

一种基于 OTFS 调制的 卫星车联网系统与性能评估



A Satellite-Based IoV System and Performance Evaluation with OTFS Modulation

马瞻希/MA Zhanxi, 薛鉴哲/XUE Jianzhe,
周海波/ZHOU Haibo

(南京大学, 中国 南京 210023)
(Nanjing University, Nanjing 210023, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241024.1226.004.html>

网络出版日期: 2024-10-24

收稿日期: 2024-08-15

摘要: 分析了卫星车联网 (SloV) 场景的现状及星地信号传播所遇到的问题, 研究利用正交时频空 (OTFS) 调制技术, 设计并评估了基于 SloV 传播信道的系统性能。此外, 深入探讨了该信道在时间-频率域和时延-多普勒域的特性, 并指出了 OTFS 调制的优势。仿真结果表明, OTFS 调制在应对具有 SloV 特性的信道时展现出卓越的性能稳健性。未来将进一步重点优化基于 OTFS 调制的系统设计, 以便更好地提升 SloV 中的高质量通信服务。

关键词: 卫星车联网; 信道分析; 正交时频空; 时延-多普勒域

Abstract: The current situation of satellite-based Internet of vehicles (SloV) scenarios and the problems encountered in signal propagation are analyzed, the use of orthogonal time frequency space (OTFS) modulation technology to design is studied and the system performance based on the SloV propagation channel is evaluated. Besides, we deeply explore the characteristics of the channel in the time-frequency domain and delay-Doppler domain, and point out the advantages of OTFS modulation. The simulation results show that OTFS modulation exhibits excellent robustness when dealing with channels with SloV characteristics. Future work will focus on optimizing the system design based on OTFS modulation to further improve high-quality communication services in SloV.

Keywords: satellite-based IoV; channel analysis; orthogonal time-frequency space division multiplexing; delay-Doppler domain

引用格式: 马瞻希, 薛鉴哲, 周海波. 一种基于 OTFS 调制的卫星车联网系统与性能评估 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 48-54. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405008

Citation: MA Z X, XUE J Z, ZHOU H B. A satellite-based IoV system and performance evaluation with OTFS modulation [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 48-54. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405008

传统卫星通信常常因为其较高的延迟和较低的带宽, 难以满足高速数据传输和车联网应用的需求。随着技术的进步, 在第 6 代移动通信技术愿景中, 以低地球轨道 (LEO) 卫星为代表的卫星网络逐渐与地面网络融合, 为各个场景下的移动车联网终端提供无缝的通信服务^[1-2]。在一个综合的卫星车联网 (SloV) 通信系统中, 终端之间的信号传播与地面网络中的信号传播显著不同^[3], 这具体体现在:

1) 卫星信道与地面信道的传播特性差异: 卫星通信的空口时延和传播时延相对较高, 并且大气衰减导致更大的路径损耗。此外, 卫星信道在大多数通信频段下还具有较强的天气敏感性, 会由于云雨衰落产生更复杂的衰落特性。

2) LEO 卫星的动态特性: 不同于地球同步轨道卫星,

LEO 卫星由于其高速移动, 导致卫星过顶速度快, 地面用户与卫星之间的高速相对运动会引发显著的多普勒频移。

为了克服这些挑战, SloV 通信需要在地面车联网系统的基础上进行适应性优化。目前的无线通信系统大多采用正交频分复用 (OFDM) 作为基础波形, 其优势在于频谱效率高, 能够有效抵抗多径效应, 但在面对 SloV 环境下由终端高速移动带来的多普勒频移时, 载波间干扰 (ICI) 会破坏 OFDM 子载波之间的正交性, 符号的设计变得更加困难, 从而不可避免地引入额外信道开销并造成性能损失。

一个有效的应对措施是利用正交时频空分复用 (OTFS) 调制技术^[4-5], 通过将信号映射到时延-多普勒 (DD) 平面, 再通过 DD 域的信道估计和均衡等技术, 更精确地估计信道

的失真影响并恢复发射信号，减少ICI的影响，为SIoV场景提供更加可靠的通信性能。近些年来，越来越多的学者开始在LEO场景中，对基于OTFS调制技术的系统进行性能分析。例如，文献[6]中在LEO通信中，利用了每个时延-多普勒路径的单一多普勒频移特性，使用一种参数化的方法细化信道估计性能，并提出一种基于最小二乘法的时间域信号检测方法。仿真结果表明，这一设计所能达到的性能能够接近完全已知信道条件下的性能。也有一些研究考虑了基于多输入多输出(MIMO)的OTFS系统性能。文献[7]中提出采用大规模MIMO可以提高频谱效率和分集性能。文献[8]在此基础上研究了在LEO系统中收发端空间相关的MIMO-OTFS系统并改善了LEO通信的误码率性能。有研究也证明了OTFS系统的优越性，例如文献[9]通过对比传统的OFDM调制，探讨了OTFS调制与卫星分集技术结合用于非地面网络的潜力。这些工作都验证了OTFS可以应用于卫星与地面用户的通信并带来性能提升，但他们大都采用统计信道模型，缺乏对具体时变信道衰减与高多普勒效应的建模，而这在验证实际的SIoV可靠传输过程中是不可或缺的。

