兼顾检测与通信服务；依赖节点协同及信道信息
	[78]	OTFS车联网联合雷达通信	不完美CSI；规定窃听者能力	保密性能、BER及雷达服务	人工噪声设计与信号检测	仿真	保护通信内容；受CSI误差与威胁模型限制

续表

方向	代表文献	系统模型	关键假设	通感目标	主要运算/代价	验证方式	优势与边界
	[79]	OFDM/OTFS 感知安全	被动感知窃听者；合法通感约束	合法/非授权检测与通信性能	时频幅相扰动、模糊函数优化	仿真	抑制非授权感知；合法性能与保护强度存在折中
学习型通感技术	[81]	空地 OTFS-ISAC 预均衡	单天线；时变 CSI；发射功率约束	符号 MSE、感知参数 CRLB	信道预测与预均衡网络	仿真	减轻接收端负担；依赖预测 CSI
	[82]	低地球轨道卫星 OTFS-ISAC 调度	用户、波束与 DD 资源约束	通信速率、感知效用	Transformer 推理与可行性投影	仿真	联合配置资源；受训练样本与系统设置限制
	[89]	城轨 OTFS-ISAC 信道估计	导频辅助；给定训练数据及信道设置	信道 NMSE、BER	条件生成对抗网络与 LSTM；离线训练与在线估计	仿真	改善信道获取；感知收益需单独评价
	[83]	OTFS-ISAC 目标参数估计	DD 稀疏字典；给定训练设置	参数估计精度、运行时间	ADMM 迭代展开与网络推理	数值实验	利用模型结构；受字典与训练分布限制
	[84]	叠加训练 OTFS-ISAC	训练序列与数据叠加传输	目标检测性能	DNN 目标检出判决	仿真	减少门限统计量预计算；需匹配测试条件
	[85]	OTFS 目标数量识别	1～6 个目标；给定训练分布	目标计数准确率	二维相关、残差网络与注意力机制	仿真	学习目标数量；未验证物理类别识别
	[86]	OTFS 车联网上行感知	整数时延/多普勒；单目标仿真	轨迹预测 RMSE	MUSIC、门限估计、LSTM 位置预测	仿真	利用历史位置；受定位误差与运动模型影响
	[87]	OTFS 无人机动态感知	突发干扰；分数时延、多普勒	动态感知精度	预测辅助估计与干扰补偿	仿真	补偿突发扰动；依赖训练与干扰条件

4　OTFS-ISAC 应用场景

OTFS-ISAC 以 DD 参数表征高动态路径和目标，多天线再引入角度维度，使链路配置、感知及状态预测能够共享物理信息。图 8 展示车联网、高铁、低空和非地面应用场景。

4.1　车联网

高速运动会使车辆通信信道快速变化，并产生明显多普勒扩展，车辆位置、速度及周围环境，也需要实时感知和预测。车联网 OTFS-ISAC 要同时保证通信可靠，支持车辆定位与环境感知，并控制多用户接入、动态波束调整的开销；低时延参数估计、鲁棒链路维护及通感协同处理，都是该场景需要研究的内容。

Yuan 等[72]根据回波状态预测拓扑，并据此配置下行波束、缩小上行搜索范围，Ling 等[8]在宽波束感知与窄波束通信之间交替切换。混合阵列的射频链数量受限，Dehkordi 等[90]对此采用波束空间似然处理，进行宽角发现和定向跟踪，再用角度估计结果安排数据流；Hussain 等[91]把背景抑制、检测和通信恢复联合处理，在仿真中通过目标检测、BER 及误差向量幅度评价效果，独立车载雷达中的波形优化也能为旁瓣设计提供参考[92]。在复杂交通环境中，还需判断各个有效路径所对应的用户，处理非视距（non-line-of-sight，NLoS）带来的不确定性，以及预测误差的累积；评价雷达侧收益时，也要把通信承载需求和资源限制计入。



车联网　　高铁　　无人机与低空网络　　卫星与非地面网络

图 8　OTFS-ISAC 典型应用场景

在移动节点感知的原型研究中，Wu等[93]采用5.6 GHz载频、96 MHz带宽的通用软件无线电外设平台，由机器人搭载发射端，金属板作为目标，从直达与反射路径中估计目标位置和移动发射端速度，验证了OTFS通信信号用于环境感知的可行性。

