

星地高速移动场景 OTFS 性能研究

李天时¹, 何睿斯¹, 艾渤¹, 杨汨¹, 钟章队¹, 张浩翔²

¹北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 中国北京市, 100044

²工业和信息化部中国工业互联网研究院, 中国北京市, 100804

概要: 第六代移动通信系统 (sixth generation, 6G) 相比 5G (fifth generation) 移动通信系统, 在应用场景、传输性能等方面需满足更高指标。为应对卫星、无人机和高速铁路等高移动性场景, 6G 面临的挑战之一是满足高达 1000 km/h 超高速移动场景的通信需求。空天地一体化通信系统以及高速率通信业务发展对下一代卫星通信系统的空口波形提出更高要求。正交时频空 (orthogonal time frequency space, OTFS) 调制技术利用时延-多普勒域信道变化缓慢特性, 将信息符号变换到时延-多普勒域传输, 可充分利用时间、频率分集。与正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术相比, 在高速移动场景下传输性能提升明显, 且具有更高频谱利用率, 更低峰均比 (peak to average power ratio, PAPR)。相比 OFDM 技术, OTFS 调制更加适合于星地高移动性通信场景。本文主要研究 OTFS 技术应用于星地通信的性能及信号检测算法, 利用 3GPP 最新的 5G 非地面网络信道模型 (5G NTN), 在典型场景下开展深入的仿真分析与验证, 对相关技术的发展和系统设计具有指导意义。

OTFS 发送端首先在时延-多普勒域进行数据符号复用得到 \mathbf{X}_{dd} , 之后将逆有限傅里叶变换 (ISFFT) 应用于 \mathbf{X}_{dd} , 再进行海森堡 (Heisenberg) 变换可得到 OTFS 系统发送端时域信号 $s(t)$, 在接收端进行以上变换的逆过程 (Wigner 变换和有限辛傅里叶变换), 即可得到 OTFS 系统的输出信号 \mathbf{Y}_{dd} 。OTFS 系统的信道估计通常可采用在时延-多普勒域中插入导频, 利用导频信号进行信道估计, 可获得用于信号检测的信道状态信息。OTFS 系统的性能与采用的信号检测方法密切相关, 在高移动速度性场景下, 由于多径传播和多普勒效应, 时延-多普勒域中数据符号都会受到相邻符号干扰, OTFS 系统的性能会因干扰而损失, 线性均衡方法由于缺乏干扰消除, 通常性能表现欠佳, 因此采用基于连续性干扰消除的最小均方误差算法 (minimum mean square error with successive deconvolution, MMSE-SD) 进行信号检测。

利用 3GPP TR 38.811 中的星-地移动信道模型, 开展了 OTFS 调制技术在星地高速移动场景下的性能研究, 仿真结果表明, OTFS 技术与 OFDM 技术相比 BER 性能更优, 尤其在高移动速度场景下, 在相同信噪比下, OTFS 调制的误码率几乎不受多普勒频移增加的影响。而对于 OFDM 调制, 误码率随着多普勒频移增加而显著增加。

比较了 LoS 和 NLoS 条件下 4 种不同场景 (密集城区、城市、郊区、农村) 下 OTFS 和 OFDM 调制的误码率性能。结果表明, 在 LoS 条件下, 在郊区场景下的 OTFS 系统的误码率性能最优, 在密集城区、城区和乡村场景下的 OTFS 系统性能接近, 而在 NLoS 条件下, 场景对误码率的影响相对较小。

对比了低轨道卫星-地面通信中, OTFS 和 OFDM 调制在密集城区、城区、郊区和乡村场景下的误比特率性能。结果表明, 在 NLoS 条件下的 OTFS 与 OFDM 的性能差距比在 LoS 条件下更大, 在 NLoS 条件下, 不同场景对 OTFS 和 OFDM 性能影响不大。

比较了不同速度和载频下 MMSE-SD 和 MMSE 检测算法的误比特率性能, 采用 NTN-TDL-B 信道模型, 考虑密集城区场景。2.2 GHz 和 20 GHz 对应的子载波间隔分别为 15 kHz 和 60 kHz。结果表明, 利用 MMSE-SD 算法可以提升 OTFS 调制在 LEO 星地通信中

的性能，对于不同的终端速度和载频，当误码率为 10^{-4} 时，MMSE-SD 算法与 MMSE 相比可获得约 2.3 dB 的信噪比增益。

关键词：时延-多普勒域；高移动性通信；最小均方误差算法；正交时频空；星地通信；毫米波通信

<https://doi.org/10.1631/FITEE.2000468>