

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

廖勇* 罗渝 荆亚昊

(重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044)

摘要: 在未来的通信网络中, 被广泛期待的第6代移动通信系统(The Sixth Generation of Mobile Communications System, 6G)技术将面临诸多挑战, 其中包括在高速移动场景下的超高可靠通信问题。正交时频空间(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制技术克服了传统通信系统在高速移动环境下多径和多普勒效应的影响, 为实现6G超高可靠通信提供了新的可能性。该文首先介绍了OTFS的基本原理、数学模型、干扰与优势分析。然后, 归纳分析了OTFS技术在同步、信道估计、信号检测技术上的研究现状。接着, 从车联网、无人机、卫星通信、海洋通信4个典型应用场景分析了OTFS的应用趋势。最后, 从降低多维匹配滤波器、相位解调和信道估计、硬件实现的复杂度和提高对时频资源的高度利用4个角度探讨了未来研究OTFS需要克服的困难和挑战。

关键词: 第6代移动通信系统; 正交时频空间; 延迟-多普勒域; 同步; 信道估计; 信号检测

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)05-0001-16

DOI: 10.11999/JEIT231133

6G New Time-delay Doppler Communication Paradigm: Technical Advantages, Design Challenges, Applications and Prospects of OTFS

LIAO Yong LUO Yu JING Yahao

(School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the future communication network, the sixth generation mobile communication system technology(6G), which is widely expected, will face many challenges, including the issue of ultra-reliable communication in high-speed mobile scenarios. Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation technology overcomes the multi-path and Doppler effects of traditional communication systems in high-speed mobile environments, and provides a new possibility for realizing 6G ultra-reliable communication. This paper first introduces the basic principle, mathematical model, interference and advantage analysis of OTFS. Then, the research status of OTFS technology in synchronization, channel estimation and signal detection is summarized and analyzed. Then, the application trend of OTFS is analyzed from four typical application scenarios of vehicle networking, unmanned aerial vehicle, satellite communication and marine communication. Finally, the difficulties and challenges to be overcome in future OTFS research are discussed from four aspects: reducing multi-dimensional matching filter, phase demodulation and channel estimation, hardware implementation complexity and improving the high utilization of time-frequency resources.

Key words: The sixth generation of mobile communications system; Orthogonal Time Frequency Space (OTFS); Delay-doppler domain; Synchronization; Channel estimation; Signal detection

1 引言

当前, 移动通信已经进入第5代移动通信系统时代(The Fifth Generation of Mobile Communica-

tions System, 5G)。5G在频谱、连接密度和速率方面带来了革命性的改变, 但对更高要求的应用需求催生了第6代移动通信系统(The Sixth Generation of Mobile Communications System, 6G)的发展。6G技术不仅将延续5G的优势, 还将在速率、延迟、连接和覆盖范围等方面进一步提升。它致力于提供更高的数据传输速率和更大的容量, 预计可以达到每秒多Tbps的级别, 以支持更高分辨率的多媒体内容、大规模数据传输和更复杂的应用^[1-4]。

收稿日期: 2023-10-17; 改回日期: 2024-02-06; 网络出版: 2024-03-21

*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 Item: Chongqing Natural Science Foundation (CSTB2023NSCQ-MSX0025)

它在智能化和自适应性方面也有了进一步的提高,6G具备自适应网络和资源管理能力,可以根据环境和应用需求动态调整通信参数^[5]。通过提供更强大的支持,6G将应用于高清多媒体传输、智能交通等多个领域^[6-8]。

高速移动环境中的通信是6G面临的核心挑战之一,多普勒效应和时延扩展会影响信号传输质量^[9]。为解决这一问题,6G引入了时延多普勒通信范式,以实现在高速运动环境下的稳定通信。正交时频空间(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制是支持时延多普勒通信范式的创新技术,它在时域、频域和空域上都具有正交性,能够有效应对高速移动环境带来的信号失真^[10]。OTFS技术不仅能提供更好的信号捕获和更低的误码率,还有望应用于高速列车、航空器等领域,为高速移动场景下的通信提供解决方案。OTFS技术有望在6G时代大显身手,为高速移动通信提供可靠性保障。它不仅能应用于高速交通工具,还有望在智能交通、远程监测、自动驾驶等领域取得突破^[11]。目前,OTFS已成为6G标准最热门的候选波形^[12],OTFS技术的引入将为6G时代带来更稳定的高速移动通信体验,推动各种行业的创新和发展。

鉴于OTFS技术对于6G的重要性以及在新兴场景的应用价值,需要对OTFS技术进行较为全面的综述。目前在OTFS综述方面,Xiao等人^[13]重点探讨了OTFS在物联网领域的应用,强调了OTFS在高多普勒环境下的鲁棒性,为物联网提供的可能解决方案。虽然涉及物联网应用,但缺乏对6G通信系统特定应用场景的深入分析。在同步、信道估计、信号检测等技术细节上的探究也并不详尽。Wei等人^[12]关注于OTFS在未来6G无线网络中的应用前景,探讨了高移动性环境下的通信挑战和OTFS的潜在应用,例如车联网、毫米波通信等。虽然提及了6G通信系统,但在6G具体应用场景和挑战的细节描述上并不全面和深入。也没有具体地讨论OTFS所面对的同步、信道估计和信号检测等关键技术问题。Li等人^[14]提供了OTFS技术的全面概览,包括其基本原理、与其他调制技术的比较、当前研究热点和具体应用场景的分析。然而,在6G通信系统中OTFS应用的具体分析方面略显不足,没有深入探讨OTFS在6G高速移动场景下的优势和挑战。

为此,本文做出了如下工作和贡献:(1)描述了OTFS技术的优势,包括其基本原理、数学模型、干扰分析和技术特点,挖掘出了OTFS作为6G标准最热门候选波形的原因;(2)归纳了OTFS设计上可

能遇到的挑战,包括同步、信道估计和信号检测,对以上技术的研究现状进行了系统的分析探究,突显了在实际应用中需要解决的关键问题;(3)展望了OTFS的应用趋势,探讨了其在未来通信技术发展中的潜在应用场景和前景;(4)探讨了OTFS在发展过程中降低多维匹配滤波器、相位解调和信道估计、硬件实现的复杂度和提高对时频资源的高度利用4个角度所面临的挑战及解决方案,为未来研究指明了方向。本文弥补了目前已有OTFS综述在针对6G通信系统特定应用场景的深入分析方面欠缺的问题。另外,已有的OTFS综述尽管提及了OTFS的一些技术挑战和研究热点,但在深入讨论同步、信道估计和信号检测等关键技术问题上,缺乏本文所展现的细致和深度。这些技术细节对于理解和优化OTFS系统至关重要。

2 OTFS技术优势

2.1 基本原理

OTFS调制是一种用于高速移动通信环境中的新型调制技术,旨在克服多普勒频移和多径衰落等问题。它采用了时频格子和符号映射的概念,以实现在高多普勒频偏和频率选择性衰落环境下的高效通信。传统调制技术在多普勒频偏和多径衰落等复杂信道条件下容易受到干扰,从而导致通信性能下降。OTFS调制通过在时域和频域上同时调制数据,将信号分布到时频格子中,从而能够在高多普勒频偏和频率选择性衰落条件下保持信号的完整性^[15]。

在OTFS调制中,发送信号被表示为2维时频格子中的点。这个时频格子可以被看作一个2维空间,在这个空间中,时间轴表示为横轴,频率轴表示为纵轴。每个格子交叉点代表一个复数值,被称为“格子点”,这些格子点将构成传输的符号。时频格子的构建依赖于两个基本概念:延迟和多普勒。延迟对应于信号在时域上的传播时间,多普勒对应于信号在频域上的频率偏移。通过在时延维度和多普勒维度上放置格子点,信号被映射到时频格子中。这使得信号能够在复杂的多普勒频移环境中保持相对稳定的传输特性^[16]。一旦信号被映射到时频格子中,就需要将每个格子点映射到传输的符号。通常情况下,正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)等调制方案可以用于这个目的。具体而言,每个格子点可以对应到一个QAM符号,其中信号的实部和虚部分别用来表示信号在时域和频域上的信息。在接收端,执行逆操作,将接收到的时频格子映射回原始信号空间,从而重构出原始数据。

2.2 数学模型与干扰分析

2.2.1 数学模型

首先对时频格子进行表示。如图1所示为离散化处理后时频(Time-Frequency, TF)域平面网格 Φ 和延迟-多普勒(Delay-Doppler, DD)域平面网格 Ψ 的描述。假设数据包的持续时间 NT ，所占带宽为 $M\Delta f$ ，则离散化后的TF域平面网格可以表示为 $\Phi = \{(nT, m\Delta f)\}$ $n = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1; N, M \in \mathbb{Z}$ 。TF域中的信号表示为： $X[n, m]$ 。在DD域中，信号以准周期形式表示， $1/\Delta f$ 为延迟方向的周期， $1/T$ 为多普勒方向的周期。分别以 $l/M\Delta f$ 、 $1/NT$ 为区间进行离散，则离散化后的DD域平面网格可以表示为： $\Psi = \{(k/NT, l/M\Delta f)\}$ ， $k = 0, \dots, N-1; l = 0, \dots, M-1; N, M \in \mathbb{Z}$ 。DD域中的信号表示为： $x[k, l]$ 。

如图2所示为OTFS系统调制的信号处理流程图。先将DD域的数据符号 $x[k, l]$ 通过逆辛有限傅里叶变换(Inverse Symplectic Finite Fourier Transform, ISFFT)得到：

$$X'[n, m] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (1)$$

其中， $n = 0, \dots, N-1; m = 0, \dots, M-1; N, M \in \mathbb{Z}$ 。然后添加一个发射窗口函数后映射到TF域转换成TF域信号 $X[n, m]$ ：

$$X[n, m] = W_{tx}[n, m] \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (2)$$