4.2　高铁

高铁运行轨迹较规则，覆盖区域比较狭长，高速和高载频则会加大多普勒及分数泄漏的影响；切换、隧道遮挡和沿线非平稳传播，还会使路径快速变化。轨迹先验可以缩小候选范围，但使用这些信息时，仍需处理跨站同步问题。

Xie等[94]先进行粗网格搜索，再用离栅格精搜估计DD参数，结合到达时间差/频率差及加权最小二乘，完成定位和测速，并推导CRLB，在3 GHz载频、0～139 m/s列车速度范围内，以RMSE与CRLB评价定位和测速结果。Jiang等[95]在高铁通信中优化非均匀网格稀疏贝叶斯估计，改善分数多普勒建模。后一类研究主要用于获取信道，评价联合收益时，还需补充定位、测速及训练开销指标。

用于全线路时，系统需要检验场景切换、时钟误差及状态跟踪的影响，一起评价通信、定位和测速的成本。遮挡或路径突变可能使规则轨迹先验不再准确，单一场景中的NMSE或BER收益，还要在连续覆盖条件下验证。

4.3　无人机与低空网络

UAV的三维机动或姿态变化，会改变速度在传播路径方向上的投影，因此多普勒频移也会变化；城市中出现遮挡和镜面反射时，传播几何的确定又会更困难。物流、巡检、应急等应用具有特殊的通信需求和安全要求，在这类条件下进行DD参数处理，需要将NLoS、阵列变化及飞行载荷限制一并考虑[96]。

Xiang等[9]由UAV回波估计用户位置、速度，预测三维拓扑后设置NOMA功率，并考虑非理想CSI，把感知状态用于接入和调度。扩展至多UAV系统，还要考虑续航、姿态与同步误差，并把状态估计及预测的不确定性计入配置。

4.4　卫星与非地面网络

卫星网络及其他非地面网络（non-terrestrial network，NTN）有大多普勒、长时延、宽波束和多星协同等特点，帧内路径近稳定时，可用紧凑DD结构描述[97]。但卫星过境时的加速度、宽带尺度效应，还需要专门建立模型。

低轨卫星的现有研究主要讨论严重多普勒下的收发设计，以及多用户OTFS/OFDM在相同开销下的比较，相关结果为通信设计提供了基础[98-99]。研究通感任务时，还需说明对地照射、回波接收和通信链路的关系，将往返几何、杂波、自干扰及同步纳入模型，并同时报告传输与目标指标。

直接面向卫星OTFS-ISAC的研究中，Hassan等[82]考虑20 GHz载频、550 km轨道高度的低轨系统，联合安排波束功率、用户接入及通感DD资源比例，以通信速率和目标费舍尔信息评价调度效果。

NTN使用多个节点后，要处理不同卫星信号在到达时间、相位及多普勒上的差别，还要考虑星历误差；较长的往返时延和有限算力，也会约束处理过程。分层资源配置、结构化接收与状态预测需要放到星地通感模型中验证，可先按星地几何生成时变时延和多普勒，在信道模拟器与SDR平台上检验同步补偿、BER及目标参数误差，再逐步开展外场和在轨验证。表5列出了各场景的特征、关键问题及核心技术。

5　技术挑战与发展趋势

5.1　技术挑战

已有工作提供了OTFS-ISAC的一些技术基础，将这些方法用到实际环境时，仍要满足任务需求和实现条件，下面讨论几个尚需研究的问题。

（1）连续参数与模型失配。整数DD栅格、理想脉冲和简化传播过程，是OTFS-ISAC模型中常用的假设，而实际信道中会有分数时延和多普勒扩展，观测窗口有限，脉冲也并不理想；这些情况会引起能量泄漏和参数耦合。超分辨估计、谱校准与匹配方法能缓解部分泄漏，但脉冲模型误差、信噪比、多目标重叠和环境变化仍会影响效果；通信信号经过单程路径，感知回波则往返传播，二者的几何约束有区别，一个目标还可能对应多个传播分量，因此判断路径关联也较为困难[56,60-61]。硬件非理想与时钟偏差会影响参数辨识，扩展目标、微多普勒、强杂波及目标重叠也使点目标、独立白噪声模型难以充分描述实际观测[17,100]。

