

# OTFS 在低轨卫星通信中的应用研究

徐川 王振永 董开原 赵开元

哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院

DOI:10.12238/ast.v1i1.13699

**[摘要]** 随着 6G 时代空天地一体化通信的发展, 低轨卫星通信以其全球覆盖和高移动性吸引了广泛关注。然而, 传统正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 调制在面对低轨卫星高速运动引起的严重多普勒扩展时性能下降。正交时频空调制 (Orthogonal Time Frequency and Space, OTFS) 作为一种新型二维调制方案, 将信息映射到时延-多普勒域, 以其对高移动性信道的鲁棒性和时频分集能力成为低轨卫星通信的潜在解决方案。该研究综述了低轨卫星通信的特点与挑战; 对比分析了 OTFS 与 OFDM 在低轨卫星通信中的性能及 OTFS 的技术原理和核心优势; 讨论了卫星通信系统标准以及 OTFS 调制解调研究现状。最后, 展望了 OTFS 在未来卫星通信领域的发展方向, 如与大规模 MIMO、深度学习信道预测相结合以及在 6G 空天地一体化通信网络 (Space Air Ground Integrated Network, SAGIN) 网络中的应用前景。

**[关键词]** 正交时频空; 低轨卫星通信; 时延-多普勒域; 空天地一体化

中图分类号: TN927.2 文献标识码: A

## Research on the Application of OTFS in Low Earth Orbit Satellite Communications

Chuan Xu, Zhenyong Wang, Kaiyuan Dong, Kaiyuan Zhao

Harbin Institute of Technology, School of Electronics and Information Engineering

**[Abstract]** With the development of space-air-ground integrated communication in the 6G era, low Earth orbit (LEO) satellite communications have attracted significant attention due to their global coverage and high mobility. However, traditional orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation suffers performance degradation under severe Doppler spread caused by the high-speed motion of LEO satellites. Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation, as a novel two-dimensional modulation scheme, maps information symbols to the delay-Doppler domain. Its robustness in high-mobility channels and time-frequency diversity capabilities make it a potential solution for LEO satellite communications. This paper reviews the characteristics and challenges of LEO satellite communications, comparatively analyzes the performance of OTFS and OFDM in such scenarios, and elaborates on the technical principles and core advantages of OTFS. The article further discusses satellite communication system standardization and the current research status of OTFS modulation and demodulation. Finally, it prospects future directions for OTFS in satellite communications, including integration with massive MIMO, deep learning-based channel prediction, and applications in 6G space-air-ground integrated networks (SAGIN).

**[Key words]** Orthogonal time frequency space; Low Earth orbit satellite communications; Delay-Doppler domain; Space-air-ground integrated network

### 1 概述

随着 6G 技术研究的推进, 空天地一体化通信网络已成为 6G 核心愿景之一。低轨卫星通信具有覆盖范围广、抗灾能力强等优势, 可为偏远地区和移动场景提供无缝连接。在 6G 愿景中, 低轨卫星通信系统 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星星座逐步与地面网络融合, 为海洋、沙漠等区域提供通信覆盖。然而, LEO 卫星高速运动会在星地链路产生极大的多普勒频移, 致使信道呈现双选择性衰落特征。传统 OFDM 在时频域具有良好的频谱效率, 可抵抗多径效应, 但在高移动

性场景下, OFDM 的子载波正交性易被破坏, 产生严重的载波间干扰 (Inter-Carrier Interference, ICI), 同时需要大量导频用于时变信道估计, 从而降低了系统性能。近年, OTFS 调制作为一种时延多普勒域的二维正交基函数调制技术, 在高移动性通信中展现出巨大潜力, 其将信息符号复用到时延多普勒域上, 并利用该域的信道稀疏特性实现信道估计与均衡。因此, 探索 OTFS 在低轨卫星通信中的应用具有重要意义。本文重点分析 OTFS 在 LEO 卫星通信场景下的优势, 并对比评估 OTFS 与 OFDM 的性能差异, 旨在为未来空天地