其中， $W_{tx}[n, m]$ 为发射窗口函数。 $X[n, m]$ 经过海森堡变换生成时域信号 $s(t)$ ：

$$s(t) = W_{tx}[n, m] \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] \cdot g_{tx}(t - nT) e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (3)$$

其中， $g_{tx}(t - nT)$ 表示接收脉冲。时域信号 $s(t)$ 通过无线信道传输到接收机，接收机接收到信号 $r(t)$ ：

$$r(t) = \int_{\nu} \int_{\tau} h(\tau, \nu) x(t - \tau) e^{j2\pi\nu(t - \tau)} d\tau d\nu + n(t) \quad (4)$$

其中， $h(\tau, \nu)$ 表示信道脉冲响应，它描述了信道对具有延迟 τ 和多普勒 ν 的脉冲的响应， $n(t)$ 为叠加高斯白噪声。在接收端，使用接收信号和接收脉冲进行匹配滤波。首先计算 g_{rx} 和 $r(t)$ 的交叉歧义函数 $C_{g_{rx}, y}$ ：

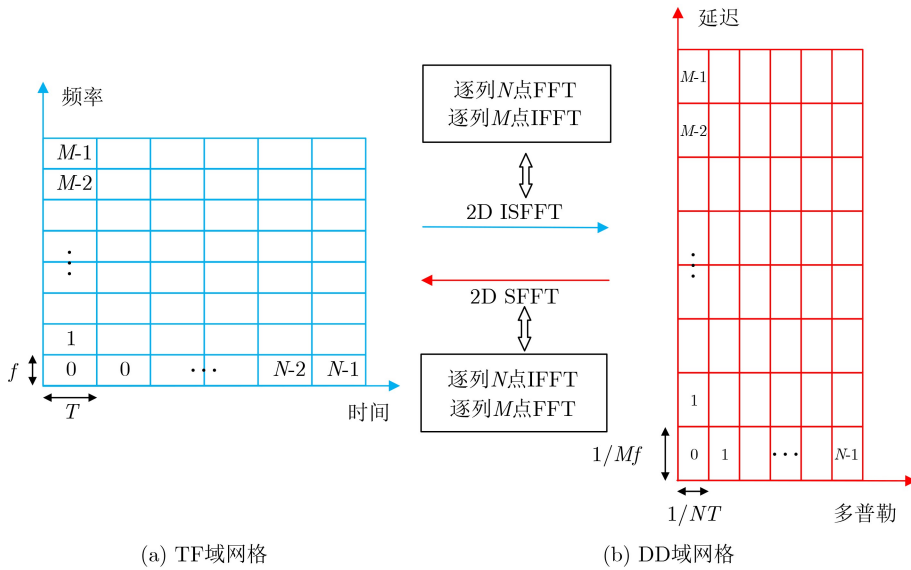


图1 TF域和DD域平面网格的描述^[15]

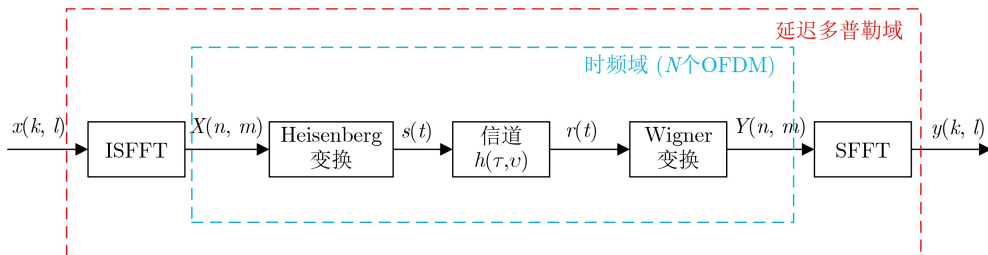


图2 OTFS系统框图^[14]

$$Y(t, f) = C_{g_{rx,y}}(t, f) = \int g_{rx}^*(t' - t)r(t')e^{-j2\pi f(t' - t)}dt' \quad (5)$$

然后, 以 $t = nT$, $f = m\Delta f$ 为间隔进行采样, 得到匹配的滤波器输出:

$$Y[n, m] = C_{g_{rx,y}}(t, f)|_{t=nT, f=m\Delta f} \quad (6)$$

添加接收窗口函数 $W_{rx}[n, m]$:

$$Y[n, m] = W_{rx}[n, m]C_{g_{rx,y}}(t, f)|_{t=nT, f=m\Delta f} \quad (7)$$

得到OTFS在时频域的输入输出关系:

$$y[n, m] = \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_{m'=0}^{M-1} H_{n,m}[n', m']X[n', m'] \quad (8)$$

其中 $H_{n,m}[n', m']$ 计算公式为

$$H_{n,m}[n', m'] = \iint h(\tau, \nu)C_{g_{rx}, g_{tx}}((n - n')T - \tau, (m - m')\Delta f - \nu)e^{j2\pi(\nu + m'\Delta f)((n - n')T - \tau)} \cdot e^{j2\pi\nu n'T} d\tau d\nu \quad (9)$$

最后, 将辛有限傅里叶变换(Symplectic Finite Fourier Transform, SFFT)应用于样本 $Y[n, m]$, 得到DD域中的符号 $y[k, l]$:

$$y[k, l] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Y[n, m]e^{-j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})} \quad (10)$$

其中, $n = 0, \dots, N - 1, m = 0, \dots, M - 1$.

2.2.2 干扰分析

从上述数学模型中, 可以得到OTFS系统中存在诸如多普勒干扰(Inter Doppler Interference, IDI)、载波间干扰(Inter Carrier Interference, ICI)和符号间干扰(Inter Symbols Interference, ISI)等干扰^[14]。多普勒干扰是由于发射端和接收端之间的相对运动引起的频率偏移导致的多普勒效应。在OTFS系统中, 由于多普勒效应, 信号的频率会发生变化, 导致信号在时频域中分散^[17]。当信号源或接收器相对于观察者运动时, 信号的波形会受到影响, 波形的展宽会发生变化。多普勒展宽会导致信号在频域中展宽, 使信号的频谱分布更广, 因此多普勒展宽通常又被称为频率扩展。这个现象在雷达、无线通信和声学中很常见, 因为移动的信号源或接收器会导致信号的频谱分散, 使接收到的信号变得更宽, 从而增加了接收干扰的可能性。为减轻多普勒干扰, 可以使用导频信号来估计多普勒频移, 然后进行补偿, 或者采用一些特定的信号处理算法来抑制多普勒干扰^[18]。载波间干扰是由于不同子载波之间的频率偏移引起的。在OTFS系统中, 信号会被分配到不同的时频格子中, 而不同格子中的子载波可能存

在频率偏移, 从而导致载波间干扰^[19]。为了减轻载波间干扰, 可以采用频率补偿技术来校正子载波的频率偏移^[20], 或者采用自适应算法来抑制载波间干扰^[21]。载波间干扰是由于信号在传播过程中, 由于信道的时延引起的。在OTFS系统中, 由于信号的时频分布特性, 可能会导致符号间干扰。为了减轻符号间干扰, 可以采用一些均衡算法来抑制符号间干扰^[22]。

2.3 技术特点与优势分析

2.3.1 技术特点

OTFS在高速移动通信环境下表现出色。传统调制技术在高速移动情况下往往受到多普勒频移的影响, 导致频谱展宽, 难以正常解调。而OTFS利用时频传输特性, 在时频域上的展宽能够抵消多普勒频移的影响, 使得信号解调变得更加可靠, 因此在高速移动通信中具有明显优势^[23]。在多径衰落环境中, 信号经常会因为多条路径导致时延扩展和相位失真。OTFS通过将信号同时分布在时频域上, 使得信号能够充分利用不同时频维度上的传播路径, 从而提供了对多径衰落的鲁棒性^[12]。这种特性使得OTFS能够更好地应对复杂的信道环境, 减少多径引起的干扰。OTFS在频率偏移和时钟漂移方面也表现出色^[24]。由于信号被同时分布在时频域中, 对于频率偏移和时钟漂移的抵抗能力更强。即使在存在一定程度的频率偏移和时钟漂移的情况下, OTFS仍然能够通过适当的信号处理技术来实现高效的解调和检测, 而传统调制技术可能会因为频偏和时钟漂移而受到较大影响。

2.3.2 优势分析

Li等人^[14]将OTFS与现有其他调制技术如: 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)、广义频分复用(Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)和仿射频分复用(Affine Frequency Division Multiplexing, AFDM)的性能进行比较, 分析得到了OTFS的优越性和适用性。OFDM是最常用的调制技术之一, 广泛应用于5G通信系统的多个方面, 包括数据传输、信道估计、波束赋形等。它在5G标准中被用作一种关键的调制和多路复用技术。GFDM和AFDM则是相对较新的调制技术, 旨在改进5G通信系统在特定情况下的性能。GFDM在时域和频域上都具有更灵活的适应性, 能够更好地应对多普勒效应和时延变化^[25]。AFDM引入了仿射变换的概念, 以实现时域信号的优化传输。它是一种用于高移动性通信的基于线性调频的新型多载波波形, 基于离散仿射傅里叶变换(Discrete Affine Fourier Trans-

form, DAFT), 这是离散傅里叶变换的推广, 其特征在于两个参数, 可以根据双色散通道的多普勒扩散进行调整^[26]。OTFS适用于高速移动场景和多径衰落环境, 而OFDM在频域上的正交性使其在抗频率选择性衰落方面表现出色。另外, 与GFDM、AFDM相比, OTFS具有更低的算法复杂性并且在高速移动场景下具有更为优异的误码率性能^[14]。