（2）联合推断与误差传播。OTFS-ISAC从共

表5 OTFS-ISAC典型应用场景及核心技术

应用场景	场景特征	关键问题	核心技术及作用	代表文献
车联网	高多普勒、多车辆	车辆运动导致波束失配；频繁搜索与训练增加开销	利用回波估计及预测车辆状态，辅助波束更新与接收搜索；结合背景抑制和通信恢复，支持车辆跟踪与数据传输	[8,72,90-91]
高铁	高速运动、轨迹规则	分数参数引起栅格泄漏，影响信道获取及定位测速	通过粗细搜索与离栅格估计提取DD参数，结合时差、频差完成定位测速；利用学习或稀疏估计改善信道获取	[89,94-95]
无人机与低空网络	三维机动、拓扑变化	用户运动及CSI误差使功率配置与实际链路状态失配	利用回波估计位置和速度，预测三维拓扑并进行鲁棒NOMA功率分配，将感知状态用于改善用户速率	[9]
卫星与非地面网络	长时延、大多普勒、资源受限	时变信道下的可靠接收；波束、功率及DD资源的通感共享	通过多普勒补偿与结构化接收支持可靠传输；联合调度波束功率、用户接入及DD资源，协调通信速率与感知信息获取	[82,97-99]

享观测中恢复通信数据、传播路径及感知参数，这些量会互相影响，未知数据增加了感知估计的不确定性，感知参数不准又影响信道恢复、数据检测。联合检测、参数关联和后验共享可以提高信息利用率，但目标遗漏、关联错误或模型失配，可能使误差在迭代中逐步积累[66,71]。在多用户、多目标或状态变化较快的场景中，接收机还要判断观测关联并维护置信度，才能维持可靠接收。

（3）实时复杂度与资源约束。天线、用户及目标增多后，系统需要同时处理更多更复杂的数据，OTFS-ISAC的搜索范围和计算量也会扩大。虽然目前已有相关研究探索了低复杂度的算法，但是也会出现候选遗漏、近似误差等问题[56-57,73]。与此同时导频、DD资源与空间自由度的配置还要受到有限资源与应用场景的共同约束。因而评价系统性能，既要看算法精度，也需考虑计算耗时、所需存储和资源更新周期。

（4）实验验证与标准化。现有OTFS-ISAC工作多数以理论分析、数值仿真验证方法，进行实际实验时，还需处理同步误差、动态范围、相位噪声，以及硬件非理想和标定误差[13,73]。各项研究的帧结构与训练方案不同，评价指标、资源条件也有差别，使波形和算法难以直接公平比较；目前，标准接口、实验平台和统一测试条件仍没有完全建立。从原型验证走向规模化部署，还需系统评估OTFS与现有空口的兼容性及实际实现开销[13-14]。

5.2 发展趋势

连续推断、联合后验和动态协同，仍是近期研究讨论的内容，下面结合推断对象、信息流和系统规模，分五个方面介绍后续发展趋势。

（1）连续参数推断。超分辨、谱校准及匹配方法用于恢复分数参数，Zak脉冲可改善局部化[51-53,56,60-61]。后续研究还要考察连续参数的可辨识性，分析脉冲匹配和失配下界，利用候选生成与局部精修控制计算量；如果进一步把加速度、近场或宽带尺度扩展加入模型，也应根据观测所含信息，判断这种扩展是否可行。

（2）联合概率推断。进行联合恢复时，可以共用导频、观测与Zak充分统计量；用因子图可把符号、路径存在性、连续参数和用户关联放在同一模型内描述，得到经过校准的后验[32,62-64,73]。若采用模型驱动学习，DD结构与似然仍需保留，所得置信度是否可信、方法能否泛化，也需要评价。学习辅助处理还需区分参数恢复与时序预测，结合分布变化、新路径和误差传播评价，避免以单一场景的训练结果替代联合任务验证。

（3）跨帧状态闭环。导频、波束、功率和搜索范围可按状态后验调整，预测精化、PI继承及Turbo反馈，将估计、跟踪和预测结果用于下一帧配置；配置更新后，后续观测条件也会改变[65-67,72-73]。闭环能否稳定运行，需要结合可观测性考察，可用事件更新、新路径检测和反馈重置控制误差，再评价闭环稳定性及所节省的训练资源。

（4）网络协同与安全。OTFS-ISAC正在向多基站、多UAV及星地节点协同拓展，提高大范围动态场景中的通感能力。分层处理和动态频谱共享

有望支持更灵活的信息交互，促进不同节点之间的协同运行。通信保密与感知信息保护也将成为网络协同的重要研究方向。未来可探索发射信号与信息共享策略的联合设计，在发挥协同增益的同时，抑制非授权接收机对通信内容和目标状态的获取，兼顾通感性能与信息安全[76-79]。