总的来说，本文旨在分析低轨卫星车联网场景下，OTFS技术在面对高多普勒信道时的性能及现实应用前景。我们首先针对SIoV传播特性搭建了一个真实的信道仿真模型，在此基础上讨论了OTFS的基本原理和DD域上的信道特性，仿真对比了OTFS与OFDM在贴近真实信道条件下的可靠传输性能，最终验证说明了OTFS在面对具有高多普勒频移特性的SIoV信道条件时具有更好的可靠性和稳定性，能够显著提高系统的通信质量。

1 系统模型

1.1 SIoV信道模型

图1展示了一个LEO网络与地面车联网用户结合的应用场景。卫星链路可以作为地面站覆盖不充分的补充覆盖链路，如在偏远地区，也可以当城市场景中地面站负载过高，带宽利用率降低时，作为协作链路，通过任务卸载的方式优化通信服务。

常见的仿真信道模型中，有统计信道仿真^[10]和确定性信道仿真^[11]。前者能够支持各种环境下的大规模信道建模，适应不同仿真场景的需求，但无法反映信道的具体物理环境特性，对动态场景的细节模拟有限；后者能够反映信道的具体物理环境特性，对动态变化的信道特性模拟精确，

但仿真计算复杂度高，对大规模网络系统的整体性能评估能力有限。

对于SIoV这样的线性时变(LTV)信道系统来说，给定信号的载波频率 f_c ，我们重点关注的信道特性包括在该频率下的云雨衰落和大气衰落，以及高多普勒频移。为了反映出信道的具体物理环境特性并模拟出动态的大规模系统场景，我们参考了半确定性信道模型^[12]中产生信道特性的方式。

受到云雨衰落和大气衰落变化影响的主要是信道的大尺度衰落参数，包括路径损耗，阴影衰落等。在SIoV通信里面中，除了载波频率 f_c 、收发端的三维距离 d_{3D} 之外，卫星与地面仰角 α_{sat} 、降雨强度 R 和大气吸收系数 γ_o 均被作为衰落变化的依赖变量。当依赖变量都取标准值时可以定义参考期望值 μ 和参考标准偏差 σ 。以阴影衰落为例， SF_μ 和 SF_σ 分别是阴影衰落的参考期望值和参考标准偏差， SF_μ 的计算可以表示如下：

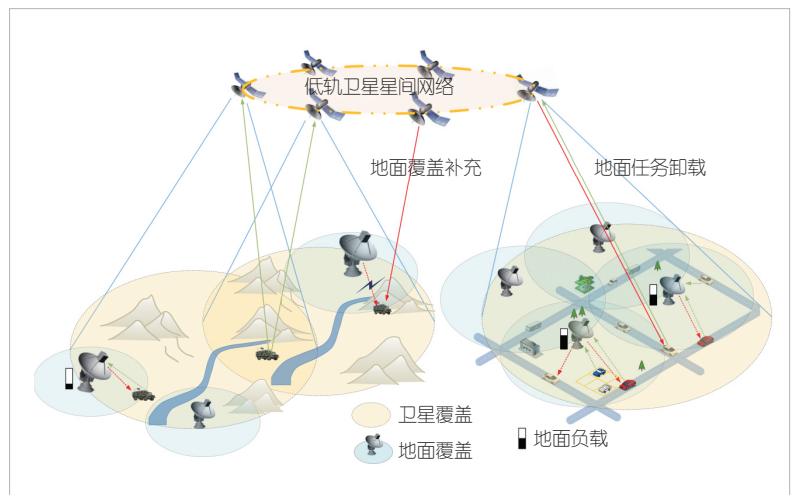
$$SF_\mu = SF_0 + SF_f \log(10 \times f_c) + SF_d \log(10 \times d_{3D}) + SF_\alpha \log(10 \times \alpha_{sat}) - rR - SF_L \gamma_o, \quad (1)$$

其中 SF_f 、 SF_d 、 SF_α 、 r 、 SF_L 分别是频率、距离、仰角、降雨和大气对阴影衰落影响的系数，这也最终反映了信号在较长距离上的衰落变化过程。

对于多普勒频移，视距(LOS)信道的多普勒频移可以通过相对运动来简单表示，如式(2)所示：

$$f_{\text{shift}} = \left(\frac{c - \vec{V}_{\text{Tx,dir}}}{c - \vec{V}_{\text{Rx,dir}}} \right) \times f_c - f_c, \quad (2)$$