综合上述分析, OTFS的优势主要体现在时频域的利用、信号映射与表示、信道的均衡处理、多径效应的处理、适应高移动性环境、低复杂度的信号处理等方面, 其优势来源于以下具体的关键操作: 在时频域利用方面, OTFS在时域和频域中都进行信号调制, 有效适应频率选择性衰落和时变信道, 优于传统OFDM技术。OTFS通过将信号映射到二维时频网格上, OTFS在时域和频域进行信号处理, 提高信道衰落的鲁棒性。OTFS的独特信号表示简化了信道均衡, 即使在复杂信道条件下也能高效恢复原始信号。OTFS特别适合处理多径衰落信道, 有效处理复杂信道估计和均衡处理中的问题。由于有效处理多普勒效应, OTFS在高速移动环境如高速列车、汽车、无人机下表现优异, 对未来6G等通信系统至关重要。与GFDM、AFDM等其他新型调制技术相比, OTFS的实现复杂度更低, 更具成本效益, 便于实际部署。

6G通信系统预计将面临更高的数据速率需求、更严格的可靠性和低延迟要求, 以及更多的智能连接和感知需求。在这种背景下, OTFS可能能够提供更好的性能和适应性, 尤其是在高速移动场景、大规模连接和异构网络等方面。通信感知一体化的应用场景将涉及更复杂的信道环境和信号干扰, OTFS的优越性在这些场景中可能会变得更加显著。这意味着实现和部署OTFS可能会更加高效和可行。

3 OTFS设计挑战

实现OTFS调制需要应对一系列关键的设计挑战, 包括波形设计问题、峰均比问题、信道均衡问题、多址接入问题、同步、信道估计、信号检测等。OTFS系统的波形设计是关键, 因为它需要在时域和频域中保持高效的资源利用和良好的频谱特性。不同的波形设计可能会影响系统的整体性能, 包括抗干扰能力和频谱效率。峰均比问题是指信号的最大功率与平均功率之比。在OFDM和OTFS系统中, 高峰均比可能导致功率放大器效率低下和非线性失真, 因此需要特别关注如何降低峰均比。OTFS技术设计时需要考虑的一个重要问题是如何有效地进行信道均衡。信道的多径效应和时变特性

可能会导致信号失真, 因此需要复杂的均衡技术来补偿这些影响。在OTFS系统中, 多个用户同时接入网络时, 如何有效地管理和分配资源以确保通信的质量和效率是一个挑战。这涉及用户分配、信号调制和解调等方面的问题。然而, 本文主要选取OTFS系统中同步、信道估计、信号检测技术的优化和改进方法3大挑战进行总结和探讨。同步、信道估计和信号检测通常是无线通信系统中的核心挑战, 对系统性能的影响尤为显著。良好的同步和准确的信道估计是确保信号检测准确性的基础, 因此它们通常是研究的重点。在实际应用中, 确保系统同步、有效的信道估计和准确的信号检测是优先解决的问题。这些问题的解决为处理其他挑战, 如多用户干扰、波形设计等提供了基础。另外, 目前在OTFS技术的研究和开发中, 关于同步、信道估计和信号检测的方法相比其他方面也更为成熟。

3.1 同步

在OTFS中, 同步通常指的是确保发送和接收端在时域和频域上保持一致, 以便有效地传输和接收数据。OTFS是一种新兴的通信系统框架, 其独特之处在于将时域和频域结合在一起, 以在移动环境中获得高度鲁棒性。同步在OTFS中非常重要, 因为OTFS系统的时域和频域特性可能受到多普勒效应、多径传播等因素的影响, 这些因素可能引入时间和频率上的变化。解决同步问题有助于提高OTFS系统的性能和可靠性, 特别是在高移动性和复杂信道条件下。OTFS中通常涉及帧同步、符号同步、载波同步和时频同步。帧同步确保接收端能够正确识别和解码每个数据帧的起始位置的问题。由于信号可能经历多路径传播和多普勒效应, 因此需要帧同步来确保接收端准确地找到数据帧的边界。符号同步涉及确保接收端能够正确识别和解码每个符号或数据块的时间定时问题。在OTFS系统中, 信号的时域特性可能会导致符号定时偏移, 因此需要符号同步来校正这种偏移, 以确保正确解码数据。载波同步是确保接收端能够正确识别和解码信号的载波频率的问题。由于OTFS系统中信号的频域特性可能受到多普勒效应的影响, 因此需要载波同步来校正载波频率偏移, 以确保正确解调信号。时频同步涉及在OTFS系统中同时校正时间偏移和载波频率偏移, 以确保接收端在时域和频域上与发送端保持一致。

为了解决上述OTFS系统中的同步问题, Sinha等人^[27]提出在基于OTFS的系统中使用OTFS调制来传输随机存取(Random Access, RA)前置信号, 通过使用OTFS调制进行RA前导码传输, 从而解

决了基于OTFS的系统中精确上行链路定时同步的挑战,尤其是在高移动性场景中,对OTFS系统中的符号同步问题做出了重要贡献。Bayat等人^[28]提出了OTFS调制的TO和CFO估计器。所提的估计器利用了用于信道估计的导频信号的周期性特性,无需额外的同步训练开销,解决了OTFS系统中的符号同步和载波同步问题。Khan等人^[16]为高多普勒环境中基于OTFS的蜂窝系统提出了一种下行链路同步和基站编号(Cell Identity, CID)估计技术,所提的技术涉及每个基站传输检测前导码(Detection Preamble, DP)和两个OTFS符号,为OTFS系统中的符号同步问题提出了一种新的解决思路,其用于同步的OTFS框架结构如图3所示。肖之长等人^[29]提出了一种基于导频的OTFS系统时域载波同步技术。该方法基于已有的导频辅助信道估计算法,旨在解决OTFS系统中的载波同步问题。如表1总结了面向OTFS调制系统的同步方法,目前对于OTFS调制系统的同步算法仍然缺乏深入研究。现有的OTFS同步技术主要集中在时间偏移(Time Offset, TO)和载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)估计上,而且可能需要引入额外的前置开销。这些问题的挑战在于OTFS系统的独特特

点,时频交叉调制结构和时变信道条件都使得同步问题更加复杂。

3.2 信道估计

在OTFS调制系统中,信道估计(Channel Estimation, CE)主要在DD域进行,DD域中的信道通常具有稀疏性,即信道的能量主要集中在少数几个时延-多普勒点上,而其他点上的信道响应接近于零。这种稀疏性使得信道估计和通信系统的设计变得更加高效。DD域的稀疏性使得在信道估计和信号检测等方面可以使用低复杂度的算法和技术,从而降低了系统的计算复杂度。邢旺等人^[30]将OTFS系统中的信道估计分为基于保护带的DD域信道估计方法、基于干扰消除的DD域信道估计、其他DD域信道估计方法。通过对比三类方法得到基于保护带的方式虽然更容易实现,但是需要更高的成本,因此目前更为主流的方式是舍弃保护带,引入导频符号并结合干扰消除或数学方法的辅助来进行信道估计。最后,邢旺等人^[30]总结分析了当前DD域信道估计方法所面临的困难及应对策略,并从基于人工智能(Artificial Intelligence, AI)快速发展的大背景简略引出了基于深度学习(Deep Learning, DL)的OTFS信道估计方法却并没

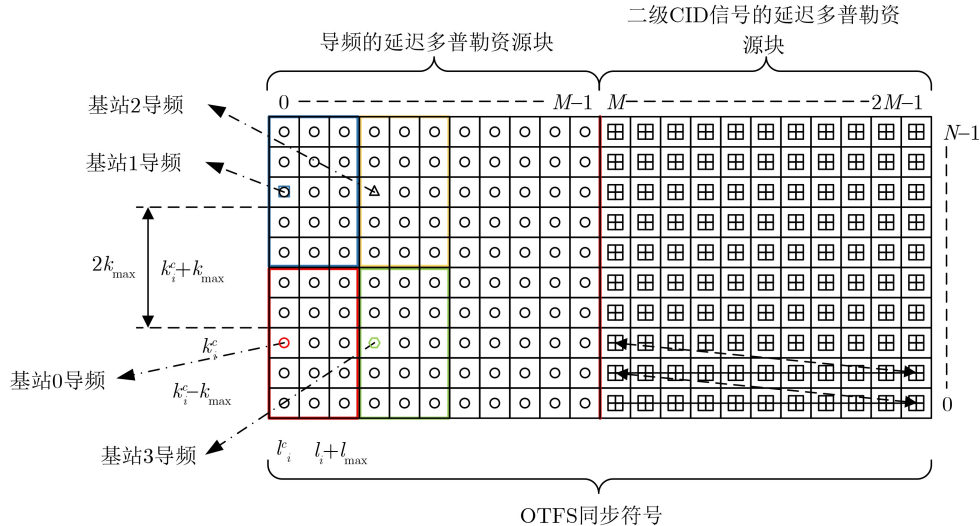


图3 用于同步的OTFS框架结构^[16]

表1 面向OTFS调制系统的同步方法

文献	估计类型	额外的前置开销	上行/下行	算法效果
[27]	TO	需要	上行	与4G-LTE系统相比,所提的基于OTFS调制的RA前导波形可以实现更准确的上行链路定时同步。
[28]	TO、CFO	不需要	—	提出的同步技术提高了OTFS系统的TO估计精度和CFO的估算性能,而无需额外的培训开销。通过大量模拟,所提出的估计器可实现较高的估计精度,并提供与全同步系统相同的误码性能。
[16]	TO	需要	下行	仿真结果表明,所提出的下行链路同步和CID估计技术适用于高多普勒环境中基于OTFS的蜂窝系统。
[29]	CFO	需要	—	易于硬件实现。满足在实际通信中的误码率性能要求。

有对基于人工智能的OTFS信道估计方法进行系统的归纳总结。鉴于当前人工智能技术的快速发展和基于人工智能的OTFS信道估计方法分析的匮乏，本文将从AI的角度出发对OTFS信道估计方法进行整理和综合分析。