（5）环境知识融合。现有研究已经表明，外部环境知识的融合可进一步改善信道估计精度、减少导频开销[7,101]。因此环境知识可以为无线观测提供补充，后续可进一步探索环境感知与OTFS-ISAC系统的融合设计，以改善复杂动态场景下的通感性能和资源利用效率。

6　结束语

本文围绕6G高动态场景梳理了OTFS-ISAC研究，包括系统模型、性能边界、关键技术和应用场景。面向6G在高动态环境下对高可靠通信与高精度感知的需求，OTFS-ISAC利用DD域参数结构为通信与感知融合提供了统一基础。本文系统梳理了OTFS-ISAC系统模型、通感性能、关键技术与典型应用，并展望其未来发展方向。相信随着相关研究及实验验证的持续推进，OTFS-ISAC可为6G高动态通信与感知融合提供技术支撑。

参考文献：

[1] 王晓云, 张小舟, 马良, 等. 6G通信感知一体化网络的感知算法研究与优化[J]. 通信学报, 2023, 44(2): 219-230.
WANG X Y, ZHANG X Z, MA L, et al. Research and optimization on the sensing algorithm for 6G integrated sensing and communication network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(2): 219-230.

[2] LIU A, HUANG Z, LI M, et al. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 994-1034.

[3] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2017: 1-6.

[4] 廖勇, 罗渝, 荆亚昊. 6G新型时延多普勒通信范式: OTFS的技术优势、设计挑战、应用与前景[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1827-1842.
LIAO Y, LUO Y, JING Y H. 6G new time-delay Doppler communication paradigm: Technical advantages, design challenges, applications and prospects of OTFS[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1827-1842.

[5] YUAN W J, ZHOU L, DEHKORDI S K, et al. From OTFS to DD-ISAC: Integrating sensing and communications in the delay Doppler domain[J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 31(6): 152-160.

[6] 廖勇, 袁伟杰, 魏志强. “面向6G的OTFS系统基础理论与关键技术”专题导读[J]. 电讯技术, 2025, 65(2): 163-164.
LIAO Y, YUAN W J, WEI Z Q. Editorial for the special issue “Fundamental theories and key technologies of OTFS systems for 6G”[J]. Telecommunication Engineering, 2025, 65(2): 163-164.

[7] QING C J, LIU Z Y, HU W Q, et al. Environmental sensing-assisted off-grid channel estimation in UAV-enabled OTFS-ISAC systems[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2026, 39(7): 103923.

[8] LING Z L, WU Y X, ZHANG G Y, et al. Integrated sensing and communications with OTFS: Application in V2I communications[C]//Signal and Information Processing, Networking and Computers. Singapore: Springer, 2023: 528-537.

[9] XIANG L P, XU K, HU J, et al. Robust NOMA-assisted OTFS-ISAC network design with 3-D motion prediction topology[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(9): 15909-15918.

[10] 高明琪, 代健美, 朱诗兵, 等. OTFS技术: 研究现状与发展趋势[J]. 电讯技术, 2025, 65(2): 177-187.
GAO M Q, DAI J M, ZHU S B, et al. OTFS technology: Research status and development trends[J]. Telecommunication Engineering, 2025, 65(2): 177-187.

[11] SHTAIWI E, ABDELHADI A, LI H, et al. Orthogonal time frequency space for integrated sensing and communication: A survey[PP/OL]. arXiv (2024-02-15)[2026-09-17]. https://arxiv.org/abs/2402.09637.

[12] TRAN K N T, MAC H D, WON D, et al. Future prospects on OTFS-based integrated sensing and communication[C]//2025 16th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE, 2025: 882-887.

[13] HONG W, ZHANG Z Y, LI C, et al. Orthogonal time frequency space (OTFS) waveform toward 6G ISAC: Fundamentals, standardizations, and prototypes[J/OL]. IEEE Communications Standards Magazine, 2026-03-31: 1-8[2026-09-17]. https://doi. org/10.1109/MCOMSTD.2026.3676458.

[14] NIE M C, CHONG R X, LI S Y, et al. Toward standardizing OTFS: A candidate waveform for next-generation wireless networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2026, 10(2): 107-118.

[15] GAUDIO L, KOBAYASHI M, CAIRE G, et al. On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 5951-5965.

[16] KESKIN M F, MARCUS C, ERIKSSON O, et al. Integrated sensing and communications with MIMO-OTFS: ISI/ICI exploitation and delay-Doppler multiplexing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 10229-10246.