一体化通信系统提供新思路。

## 2 低轨卫星通信系统特点与挑战

LEO 凭借其低轨道高度具备广覆盖、低时延的优势，但仍面临诸多挑战。尽管 LEO 卫星较地球同步轨道卫星距离地面更近，信号传播距离依然远大于地面通信系统，因此不可避免地存在较大的路径损耗和传播时延，特别是在雨衰等复杂气候条件下，链路质量更易受到影响。同时，LEO 卫星以每秒数公里的速度绕地运行，与地面用户之间存在高速相对运动，从而引发严重的多普勒频移问题。高多普勒扩展不仅造成频率偏移，还加剧了信道的快速变化，使得传统通信系统难以实时跟踪。

由于 LEO 星地链路的信道特性强烈依赖于卫星轨迹及地面环境，呈现显著的时变特性，且可能从视距 (Line of Sight, LOS) 到非视距 (Non Line of Sight, NLOS) 频繁切换，造成多径衰落建模更加复杂。此外，尽管 LEO 卫星在拓展地面网络覆盖方面具有巨大潜力，现有的地面通信系统与卫星系统多为独立设计，如何实现业务互通、网络协同成为现实挑战。更重要的是，LEO 系统的功率预算有限，频谱资源紧张，急需高效、鲁棒的调制技术来适应高动态环境并实现空天地一体化通信。

## 3 OTFS 与 OFDM 在低轨卫星通信中的对比分析

OFDM 因其对多径环境的良好适应性和频谱利用效率被广泛应用于地面通信系统。然而，在低轨卫星通信中，由于高速相对运动引发的多普勒频移严重破坏了 OFDM 子载波之间的正交性，导致 ICI 显著增加，进而影响误码性能和符号检测复杂度。此外，为跟踪快速变化的时变信道，OFDM 需要频繁插入导频以维持信道估计的精度，尤其在 LEO 环境中，块状或梳状导频都需占用大量频谱资源，显著提高链路开销。为了抑制多普勒扩展，传统 OFDM 系统往往需增大子载波间隔或缩短符号时长，这种方式虽然部分缓解了频偏影响，但同时加剧同步难度并降低频谱利用率。在高频时变信道下，OFDM 难以提供稳定的估计和均衡性能，尤其在多径分量延迟超过循环前缀长度时，更易导致符号间干扰和频率间干扰。因此，OFDM 在面对 LEO 通信需求时显得力不从心，迫切需要新的调制方案来弥补其局限。

而 OTFS 通过 DD 域的结构化调制，显著缓解了频率扩展带来的干扰，BER 性能获得显著提升。在多用户场景中，OTFS 能够更有效地利用时频资源，提高系统整体吞吐量，并展现出更强的信道适应能力。综上所述，相较 OFDM，OTFS 在 LEO 场景中具备更低的误码率、更高的频谱效率和更强的信道鲁棒性，是一种更为适配的调制方案。

## 4 OTFS 技术原理与核心优势

正交时频空调制是一种新兴的二维调制技术，其核心在于将信息符号映射至时延-多普勒 (Delay-Doppler, DD) 域，

而非传统的时频域。其发送过程通过逆辛有限傅里叶变换 (Inverse Symplectic Fast Fourier Transform, ISFFT) 将 DD 域符号映射至时频域，经 OFDM 调制后传输；接收端则反向操作，通过辛傅里叶变换 (Symplectic Fast Fourier Transform, SFFT) 将接收信号恢复到 DD 域并进行检测。此过程利用了信号在 DD 域的稀疏性和准静态特性，提升了系统对信道变化的鲁棒性。OTFS 的最大优势在于其天然抗多普勒频移能力，信息符号在 DD 域中几乎经历相同的信道增益，因而能充分获取时频分集，大幅降低误码率。此外，DD 域中无线信道的稀疏分布使得信道估计和均衡更为高效，从而简化了对高速时变信道的建模和追踪。值得强调的是，OTFS 具有良好的兼容性，可以在现有 OFDM 系统基础上通过增加前后处理模块进行升级部署，有效降低系统演进成本。在构建统一的空天地一体化网络过程中，OTFS 作为全场景可适应波形，具备显著的灵活性和一致性优势。

