DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.230818001

面向车联网通信的 OTFS 信号检测算法综述*

王 健1,王吉哲1,沈正华1,龚黎慧倩1,高 歌2,廖 勇2

(1.国网重庆市电力公司信息通信分公司,重庆401120;2.重庆大学微电子与通信工程学院,重庆400044)

摘 要:车联网(Vehicle to Everything, V2X)通信被认为是未来无线通信网络最重要的应用之一。然而,车辆在高速移动时引起的高多普勒频移会严重恶化 V2X 通信链路的性能。正交时频空(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制技术可以将时间和频率选择性信道转换为时延-多普勒(Delay-Doppler, DD)域的非选择性信道,从而显著提高无线通信系统在高移动性场景下的性能,在 V2X 通信中具有重要的应用价值。但 OTFS 调制技术极大地增加了系统接收端的复杂度,研究低复杂度信号检测算法成为了新一代无线通信系统采用 OTFS 调制的关键问题之一。为此,综述了面向车联网 V2X 通信的 OTFS 信号检测算法。首先介绍了 OTFS 系统模型,然后概述了现有的低复杂度 OTFS 信号检测算法,并将其分为线性检测算法、消息传递(Message Passing, MP)检测算法及其改进算法、基于神经网络的检测算法 3 类,最后探讨了 V2X 通信中 OTFS 信号检测目前所面临的技术挑战与未来的发展趋势。

关键词:车联网;高速移动通信;正交时频空(OTFS);信号检测

开放科学(资源服务)标识码(OSID): ^{10 微信扫描二维码} 新加索语音释文 与作者在线交流 回答: 5 年 5 年者在线交流

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)02-0316-09

A Survey on OTFS Signal Detection Algorithms for V2X Communications

WANG Jian¹, WANG Jizhe¹, SHEN Zhenghua¹, GONGLI Huiqian¹, GAO Ge², LIAO Yong²

(1. Information Communication Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China;
 2. School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Vehicle to Everything (V2X) communication is considered to be one of the most important applications for future wireless communication networks. However, the high Doppler shift caused by vehicles moving at high speeds can seriously deteriorate the performance of on-board communication links. Orthogonal time frequency space(OTFS) modulation technology can convert Time and frequency selective channels to non-selective channels in the delay-Doppler (DD) domain. Therefore, the performance of wireless communication system in high mobility scenario is significantly improved, and it has important application value in V2X communication. However, OTFS modulation technology greatly increases the complexity of the receiving end of the system, and the study of low-complexity OTFS signal detection algorithm has become one of the key issues in the adoption of OTFS modulation in the new generation wireless communication system. Therefore, the oTFS system model, and then summarizes the existing low-complexity OTFS signal detection algorithms, which are divided into three categories, namely linear detection algorithm, message passing(MP) detection algorithm and its improved algorithm, and detection algorithm based on neural network. Finally, they discuss the current technical challenges and future trends of OTFS signal detection for V2X communications.

Key words: Vehicle to Everything(V2X); high mobility communication; orthogonal time frequency space (OTFS); signal detection

 ^{*} 收稿日期:2023-08-18;修回日期:2023-11-28
 基金项目:重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX0025)
 通信作者:廖勇 Email:liaoy@cqu.edu.cn

0 引 言

近年来,随着无线通信技术与各个领域的融合, 车联网逐渐演变为集交通服务、无线通信技术、智能 安防于一体的智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)^[1]。车联网(Vehicle to Everything, V2X)通信是指车辆与一切事物之间的通信,它通过 无线通信技术将车辆与其他车辆、交通基础设施、行 人和互联网等连接起来,实现实时的双向数据交换 和信息共享^[2]。V2X 通信是促进交通安全和智能 化的关键技术,实现 V2X 通信的快传输速率、低时 延、高可靠性是保证 ITS 高效运行的本质要求^[3]。

然而,在 V2X 通信中,车辆具有高速移动的特点。由高速移动性导致的时变信道会产生较大的多普勒频移,从而导致显著的载波间干扰(Intercarrier Interference, ICI),严重降低传统正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 系统的通信性能^[4],使得传统的OFDM系统难以满足 V2X 通信的需求。

正交时频空(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)所基于的时延-多普勒(Delay-Doppler,DD) 信道模型最初源自 Bello^[5]的研究,然而当初它仅作 为理论推导,并未得到广泛应用。在数学文献中, DD 信道有时也被称为海森堡群的晶格表示^[6]。 1988年,Janssen^[7]重新发现了这一结构,并将其称 为ZAK 变换,用于将信号从时间-频率域转换为 DD 域。基于这一基础,Coherence 技术公司联合了德克 萨斯大学的 Hadani 教授和南加州大学的 Molisch 教 授等研究人员,致力于找到 Bello 信道模型的最佳信 号设计,以更充分地捕捉时延-多普勒领域内的分 集效应。最终,在 2017年,OTFS 调制技术被正式 提出^[8]。