其中 $\vec{V}_{\text{Tx,dir}}$ 和 $\vec{V}_{\text{Rx,dir}}$ 分别表示终端的移动速度与方向。尽管星地通信场景中以LOS信道为主，但仍然存在可能的多径传



▲图1 卫星车联网(SIoV)网络应用场景

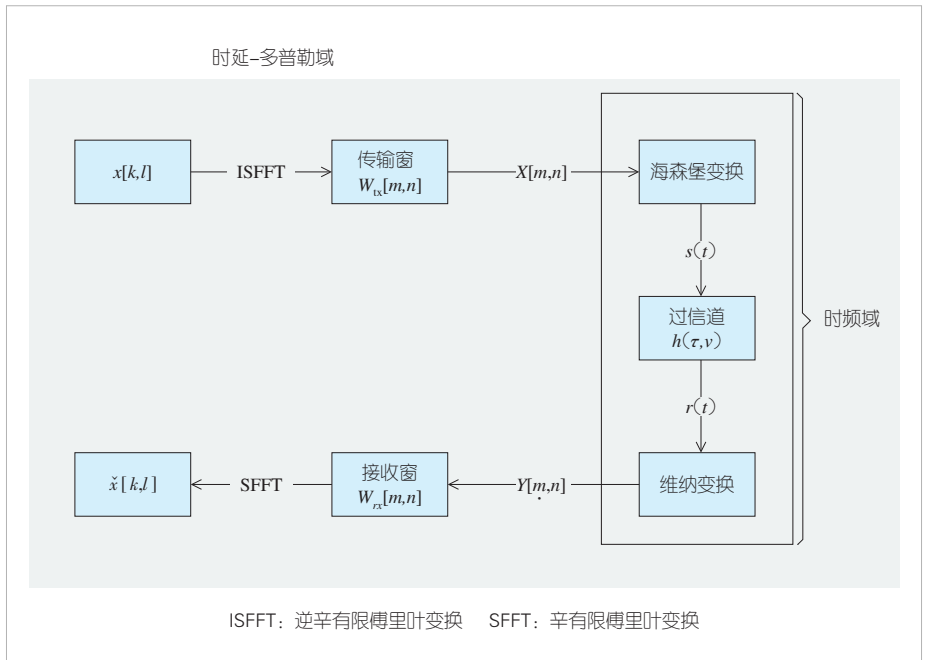
输。3GPP TR 38.811^[13]中统计了在不同的环境与仰角下，卫星与地面用户产生非视距（NLOS）信道的概率。NLOS 信道为每个子路径引入了一个由多普勒频移变化引起的相位变化 $e^{j\theta}$ ，并通过乘上每个子径对应的相位变化，得到最终的复数形式信道系数 g 和时延矩阵 τ ，记录了信道的衰落、相位的变化信息以及 NLOS 多径分量。

1.2 OTFS 调制技术

在图 2 所示的 OTFS 调制系统模型中，整体流程可以视作在传统 OFDM 系统收发端分别增加了一步处理过程，在保持信号结构的前提下，调制信号所经历的时变衰落信道转换为准时不变信道。因此相对于地面通信系统来说，基于 OTFS 的 SiOv 系统不需要调整复杂的系统架构以及基本波形。

但是对于 SiOv 场景模型而言，由于较高的多径-多普勒效应存在，在调制信号之前需要确定合适的 DD 域分辨率，确保更好地检测分离信号和估计信道，提高接收端数据恢复的性能。指定 M 为 DD 域的时延方向单位数，即子载波数量； N 为多普勒方向单位数，即时隙数量。令 T 表示符号持续时间， $\Delta f = 1/T$ 表示子载波频率间隔。延迟分辨率 $1/M\Delta f$ 定义了系统区分不同延迟信号的能力，即子载波数越大，延迟分辨率越小，系统能够区分的延迟差异就越细微。多普勒分辨率 $1/NT$ 定义了系统区分不同多普勒频移信号的能力，主要受每帧的时隙数影响。在一个通信系统中，子载波间隔与符号持续时间一般是默认的。比如 LTE 系统中子载波间隔通常为 15 kHz，而子载波数则会因不同编码方式对频谱利用效率的影响而产生变化。文献[14]对比了经过恰当设计的编码 OTFS 系统与未编码的 OTFS 系统在高移动性信道中的分集增益，阐释了信道编码对 DD 域分辨率的影响。

根据确定好的 DD 域分辨率，初始化一个在 $M \times N$ 二维网格上排列的正交幅度调制星座图，并将发射信号比特映射为网格上的数据符号 $x[k,l]$ ，其中 $k = 0, \dots, M-1$ ； $l = 0, \dots, N-1$ 。经过逆辛有限傅里叶变换（ISFFT）和传输窗后，得到时间-频率（TF）域矩阵 $X[m,n]$ ，其中 $m = 0, \dots, M-1$ ； $n = 0, \dots, N-1$ 。由 DD 域到 TF 域的 ISFFT 可以表示如下：