## 5 OTFS 在空天地一体化通信中的融合应用

在 6G 网络架构下，空天地一体化网络 (SAGIN) 成为支撑全覆盖、无缝连接的重要技术路径。OTFS 凭借其在高动态信道中的稳定性和灵活性，成为理想的通用调制波形。在卫星车联网 (Satellite Internet of Vehicles, Satellite IoV) 场景中，OTFS 通过 DD 域调制有效应对来自地面基站与卫星链路的双重信道挑战，兼顾高多普勒频移与传播时延，在城市高密度区域和偏远地区均可提供稳定服务。例如，在地面网络信号覆盖薄弱的区域，LEO 卫星借助 OTFS 实现补充覆盖，而在城市流量高峰时段，卫星链路则可承担任务卸载，平衡网络负载。OTFS 的灵活波形设计使其具备同时支持毫米波、大带宽、智能波束赋形等多种接入模式的能力，特别是在无人机、HAPS 等空中平台通信中，其高鲁棒性和 Doppler 适应性尤为突出。因此，OTFS 具备成为未来空天地融合网络统一波形的潜力，为实现 6G 全场景无缝覆盖奠定坚实基础。

## 6 研究现状

### 6.1 卫星通信系统标准现状

为了实现空天地一体化的愿景，非地面网络 (Non Terrestrial Networks, NTN) 技术再次进入大众视野。非地面网络是指利用卫星、高空平台或者其他空中节点提供无线通信服务的网络，其可以扩展现有网络的覆盖范围，提高灾后恢复能力，支持新的应用场景和业务需求。

3GPP 组织在全球通信产业的标准化中起着主导型的作用，其提供了技术规范 (Technical Specification, TS) 和技术报告 (Technical Report, TR)，在 Release 15 阶段，3GPP 完成了研究报告 TR38.811，该报告由 RAN WG1 主导，研究了新无线电 (New Radio, NR) 支持 NTN 的可能性与需求，其主要内容包括 NTN 的使用场景和业务需求，如广播/组播、

物联网、公共安全、航空/海洋/铁路移动性等、系统架构和部署选项，如单跳或多跳传输，地面网关或直接用户终端接入等技术挑战，同时提供了解决方案，如信道特性、同步、传输延迟、功率控制、链路预算、信号干扰以及对 NR 协议层和功能的影响和适配<sup>[1]</sup>。

其定义的 NTN 部署场景中包含了两个大规模机器类通信 (Massive Machine Type Communication, mMTC) 场景与八个增强型移动宽带 (Enhanced Mobile Broad Band, eMBB) 场景<sup>[2]</sup>，由于卫星通信对比地面通信网络来说传输时延较大，不适用于低时延高可靠通信 (Ultra-reliable and Low Latency Communications, uRLLC)。其中结合了 5G 应用场景需求以及卫星技术，给出的部署方案与参数设定，保障了目前 5G 通信系统的通信质量与性能要求。

在 R16 阶段，3GPP 启动了 TR38.821，旨在为 NR 支持 NTN 提供必要的适配措施，并优先考虑卫星接入。由于在阶段演进中，对于信道模型的改进不大，目前较多研究都在 TR38.811 标准下进行。

## 6.2 OTFS 调制解调研究现状

OTFS 技术的提出源于对 OFDM 系统的改进。OFDM 技术是目前无线通信系统中最广泛使用的调制技术之一，它存在一些缺陷，如对同步误差敏感、对高速移动场景下的多普勒效应不适应、对大规模多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统的支持不足等。