近年来,针对高速移动性无线通信提出的正交 时频空调制技术因其在高速移动的车辆上仍具有优 异的通信性能,引起了 OTFS 调制技术在 V2X 通信 中的广泛关注。OTFS 调制技术将逆辛有限傅里叶 变换(Inverse Symplectic Finite Fourier Transform, ISFFT)引入在 OFDM 调制前,并在 OFDM 解调后进 行辛有限傅里叶变换(Symplectic Finite Fourier Transform,SFFT)。通过 ISFFT/SFFT 变换,在 OTFS 系统中引入 DD 域,使调制后的信号在 DD 域而不 是时频(Time-Frequency,TF)域进行传输。等效的 DD 信道具有出色的可分离性、稳定性、简洁性和潜 在稀疏性,使 OTFS 系统能够获得延迟-多普勒分集 增益,从而增强了 OTFS 信号在高速移动环境中抗 多普勒频移的能力,提高 V2X 通信性能^[9]。所以, 研究 OTFS 系统相关难题对 V2X 通信具有重要应用 价值。由于 OTFS 系统中的每个调制符号都通过 ISFFT 运算映射到整个 TF 资源网格中,导致等效 DD 信道的维数远大于 OFDM 系统,从而极大地增 加了 OTFS 系统信号检测的复杂度。为了应对这一 难题,相关研究人员致力于低复杂度 OTFS 信号检 测算法的研究。

本文对可适用于 V2X 通信的低复杂度 OTFS 信号检测算法进行了综述,分类比较了 OTFS 信号检测算法的优势,并讨论了 OTFS 系统低复杂度信号 检测目前所面临的问题与前景。

1 OTFS 系统模型

扩展车辆信道(Extended Vehicular A Model, EVA)是车联网典型通信信道之一,各径之间相互 独立且均服从瑞利分布。在时域上,由于多路径传 播的原因,EVA 通常显示出时延展宽的特点,且由 于车辆的运动,车辆信道中存在时域抖动,即信号传 输的不稳定性和不规则性,这会导致时域上的信号 波形变化和频繁的时域波动。时延-多普勒域中, 进一步出现多普勒展宽,时延-多普勒域中的信道 响应通常表现为一个三维表面,称为时延-多普勒 色散,这个表面描述了不同时延和多普勒频移值上 的信道增益和相位。不同车辆的速度和方向可能会 引起不同的多普勒效应,因此在时延-多普勒域上, 多普勒频移的分布可能会因车辆的运动情况而异。

系统模型介绍如下,OTFS 将数据流映射到 DD 域进行数据传输,图1展示了OTFS系统的传输模型。 在发送端,数据流经过调制之后与导频序列一起被映 射到 DD 域的资源网格 $X \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 上,其中 $M \setminus N$ 分别 表示时延域和多普勒域的资源元素数量。经过 ISFFT 之后,即 $D = F_M X F_N^H, X$ 从 DD 域转换到了 TF 域, $D \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 代表了 TF 域的资源网格, $F_M \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 和 $F_N \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 是归一化快速傅里叶变换矩阵。接着,与 OFDM 调制操作类似,对D进行反傅里叶变换将其变 换到时域,即 $S = F_M^H D = X F_N^H$,其中 $S \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 。为了让 发送的数据能在信道中进行传输,需要将S转换成 串流数据,即 $s = \operatorname{vec}(S) = (F_N^H \otimes I_M) x, s \in \mathbb{C}^{MN \times 1}, x =$ vec(X^{T}) ∈ $\mathbb{C}^{M^{\mathsf{N}\times 1}}$ 代表了 DD 域的串流发射信号, $I_{M} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 代表了单位矩阵。在发射信号之前,为了 避免帧间干扰,还需要在 s 之前插入长度为 N_{cp} 的 循环前缀(Cyclic Prefix, CP)。



Fig. 1 OTFS transmission system

发送的时域信号 *s* 在信道中,会受到双选信道的影响,同时需要注意的是,信道的最大时延不会超过信道的 CP 长度,即 $L \leq N_{CP}$,因此接收时域信号 $r \in \mathbb{C}^{MN\times 1}$ 可以表示为

$$r = Gs + w \tag{1}$$

式中: $G = \operatorname{circ} [g_0, g_1, \dots, g_{L-1}, 0, \dots, 0] \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ 是 由信道抽头 $g_1 \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 构成的循环时域矩阵; $w \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 代表了均值为 0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪 声。在去除 CP 之后,接收信号 $r \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 会从串行 数据转变为矩阵形式,即 $R = \operatorname{vec}^{-1}(r), R \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 。 然后对其进行傅里叶变换,即 $D' = F_M R$,再通过 SFFT 将其从 TF 域变换到 DD 域,得到 DD 域资源网 格 $Y = F_M^H D' F_N = R F_N, Y \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 。最后,将 Y 向量化 $y = \operatorname{vec}(Y^T)$,即可以得到 OTFS 系统中 DD 域的输入 输出关系为

 $y = (I_{M} \otimes F_{N}) P^{H} GP (I_{M} \otimes F_{N}^{H}) x + \tilde{w} = Hx + \tilde{w} \quad (2)$ 式中: $H = (I_{M} \otimes F_{N}) P^{H} GP (I_{M} \otimes F_{N}^{H}) \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ 是 DD 域的等效信道矩阵; $P \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ 是置换矩阵^[10]; $\tilde{w} = (F_{N} \otimes I_{M}) w \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 代表 DD 域的信道噪声。

2 OTFS 信号检测算法

本节将根据文献介绍 OTFS 调制系统常用的信号检测算法,这些算法可分为3类,分别为线性检测算法、消息传递(Message Passing, MP)检测算法及 其改进算法、基于神经网络的检测算法,如图2 所示。