▲图2 正交时频空(OTFS)系统框架

$$X[m, n] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi(\frac{nl}{N} - \frac{mk}{M})} \quad (3)$$

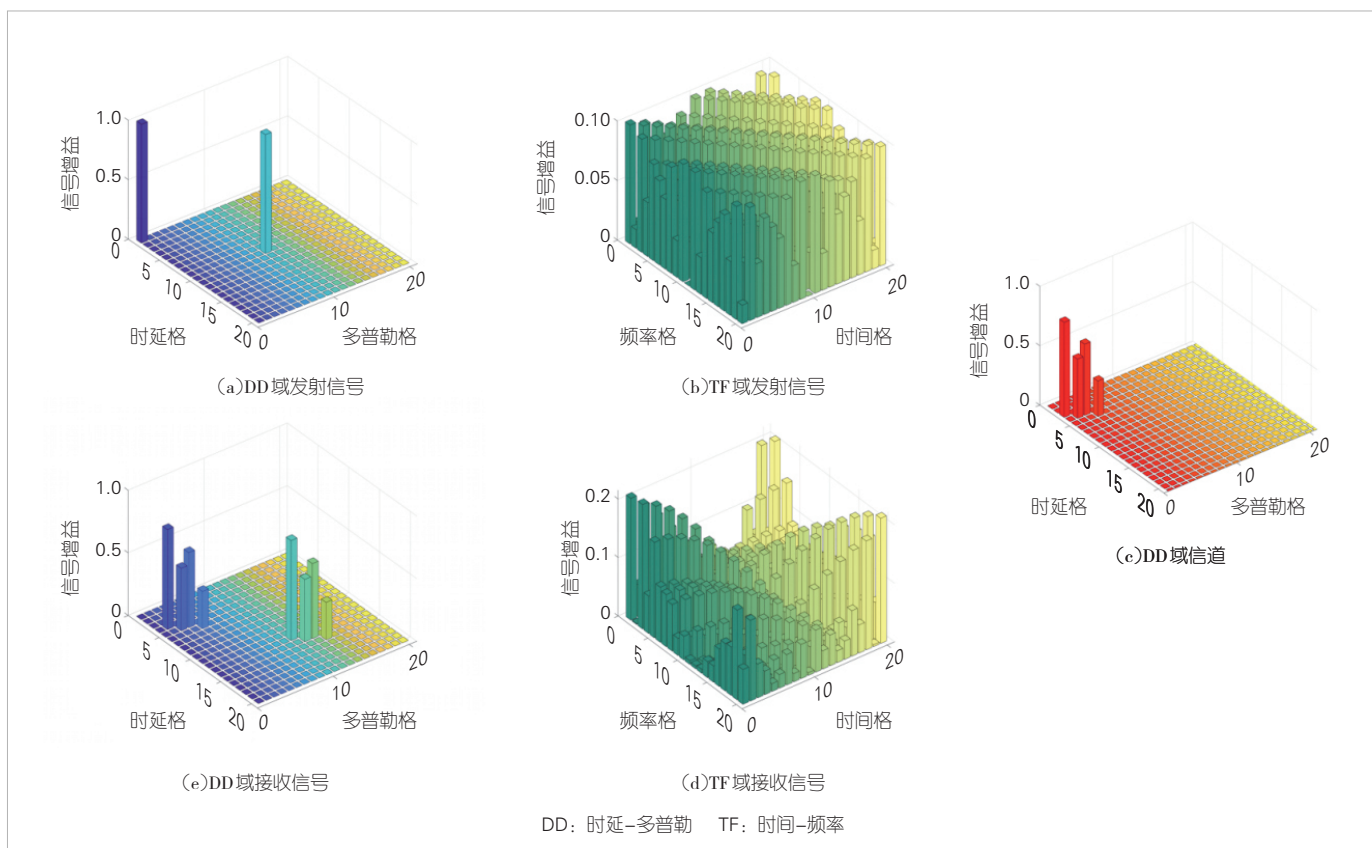
DD 域平面的 $x[k,l]$ 与 TF 域平面的 $X[m,n]$ 中元素本质上是傅里叶变换下的映射关系，这保证了转换过程中的信息完整性和准确性。在这之后，海森堡变换作为 OFDM 变换的泛化模型，可以视作逆离散傅里叶变换的扩展，将 TF 域信号 $X[m,n]$ 转换为时域信号 $s(t)$ ：

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[m, n] g_{\alpha}(t - nT) e^{j2\pi m \Delta f (t - nT)} \quad (4)$$

其中， $g_{\alpha}(t)$ 是脉冲成形函数或基函数，用于定义子载波的时域形状。信号在时域上通过信道传输的过程可以由如下的公式等效表示：

$$r(t) = \sum_{p=1}^P h(\tau, \nu) s(t - \tau_p) e^{j2\pi \nu_p (t - \tau_p)} + w(t) \quad (5)$$