常见的基于AI的OTFS系统信道估计方法大多使用稀疏贝叶斯学习(Sparse Bayesian Learning, SBL)。Liao等人^[31]从解决OTFS调制系统分数多普勒引起的多普勒间干扰问题出发，根据时域与DD域之间的关系，利用基展开模型(Basis Expansion Model, BEM)将信道估计问题转化为基系数估计(Basis Coefficients Estimation, BCE)问题，并将欠定问题转化成了过定问题。基于DD域信道的稀疏性，提出了一种基于SBL的BCE算法。Zhao等人^[32]基于DD域的稀疏性提出了一种新的导频模式，其不仅没有保护带且导频和数据符号的功率是一致的，有效降低了导频的开销和信噪比；除此外还提出了一种基于稀疏贝叶斯学习的信道估计算法SBL-CE，并采用期望最大化算法(Expectation-Maximization Algorithm, EM)对所提方法中的参数进行了更新，提出SBL-EM。相对于大多数文献采用等效DD域信道的估计，Wei等人^[33]直接估计原始DD域信道响应，避免了信道扩展，包括分数延迟和多普勒频移，从而更有效地利用DD域信道的稀疏性。具体地，提出了一种利用SBL框架的OTFS系统离网信道估计方案。除此外，为了平衡信道估计性能与计算复杂度，作者还提出了一个2维离网SSR问题，通过解耦时延和多普勒频移估计。在基于1维和2维离网SBL的信道估计算法中，交替更新超参数以计算信道的条件后验分布，可用于重建有效的DD域信道。Wang等人^[34]提出并比较了双分数模型和混合1维和2维分数模型两种离网模型。虽然混合1维和2维分数模型复杂度更低，但会发生串联离网畸变。为解决上述问题，同时平衡精度和计算复杂度，Wang等人^[34]提出了一种基于双2维

混合分数模型的2维离网分解和组合方案。Zhao等人^[35]将OTFS中的信道估计问题转换为块稀疏信号恢复问题，并提出了一种块稀疏贝叶斯学习与块重组(Block Sparse Bayesian Learning with Block Reorganization, BSBL-BR)方法对问题求解。以上研究展示了SBL技术在OTFS信道估计中的广泛应用，并在不同方面提出了有效的方法来改善OTFS系统的信道估计性能。经分析得到SBL在OTFS信道估计中具有5大优点：(1)稀疏建模特性使SBL能够有效地处理DD域信道估计任务；(2)引入先验知识和贝叶斯推断，SBL可以自适应地估计信道的稀疏性和相关参数；(3)SBL可以从观测数据中学习信道的特性和稀疏模式，从而提高信道估计的准确性。它能够识别并估计多径路径，有效降低多普勒间干扰问题；(4)SBL允许建模噪声的统计特性，这对于在复杂的OTFS信道环境中提高估计的准确性非常重要；(5)SBL能够自动地从数据中学习并确定稀疏模式，而不需要事先知道信号的稀疏度，这使得它具有一定的普适性和灵活性。

除了基于SBL的OTFS信道估计方法及其优化改进，还有部分研究者采用基于深度学习的OTFS信道估计方法，包括使用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)或递归神经网络(Recursive Neural Network, RNN)等深度学习架构来学习OTFS信道的特征，如图4所示为一种基于CNN的OTFS信道估计方法结构图。这些方法通过训练神经网络来自动地从接收到的信号中提取有用的特征以进行信道估计。周硕等人^[36]基于修正残差神经网络(Residual Neural Network, ResNet)提出了一种联合信道估计和信号检测算法，无需获取显示信道信息也能对传输的符号信息进行直接恢复。He等人^[37]提出了一种适用于高速车载通信应用场景的OTFS系统信道估计方法，此方法基于去噪卷积神经网络(Denoising Convolutional Neural Network, DCNN)，在CNN中引入了混合扩张卷积

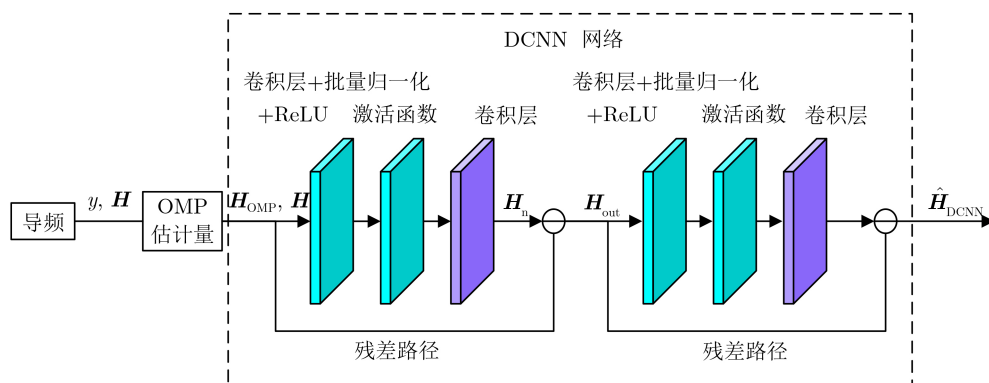


图4 基于CNN的OTFS信道估计方法结构图^[37]

(Hybrid Dilated Convolution, HDC)以及残差路径。Zhang等人^[38]把信道估计建模成为降噪问题,并通过深度残余去噪网络(Deep Residual Denoising Network, DRDN)隐式学习残余噪声的方法对信道矩阵进行复原,提出了一种数据驱动的DRDN方法。除此外,Zhang等人^[39]又基于OTFS信道的稀疏性,提出采用深度残余收缩网络(Deep Residual Shrinkage Network, DRSN)隐式学习残余噪声来恢复信道信息。同时作者采用了自适应阈值消除不相关特征,保障了信道的稀疏性,并进一步提高了信道估计的精度。Mattu等人^[40]为了解决OTFS系统中DD域的信道估计问题,提出了一种基于多层递归神经网络(Recursive Neural Network, RNN)的DD信道估计方法,训练方法新颖。如表2所示,对基于AI的OTFS信道估计方法进行了总结,分析了其采用的网络结构、基准算法和应用效果。

3.3 信号检测

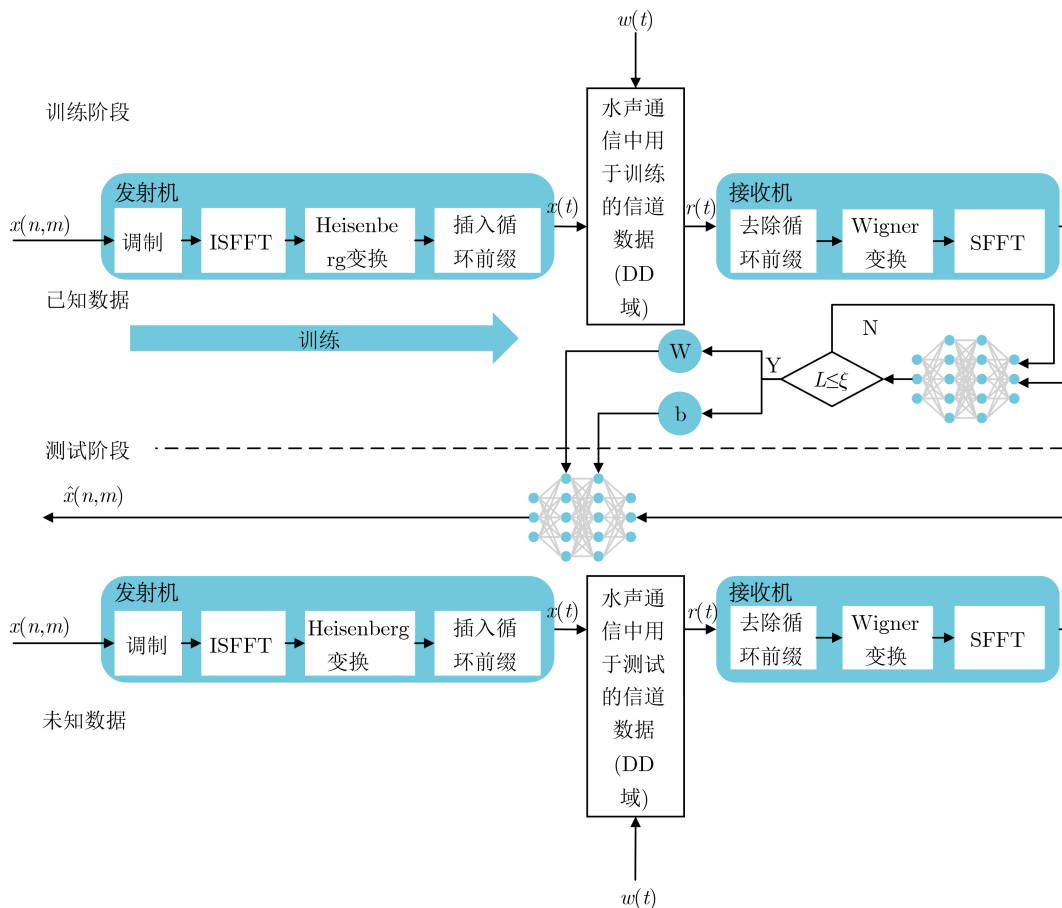
在移动通信环境中,信号会经历多径传播和多普勒效应等影响,导致信号的时频特性发生变

化^[50]。通过准确地检测信号时频特性,可以更有效地利用频谱资源,提升系统的通信容量,支持更多用户同时进行通信,且提高了系统的稳定性和可靠性^[51]。OTFS信号的检测往往涉及非线性映射关系,这使得传统的线性检测方法效果不佳。深度学习模型能够学习复杂的非线性映射,从而更好地适应OTFS信号的检测任务。