图 2 OTFS 系统信号检测算法

Fig. 2 Signal detection algorithms for OTFS system

2.1 线性检测算法

OTFS 线性检测算法主要包括最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE)算法和迫零 (Zero Forcing, ZF)算法及其改进算法。其中, MMSE 算法因其复杂度低,已经被 4G/5G OFDM 系统所采 用, ZF 算法因其没有考虑噪声的统计特性, 相比于 MMSE 算法,其检测性能相对较差。OTFS 系统中经 典 MMSE 与 ZF 检测算法的检测矩阵分别为 G_{MMSE} = $(H^{\text{H}}H+\sigma^{2}I)^{-1}H^{\text{H}}$ 和 $G_{\text{ZF}} = (H^{\text{H}}H)^{-1}H^{\text{H}}$ 。然而, 当经 典的 MMSE/ZF 检测算法直接应用于 OTFS 系统时, 由于 OTFS 系统中等效 DD 信道矩阵的维数为 $MN \times$ MN,导致了 $MN \times MN$ 矩阵求逆, 使得它们的复杂度 非常高, 为 $O(M^{3}N^{3})$ 。

为了降低 OTFS 系统中线性信号检测的复杂 度,考虑到等效 DD 信道的稀疏性和块循环等特性, 相关研究人员进行了一些低复杂度的线性信号检测 算法的研究。文献[11]利用 OTFS 解调过程中矩阵 的稀疏性和准带状结构,研究了一种低复杂度 MMSE 检测算法,从而在不降低误码率(Bit Error Rate, BER)的情况下获得对数线性复杂度。文献 [12]充分利用 DD 信道矩阵的特征值,在复杂度较 低的情况下给出了精确的 MMSE 和 ZF 解。同时, 文献「13]利用多入多出 OTFS (Multiple-Input Multiple-Output OTFS, MIMO-OTFS)系统信道矩阵分 块矩阵和分块循环矩阵的性质,显著地降低了 MMSE/ZF 算法的复杂度。文献 [14] 联合 MMSE 和 最大似然估计,提出了一种低复杂度的集成检测方 案,对高频谱效率的信号具有更好的性能。文献 [15]在 DD 域中放置导频和保护符号,实时估计自 干扰频率以调整 MMSE 算法,从而提高了 V2X 通信 性能。文献[16]利用 MIMO-OTFS 系统信道块矩阵 的特性,提出了一种比传统 MMSE/ZF 算法复杂度 更低的新型 MMSE/ZF 信号检测器。文献 [17]分析 对比了现有的低复杂度 MMSE 和 ZF 检测算法。文 献[18]只估计信道主对角线和自干扰功率,而不考

虑进行干扰消除,并将信道估计误差和自干扰功率 作为附加的调谐方差参数,实现了双色散信道下 OTFS 系统的低复杂度检测。文献[19]提出了一种 基于上下(Lower-Upper,LU)分解的低复杂度 MMSE 检测算法,使用低复杂度的 LU 分解运算取代了高 复杂度的信道矩阵求逆运算。文献[20]充分利用 信道特性,设计并分析了 MIMO-OTFS 系统中适用 于完美和不完美信道状态信息的低复杂度 MMSE/ ZF 信号接收器。文献 [21] 提出了 SIC-MMSE 算法 对发射信号进行分层检测,对同一层信号的不同多 径分量及其干扰进行相干组合,并通过 MMSE 滤波 进行抑制。仿真结果表明,4-QAM 调制时,所提算 法与传统最大合并比(Maximal Ratio Combining, MRC)算法和 MP 算法相比,其 BER 性能显著优于 MRC 和 MPA 算法。文献 [22] 充分利用 OTFS 系统 的稀疏性,将广义最小残差和分解稀疏近似逆两种 迭代算法应用于 MMSE 估计,从而提高信号检测 性能。

OTFS 系统	线性信号检测算法总结如表1所示。
表 1	OTFS 系统线性信号检测算法

Tab. 1 Summary of linear signal detection algorithms for OTFS systems

算法名称	算法性能
MMSE ^[7]	在不降低误码率的情况下获得了对数线性 复杂度
MMSE/ZF ^[8]	为局部搜索技术提供低复杂度的初始解, 从而提高误码率性能
MMSE/ZF ^[9]	提高了高迁移率和高频谱效率下的误码率 性能
MMSE ^[10]	获得了更高的误码率性能,保持良好的多 普勒效应容忍度,尤其是对于更高的频谱 效率。
MMSE ^[11]	充分利用了线性均衡器的分集,精确估计 了自干扰功率
MMSE/ZF ^[12]	导出的信噪比表达式可以准确地表征完美 和不完美接收信道状态信息各自的误码率
MMSE/ZF ^[13]	以数字方式对比了传统接收器,所提设计 具有相同的误码率和更低的复杂性
MMSE/ZF ^[14]	所提的均衡器使 OTFS 系统在双色散信道 上的低复杂度均衡明显优于 OFDM 系统
MMSE ^[15]	所提出的均衡器在不增加复杂度的情况下 提高了性能,在信噪比为25dB时的误码率 约为 MMSE 算法的0.1倍
MMSE/ZF ^[16]	具有更低的误码率和更低的复杂性
MMSE ^[17]	所提的 SIC-MMSE 检测由于其匹配滤波器 和迫零检测器的固有平衡,可以优于最大 比率梳
MMSE ^[18]	无论分数多普勒如何,所提均衡器都可以 实现良好的误码率性能,并且仅具有线性 阶的复杂度