为了克服 OFDM 技术的局限性，OTFS 技术在 2016 年由 Hadani 等在文献<sup>[3]</sup>首次被提出。这样，OTFS 技术可以在时延-多普勒域上实现信息符号的正交调制和解调，并在时域上实现与 OFDM 系统的兼容性。在文献<sup>[4-5]</sup>中，Arman Farhang 等学者研究了离散时间的信道影响，提出了一种基于 OFDM 的正交时频空间调制的低复杂度调制解调器结构，基于该方案，在原有的 OFDM 系统的调制器和解调器中在一个给定的多载波波形上添加预编码和后处理单元，提出了一个基于 OFDM 的 OTFS 系统的离散时间表述。在文献<sup>[6]</sup>中，Ahmad Nimr 等提出了基于广义频分复用 (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM) 的扩展表示，表明 OTFS 可以作为 GFDM 信号进行简单的置换处理，实现了将 OTFS 信号在 GFDM 框架中进行解调，能够实现简化的最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 信号检测，仿真结果表明，OTFS 调制技术的误比特率在高移动性信道环境下，其性能强于 GFDM 和 OFDM。

除了对调制方案的研究，人们开始在信号输入输出的关系方面进行研究。在文献<sup>[7]</sup>中，P.Raviteja 等利用分块循环矩阵首先在矩形波形下 OTFS 系统的输入输出关系，又将其推广到任意脉冲波形，表明其具有简单的稀疏输入输出关系，指出可以使用低复杂度的信号检测算法。同时还比较了不同

波形的误差性能，与其在误码率与带外增益之间的折衷。

信号检测能够感知信道特征、提高通信质量和效率以及灵活性和鲁棒性，在研究输入输出关系后，学者们将目光转移到研究适用 OTFS 的信号检测方案上。在文献<sup>[8]</sup>中，P.Raviteja 等为联合干扰消除和符号检测开发了一种新型的低复杂度但高效的消息传递 (Message Passing, MP) 算法，其所提出的 MP 算法可以有效地补偿宽范围信道多普勒扩散。在文献<sup>[9]</sup>中，提出了一种基于协方差处理的改进的近似消息传递 (Approximate Message Passing, AMP) 算法，其复杂度与传统 AMP 算法几乎相同，但表现出更好的误码率 (Bit Error Ratio, BER) 性能。

信号在复杂的无线信道中传播会经历直射、反射、折射以及散射等过程，产生多径衰落，为了正确检测出传输信号，接收机需要利用信道估计补偿接收信号，因此需要利用导频进行信道估计。而由于低地球轨道卫星具有高机动性的特点，无线信道存在严重的多普勒效应。为了跟踪信道状态变化以实现可靠传输，传统 OFDM 方案下所需的导频数量大幅增加，这对信道估计造成了相当大的负担。相比之下，OTFS 方案在时延-多普勒域中呈现准静态且可能稀疏的通道响应，这可以极大地简化信道估计。基于导频估计方法，OTFS 信道估计所需的导频数量是 OFDM 在类似信道条件下的十分之一<sup>[10]</sup>。进一步表明，只要设置适当的导频保护间隔，不需要增加导频数量，估计精度不会因多普勒效应的加剧而受到明显影响。在文献<sup>[11]</sup>中提出了 OTFS 的嵌入式先导辅助信道估计方案，在延迟-多普勒平面上，在每个 OTFS 帧中安排导频、保护和数据符号，来避免接收器上导频和数据符号之间的干扰。这种方案的信道估计和数据检测都是在同一 OTFS 帧内进行的，开销最小。

## 7 未来发展方向

未来，OTFS 调制技术在低轨卫星通信和空天地一体化通信网络中的发展将向多维度、多方向深入拓展。首先，在多址与多用户协同方面，研究将聚焦于开发更加高效的多址接入机制，例如基于延迟-多普勒域的多址方案，以更好地适配 LEO 卫星星座中多用户同时接入的复杂通信需求。同时，在有限资源下实现灵活的功率控制和资源块分配，也将成为提升系统容量和用户体验的关键。