深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)是强大的非线性函数逼近器。OTFS信号检测涉及复杂的非线性映射关系,而DNN能够学习和表示这些复杂的映射,从而提高了信号检测的性能,如图5所示为一种基于DNN的OTFS信号检测方法结构图。Zhang等人^[15]提出了一种基于DNN的水声传播信道(Underwater Acoustic Channel, UWA) OTFS通信信号检测方法,无需先验知识,仅需充分训练DNN即可恢复接收到的符号。Naikoti等人^[52]提出一种用于OTFS信号检测的低复杂度延迟多普勒符号DNN,不同于将OTFS帧中所有符号同时考虑的完整DNN算法,该算法采用符号级DNN,每个符号都与单独的DNN相关联。需要的学习参

表2 基于AI的OTFS信道估计算法

文献	网络结构	算法名称	基准算法	算法效果
[31]	SBL	基于SBL的BCE算法	EP辅助信道估计算法 ^[41] 、基于最小二乘的BCE	在信道路径未知情况下,所提算法仍然可以对路径的数量和位置进行准确估计,有效提高了接收机性能。对算法进行复杂度分析和仿真分析,所提算法在复杂度、误码率和NMSE性能方面比基准算法更具优越性。
[32]	SBL	SBL-EM	OMP-CE, GP-CE ^[41]	通过详尽的模拟分析,验证了所提出的信道估计方案在信道恢复误差、导频成本和导频功率等方面的优越性。
[33]	SBL	基于SBL的1维、2维离网信道估计算法	并网OMP ^[42] 、离网NOMP ^[43] 、传统脉冲 ^[44] 、传统脉冲+DC窗 ^[44]	所提出的离网信道CS方案相对于并网方法,在虚拟采样分辨率较低的情况下,也能显著提高OTFS系统的CE精度。基于1维离网SBL的CE方案通过解耦时延和多普勒估计,实现了优异的性能,而所提出的2维离网方案计算复杂度更低。进一步采用数据辅助CE可以提升对未知数据符号干扰的鲁棒性,从而在无保护空间的情况下进一步提升CE性能。
[34]	SBL	基于2维离网分解和SBL组合的信道估计	传统OTFS信道估计算法 ^[45] 、基于SBL的1维、2维离网信道估计算法 ^[33] 、基于双分数模型的算法 ^[33]	仿真结果表明,所提方案比现有的基于双分数模型的方法具有更高的精度和更低的计算成本。
[35]	SBL	BSBL-BR	PP-GP ^[43] , SBL-EM ^[32] , BSBL w/o BR ^[46] , BOMP ^[47]	不同于传统的BSBL方法,BSBL-BR采用迭代更新非稀疏块的大小来提高信道估计精度。仿真结果表明,所提方法比基准算法具有更加优异的估计误差和噪声鲁棒性。
[36]	ResNet	基于修正ResNet的联合信道估计和信号检测方案	嵌入式导频信道估计 ^[41] +MMSE信号检测算法 ^[48] 、嵌入式导频信道估计 ^[41] +MP信号检测算法 ^[21]	与基准算法相比,所提方法具有更强的鲁棒性和良好的泛化能力,其算法复杂度得到降低,误码率性能也增加了约2dB。
[37]	CNN	基于DCNN的信道估计	OMP、基于导频的信道估计算法	与基准算法比较,此方法复杂度更低,对不同的车速具有较好的鲁棒性,满足了高精度信道估计。
[38]	DRDN	一种数据驱动的DRDN信道估计方法	最小二乘估计器、线性最小均方误差估计器、OMP、基于阈值的算法	在复杂噪声环境下,与基准算法相比,此算法在OTFS系统信道估计中具有更强的盲去噪能力。
[39]	DRSN	基于DRSN的信道估计	最小二乘估计器、线性最小均方误差估计器、OMP、基于阈值的算法	仿真结果表明,即使在没有先验知识的情况下,所提的算法性能依然可以接近于经典算法。相比基准算法,该算法在复杂的噪声场景下性能显著更优。
[40]	RNN	基于RNN的信道估计	独有导频架构的信道估计算法 ^[49] 、嵌入式导频架构的信道估计算法 ^[41]	与基准算法相比,所提出的方法有着更好的最小均方误差性能和误码率性能。

图5 基于DNN的OTFS信号检测方法结构图^[15]

数更少，其复杂度更低。Abid等人^[53]从提高OTFS信号方向性的角度出发，考虑了用于高速环境下的可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)辅助OTFS传输。除此外，作者还提出了一种基于DNN的信号检测器用于此系统。现有研究基于深度学习(Deep Learning, DL)的OTFS信号检测方法大多应用于特定环境，一旦环境发生变化，已经训练好的模型可能失效，需要再次训练。为解决上述问题，Cheng等人^[54]利用匹配网络(Matching Network, MatNet)的特性，提出了一种环境稳健的方法来检测OTFS信号，称为OTFS-MatNet。卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)专注于从数据的局部区域提取特征，这使得它特别适合处理具有空间相关性或局部结构的数据，如图像、声音等。对于OTFS信号，可能存在具有明显的局部特征，例如在时频域中的特定频率和时段内的特征。基于CNN的OTFS探测器具有计算复杂度低、性能高等优点，也是未来OTFS信号检测的一个有前景的方向。Enku等人^[55]提出了一种基于2维卷积神经网络(2D Convolutional Neural Network, 2D CNN)的检测器，同时作者还采用了基于广泛使用的消息传递(Message

Passing, MP)算法的数据增强技术对所提算法的学习能力进行增强。Singh等人^[56]从系统存在硬件损伤(Hardware Injury, HI)的角度出发，设计并分析了一个存在硬件损伤时的基于CNN的OTFS信号检测算法。尽管CNN在处理具有局部结构的数据时具有很强的优势，但在某些情况下，特别是当全局信息对于任务很重要时，DNN可能表现得更好。因此，具体应用时需要根据OTFS信号的特性和任务的需求来选择合适的网络结构。

上述算法均为数据驱动算法，依赖于大量的实际数据来进行训练和学习，而不是依赖于先验模型。对于OTFS信号检测，这可能涉及大量的OTFS信号样本数据。数据驱动算法通常更具有适应复杂信道环境和多变性的能力，因为它们可以从实际数据中学习信号的复杂特性。以下算法均为模型驱动算法，通常依赖于先验的信号模型或系统模型。Gong等人^[57]提出了一种基于ViterbiNet的低复杂度OTFS信号检测算法，使用神经网络(Neural Network, NN)来取代Viterbi算法中对CSI的对数似然计算。因此，该算法无信道状态信息(Channel State Information, CSI)也可以进行信号检测。作者还将软加功能引入作为激活函数，以使得训练过

程更加顺畅。Zhang等人^[58]提出了一种高效的图神经网络(Graph Neural Network, GNN)辅助检测算法,该算法把发送符号作为GNN的节点,然后通过聚合、更新和输出模块获得最终的检测结果。Li等人^[59]提出了一种用于OTFS信号检测的期望传播(Expectation Propagation, EP)辅助模型驱动深度学习算法。其算法的每次迭代都展开到一个逐层网络中,为了使该算法更快收敛和提高检测性能,作者还向该网络中添加了可训练的参数。

如表3所示,在对OTFS信号检测的研究中采用数据驱动算法的研究方向更多,可能是以下原因导致的:在实际通信环境中,OTFS信号通常会受到复杂的多径传播、多普勒效应等影响。这使得建立准确的模型来描述信道变化变得困难。数据驱动算法可以通过大量实际数据的学习来适应各种复杂的信道情况,从而提高了在实际环境下的性能。

4 OTFS应用趋势

由国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)提出的IMT-2030(6G)指出未来通信网络将向着空天地海一体化的目标发展^[68]。更加复杂的通信应用环境和海量的动态通信节点将对6G网络的性能提出新的挑战,而OTFS调制系统在高速移动通信、信号覆盖增强、通信可靠性增强等

方面展示出了显著的优势。本节将以空天地一体化角度出发,分别探讨OTFS在车联网、无人机、卫星通信、海洋通信中的应用。

OTFS技术在处理高速移动环境下的通信时表现将更为出色,能够有效地利用时域和频域信息,从而在复杂的通信环境中提供更为可靠的连接^[69]。OTFS技术可以有效地支持高达1,000 km/h的移动性需求^[70]。面向车联网的高速移动通信中,多径传输是一个常见的问题,特别是在城市环境中。OTFS技术能够更有效地处理多径传输,减少信号失真和丢失,从而提高通信的稳定性。比如,与现有的OFDM相比,在GHz频段从30 km/h到500 km/h的高速车辆通信中OTFS能够展现出更好的误差性能^[71]。

对于无人机而言,OTFS技术可以在高速飞行的无人机中保证高质量的图像传输,这对于任务如监测、勘察、救援等至关重要^[72]。另外,无人机通常携带各种传感器,OTFS技术可以高效地传输传感器产生的大量数据,保证了实时监测和数据采集的可靠性^[73]。对于卫星通信而言,OTFS技术可以在卫星通信中保证高速数据传输,特别是对于卫星到地面的通信链路,可以提供更高的数据传输速度^[74]。除此外,卫星通信往往需要在复杂的大气和环境条件下进行通信,OTFS技术可以提高对地通信的稳定性和可靠性^[75]。