2.2 MP 检测算法及其改进算法

MP 信号检测算法利用概率图模型来表示信号 传递过程中的相关性和依赖关系,并使用消息传递 算法在图上进行推断,常被用于解决多用户干扰和 多路径干扰等复杂通信环境中的问题。其具体处理 步骤如图 3 所示。



图 3 MP 信号检测算法处理步骤

Fig. 3 MP signal detection algorithm processing steps

MP 信号检测算法的关键思想是使用匹配滤波器(Matched Filter, MF)来最大程度地提高信号与预定义信号波形的匹配程度。这种滤波器的作用是将接收到的信号与已知信号波形进行卷积,从而突出与已知信号波形相匹配的部分。一旦 MF 增强了信号的相关部分,可以将信号积分以减小噪声的影响,进一步提高信号的检测性能。这一过程通常称为脉冲积分。

MP 检测算法虽被认为是实现 OTFS 系统信号 检测最佳性能的方法,但仍存在复杂度高等问题。 文献[23]提出了一种适用于 MIMO-OTFS 系统的基 于 MP 的迭代信号检测算法,并与 MIMO-OFDM 系 统进行了性能对比。文献[24]使用 MP 算法来补偿 多普勒间干扰的影响,充分利用了信道的稀疏性,从 而提高了 OTFS 系统通信性能。文献 [25] 使用 MP 算法进行联合干扰的消除和信号检测,使采用实际 矩形波形的 OTFS 可以达到使用理想脉冲整形波形 的 OTFS 的性能。文献 [26] 提出了一种改进的基于 协方差处理的近似消息传递(Approximate Message Passing, AMP)算法, 其复杂度与传统的 AMP 算法 基本相同,但误码率性能更好。文献[27]研究了一 种 MP 与最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)联合的检测算法,利用波束成形网络将空域 的多普勒频偏进行分离,保证了等效稀疏性,获得了 最佳的分集。文献[28]提出了一种阻尼因子基于 深度学习进行优化的阻尼广义近似消息传递 (Generalized Approximate Message Passing, GAMP) 算法,相较于传统 MP 算法具有更低的复杂度。文 献[29]结合概率剪裁(Probability Clipping, PC)研究 · 319 ·

了一种基于匹配滤波(Matched Filtering, MF)的 MF-MP 检测器,在降低复杂度的同时获得了更好的误 码率性能。文献[30]针对非理想高斯干扰导致 MP 检测性能下降这一问题,通过高斯分布对单个发射 信号进行建模,提出了高斯近似消息传递(Gaussian Approximate-Message Passing, GA-MP)检测方法。文 献[31]引入了分数间隔采样(Fractionally Spaced Sampling, FSS),利用 DD 信道的稀疏性和 FSS 的信 道分集增益,研究了迭代组合消息传递(Iterative Combining-Message Passing, IC-MP)和涡轮消息传递 (Turbo Message Passing, TMP)检测器。文献[32]为 了克服 MP 信号检测器在高散射环境或分数多普勒 频移情况下性能损失严重这一问题,提出了一种统 一近似消息传递(Unitary Approximate Message Passing, UAMP) 检测器。UAMP 检测器在接收到 DD 信号后,利用酉矩阵进行酉变换,利用交织器与 去交织器的迭代联合检测流程如图 4 所示。UAMP 算法与 MRC 算法和 MP 算法的 BER 性能仿真对比 表明,在16-QAM 情况下,UAMP 算法的 BER 性能 明显优于其他两种算法,当 BER 为 10⁻⁴ 时, UAMP 算法的 SNR 相较于 MRC 算法提升约 2 dB. 相较于 MP 算法性能提升更为明显。



Fig. 4 Flowchart of UAMP detection system^[28]

文献 [33] 利用正交三角分解(Orthogonal Triangular Decomposition, QRD)改进了 MP 检测,有效的降低了符号间干扰,提高了信道的可靠性。文献 [34] 针对 OTFS 系统的广义空间调制 (Generalized Spatial Modulation, GSM)技术提出了一种具有更好性能的改进 MP 检测算法,通过激活部分发射天线来减轻信道间干扰(Inter-channel Interference, ICI)。

OTFS 系统 MP 及其改进信号检测算法总结如表2所示。

· 320 ·

表 2 OTFS 系统 MP 及其改进信号检测算法

Tab. 2 Summary of MP signal detection algorithms and

its improved algorithms for OTFS systems		
算法名称	算法性能	
$\mathrm{MP}^{[19]}$	所提出的信道估计方案使用延迟多普勒域 中的脉冲作为估计的导频	
$\mathrm{MP}^{[20]}$	将复杂度降低为 O(MNL ³)的同时拥有更 好的误码率性能	
$\mathrm{MP}^{[21]}$	在各种信道条件下,所提出的未编码 OTFS 方案比 OFDM 具有更优越的误码性能	
AMP ^[22]	所提算法的复杂度与传统近似消息传递算 法几乎相同,但具有更好的误码率性能	
MP-MRC ^[23]	显着提高了迭代的收敛性能,并获得了出 色的系统误差性能	
GAMP ^[24]	所提算法在信噪比为 6~18 dB 范围内的 误码率性能优于经典的 GAMP 算法和 MP 算法	
MF-MP ^[25]	可以在信噪比为 0~20 dB 的范围内实现 更好的误码率性能	
GA-MP ^[26]	所提出的 GA-MP 检测器在相同误码率的 情况下比最先进的 MP 检测器拥有更高的 信噪比,同时保持相同的复杂度	
IC-MP/TMP ^[27]	所提接收器表现出比传统接收器更强的性 能以及对不完善的信道状态信息知识的鲁 棒性	
UAMP ^[28]	基于 UAMP 的检测器可提供卓越的性能, 并且显著优于 AMP 检测器	
QRD-MP ^[29]	消除交叉符号干扰,提高符号级信道的可 靠性	
GSM-MP ^[30]	有效降低符号间干扰	