其中， $r(t)$ 和 $w(t)$ 分别表示时域接收信号波形以及加性高斯白噪声， p 表示不同路径， $h(\tau, \nu)$ 表示具有时间和频率衰落的通用信道模型。接收端的变换可以视为发射端的逆过程，在通过信道后，信号引入了 SiOv 场景下的衰减和干扰，维纳变换将接收信号 $r(t)$ 转换回 TF 域，再通过辛有限傅里叶变换（SFFT）转换回 DD 域，得到最终的接收信号 $\hat{x}[k,l]$ 。图 3 的 OTFS 系统信号传输可视化展示了上述的完整过程。



▲图3 正交时频空复用(OTFS)信号变换示例

2 OTFS 系统设计

2.1 TF/DD 域信道特征

为验证 OTFS 系统对 Si6V 场景的优越性，我们在前文的信道模型基础上，参考了 3GPP TR 38.811 中定义仰角-LOS 统计概率，确定了卫星-车辆的 LOS 或 NLOS 状态，构建了一个卫星与车联网通信环境。卫星的仰角由默认历元时间下的轨道 6 元素决定，包括半长轴、轨道偏心率、轨道倾角、升交点赤经、近地点幅角和真近地点。为了综合验证信道特征，我们假设车辆的移动是单向的线性运动，卫星下行传输，载波频率 f_c 位于 Ka 波段。在我们的信道模型中，最终得到的是信道系数矩阵 g 和时延矩阵 τ ，这样的表达方式与式 (5) 中 OTFS 系统的信道 $h(\tau, \nu)$ 有所不同。为了进行后续的信道分析，需要提取出矩阵 g 和 τ 中的多径-多普勒特征。式 (6) 是一个计算信道 TF 域响应的公式：

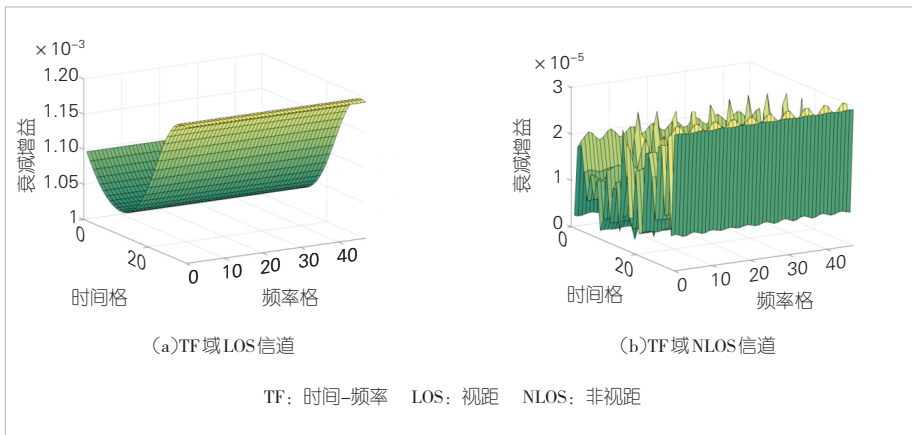
$$H(t, f) = \sum_p \sum_{\text{samples}} g_{ssfp} \cdot e^{-j2\pi k \Delta f \tau_p} \quad (6)$$

其中，samples 表示信道采样点， k 是子载波索引。这个过程参考了短时傅里叶变换的思想，将多个采样点视作一个时

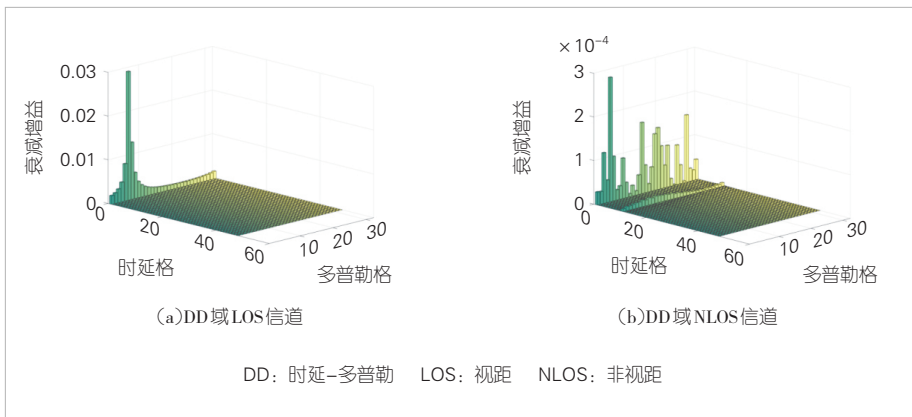
隙，对时隙进行信道系数和时延的傅里叶变换，以及响应在多径分量上的叠加。但是当在一个时隙内的信道采样点发生了剧烈波动时，子载波之间的正交性会被破坏， $H(t, f)$ 的估计和均衡会变得非常具有挑战性。传统的处理方法中考虑了提高 OFDM 系统的子载波间隔，也就是缩短符号持续时间，但这同时也会带来频谱管理以及带宽资源等一系列问题。在 OTFS 调制技术中，我们可以通过 SFFT 将信道转换到 DD 域分析，得到 $\hat{H}(\nu, \tau)$ ，这使得信道的延迟和多普勒频移特性被更清晰地分离和表征：