表3 基于DL的OTFS信号检测算法

文献	算法类型	算法名称	基准算法	数据驱动/ 模型驱动	算法效果
[15]	DNN	基于DNN的UWA OTFS通信信号检测算法	线性最小均方误差、迫零算法、匹配滤波器	数据驱动	仿真表明所提算法比基准算法的误码率更低且具有非线性映射的优势有利于对DD域中的数据进行拟合。除此外,所提方法对多径和多普勒效应应具有很好的鲁棒性。
[52]	DNN	用于OTFS信号检测的低复杂度延迟多普勒符号DNN算法	全DNN、最大似然	数据驱动	在误码率、复杂度方面,所提算法均优于基准算法。
[53]	DNN	基于DNN的RIS辅助OTFS系统信号检测算法	最小均方误差、迫零算法、MP	数据驱动	仿真表明,此算法能够比基准算法以更低的信噪比提供无限低的误码率。
[54]	MatNet	OTFS-MatNet	最小均方误差、DR-DNN ^[60] 、符号DNN ^[52]	数据驱动	所提算法在误码率性能改进和减少训练样本方面与基准算法相比具有显著的优势。
[55]	CNN	基于2D CNN的OTFS系统信号检测算法	最优最大后验、线性最小均方误差、MP	数据驱动	所提算法的性能优于MP检测器,与最优最大后验检测器的性能近乎相同,但所提算法的时间复杂度很低。
[56]	CNN	存在HI时的基于DL的OTFS信号检测	最小均方误差 ^[61] 、MP ^[21]	数据驱动	仿真表明所提算法比带有和不带有HI的传统MP、最小均方误差检测器都有更好的误码率性能。
[57]	NN	ViterbiNet	最小均方误差、MRC ^[62] 、MP ^[21] 、FC-DNN ^[60]	模型驱动	仿真验证了所提算法的鲁棒性。因为ViterbiNet是模型驱动的网络,因此仅仅要求小尺寸的神经网络和少量的训练数据也能够达到不错的性能。
[58]	GNN	一种高效的GNN辅助检测算法	最小均方误差 ^[63] 、MP ^[21] 、GAMP ^[64] 、GAMP-NET ^[65]	模型驱动	仿真表明所提算法比基准算法的误码率性能更优。
[59]	EP-Net	用于OTFS信号检测的EP辅助模型驱动深度学习算法	最小均方误差 ^[49] 、MP ^[67] 、JMPA ^[64] 、GAMP ^[64] 、OAMP ^[66] 、OAMP-Net ^[66] 、EP ^[67]	模型驱动	仿真表明所提算法比传统的EP算法具有更加显著的性能。

海洋通信环境中存在更为丰富的多径传播,造成信号失真和干扰。OTFS技术以其在时频领域的处理能力,能够有效抵抗多径效应,使得在复杂的海洋环境中也能保持相对稳定的通信。同样地,在海洋中,船舶和浮标等移动物体的速度可能很高,传统通信技术往往难以应对高速移动性的需求^[76]。另外,海洋环境中存在着由于波浪、洋流等因素引起的多普勒效应,也会使得传统通信系统的性能受到影响^[76]。OTFS技术通过在时频领域对信号进行处理,可以有效地抵消多普勒效应,保证信号的稳定传输。

5 OTFS发展挑战

经上文分析,OTFS在适应高速运动环境、适用复杂信道环境展示出了显著的优势,是一种未来移动通信最具潜力的调制方式。但是,与传统的OFDM相比,OTFS在计算复杂度方面存在一些显著的挑战。本节将从多维匹配滤波器、相位解调和信道估计、对时频资源的高度利用、硬件实现复杂性4个角度出发,探讨分析OTFS面临的发展挑战及潜在的解决策略。

(1) 多维匹配滤波器

在OTFS系统中,设计和实现复杂的多维匹配滤波器对于处理时延和多径信道至关重要。这些滤波器的任务是在接收端准确恢复发送端的信号,同时解决多径效应和时变信道条件带来的挑战。然而,这种方法在计算复杂度上相对较高,特别是当处理大规模的数据和高速移动场景时。与OTFS相比,OFDM系统在接收端的处理通常更为简单。OFDM依赖于频域的正交性来处理多径信道的影响,通过频域分解和正交子载波的使用,有效地减少了多径效应和符号间干扰。这种方法虽然在静态或低速移动的环境下有效,但在高速移动环境下,尤其是在处理多普勒效应方面,可能不如OTFS系统有效。因此,需要考虑设计和优化用于OTFS接收的多维匹配滤波器算法,以减少其计算复杂度。

(2) 相位解调和信道估计

由于OTFS的接收端需要在时频域上解调信号并进行信道估计,相对于OFDM,其处理过程更为复杂。特别是在高速运动环境下,相位解调和信道估计会变得非常具有挑战性。结合人工智能、机器学习等技术,可以训练模型来自动化解决相位解调和信道估计问题^[77]。

通过训练机器学习模型来自动处理相位解调和信道估计问题。这些模型可以通过大量数据学习复杂的信道特性和相位变化,从而在实际应用中提供更准确和鲁棒的解决方案。深度学习和神经网络技

术在这方面尤为有用,能够处理高维数据并从中提取有用信息。这可以提高在高速运动环境下的稳定性和鲁棒性。除此外,可以引入先进的信道估计算法和时频域跟踪技术,以应对高速运动环境下信道的快速变化^[78]。

(3) 对时频资源的高度利用

OTFS需要对时频资源进行高度的利用,这要求在接收端进行复杂的信号处理以保证对时频关联的准确度。首先,可以开发自适应的信号处理算法^[79],例如:Sun等人^[80]提出的基于Transformer的信道估计方法根据信道的实时特性自动调整阈值,以适应不同的高移动性环境。Enku等人^[55]提出的基于二维卷积神经网络的信号检测能够根据输入数据的特性自动调整其内部参数。其次,可以对系统的整体架构进行联合优化设计。例如,Long等人^[81]提出了一种基于期望传播的OTFS联合信道估计和均衡方法。这种方法展示了如何结合适当的接收器,以充分利用OTFS信号的时频多样性。这反映了在设计接收端算法时,将信道估计和信号均衡紧密结合的联合优化思路。除此外,可以利用智能调度算法,根据实际通信情况和环境,动态地调整时频资源的分配,使得资源利用更为高效^[82]。

(4) 硬件实现复杂性

OTFS系统的硬件实现相对于OFDM可能会更为复杂,特别是在高速移动环境下需要更高性能的硬件设备,主要体现在时频变换处理、多普勒效应补偿、高分辨率模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)/数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)、并行处理能力、信号处理算法的实时性五方面。OTFS系统中的关键步骤之一是数据在时域和频域之间的转换。这需要复杂的算法,如Zak变换,要求更高的时钟频率和更多的处理核心^[83]。在高速移动场景中,OTFS系统需要复杂的信号处理算法来应对信号衰减、时延扩展和多普勒效应等问题。因此,具有数百万等效门计数和以数字信号处理为中心的特性的FPGA可以提供更大的计算资源和灵活性,以应对这些复杂的信号处理算法^[84]。OTFS系统的高动态范围和宽带传输要求,对ADC和DAC提出了更高的性能要求,尤其是在分辨率和采样速率方面。OTFS系统中的处理步骤,如信号的预处理、编码/解码和均衡,可能受益于多核处理器或多个处理单元的并行计算能力,提高处理效率。OTFS系统需要实时处理大量数据,这对处理器速度和处理算法的优化提出了挑战。

6 结束语

本文首先探讨了OTFS的基本原理、数学模

型、干扰分析、技术特点,然后归纳了OTFS在同步、信道估计和信号检测方面的研究现状。通过对OTFS技术的综述,不仅更好地阐释了这一新兴通信技术的核心概念,也总结归纳了它在各个领域的潜在应用价值。OTFS技术以其出色的抗多径和抗多普勒效应能力,为无线通信领域带来了全新的可能性,已经成为6G标准候选的热门波形。然而,随着OTFS技术的不断发展,也必须正视其在计算复杂度上面临的挑战。随着通信系统的需求不断增长,如何在保持性能的同时降低计算复杂度和提高对时频资源的高度利用,将是未来研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] GUO Fengxian, YU F R, ZHANG Heli, *et al.* Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 11891–11915. doi: [10.1109/JIOT.2021.3063686](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3063686).
- [2] SALH A, AUDAH L, SHAH N S M, *et al.* A survey on deep learning for ultra-reliable and low-latency communications challenges on 6G wireless systems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 55098–55131. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3069707](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069707).
- [3] LV Zhihan, LOU Ranran, LI Jinhua, *et al.* Big data analytics for 6G-enabled massive internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5350–5359. doi: [10.1109/JIOT.2021.3056128](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3056128).
- [4] ALSAEDI W K, AHMADI H, KHAN Z, *et al.* Spectrum options and allocations for 6G: A regulatory and standardization review[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2023, 4: 1787–1812. doi: [10.1109/OJCOMS.2023.3301630](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3301630).
- [5] BANAFAA M, SHAYEA I, DIN J, *et al.* 6G mobile communication technology: Requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 64: 245–274. doi: [10.1016/j.aej.2022.08.017](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.017).
- [6] ABASI A K, ALOQAILY M, OUNI B, *et al.* A survey on securing 6G wireless communications based optimization techniques[C]. Proceedings of 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing, Marrakesh, Morocco, 2023: 216–223. doi: [10.1109/IWCMC58020.2023.10183210](https://doi.org/10.1109/IWCMC58020.2023.10183210).
- [7] CUI Huanxi, ZHANG Jun, GENG Yuhui, *et al.* Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: Requirements, architecture and challenges[J]. *China Communications*, 2022, 19(2): 90–108. doi: [10.23919/JCC.2022.02.008](https://doi.org/10.23919/JCC.2022.02.008).
- [8] CHANG Luyi, ZHANG Zhe, LI Pei, *et al.* 6G-enabled edge AI for metaverse: Challenges, methods, and future research directions[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2022, 7(2): 107–121. doi: [10.23919/JCIN.2022.9815195](https://doi.org/10.23919/JCIN.2022.9815195).
- [9] 程翔, 张浩天, 杨宗辉, 等. 车联网通信感知一体化研究: 现状与发展趋势[J]. *通信学报*, 2022, 43(8): 188–202. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022137](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022137).
CHENG Xiang, ZHANG Haotian, YANG Zonghui, *et al.* Integrated sensing and communications for Internet of vehicles: Current status and development trend[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(8): 188–202. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022137](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022137).
- [10] LI Qingyu, GONG Yi, WANG Jianyu, *et al.* Exploring the performance of receiver algorithm in OTFS based on CNN[C]. Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops, Seoul, Korea, Republic of, 2022: 957–962. doi: [10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814529](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814529).
- [11] REDDY C S, PRIYA P, SEN D, *et al.* Spectral efficient modem design with OTFS modulation for vehicular-IoT system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(3): 2444–2458. doi: [10.1109/JIOT.2022.3211531](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3211531).
- [12] WEI Zhiqiang, YUAN Weijie, LI Shuangyang, *et al.* Orthogonal time-frequency space modulation: A promising next-generation waveform[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(4): 136–144. doi: [10.1109/MWC.001.2000408](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000408).
- [13] XIAO Lixia, LI Shuo, QIAN Ying, *et al.* An overview of OTFS for internet of things: Concepts, benefits, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(10): 7596–7618. doi: [10.1109/JIOT.2021.3132606](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3132606).
- [14] LI Mao, LIU Wei, and LEI Jing. A review on orthogonal time-frequency space modulation: State-of-art, hotspots and challenges[J]. *Computer Networks*, 2023, 224: 109597. doi: [10.1016/j.comnet.2023.109597](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109597).
- [15] ZHANG Shumin, ZHANG Yuzhi, CHANG Jiazheng, *et al.* DNN-based signal detection for underwater OTFS systems[C]. Proceedings of 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Sanshui, Foshan, China, 2022: 348–352. doi: [10.1109/ICCCWorkshops55477.2022.9896695](https://doi.org/10.1109/ICCCWorkshops55477.2022.9896695).
- [16] KHAN M S, KIM Y J, SULTAN Q, *et al.* Downlink synchronization for OTFS-based cellular systems in high doppler environments[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 73575–73589. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3079429](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079429).
- [17] GAO Ziqiang, DENG Xiong, ZOU Xihua, *et al.* Orthogonal time frequency space modulation in wideband Doppler channel[C]. Proceedings of the 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022: 1–6. doi: [10.1109/IECON49645.2022.9968556](https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968556).
- [18] TUSHA A and ARSLAN H. Low complex inter-doppler