2.3 基于神经网络的检测算法

传统的信号检测方法通常依赖于数学模型和特 定的检测算法,随着人工智能技术的发展,神经网络 作为一种基于数据驱动的方法,可以从数据中学习 信号的模式和特征,从而更好地进行信号检测。文 献[35]将基于数据增强预处理的 OTFS 帧的二维结 构作为二维卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN)的输入进行信号检测, 在较低复杂度 的情况下获得了与最大后验检测器几乎相同的信号 检测性能。文献[36]提出了两种深度神经网络 (Deep Neural Network, DNN)方法:一种方法是使用 一个全连接深度神经网络(Fully Connected-Deep Neural Network, FC-DNN) 来检测信号向量, 检测问 题被表述为一个多类分类问题,其中每个类对应于 传输信号集中的每个向量,从而实现对传输符号向 量的联合检测:另一种方法使用多个 DNN 进行检 测,传输矢量中的每个符号由单个 DNN 进行检测, DD 域 symbol-DNN 结构如图 5 所示。



图 5 DD 域 symbol-DNN 结构图^[32] Fig. 5 DD domain symbol-DNN structure diagram^[32]

随后,文献[37]提出的信号接收器使用单个 DNN 在空间相干间隔上学习 DD 信道并检测 OTFS 帧中的信息符号。文献[38]级联了具有跳过连接 (Skip Connections, SC)的 CNN 和双向长短期记忆 (Bidirectional Long Short-Term Memory, BiLSTM)网 络来执行信号恢复,提高了 OTFS 系统在水声信道 中的信号检测性能。文献[39]集成了神经网络、贝 叶斯推理和并行干扰消除概念提出了一种基于贝叶 斯并行干扰消除网络(Bayesian-Parallel Interference Cancellation- Network, B-PIC-Net)的 OTFS 信号检测 器,并与现有的检测器进行了性能对比。文献[40] 使用训练过的 DNN 来恢复被码间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI) 扭曲的 OTFS 信号。文献 [41]提出基于 2D-CNN 的检测器模型利用 DD 信道 来学习 MIMO-OTFS 系统的输入输出关系,并且使 用线性检测器的数据增强技术来增强所提模型的学 习和检测能力。文献[42]通过使用更合适的激活 函数以提高 DNN 的精度, 使训练后的基于 DNN 的 数据驱动 OTFS 接收机无需显示信道估计即可直接 恢复初始传输数据。文献[43]提出了一种基于深 度图像先验(Deep Image Prior, DIP)和解码器架构 的未经训练的 DNN,称为 D-DIP,取代了迭代检测器 中的 MMSE 去噪器,从而保持了较低的计算复杂 度。文献[44]提出了3种用于 OTFS 系统信号检测 的新型网络结构,分别为残余网络(Residual Network, ResNet)、密集网络(Dense Network, DenseNet) 和残余密集网络(Residual Dense Network, RDN), 并与 FC-DNN 和 CNN 进行了性能 对比,结果表明随着训练数据量的增大,利用 RDN 网络进行信号检测的 BER 显著下降后趋于稳定,在 训练数据量大于 6.5×10⁴ 后,该网络结构信号检测 的 BER 接近于 10⁻⁵,相较于其他网络结构拥有更好 的 BER 性能。文献 [45] 使用神经网络代替了

Viterbi 算法中需要信道状态信息(Channel State Information, CSI)的对数似然计算,从而提高了信号 检测性能。文献[46]通过使用图神经网络(Graph Neural Network, GNN)辅助 OTFS 信号检测,将发送 符号视为 GNN 的节点,通过聚合、更新和输出模块 获得检测结果。

OTFS 系统基于神经网络的信号检测算法如表 3 所示。

表 3 OTFS 系统基于神经网络的信号检测算法 Tab. 3 Summary of signal detection algorithms

based	on neural network for UIFS systems
算法名称	算法性能
CNN ^[31]	在复杂度仅为 O(MN) 的同时,实现了与 最优最大后验检测器几乎相同的性能
FC-DNN ^[32]	与联合考虑 OTFS 帧中所有符号的完整 DNN 相比,所考虑的符号级 DNN 需要学 习的参数较少,因此复杂性较低
DNN ^[33]	所提出的收发器可以获取发送器和接收器 中存在的 IQ 不平衡,并有效地对其进行 补偿
BiLSTM ^[34]	比 MMSE/ZF 等传统信号检测方法具有更低的误码率
B-PIC-Net ^[35]	集成了神经网络、贝叶斯推理和并行干扰 消除概念,使探测器性能优于目前较先进 的 UAMP 探测器
DNN ^[36]	比 ZF/MP 等传统信号检测方法具有更低的误码率
2D-CNN ^[37]	所提出的模型不需要将通道作为输入来分 析训练和在线部署期间随机变化通道的 特征
DNN ^[38]	可以有效地对抗信道失真,从而对信道参数的变化具有良好的鲁棒性
D-DIP ^[39]	所提出的 D-DIP-BPIC 检测器的符号错误 率性能比实际最先进的检测器高 0.5 dB, 并且保持较低的计算复杂度
RDN ^[40]	可以缓解梯度爆炸和梯度消失的问题,以 解决传统网络没有充分利用所有层次信息 而造成的性能损失问题
Viterbi-NET ^[41]	所提出的方案只需要小尺寸的神经网络和 少量的训练数据即可实现良好的性能
GNN ^[42]	所提出的 GNN 辅助检测器的性能优于 GAMP 检测器约1 dB