$$\hat{H}(\nu, \tau) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{t=0}^{N-1} \sum_{f=0}^{M-1} H(t, f) e^{-j2\pi \left(\frac{\nu}{N} t - \frac{f}{M} \right)} \quad (7)$$

图 4 和图 5 展示了在 LOS 和 NLOS 条件下，均存在由多普勒频移引起的时间选择性衰落时，TF 域和 DD 域的信道可视化结果。在图 4 (a) 中，幅度随时间平滑变化，但在子载波之间保持一致。这表明没有频率选择性衰落，仅存在时间选择性衰落，符合单径移动信道特点。与之对应，在图 4 (b) 中，两个维度上的波动意味着综合的多径-多普勒效应引起了时频选择性衰落。在图 5 中，信道响应集中在一些延迟多普勒单元上，这反映了信道稀疏性。对比图 5 (a) 和



▲图4 TF域中的LOS/NLOS信道



▲图5 DD域中的LOS/NLOS信道

图5 (b), 单径条件下的多普勒维度有一个最高峰值, 并向两边平滑变化。多径效应的影响包括两个方面: 一方面在多个时延维度上产生了数据, 另一方面则造成了叠加路径后的多普勒响应的不规则性。这是由于不同路径可能涉及不同方向和不同速度的散射体移动, 产生不规则的正负多普勒频移分量, 从而导致叠加后多普勒效应的不平滑变化。与TF域相比, DD域产生的结果更加直观, 在已知DD域分辨率的情况下, 可以很轻易地分辨并提取出信道的特性。

2.2 DD域系统化挑战

尽管前文的对比中展示了DD域在有多径分量的高多普勒场景信道上的优势, 但从系统角度来说, 整体场景较为理想化, 实际的场景中还存在一些具体的挑战。

图4和图5中的结果保留了分数多普勒的形式。在大多数OFDM/OTFS系统的研究中, 为了简化系统的实现和分析, 常常将分数多普勒频移量化为整数多普勒值。尽管这个操作会使同步和信道估计更容易实现, 但是很大程度上牺牲了多普勒频移的精度, 对多普勒效应的保留不够完整。完整保留

的分数多普勒频移会导致载波频率的偏移, 从而对系统的性能产生显著影响。因此, 我们在系统设计上应该引入更完善的同步机制或相位补偿技术, 对完整的多普勒效应进行处理。

前文已经论证了DD域分辨率的重要性, 图5的可视化也是基于足够精细的DD域分辨率而得到的信道特性。在OTFS系统中, 物理路径本身由于信号传播过程中固有的时延和多普勒频移的连续性, 并不会完全一一对应于DD域的格点, 而传输-接收窗的选择和应用可能会进一步影响DD域的分辨率和系统性能。窗函数本身是通过信号进行加窗处理来确保信号能量尽可能集中在目标格点上, 减少对其他格点的干扰, 优化DD域的分辨率。但是在实际的系统中, 窗函数并不能在消除符号间干扰的同时满足无线通信所需的带限特性, 这在文献[15]中进行了推导。文献基于不同滤波波下的OTFS等效信道模型, 分析了非理想滤波器引入的符号间干扰和消除方法, 指出OTFS的窗函数设计需要考虑性能和带限特性之间的折中关系。因此, 我们在系统设计上应该考虑对合适窗函数的选择与设计, 尽可能地减小DD域格点间干扰。

总的来说, 尽管图5的结果确实展现了DD域信道的稀疏性和相较于TF域的优势, 但实际的物理路径通常不会准确对应延迟-多普勒平面上的格点, 对分数和整数多普勒形式的处理以及窗函数的选择都可能导致DD域信道的等效形式复杂化。因此, 在未来实际系统的设计和评估中, 如何平衡分辨率、窗函数特性和系统复杂性之间的关系, 是一个需要深入研究和优化的问题。

3 可靠传输性能分析

在本节中, 我们在包含高多普勒频移特性和大气衰减SLoV信道模型基础上, 完善了一组具有普适性的OFDM和OTFS的通信系统框架, 并进行可靠传输性能分析。

3.1 信道估计

接收端想要通过信号检测恢复原始信号, 离不开信道估

计获得的信道状态信息 (CSI)。传统的 OFDM 系统针对基于导频的信道估计提出了多种方案, 比如块状导频、梳状导频。这些方案都能一定程度上在时频域对信道的波动进行追踪, 但是在 SIoV 这样的高多普勒频移场景中, 信道估计结果很难完全抵消 ICI。

