



专题: 6G

OTFS 技术研究现状与展望

龙航¹, 王森², 徐林飞¹, 贾寅华¹, 代璐¹

(1. 北京邮电大学, 北京 100876;
2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 正交时频空 (orthogonal time frequency space, OTFS) 技术是近年来出现的一种新型多载波调制技术。在 OTFS 技术中, 数据信号在时延-多普勒域产生, 经过逆偶有限傅里叶变换实现信号的时频二维扩展, 以解决正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术在时频双选信道下干扰严重的问题。介绍了 OTFS 技术的基本原理, 通过仿真验证其相比于 OFDM 技术的优势。对其研究现状进行分析总结, 指出 OTFS 技术中的多址接入、信道估计和线性接收机等研究方向目前有待解决的问题。对 OTFS 技术在雷达-通信一体化系统中的应用前景进行分析和展望。

关键词: 多载波; 多普勒频移; 正交频分复用

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021221

OTFS technology research and prospect

LONG Hang¹, WANG Sen², XU Linfei¹, JIA Yinhua¹, DAI Lu¹

1. Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China
2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Recently, a new multi-carrier modulation technique termed orthogonal time frequency space (OTFS) was proposed. In the OTFS modulation, the data symbols are modulated at the delay-Doppler plane and spread on all the time-frequency resource elements with the inverse symplectic finite Fourier transform. Compared with the conventional orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technique, the OTFS modulation performs better in the time-varying and frequency-selective channel. The state of art of OTFS was reviewed and summarized. Simulation results were presented to demonstrate the performance advantage of OTFS over the conventional OFDM. The remainder problems of multi-accessing, channel estimation and linear equalization in OTFS was given. The application of OTFS signal in joint Radar and communication system was also analyzed.

Key words: multi-carrier, Doppler frequency shift, orthogonal frequency division multiplexing

收稿日期: 2021-06-25; 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61931005); 北京邮电大学-中国移动研究院联合创新中心资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61931005), Funded by Beijing University of Posts and Telecommunications-China Mobile Research Institute Joint Innovation Center



1 引言

正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术由于其高频谱效率及抗多径干扰能力, 在 4G 和 5G 系统中广泛应用, 但是其在时频双选 (高时延、高多普勒频移) 信道下性能不佳。5G 系统需要支持移动速度达到 500 km/h 的高速铁路场景^[1], 而在 6G 系统的展望中, 频段和终端移动速度要求分别提升到了太赫兹和 1 000 km/h^[2-3]。高速移动和高频段带来的高多普勒频移会严重破坏 OFDM 子载波之间的正交性。虽然 5G 系统中的 OFDM 采用了更大、更灵活的子载波间隔设计, 但是子载波间隔的增大会导致循环前缀 (cyclic prefix, CP) 变短, 抗多径能力下降, 不能同时满足时频双选信道下的需求^[4]。因此, 6G 系统需要新型多载波调制技术的出现。

Hadani 等^[5-7]于 2015 年公布了正交时频空 (orthogonal time and frequency space, OTFS) 技术, 以在时频双选信道下实现高可靠和高速率的数据传输。OTFS 技术直接在时延—多普勒 (delay-Doppler, DD) 域进行数据调制并且在整个时频域上扩展^[6-8]。当使用合适的接收机时, OTFS 能够获得时间和频率上的全部信道分集^[6]。OTFS 技术将时变多径信道变换到 DD 域上, 使得传输单元中的所有符号都经历几乎相同且变化缓慢的稀疏信道。此外, 由于所有调制符号在时频域上均匀扩展, OTFS 信号的峰均比 (peak-to-average

power ratio, PAPR) 比 OFDM 更低^[9]。

如图 1 所示, OTFS 技术中数据调制符号产生于 DD 域, DD 域离散符号转换为时域波形一般分两步完成, 首先通过逆偶有限傅里叶变换 (inverse symplectic finite Fourier transform, ISFFT) 从 DD 域转换到时频域:

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

再通过海森堡 (Heisenberg) 变换转换到时域。从式 (1) 中可以看出, 每一个调制符号都由一个二维正交基函数扩展到时频域上, 即 OTFS 可看作一种时频二维扩展技术式 (1) 中还可以看出, ISFFT 可以通过对 DD 域信号矩阵的列和行分别进行 M 点离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 和 N 点逆离散傅里叶变换 (inverse DFT, IDFT) 实现。

在接收端使用发送端的逆操作, 首先通过魏格纳 (Wigner) 变换将接收信号从时域转换到时频域, 再通过 SFFT 变换从时频域变换到 DD 域:

$$y(k, l) = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Y(n, m) e^{-j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right)} \quad (2)$$