3 技术挑战与发展趋势

3.1 技术挑战

OTFS 系统可克服传统 OFDM 系统在高速移动 环境下的局限性,使得它成为未来车联网 V2X 通信 领域的一项重要技术^[47]。但 OTFS 系统的信号检测仍面临以下技术挑战:

一是在复杂 V2X 信道环境下的 OTFS 信号检测 仍存在许多问题^[48]。信道估计对于正确检测 OTFS 信号至关重要,但在复杂信道条件下,信道估计变得 更加困难,使得 OTFS 信号检测在复杂的多径信道 和频率选择性衰落条件下面临挑战。

二是根据目前的研究成果, V2X 通信中的 OTFS 检测器的计算复杂度仍然远远高于 OFDM 检 测器,尤其在应用于 MIMO 环境下时,传统的 OTFS 信号检测算法可能需要大量的计算资源^[49]。因此, 如何降低 OTFS 信号检测的计算复杂度仍是一个重 要的挑战。

三是在 V2X 通信信号检测中,因为需要同时估 计时延、多径衰落、频率偏移等参数^[50],所以 OTFS 系统中的信号检测复杂性依然存在,考虑是否可以 借助于 OTFS 信号简化信号检测的参数估计,是当 前使用 OTFS 信号进行信号检测的挑战之一。

四是 OTFS 信号相较于 OFDM 信号多了 ISFFT 和 SFFT 变换,所以在车载终端也需要对 ISFFT 和 SFFT 变换对进行实现,这可能需要特殊的硬件支持,所以对基于 OTFS 信号检测的车载终端硬件实现是当前可能面临的挑战^[51]。

3.2 发展趋势

面对上述技术挑战的同时, V2X 通信中的 OTFS系统信号检测也有以下发展趋势:

1)目前已有较多针对 SISO-OTFS 系统提出的 信号检测算法,但将 SISO-OTFS 系统信号检测算法 扩展到 MIMO-OTFS 系统时,会面临一些新的问 题^[52]。因此,如何将已有的 SISO-OTFS 信号检测技 术扩展到 MIMO-OTFS 系统具有较大的研究价值。

2)机器学习技术在信号处理领域具有广泛的应用前景^[53],将机器学习引入 OTFS 信号检测中,可以提高检测性能并减少计算复杂度^[54]。目前,基于机器学习的 OTFS 信号检测的研究工作仍然较少,机器学习在 V2X 通信领域中的实际应用也较少,仍需要在学习模型和性能验证等方面进行大量的研究。因此,基于机器学习的 OTFS 信号检测是未来的一个热点研究方向^[55]。

3)由于新的移动通信技术的不断发展,多天线 技术变得越发成熟。通过引入多天线技术可以改善 OTFS 系统的鲁棒性和性能,特别在多径传播环境 中。通过多天线系统提供的空间多样性,可以有效 减少信号的多径衰落影响,提高 OTFS 系统信号检 测的准确率。因此,如何在 V2X 通信领域的 OTFS 系统中引入超大规模 MIMO 用于信号检测是未来可能的一个研究方向^[56]。

4)随着适应 V2X 通信中高速移动环境和复杂 信号条件的同步和定时技术的更新,可以辅助用于 OTFS 信号检测中以简化其参数估计复杂度^[57]。因 此,对 V2X 通信中车载终端的同步和定位等技术的 研究对于简化 OTFS 信号检测参数估计有较大的潜 在研究价值^[58]。

4 结束语

本文面向车联网领域,对适用于 V2X 通信的低 复杂度 OTFS 信号检测算法进行了综述。首先介绍 了 V2X 通信的背景与面临的问题,描述了适用于高 速移动通信的 OTFS 系统模型,然后分类概述了现 有的低复杂度 OTFS 信号检测算法,分别为线性检 测算法、MP 检测算法及其改进算法和基于神经网 络的检测算法,最后讨论了 V2X 通信中的 OTFS 信 号检测技术目前所面临的技术挑战与未来的发展趋 势,给出了一些未来热点研究方向。虽然将 OTFS 调制技术应用于 6G 系统仍然面临着巨大的挑战, 但未来对高速移动场景下的高可靠无线通信的需求 日益增加,OTFS 调制技术所表现出的性能优势在高 速移动无线通信领域仍具有极大的潜力。

参考文献:

- ROY C, SAHA R, MISRA S, et al. Micro-safe: microservices-and deep learning-based safety-as-a-service architecture for 6G-enabled intelligent transportation system [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(7):9765-9774.
- [2] GARCIA M H C, MOLINA-GALAN A, BOBAN M, et al. A tutorial on 5G NR V2X communications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2021, 23 (3): 1972-2026.
- [3] PRATHIBA S B, RAJA G, ANBALAGAN S, et al. Federated learning empowered computation offloading and resource management in 6G - V2X [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 9(5):3234-3243.
- XIAO L, LI S, QIAN Y, et al. An overview of OTFS for Internet of Things: concepts, benefits, and challenges
 I. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9 (10): 7596-7618.
- [5] BELLO P. Characterization of randomly time-variant linear channels [J]. IEEE transactions on Communications Systems, 1963, 11(4): 360-393.
- [6] HADANI R, MONK A. OTFS: a new generation of modulation addressing the challenges of 5G [EB/OL]. (2018-02-07) [2023-08-14]. https://arxiv.org/

· 322 ·

第64卷

abs/1802.02623.

- JANSSEN A J E M. The Zak transform: a signal transform for sampled time-continuous signals [J]. Philips Journal of Research, 1988, 43(1):23-69.
- [8] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]//Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. San Francisco: IEEE, 2017:1-6.
- [9] WEI Z, YUAN W, LI S, et al. Orthogonal time-frequency space modulation: a promising next-generation waveform [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(4):136–144.
- [10] THAJ T, 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.
- [11] TIWARI S, DAS SS, RANGAMGARI V. Low complexity LMMSE receiver for OTFS [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12):2205-2209.
- [12] SURABHI G D, CHOCKALINGAM A. Low-complexity linear equalization for OTFS modulation [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 24(2): 330-334.
- [13] SURABHI G D, CHOCKALINGAM A. Low-complexity linear equalization for 2×2 MIMO-OTFS signals [C]// Proceedings of 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Atlanta: IEEE, 2020:1-5.
- [14] LIANG Y, LI L, FAN P, et al. Doppler resilient orthogonal time-frequency space(OTFS) systems based on index modulation [C]//Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. Antwerp: IEEE, 2020:1-5.
- [15] PFADLER A, JUNG P, STANCZAK S. Pulse-shaped OTFS for V2X short-frame communication with tuned one-tap equalization [C]//Proceedings of 24th International ITG Workshop on Smart Antennas. Hamburg:IEEE, 2020:1-6.
- [16] SINGH P, GUPTA A, MISHRA H B, et al. Lowcomplexity ZF/MMSE receivers for MIMO-OTFS systems with imperfect CSI [EB/OL]. (2020-08-08) [2023-08-14]. https://arxiv.org/abs/2010.04057.
- SINGH P, MISHRA H B, BUDHIRAJA R. Low-complexity linear MIMO-OTFS receivers [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Montreal:IEEE,2021:1-6.
- PFADLER A, JUNG P, SZOLLMANN T, et al. Pulseshaped OTFS over doubly-dispersive channels: one-tap vs. full LMMSE equalizers [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Montreal: IEEE, 2021:1-6.
- [19] ZOU T, XU W, GAO H, et al. Low-complexity linear equalization for OTFS systems with rectangular waveforms [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Montreal: IEEE,2021:1-6.

- [20] SINGH P, GUPTA A, MISHRA H B, et al. Lowcomplexity ZF/MMSE MIMO-OTFS receivers for highspeed vehicular communication [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, 3:209–227.
- [21] LI Q, YUAN J, LIN H. Iterative MMSE detection for orthogonal time frequency space modulation [C]// Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops. Seoul: IEEE, 2022:01-06.
- [22] LI H, YU Q. Doubly-iterative sparsified MMSE Turbo equalization for OTFS modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(3):1336–1351.
- [23] RAMACHANDRAN M K, CHOCKALINGAM A. MIMO-OTFS in high-Doppler fading channels: signal detection and channel estimation [C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference. Abu Dhabi: IEEE, 2018:2080-2085.
- [24] RAVITEJA P, PHAN K T, JIN Q Y, et al. Lowcomplexity iterative detection for orthogonal time frequency space modulation [C]//Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Barcelona: IEEE, 2018:1-6.
- [25] 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.
- [26] LI L, LIANG Y, FAN P, et al. Low complexity detection algorithms for OTFS under rapidly time-varying channel [C]//Proceedings of 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference. Kuala Lumpur:IEEE,2019:1-5.
- [27] CHENG J, JIA C, GAO H, et al. OTFS based receiver scheme with multi-antennas in high-mobility V2X systems [C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops. Dublin: IEEE,2020:1-6.
- [28] XU X,ZHAO MM,LEI M,et al. A damped GAMP detection algorithm for OTFS system based on deep learning [C]// Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Victoria: IEEE, 2020:1-5.
- [29] ZHANG H, ZHANG T. A low-complexity message passing detector for OTFS modulation with probability clipping [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021,10(6):1271-1275.
- [30] XIANG L, LIU Y, YANG L L, et al. Gaussian approximate message passing detection of orthogonal time frequency space modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10):10999-11004.
- [31] GE Y, DENG Q, CHING P C, et al. Receiver design for OTFS with a fractionally spaced sampling approach [J].
 IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7):4072-4086.
- [32] YUAN Z, LIU F, YUAN W, et al. Iterative detection for orthogonal time frequency space modulation with unitary approximate message passing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(2):714-725.