[17] ETSI. Integrated Sensing and Communications (ISAC); Channel Modelling, Measurements and Evaluation Methodology: ETSI GR ISC 002 V1.1.1[R/OL]. 2025-08-05[2026-10-26]. https://www. etsi. org/deliver/etsi_gr/ISC/001_099/002/01.01.01_60/gr_ISC002v010101p.pdf.

[18] ROU H S, DE ABREU G T F, CHOI J, et al. From orthogonal time-frequency space to affine frequency-division multiplexing: A comparative study of next-generation waveforms for integrated sensing and communications in doubly dispersive channels[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2024, 41(5): 71-86.

[19] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(10): 6501-6515.

[20] SURABHI G D, AUGUSTINE R M, CHOCKALINGAM A. On the diversity of uncoded OTFS modulation in doubly-dispersive channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(6): 3049-3063.

[21] GAUDIO L, COLAVOLPE G, CAIRE G. OTFS vs. OFDM in the presence of sparsity: A fair comparison[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(6): 4410-4423.

[22] CHI Y H, PENG Z Y, LIU L, et al. Achievable rate and coding principle for MIMO multicarrier systems with cross-domain MAMP receiver over doubly selective channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 10354-10370.

[23] BEMANI A, KSAIRI N, KOUNTOURIS M. Affine frequency division multiplexing for next generation wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(11): 8214-8229.

[24] LI S Y, YUAN W J, WEI Z Q, et al. Cross domain iterative detection for orthogonal time frequency space modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4): 2227-2242.

[25] YUAN Z D, LIU F, YUAN W J, et al. Iterative detection for orthogonal time frequency space modulation with unitary approximate message passing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(2): 714-725.

[26] 王永川, 周平, 黄局. 正交时频空调制的信道估计与信号检测技术研究现状[J]. 通信学报, 2024, 45(9): 229-243.
WANG Y C, ZHOU P, HUANG J. Research status of channel estimation and signal detection techniques for orthogonal time frequency space modulation[J]. Journal on Communications, 2024, 45(9): 229-243.

[27] CORREAS-SERRANO A, PETROV N, GONZALEZ-HUICI M, et al. Comparison of radar receivers for OFDM and OTFS waveforms[C]// 2022 19th European Radar Conference (EuRAD). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 93-96.

[28] KESKIN M F, WYMEERSCH H, ALVARADO A. Radar sensing with OTFS: Embracing ISI and ICI to surpass the ambiguity barrier[C]// 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.

[29] GAUDIO L, KOBAYASHI M, BISSINGER B, et al. Performance analysis of joint radar and communication using OFDM and OTFS[C]// 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1-6.

[30] ROU H S, DE ABREU G T F. Normalized ambiguity function characteristics of OFDM, OTFS, AFDM, and CP-AFDM for ISAC[C]//2026 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE, 2026: 1-6. DOI: 10.1109/ICC59461.2026.11588054.

[31] BEMANI A, KSAIRI N, KOUNTOURIS M. Integrated sensing and communications with affine frequency division multiplexing[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(5): 1255-1259.

[32] GOPALAM S, INALTEKIN H, COLLINGS I B, et al. Optimal Zak-OTFS receiver and its relation to the radar matched filter[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 4462-4482.

[33] ZHANG X Y, YIN H R, TANG Y Q, et al. A unified multicarrier waveform framework for next-generation wireless networks: Principles, performance, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 5416-5455.

[34] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4906-4917.

[35] 江甲沫, 韩凯峰, 徐晓燕. 6G通信感知一体化系统的性能指标[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(5): 39-45.
JIANG J M, HAN K F, XU X Y. Performance Metric for 6G Integrated Sensing and Communication System[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(5): 39-45.

[36] 3GPP TS 22.137 V19.1.0 (2024-03) Service requirements for Integrated Sensing and Communication; Stage 1[S/OL][2026-10-26]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.137/22137-j10.zip.

[37] XIONG Y F, LIU F, CUI Y H, et al. On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2023, 69(9): 5723-5751. DOI: 10.1109/TIT.2023.3284449.

[38] ZHANG M Y, HE H T, SONG S H, et al. Resource allocation for OTFS-based ISAC systems[C]//2023 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom). Piscataway: IEEE, 2023: 282-287.

[39] 3
GPP. Study on integrated sensing and communication (ISAC) for NR: 3GPP TR 38.765 V20.0.0[R/OL]. 2026-06[2026-10-26]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.765/38765-k00.zip.