- interference mitigation for OTFS systems via global receiver windowing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(6): 7685–7698. doi: [10.1109/TVT.2023.3243577](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3243577).
- [19] CHENNIAPPAN P, PRASANA S, DEEPA D, *et al.* Performance analysis of Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation technique in massive MIMO system for high-speed communication[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2023, 2725(1): 060003. doi: [10.1063/5.0125238](https://doi.org/10.1063/5.0125238).
- [20] CAUS M, SHAAT M, PÉREZ-NEIRA A I, *et al.* Reliability oriented OTFS-based LEO satellites joint transmission scheme[C]. Proceedings of 2022 IEEE Globecom Workshops, Rio de Janeiro, Brazil, 2022: 1406–1412. doi: [10.1109/GCWkshps56602.2022.10008593](https://doi.org/10.1109/GCWkshps56602.2022.10008593).
- [21] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Yi, *et al.* Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(10): 6501–6515. doi: [10.1109/TWC.2018.2860011](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2860011).
- [22] JIN Chenxi, BIE Zhisong, LIN Xuehong, *et al.* A simple two-stage equalizer for OTFS with rectangular windows[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(4): 1158–1162. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3043841](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3043841).
- [23] 尉志青, 冯志勇, 李怡恒, 等. 太赫兹通信感知一体化波形: 现状与展望[J]. *通信学报*, 2022, 43(1): 3–10. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022007](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022007).
WEI Zhiqing, FENG Zhiyong, LI Yiheng, *et al.* Terahertz joint communication and sensing waveform: Status and prospect[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(1): 3–10. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022007](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022007).
- [24] THAJ T and VITERBO E. OTFS modem SDR implementation and experimental study of receiver impairment effects[C]. Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops, Shanghai, China, 2019: 1–6. doi: [10.1109/ICCW.2019.8757167](https://doi.org/10.1109/ICCW.2019.8757167).
- [25] MOZAFFARI TAZEHKAND B, AGHDAM M R G, VAKILIAN V, *et al.* Novel successive interference cancellation (SIC) with low-complexity for GFDM systems[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 40063–40072. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3167051](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3167051).
- [26] BEMANI A, KSAIRI N, and KOUNTOURIS M. Affine frequency division multiplexing for next generation wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8214–8229. doi: [10.1109/TWC.2023.3260906](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3260906).
- [27] SINHA A K, MOHAMMED S K, RAVITEJA P, *et al.* OTFS based random access preamble transmission for high mobility scenarios[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15078–15094. doi: [10.1109/TVT.2020.3034130](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3034130).
- [28] BAYAT M and FARHANG A. Time and frequency synchronization for OTFS[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(12): 2670–2674. doi: [10.1109/LWC.2022.3214002](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3214002).
- [29] 肖之长, 彭丽, 张沉思, 等. 基于导频辅助的OTFS载波同步技术[J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(3): 315–318. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2021.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2021.03.010).
XIAO Zhichang, PENG Li, ZHANG Chensi, *et al.* Pilot-aided OTFS carrier synchronization technology[J]. *Radio Communications Technology*, 2021, 47(3): 315–318. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2021.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2021.03.010).
- [30] 邢旺, 唐晓刚, 周一青, 等. 面向OTFS的时延-多普勒域信道估计方法综述[J]. *通信学报*, 2022, 43(12): 188–201. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022224](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022224).
XING Wang, TANG Xiaogang, ZHOU Yiqing, *et al.* Survey of channel estimation method in delay-Doppler domain for OTFS[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(12): 188–201. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022224](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022224).
- [31] LIAO Yong and LI Xue. Joint multi-domain channel estimation based on sparse Bayesian learning for OTFS system[J]. *China Communications*, 2023, 20(1): 14–23. doi: [10.23919/JCC.2023.01.002](https://doi.org/10.23919/JCC.2023.01.002).
- [32] ZHAO Lei, GAO Wenjing, and GUO Wenbin. Sparse Bayesian learning of delay-Doppler channel for OTFS system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(12): 2766–2769. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3021120](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3021120).
- [33] WEI Zhiqiang, YUAN Weijie, LI Shuangyang, *et al.* Off-grid channel estimation with sparse Bayesian learning for OTFS systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 7407–7426. doi: [10.1109/TWC.2022.3158616](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3158616).
- [34] WANG Qianli, LIANG Yu, ZHANG Zhengquan, *et al.* 2D off-grid decomposition and SBL combination for OTFS channel estimation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(5): 3084–3098. doi: [10.1109/TWC.2022.3215991](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3215991).
- [35] ZHAO Lei, YANG J, LIU Yueliang, *et al.* Block sparse Bayesian learning-based channel estimation for MIMO-OTFS systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(4): 892–896. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3144674](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3144674).
- [36] 周頌, 周一青, 张冲, 等. ResNet使能的OTFS联合信道估计和信号检测[J]. *西安电子科技大学学报*, 2023, 50(3): 19–30. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2023.03.002](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2023.03.002).
ZHOU Shuo, ZHOU Yiqing, ZHANG Chong, *et al.* ResNet enabled joint channel estimation and signal detection for OTFS[J]. *Journal of Xidian University*, 2023, 50(3): 19–30. doi: [10.19665/j.issn1001-2400.2023.03.002](https://doi.org/10.19665/j.issn1001-2400.2023.03.002).
- [37] HE Bangwei, BAI Zhiquan, MA Yuanyuan, *et al.* Denoising