- [33] SHAO H, ZHANG H, ZHOU H, et al. A complexityreduced QRD-SIC detector for interleaved OTFS [J].
 IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(2):950-960.
- [34] WANG T, FAN S, CHEN H, et al. Generalized approximate message passing detector for GSM-OTFS systems[J]. IEEE Access, 2022, 10:22997-23007.
- [35] ENKU Y K, BAI B, WAN F, et al. Two-dimensional convolutional neural network-based signal detection for OTFS systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(11):2514-2518.
- [36] NAIKOTI A, CHOCKALINGAM A. Low-complexity delay-Doppler symbol DNN for OTFS signal detection [C]//Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference. Virtual Event: IEEE, 2021:1-6.
- [37] NAIKOTI A, CHOCKALINGAM A. A DNN-based OTFS transceiver with delay-Doppler channel training and IQI compensation [C]//Proceedings of 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Helsinki: IEEE, 2021: 628-634.
- [38] ZHANG Y, ZHANG S, WANG B, et al. Deeplearningbased signal detection for underwater acoustic OTFS communication [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(12):1920-1932.
- [39] KOSASIH A, QU X, HARDJAWANA W, et al. Bayesian neural network detector for an orthogonal time frequency space modulation [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(12):2570-2574.
- [40] ZHANG S,ZHANG Y,CHANG J, et al. DNN-based Signal Detection for Underwater OTFS Systems [C]//Proceedings of 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Foshan: IEEE, 2022;348–352.
- [41] ENKU Y K, BAI B, LI S, et al. Deep-learning based signal detection for MIMO-OTFS systems [C]// Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops. Seoul: IEEE, 2022:1-5.
- [42] LI Q,GONG Y,LIU Y, et al. Explore the performance of receiver algorithm in OTFS based on DNN[J]. 2022,21 (4):162-181.
- [43] CHANG H, KOSASIH A, HARDJAWANA W, et al. Untrained neural network based Bayesian detector for OTFS modulation systems [EB/OL]. (2023-05-08) [2023-08-14]. https://arxiv.org/abs/2305.04414.
- [44] GONG Y, LI Q, MENG F, et al. Data-driven deep learning for OTFS detection[J]. China Communications, 2023,20(1):88-101.
- [45] GONG Y, LI Q, MENG F, et al. ViterbiNet-based signal detection for OTFS system [J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(3):881-885.
- [46] ZHANG X, ZHANG S, XIAO L, et al. Graphneural network assisted efficient signal detection for OTFS systems [EB/OL]. (2023-06-16) [2023-08-14]. https://ieeexplore.ieee.org/document/10154051.

- [47] ZHANG Z, LIU H, WANG Q, et al. A survey on low complexity detectors for OTFS systems [J]. ZTE Communications, 2022, 19(4):3-15.
- [48] NAIKOTI A, CHOCKALINGAM A. Signal detection and channel estimation in OTFS[J]. ZTE Communications, 2021,19(4):16-33.
- [49] WU Y, XIAO L, XIE Y, et al. Efficient signal detector design for OTFS with index modulation [J]. Digital Communications and Networks, 2022, 5(12):45-57.
- [50] MISHRA H B, SINGH P, PRASAD A K, et al. OTFS channel estimation and data detection designs with superimposed pilots [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(4):2258-2274.
- [51] XIAO L, LI S, QIAN Y, et al. An overview of OTFS for Internet of Things: concepts, benefits, and challenges
 [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9 (10): 7596-7618.
- [52] LIAO Y, LI X. Joint multi-domain channel estimation based on sparse Bayesian learning for OTFS system[J]. China Communications, 2023, 20(1):14-23.
- [53] 廖勇,李雪,王幕熙,等. 基于深度学习的信道估计技术 研究进展[J].电讯技术,2023,63(10):1642-1650.
- [54] CHENG Q, SHI Z, YUAN J, et al. Environment-robust signal detection for OTFS systems using deep learning
 [C]//Proceedings of 2022 IEEE Global Communications Conference. Rio de Janeiro: IEEE, 2022:5219-5224.
- [55] 方斌,田海,贾皓翔,等. OTFS 调制系统的低复杂度 GAMP 算法实现[J].电讯技术,2023,63(6):876-881.
- [56] PANDEY B C, MOHAMMED S K, RAVITEJA P, et al. Low complexity precoding and detection in multi-user massive MIMO OTFS downlink [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5):4389-4405.
- [57] 方箭,冯大权,段海军,等. V2X 通信研究概述[J]. 电 信科学,2019,35(6):102-112.
- [58] 陈成瑞,孙宁,何世彪,等. 面向 C-V2X 通信的基于深 度学习的联合信道估计与均衡算法[J]. 计算机应 用,2021,41(9):2687-2693.

作者简介:

王 健 男,1990 年生于山西忻州,2017 年获硕士学位,主要研究方向为电力信息处理、车载电力系统与通信。

王吉哲 男,1986年生于河南焦作,2012年获硕士学位,主要研究方向为电力信息处理及网络安全。

沈正华 男,1994 年生于重庆,2016 年获学士学位,主要研究方向为电力信息处理。

龚黎慧情 女,1991 年生于重庆,2022 年获硕士学位, 主要研究方向为电力信息处理。

高 歌 男,2001 年生于河南洛阳,2022 年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为 OTFS 信道估计。

廖 勇 男,1982 年生于四川自贡,2014 年获博士学位,现为副研究员,主要研究方向为移动通信、人工智能及其应用。

· 324 ·