结合高阶 MIMO 系统和智能波束赋形技术将成为提升系统空间利用率和抗干扰能力的重要路径。OTFS 在 DD 域天然具有良好的时频分集能力，若与大规模 MIMO 结合，可以显著增强空分增益，并通过波束赋形技术实现定向增强和干扰抑制，提升整体链路稳定性和系统覆盖能力，满足未来卫星大规模通信系统的要求。

在信道估计和预测方面，OTFS 调制由于其稀疏准静态的 DD 域信道特性，为引入深度学习等人工智能方法提供了

天然优势。研究将进一步探索如何结合先验统计知识与神经网络模型,实现低开销、高精度的信道估计和均衡算法。同时,利用用户移动轨迹、卫星轨道信息等上下文数据进行信道预测,有望有效缓解信道快速变化所带来的性能下降,提升 OTFS 在高速场景下的鲁棒性。

硬件实现和系统集成方面,OTFS 的发展也将依赖于工程实现的逐步推进。这包括设计适配 OTFS 调制流程的数字信号处理和现场可编程门阵列模块,构建完整的原型系统并与现有 OFDM 结构实现兼容与共存。此外,OTFS 在毫米波与太赫兹等高频段下的实际性能表现将成为研究重点,以应对未来高速率、大带宽卫星通信需求。

最后,随着 6G 和非地面网络标准的推进,OTFS 有望被纳入国际通信标准体系之中。研究将致力于构建完整的 OTFS 协议栈,制定其在卫星与地面融合网络中的信号结构、资源调度和接入机制等,推动其在下一代空天地一体化网络中的广泛部署。综上,OTFS 作为面向未来高动态环境的关键调制技术,正逐步走向标准化、实用化,并将在 6G 时代的多维融合通信体系中发挥核心作用。

## 8 结语

本文围绕低轨卫星通信环境下的调制挑战,系统分析了传统 OFDM 方案的局限,并重点探讨了 OTFS 调制在时延-多普勒域的优势和性能提升。研究表明,OTFS 凭借其对高速多普勒和时变信道的良好鲁棒性,能有效应对 LEO 卫星通信中的高速移动性与频谱效率要求,在抗干扰、信道估计和资源利用等方面展现出显著优势。展望未来,随着 6G 及空天地一体化网络的加速推进,OTFS 有望成为低轨卫星通信中的关键调制技术,为构建广域、可靠、高速的下一代无线通信系统提供技术支撑。

## [参考文献]

- [1] XU B Y, HAN M. Research progress on international satellite communication standards[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019, 305(11): 41-44. (徐冰玉, 韩森. 国际卫星通信标准研究进展[J]. 信息技术与政策, 2019, No.305(11):41-44.)
- [2] HE Y Z. Progress and analysis of international integrated space-terrestrial satellite communication standards[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2018, 290(8): 1-6. (何异舟. 国际天地融合的卫

星通信标准进展与分析[J]. 信息技术与政策, 2018, No.290(8):1-6.)

[3] MONK A, HADANI R, TSATSANIS M, et al. OTFS-orthogonal time frequency space[J]. arXiv preprint, 2016.

[4] FARHANG A, REZAZADEHREYHANI A, DOYLE L E, et al. Low complexity modem structure for OFDM based orthogonal time frequency space modulation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 7(3): 344-347.

[5] REZAZADEHREYHANI A, FARHANG A, JI M, et al. An analysis of discrete-time MIMO OFDM-based orthogonal time frequency space modulation[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City, MO, USA, 2018: 1-6.

[6] NIMR A, CHAFII M, MATTHE M, et al. Extended GFDM framework: OTFS and GFDM comparison[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018: 1-6.

[7] 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.

[8] 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.

[9] LI L, LIANG Y, FAN P, et al. Low-complexity detection algorithms for OTFS under rapidly time-varying channel[C]//IEEE VTC. Apr. 2019: 1-5.

[10] SHARMA P K, YOGESH B, GUPTA D, et al. Performance analysis of IoT-based overlay satellite-terrestrial networks under interference[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 985-1001.

[11] 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.