[40] IEEE Std 802.11bf-2025 IEEE Standard for Information Technology -- Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks -- Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing[S/OL] [2026-10-26]. https://standards. ieee. org/ieee/802.11bf/11574/.

[41] Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023) Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[S/OL][2026-10-26]. https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160-0-202311-I/en.

[42] KARPOVICH P, ZIELINSKI T P. Random-padded OTFS modulation for joint communication and radar/sensing systems[C]//2022 23rd International Radar Symposium (IRS). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 104-109.

[43] ZEGRAR S E, RAFIQUE S, ARSLAN H. OTFS-FMCW waveform design for low complexity joint sensing and communication[C]//2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE, 2022: 988-993.

[44] LI S Y, YUAN W J, LIU C, et al. A novel ISAC transmission framework based on spatially-spread orthogonal time frequency space modulation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40 (6): 1854-1872.

[45] WANG K L, PETROPULU A. ISAC MIMO systems with OTFS waveforms and virtual arrays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2026, 44: 229-244.

[46] ZHOU M W, CHEN F J, YU H, et al. Iterative channel estimation for OTFS systems based on low-PAPR hybrid superimposed pilots[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(8): 1939-1943.

[47] ZHANG K C, YUAN W J, FAN P Z, et al. Dual-functional waveform design with local sidelobe suppression via OTFS signaling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(9): 14044-14049.

[48] KARIMIAN-SICHANI N, SEDIGHI S, ALAEE-KERAHROODI M,

et al. Phase-tailored OTFS waveform with reduced sidelobes for ISAC systems[C]//2025 33rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Piscataway: IEEE, 2025: 2332-2336.

[49] 刘涛, 李香璇, 李玉博. 通感一体化波形和接收滤波器联合设计方法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(7): 2163-2171.
LIU T, LI X X, LI Y B. Joint design of integrated sensing and communication waveforms and receiving filters[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(7): 2163-2171.

[50] 石明利, 李晓辉, 吕思婷. 基于多目标公平感知的通感一体化恒模波形设计[J]. 通信学报, 2024, 45(10): 31-40.
SHI M L, LI X H, LYU S T. ISAC constant modulus waveform design based on multi-target fair sensing[J]. Journal on Communications, 2024, 45(10): 31-40.

[51] MOHAMMED S K, HADANI R, CHOCKALINGAM A, et al. OTFS—Predictability in the delay-Doppler domain and its value to communication and radar sensing[J]. IEEE BITS the Information Theory Magazine, 2023, 3(2): 7-31.

[52] UBADAH M, MOHAMMED S K, HADANI R, et al. Zak-OTFS to integrate sensing the I/O relation and data communication[PP/OL]. V2. arXiv (2025-06-27)[2026-09-17]. https://arxiv.org/abs/2404.04182v2.

[53] MEHROTRA N, MATTU S R, CALDERBANK A R. Pulse shaping filter design for integrated sensing and communication with Zak-OTFS [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2026, 15: 2323-2327.

[54] CUI Z C, HU J, CHENG J, et al. Multi-domain NOMA for ISAC: Utilizing the DoF in the delay-Doppler domain[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(2): 726-730.

[55] LI Z J, YUAN W J, JING Z X, et al. RIS-aided OTFS: A novel ISAC scheme for achieving real-time communication and sensing[C]//Proceedings of the 2nd Workshop on Integrated Sensing and Communications for Metaverse. New York: ACM, 2023: 7-12.

[56] XIA X C, XU K, WANG Y R, et al. Achieving better accuracy with less computations: A delay-Doppler spectrum matching assisted active sensing framework for OTFS based ISAC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(6): 6204-6220.

[57] BACCHIELLI T, PUCCI L, PAOLINI E, et al. Performance analysis of a low-complexity OTFS integrated sensing and communication system[C]//2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall). Piscataway: IEEE, 2023: 1-6.

[58] LEE H G, KIM J, ZHAO J, et al. Single-tone-based channel estimation method for OTFS systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(3): 1638-1651.

[59] YOGESH V, MATTU S R, CHOCKALINGAM A. Low-complexity delay-Doppler channel estimation in discrete Zak transform based OTFS[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(3): 672-676.

[60] ZEGRAR S E, HAIF H, ARSLAN H. OTFS-based ISAC for super-resolution range-velocity profile[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(7): 3934-3946.

[61] YANG Y R, PAN Y C, LIU X Q, et al. Barycenter calibration with high order spectra of windowed delay-Doppler signals for OTFS based ISAC systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2024, 72: 2450-2466.