在 OTFS 调制解调框架下, 将导频符号与 DD 域二维网格结构结合, 能够提高信道估计算法精确性。OTFS 数据帧由导频符号 x_{pt} 、时延方向的 M_d 行数据符号 x_d 以及 $M - M_d$ 行保护间隔组成。在时延方向上通过零填充设置保护间隔, 并在其中放置导频符号 $x_{pt}[k_{pt}, l_{pt}]$, 以便排除数据符号在延迟方向和多普勒方向对导频符号的干扰。因此, 对于该已知的不受数据符号干扰的导频符号, 接收端信道估计区域内接收到的导频符号一定是按照 DD 域信道参数经过循环位移和衰减后的结果。这个过程充分利用了 OTFS 中 DD 域信道的稀疏性, 在理想情况下能够大幅度降低信道估计的开销和复杂度。在基于导频的框架中, 我们通过线性最小均方误差 (LMMSE) 方式来对 OTFS 系统进行信道估计:

$$\hat{h} = \frac{\hat{Y} \cdot P^*}{|P|^2 + w^2}, \quad (8)$$

其中, P^* 是导频符号的共轭转置, \hat{Y} 是根据导频接收的信号, w^2 是噪声的方差。这种形式下的信道估计旨在平衡观测信号和噪声方差, 能够在信道条件较差的情况下提取出导频符号的线性相关部分, 降低噪声对信道估计的影响。

3.2 可靠通信性能对比

我们通过仿真对比了不同码率下 OTFS 和 OFDM 的误码率 (BER) 来获取可靠通信性能。在前文的信道模型与信道估计基础上, 发送 1 000 帧, 每一帧取 800 bit 的码长。此外, 我们部署了 Turbo 码作为一个通用的信道编码方式, 并比较了 4 种码率。输入符号的调制方式采用 16 阶正交幅度调制 (16QAM)。对于 OFDM 系统, 为了完整估计信道的波动性, 我们采用全值导频的方法, 同样基于 LMMSE 进行信道估计。

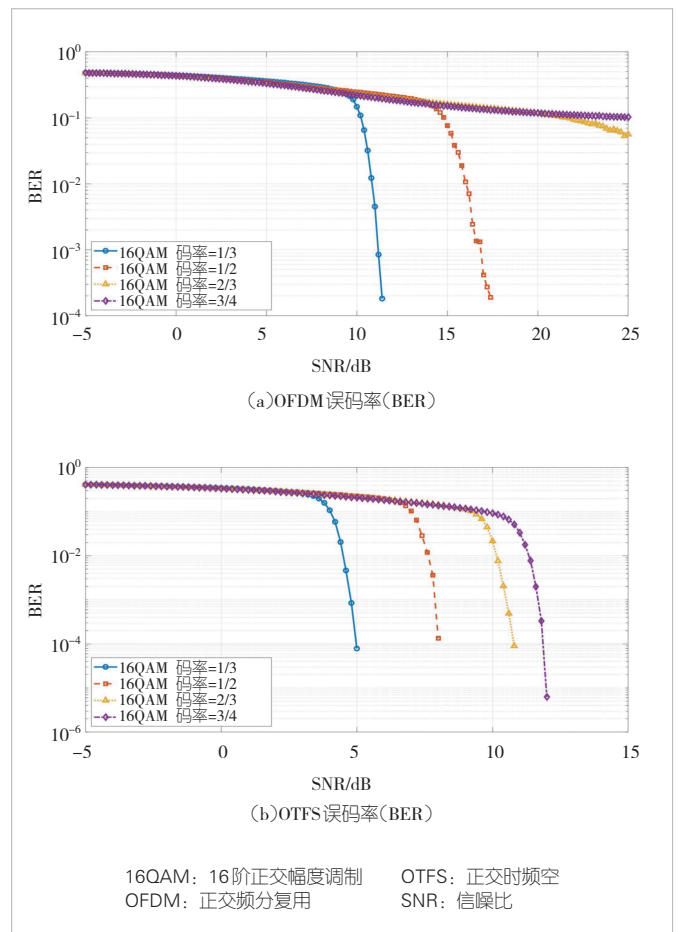
高码率编码可以通过更少的冗余位提高传输效率, 而低码率虽然降低了带宽利用率, 但增强了纠错能力并更好地处理复杂的信道条件。图 6 的结果显然验证了这一点。图 6 (a) 的 OFDM 系统中 1/3 码率的 16QAM 调制在较高信噪比 (SNR) 水平下成功降低了误码率。但是随着码率的增加, 误码率仍然维持在一个较高的差异值。图 6 (b) 中, 尽管码率的增加同样会导致误码率差异值的升高, 但是相比于 OFDM, OTFS 传输并不需要较高的信噪比水平也能将误码率降低到 10^{-5} 数量级。这表明了当面对高多普勒频移引入的