- CNN based channel estimation for vehicular OTFS communication system[C]. Proceedings of the 25th International Conference on Advanced Communication Technology, Pyeongchang, Korea, Republic of, 2023: 54–58. doi: [10.23919/ICACT56868.2023.10079625](https://doi.org/10.23919/ICACT56868.2023.10079625).
- [38] ZHANG Xiaoqi, YUAN Weijie, and LIU Chang. Deep residual learning for OTFS channel estimation with arbitrary noise[C]. Proceedings of 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Sanshui, Foshan, China, 2022: 320–324. doi: [10.1109/ICCCWorkshops55477.2022.9896721](https://doi.org/10.1109/ICCCWorkshops55477.2022.9896721).
- [39] ZHANG Xiaoqi, YUAN Weijie, LIU Chang, *et al.* Deep learning with a self-adaptive threshold for OTFS channel estimation[C]. Proceedings of 2022 International Symposium on Wireless Communication Systems, Hangzhou, China, 2022: 1–5. doi: [10.1109/ISWCS56560.2022.9940260](https://doi.org/10.1109/ISWCS56560.2022.9940260).
- [40] MATTU S R and CHOCKALINGAM A. An RNN based DD channel estimator for OTFS with embedded pilots[C]. Proceedings of 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Kyoto, Japan, 2022: 457–462. doi: [10.1109/PIMRC54779.2022.9977831](https://doi.org/10.1109/PIMRC54779.2022.9977831).
- [41] RAVITEJA P, PHAN K T, and HONG Yi. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(5): 4906–4917. doi: [10.1109/TVT.2019.2906357](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2906357).
- [42] SHEN Wenqian, DAI Linglong, AN Jianping, *et al.* Channel estimation for orthogonal time frequency space (OTFS) massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(16): 4204–4217. doi: [10.1109/TSP.2019.2919411](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2919411).
- [43] LI Muye, ZHANG Shun, GAO Feifei, *et al.* A new path division multiple access for the massive MIMO-OTFS networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 903–918. doi: [10.1109/JSAC.2020.3018826](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3018826).
- [44] WEI Zhiqiang, YUAN Weijie, LI Shuangyang, *et al.* Transmitter and receiver window designs for orthogonal time-frequency space modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2207–2223. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3051386](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3051386).
- [45] QIAN Ying, XIAO Lixia, and JIANG Tao. SM-STBC aided orthogonal time frequency space modulation[C]. Proceedings of 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Austin, USA, 2022: 2172–2177. doi: [10.1109/WCNC51071.2022.9771767](https://doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771767).
- [46] PRASAD R, MURTHY C R, and RAO B D. Joint channel estimation and data detection in MIMO-OFDM systems: A sparse Bayesian learning approach[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(20): 5369–5382. doi: [10.1109/TSP.2015.2451071](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2451071).
- [47] LI Haifeng and WEN Jinming. A new analysis for support recovery with block orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(2): 247–251. doi: [10.1109/LSP.2018.2885919](https://doi.org/10.1109/LSP.2018.2885919).
- [48] SURABHI G D and CHOCKALINGAM A. Low-complexity linear equalization for OTFS modulation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(2): 330–334. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2956709](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2956709).
- [49] KOLLENGODE RAMACHANDRAN M and CHOCKALINGAM A. MIMO-OTFS in high-doppler fading channels: Signal detection and channel estimation[C]. Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018: 206–212. doi: [10.1109/GLOCOM.2018.8647394](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647394).
- [50] ZHENG Jieheng, ZHANG Lin, LI Yan, *et al.* An orthogonal time frequency space modulation based differential chaos shift keying transceiver for reliable communications[C]. Proceedings of 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference, Florence, Italy, 2023: 1–5. doi: [10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10201217](https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10201217).
- [51] 梁应敞, 谭俊杰, NIYATO D. 智能无线通信技术研究概况[J]. *通信学报*, 2020, 41(7): 1–17. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020145](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020145).
- LIANG Yingchang, TAN Junjie, and NIYATO D. Overview on intelligent wireless communication technology[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(7): 1–17. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020145](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020145).
- [52] NAIKOTI A and CHOCKALINGAM A. Low-complexity delay-Doppler symbol DNN for OTFS signal detection[C]. Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference, Helsinki, Finland, 2021: 1–6. doi: [10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448630](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448630).
- [53] ABID M H, TALIN I A, and KADIR M I. Reconfigurable intelligent surface-aided orthogonal time frequency space and its deep learning-based signal detection[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 47321–47338. doi: [10.1109/ACCESS.2023.3273297](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3273297).
- [54] CHENG Qingqing, SHI Zhenguo, YUAN Jinhong, *et al.* Environment-robust signal detection for OTFS systems using deep learning[C]. Proceedings of 2022 IEEE Global Communications Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2022: 47321–47338. doi: [10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000940](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000940).
- [55] ENKU Y K, BAI Baoming, WAN Fei, *et al.* Two-dimensional convolutional neural network-based signal detection for OTFS systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(11): 2514–2518. doi: [10.1109/LWC.2021.3106039](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3106039).

- [56] SINGH A, SHARMA S, DEKA K, *et al.* DL-based OTFS signal detection in presence of hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(9): 1533–1537. doi: [10.1109/LWC.2023.3281790](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3281790).
- [57] GONG Yi, LI Qingyu, MENG Fanke, *et al.* ViterbiNet-based signal detection for OTFS system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(3): 881–885. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3237719](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3237719).
- [58] ZHANG Xufan, ZHANG Shengyu, XIAO Lixia, *et al.* Graph neural network assisted efficient signal detection for OTFS systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(8): 2058–2062. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3286800](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3286800).
- [59] LI Shuo, DING Chao, XIAO Lixia, *et al.* Expectation propagation aided model driven learning for OTFS signal detection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(9): 12407–12412. doi: [10.1109/TVT.2023.3268231](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3268231).
- [60] LI Qingyu, GONG Yi, MENG Fanke, *et al.* Data-driven receiver for OTFS system with deep learning[C]. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Network Intelligence and Digital Content, Beijing, China, 2021: 172–176. doi: [10.1109/IC-NIDC54101.2021.9660432](https://doi.org/10.1109/IC-NIDC54101.2021.9660432).
- [61] LI Qi, YUAN Jinhong, and LIN Hai. Iterative MMSE detection for orthogonal time frequency space modulation[C]. Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops, Seoul, Korea, Republic of, 2022: 1–6. doi: [10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814638](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814638).
- [62] THAJ T and VITERBO E. Low complexity iterative rake decision feedback equalizer for zero-padded OTFS systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15606–15622. doi: [10.1109/TVT.2020.3044276](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3044276).
- [63] TIWARI S, DAS S S, and RANGAMGARI V. Low complexity LMMSE Receiver for OTFS[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(12): 2205–2209. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2945564](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2945564).
- [64] XIANG Luping, LIU Yusha, YANG Lieliang, *et al.* Gaussian approximate message passing detection of orthogonal time frequency space modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 10999–11004. doi: [10.1109/TVT.2021.3102673](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3102673).
- [65] ZHANG Xufan, XIAO Lixia, LI Shuo, *et al.* Gaussian AMP aided model-driven learning for OTFS system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(12): 2949–2953. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3206414](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3206414).
- [66] HE Hengtao, WEN Chaokai, JIN Shi, *et al.* Model-driven deep learning for MIMO detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 1702–1715. doi: [10.1109/TSP.2020.2976585](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2976585).
- [67] LI Hua, DONG Yuanyuan, GONG Caihong, *et al.* Low complexity receiver via expectation propagation for OTFS modulation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(10): 3180–3184. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3101827](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3101827).
- [68] IMT-2030 (6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. IMT-2030 (6G), 2021.
- IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G network architecture vision and key technology outlook white paper[R]. IMT-2030 (6G), 2021.
- [69] XU Weilin, HE Yating, ZHAI Shenghua, *et al.* Discussion on network communication technology of unmanned cluster[C]. Proceedings of 2022 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology, Guilin, China, 2022: 48–52. doi: [10.1109/ISCTech58360.2022.00014](https://doi.org/10.1109/ISCTech58360.2022.00014).
- [70] CHU T M C, ZEPERNICK H J, WESTERHAGEN A, *et al.* Performance assessment of OTFS modulation in high Doppler airborne communication networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2022, 27(4): 1746–1756. doi: [10.1007/s11036-022-01928-4](https://doi.org/10.1007/s11036-022-01928-4).
- [71] RAVITEJA P, VITERBO E, and HONG Yi. OTFS performance on static multipath channels[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(3): 745–748. doi: [10.1109/LWC.2018.2890643](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2890643).
- [72] ALBANESE A, SCIANCALEPORE V, and COSTA-PÉREZ X. First responders got wings: UAVs to the rescue of localization operations in beyond 5G systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(11): 28–34. doi: [10.1109/MCOM.101.2100273](https://doi.org/10.1109/MCOM.101.2100273).
- [73] VAEZI M, AZARI A, KHOSRAVIRAD S R, *et al.* Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: A survey on 5G advances and the road toward 6G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(2): 1117–1174. doi: [10.1109/COMST.2022.3151028](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3151028).
- [74] ALSABAH M, NASER M A, MAHMMOD B M, *et al.* 6G wireless communications networks: A comprehensive survey[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 148191–148243. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3124812](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124812).
- [75] WANG Jiawei, JIANG Chunxiao, and KUANG Linling. High-mobility satellite-UAV communications: Challenges, solutions, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(5): 38–43. doi: [10.1109/MCOM.001.2100850](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2100850).
- [76] VAN WALREE P A. Propagation and scattering effects in underwater acoustic communication channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(4): 614–631. doi: [10.1109/JOE.2013.2278913](https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278913).
- [77] JOSHI M, PUNJABI G, SAINATH B, *et al.* Comparative performance investigation of MIMO-OTFS and MIMO-OFDM using deep neural network modeling[C]. Proceedings

- of 2021 IEEE 18th India Council International Conference, Guwahati, India, 2021: 1–6. doi: [10.1109/INDICON52576.2021.9691490](https://doi.org/10.1109/INDICON52576.2021.9691490).
- [78] QU Huiyang, LIU Guanghui, ZHANG Lei, *et al.* Low-dimensional subspace estimation of continuous-Doppler-spread channel in OTFS systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7): 4717–4731. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3072744](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3072744).
- [79] XIAO Zhenyu, YANG Junyi, MAO Tianqi, *et al.* LEO satellite access network (LEO-SAN) towards 6G: Challenges and approaches[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(2): 89–96. doi: [10.1109/MWC.011.2200310](https://doi.org/10.1109/MWC.011.2200310).
- [80] SUN Teng, LV Jiebiao, and ZHOU Tao. A transformer-based channel estimation method for OTFS systems[J]. *Entropy*, 2023, 25(10): 1423. doi: [10.3390/e25101423](https://doi.org/10.3390/e25101423).
- [81] LONG Fei, NIU Kai, and LIN Jiaru. Joint channel estimation and equalization for OTFS based on EP[C]. Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference, Madrid, Spain, 2021: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685527](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685527).
- [82] TUSHA A, ALTHUNIBAT S, HASNA M O, *et al.* Exploiting user diversity in OTFS transmission for beyond 5G wireless systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(8): 1689–1693. doi: [10.1109/LWC.2022.3174455](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3174455).
- [83] MOHAMMED S K. Time-domain to delay-Doppler domain conversion of OTFS signals in very high mobility scenarios[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 6178–6183. doi: [10.1109/TVT.2021.3071942](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3071942).
- [84] BALAKRISHNAN S and EDDINGTON C. Efficient DSP algorithm development for FPGA and ASIC technologies[C]. Proceedings of 2007 IFIP International Conference on Very Large Scale Integration, Atlanta, USA, 2007: 168–171. doi: [10.1109/VLSISOC.2007.4402492](https://doi.org/10.1109/VLSISOC.2007.4402492).
- 廖 勇: 男, 副研究员, 研究方向为高速移动通信系统及其关键技术.
罗 渝: 男, 硕士生, 研究方向为智能信号与信息处理技术.
荆亚昊: 男, 硕士生, 研究方向为智能信号与信息处理技术.

责任编辑: 陈 倩