[62] LI X R, LI Z H, YU Y, et al. Passive sensing and channel estimation methods for OTFS-ISAC system[C]//2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.

[63] KUMAR A, MAJHI S, LI H. Sensing and channel estimation for OTFS-ISAC system with reduced PAPR[J]. IEEE Communications Letters, 2025, 29(9): 2023-2027.

[64] MENG Z, ZHANG Y, ZHOU Y, et al. Data-interference free and low-overhead channel estimation framework for MIMO-OTFS system[J]. IEEE Communications Letters, 2025, 29(9): 2143-2147.

[65] SHI Y M, HUANG Y. Integrated sensing and communication-assisted user state refinement for OTFS systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(2): 922-936.

[66] YANG X, LI H, GUO Q H, et al. Sensing aided uplink transmission in OTFS ISAC with joint parameter association, channel estimation and signal detection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 9109-9114.

[67] LI H. Turbo bi-static radar in OTFS-based joint communications and sensing[C]//ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2023: 6435-6441.

[68] WANG H R, YU H, DIAO X Q, et al. Sensing-aided channel estimation in OTFS-ISAC systems[C]//2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE, 2024: 2382-2387.

[69] YUAN W J, LI S Y, WEI Z Q, et al. Bypassing channel estimation for OTFS transmission: An integrated sensing and communication solution [C]//2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). Piscataway: IEEE, 2021: 1-5.

[70] LI B Y, YUAN W J. OTFS communications-assisted environment sensing[C]//2023 IEEE 3rd International Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S). Piscataway: IEEE, 2023: 1-6.

[71] LI B Y, YUAN W J, LIU F, et al. OTFS-based ISAC: How delay Doppler channel estimation assists environment sensing?[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(12): 3563-3567.

[72] YUAN W J, WEI Z Q, LI S Y, et al. Integrated sensing and communication-assisted orthogonal time frequency space transmission for vehicular networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1515-1528.

[73] WEI X Y, YUAN W J, ZHANG K C, et al. OTFS-assisted ISAC system: Delay Doppler channel estimation and SDR-based implementation [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(11): 11865-11878.

[74] FAN Y F, WU S C, BI X X, et al. Power allocation for cell-free massive MIMO ISAC systems with OTFS signal[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(7): 9314-9331.

[75] SINGH S, NAKKEERAN A, SINGH P, et al. Target detection for OTFS-aided cell-free MIMO ISAC system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(7): 11568-11573. DOI: 10.1109/TVT.2025.3550135.

[76] MENG K, MASOUROS C, CHEN G, et al. Network-level integrated sensing and communication: Interference management and BS coordination using stochastic geometry[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(12): 19365-19381. DOI: 10.1109/TWC.2024.3483031.

[77] ABOUELMAATI A M, ABOAGYE S, TABASSUM H. Joint spectrum partitioning and power allocation for energy efficient semi-integrated sensing and communications[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(7): 1589-1593.

[78] ABUSHATTAL A, YAZGAN A. Artificial noise physical layer secu-

rity for V2X joint radar communication systems-based OTFS waveform[J]. IEEE Access, 2025, 13: 87884-87897. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3571491.

[79] DU B, HAN K, MASOUROS C. Securing the sensing functionality in ISAC: KLD-based ambiguity function shaping[J]. npj Wireless Technology, 2026, 2: 79. DOI: 10.1038/s44459-026-00089-0.

[80] 冉鑫怡, 陈前斌, 徐勇军, 等. 基于深度学习的通感一体化系统综述[J]. 通信学报, 2025, 46(6): 233-250.
RAN X Y, CHEN Q B, XU Y J, et al. Survey on deep learning-based integrated sensing and communication systems[J]. Journal on Communications, 2025, 46(6): 233-250.

[81] WANG W H, GUO J, WANG S Q, et al. Pre-equalization design for ISAC-OTFS air-ground transmission: a deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2026, 75(10): 23996-24009. DOI: 10.1109/TVT.2026.3705961.

[82] HASSAN S S, ADHIKARY A, DAS N, et al. OTFS-enabled ISAC scheduling for LEO satellite with reconfigurable holographic surfaces using a transformer approach[C]//2026 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2026: 1-6. DOI: 10.1109/WCNC65185.2026.11555573.

[83] LIN W, ZHENG H, FENG X, et al. Deep unfolding network for target parameter estimation in OTFS-based ISAC systems[C]//2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2024: 1-6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10571155.