ICI 时, OFDM 调制由于 TF 域的局限性, 对复杂的 SIoV 信道展现出较差的抵抗力。在相同条件下, OTFS 调制则通过将多普勒效应转化到 DD 域, 表现出更好的抗干扰能力。因此, 这些结果验证了在多普勒频移环境中, OTFS 技术相比传统的 OFDM, 展现出了卓越的抗干扰能力, 使其能够在未来 SIoV 通信领域中提供更为稳健和可靠的通信服务。

4 结束语

在本文中, 我们通过分析 SIoV 场景信号传播特性, 介绍了一种可以模拟 SIoV 中的高多普勒频移和大气衰落特性的信道模型, 并利用 OTFS 调制来实现此类信道上的可靠传输。我们提取并讨论了 TF 和 DD 域下的信道特征, 相应地指出了 OTFS 调制的基本优点。仿真结果证明了 OTFS 能够显著增强现有 OFDM 调制方案在高移动性场景下通信的可靠性, 对全面支持 SIoV 通信需求具有重要意义。

但是在 SIoV 的未来演进中, OTFS 仍然存在很多局限性, 需要进一步探讨在非理想条件下的约束, 包括 DD 域中



▲图 6 OFDM/OTFS 误码率曲线

对系统要求更高的相位补偿和窗函数支持，以及在实际传输过程中处理信道估计复杂度的问题。为此，继续深入研究实测场景下的多普勒频移效应，并结合适当的符号调制技术，将是保障 SIoV 能够提供高质量通信服务的关键方向。未来的研究将致力于优化 OTFS 系统，以应对实际应用中的挑战，从而更好地满足卫星与车联网通信的需求。

参考文献

[1] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议 [J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13

[2] MA T, QIAN B, QIN X H, et al. Satellite-terrestrial integrated 6G: an ultra-dense LEO networking management architecture [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(1): 62-69. DOI: 10.1109/MWC.011.2200198

[3] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G [J]. China communications, 2020, 17(12): 156-171. DOI: 10.23919/JCC.2020.12.011

[4] HADANI R, MONK A. OTFS: a new generation of modulation addressing the challenges of 5G [EB/OL]. (2019-02-07) [2024-08-10]. <http://arxiv.org/abs/1802.02623>

[5] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1-6. DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925924

[6] ZHOU X Y, YING K K, GAO Z, et al. Active terminal identification, channel estimation, and signal detection for grant-free NOMA-OTFS in LEO satellite internet-of-things [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(4): 2847-2866. DOI: 10.1109/TWC.2022.3214862

[7] THAJ T, VITERBO E. Low-complexity linear diversity-combining detector for MIMO-OTFS [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(2): 288-292. DOI: 10.1109/LWC.2021.3125986

[8] BORA A S, PHAN K T, HONG Y. Spatially correlated MIMO-OTFS for LEO satellite communication systems [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2022: 723-728. DOI: 10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814666

[9] BUZZI S, CAIRE G, COLAVOLPE G, et al. LEO satellite diversity in 6G non-terrestrial networks: OFDM vs. OTFS [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(11): 3013-3017. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3320793

[10] HE R S, AI B, STÜBER G L, et al. Geometrical-based statistical modeling for polarized MIMO mobile-to-mobile channels [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(8): 4213-4227. DOI: 10.1109/TAP.2018.2839758

[11] LI S D, LIU Y J, YAO L, et al. Improved channel model and analysis of the effect of bodies in curved tunnel using ray tracing [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2020, 19(7): 1162-1166. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2993469

[12] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BÖRNER K, et al. QuaDRiGa: a 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(6): 3242-3256. DOI: 10.1109/TAP.2014.2310220

[13] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15): 3GPP TR 38.811 v15.1.0 [S]. 2019

[14] LI S Y, YUAN J H, YUAN W J, et al. Performance analysis of coded OTFS systems over high-mobility channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(9): 6033-6048. DOI: 10.1109/TWC.2021.3071493

[15] RAVITEJA P, HONG Y, VITERBO E, et al. Practical pulse-shaping waveforms for reduced-cyclic-prefix OTFS [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(1): 957-961. DOI: 10.1109/TVT.2018.2878891

作者简介



马瞻希，南京大学在读博士研究生；主要研究领域为星地融合网络。



薛鉴哲，南京大学在读博士研究生；主要研究领域为高移动性场景中的可靠通信。



周海波，南京大学教授、博士生导师；主要研究领域包括 B5G/6G 网络、车载自组织网络、空天地一体化网络中的资源管理和协议设计；主持国家自然科学基金首批原创探索计划项目、科技部重点研发项目、国家自然科学基金面上项目、华为创新重点研究项目等。