[84] MÉNDEZ-MONSANTO SUÁREZ L, CHEN-HU K, FERNÁNDEZ-GETINO GARCÍA M J, et al. Deep learning-aided robust integrated sensing and communications with OTFS and superimposed training [C]//2023 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom). Piscataway: IEEE, 2023: 1-6. DOI: 10.1109/MeditCom58224.2023.10266634.

[85] YAN Z Y, TAN L, ZHANG X Q, et al. Deep learning-assisted target classification using OTFS signaling[C]//2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE, 2023: 1-6. DOI: 10.1109/ICCCWorkshops57813.2023.10233827.

[86] CAI L Q, YAN Z Y, ZHANG X Q, et al. Uplink sensing in vehicular networks with OTFS signaling: a LSTM-based approach[C]//2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2024: 1-6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10570714.

[87] YAN Z Y, YUAN W J, ZHANG X Q, et al. Deep-learning-based compensation mechanism for UAV sensing via OTFS signaling[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(15): 29797-29810. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3571754.

[88] YING D D, YE F. Deep learning supported path prediction and channel estimation for MIMO-OTFS system with high delay resolution[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(3): 3584-3597.

[89] 杨骞, 苏宏升, 陶旺林, 等. 城轨车-地场景下基于CGAN-LSTM网络的OTFS-ISAC系统信道估计[J]. 通信学报, 2025, 46(2): 59-71.
YANG Q, SU H S, TAO W L, et al. OTFS-ISAC system channel estimation based on GAN-LSTM network in urban rail train-infrastructure scenario[J]. Journal on Communications, 2025, 46(2): 59-71.

[90] DEHKORDI S K, GAUDIO L, KOBAYASHI M, et al. Beam-space MIMO radar for joint communication and sensing with OTFS modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22 (10): 6737-6749.

[91] HUSSAIN K, ALI E M, HUSSAIN W, et al. Robust OTFS-ISAC for vehicular-to-base station end-to-end sensing and communication[J]. Electronics, 2025, 14(21): 4340.

[92] KARIMIAN-SICHANI N, ALAEE-KERAHROODI M, GRECO M S, et al. OTFS for automotive radars: Waveform optimization and ambiguity function analysis[C]//2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE, 2025: 1-5.

[93] WU J, SHI Y Y, YUAN W J, et al. SDR-empowered environment sensing design and experimental validation using OTFS-ISAC signals[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(11): 12252-12263. DOI: 10.1109/TMC.2025.3581716.

[94] XIE J L, HAO Y, LI C R, et al. Research on an algorithm for high-speed train positioning and speed measurement based on orthogonal time frequency space modulation and integrated sensing and communication[J]. Electronics, 2024, 13(22): 4397.

[95] JIANG Z J, LIU K W, QUAN H Y, et al. Fractional Doppler channel estimation for OTFS high-speed railway train-to-ground communication system[J]. Physical Communication, 2025, 72: 102788.

[96] 廖勇, 覃录智, 刘思其. 无人机在低空经济中的应用综述[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025, 42(4): 60-72.
LIAO Y, QIN L Z, LIU S Q. A review of the application of unmanned aerial vehicle in low altitude[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2025, 42(4): 60-72.

[97] 杨帅斌, 张昱, 卢为党. 面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 16-23.
YANG S B, ZHANG Y, LU W D. Satellite Integrated Sensing and Communication Network for 6G and Its Key Technologies[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(5): 16-23.

[98] SHI J, LI Z, HU J F, et al. OTFS enabled LEO satellite communications: A promising solution to severe Doppler effects[J]. IEEE Network, 2024, 38(1): 203-209.

[99] LIU Y, CHEN M, PAN C H, et al. OTFS versus OFDM: Which is superior in multiuser LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(1): 139-155.

[100] ABUSHATTAL A, ZEGRAR S E, YAZGAN A, et al. A comprehensive experimental emulation for OTFS waveform RF-impairments [J]. Sensors, 2023, 23(1): 38. DOI: 10.3390/s23010038.

[101] WANG W H, GUO J, HUANG J X, et al. Visual environment semantic sensing-assisted OTFS channel estimation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 15519-15533.



廖勇（1982– ），男，博士，重庆大学副研究员，主要研究方向为移动通信、人工智能。



陈锦洋（2003− ），男，重庆大学微电子与通信工程学院硕士研究生，主要研究方向为智能信号与信息处理。