OTFS 可以与已有的多载波调制技术兼容^[10-12]。将图 1 中的海森堡变换特化为 IFFT, 魏格纳变换特化为 FFT, 内侧虚线框中就是一个 OFDM 系统。因此, 在 OFDM 系统的发送端增加 ISFFT 预处理模块, 在接收端增加 SFFT 模块即可实现 OTFS^[11-12]。

OFDM 系统采用更大的子载波间隔提高抵抗

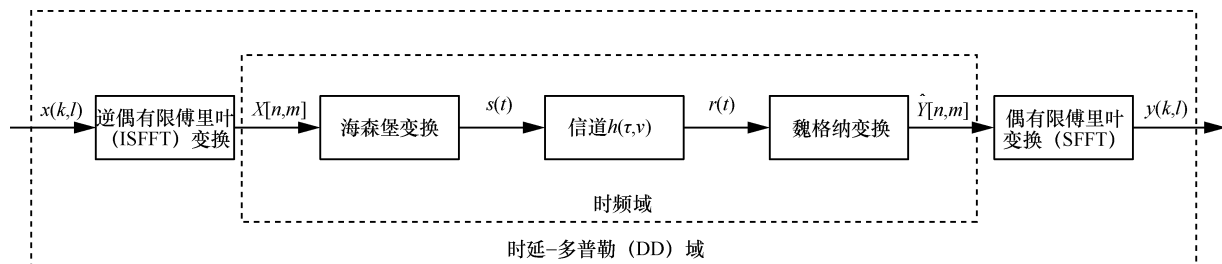


图 1 一般 OTFS 框架

多普勒频移的能力,但是会造成符号长度以及相应的循环前缀的缩短,无法同时应对多普勒频移和时延扩展,而 OTFS 技术则不受多普勒频移变大的影响。仿真参数见表 1, OFDM 与 OTFS 性能对比如图 2 所示。CP 长度参考 5G NR 标准,可见在高速移动场景下,OTFS 远超 OFDM 技术。

表 1 仿真参数

载频	4 GHz
M	120
N	12
子载波间隔	OFDM15: 15 kHz OFDM30: 30 kHz OTFS: 15 kHz
信道模型	两径信道, $[0, -1.5]$ dB, $[0, 2.51]$ μ s
编码调制	QPSK, LDPC, 码率 0.188 5

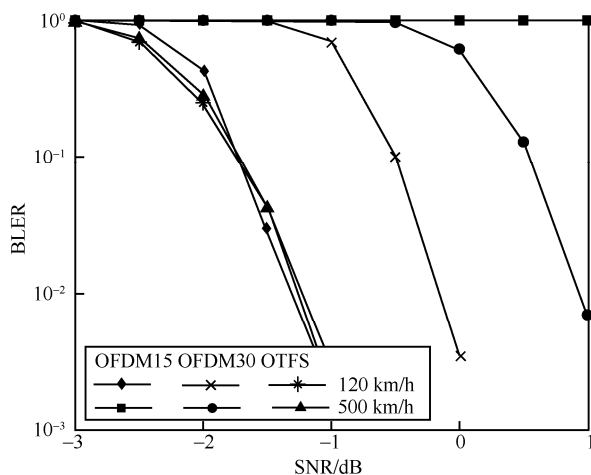


图 2 OFDM 与 OTFS 性能对比

2 OTFS 研究现状

2.1 波形设计和 PAPR 降低

根据海森堡不确定性原理,双正交的理想波形^[6]是无法实现的,因此 OTFS 的波形研究中放开了双正交原则^[13]。OTFS 中可以采用和 OFDM 一样的矩形波形,其优点是易于实现,但缺点是带来高带外辐射导致邻道干扰,可以采用频率局部

脉冲整形^[14]和时域加窗技术^[15]进行带外衰减优化。

虽然 OTFS 的 PAPR 低于 OFDM,但时域符号数目较大时仍是一个问题。目前研究 PAPR 降低的方法有很多,如降低导频功率^[16]、脉冲整形^[14]、迭代限幅滤波技术^[17]和压扩技术^[18]等。

2.2 基于 OTFS 的多址接入

由于 DD 域上发送信号和信道是二维循环卷积的关系^[6],在多径信道下,发送端 DD 域上正交的信号在接收端并不正交,因此 OTFS 下的多址接入方式是一个值得深入研究的方向。

OTFS 多址接入技术可以分为正交多址接入和非正交多址接入^[19-20],也可以分为 DD 域多址接入^[21]和时频域多址接入^[22-23]。在 DD 域上分配资源共有 3 种方式^[24],即沿时延轴分配、沿多普勒轴分配和块状分配。在 DD 域分配连续的资源会导致多用户干扰,虽然可以采用保护间隔来避免,但会影响到频谱效率^[21]。

如果将交错的 DD 域资源分配给每个用户,相应的时频域信号会占据时频域中的连续非重叠区域,从而实现时频域中无干扰复用用户的多址接入方式,此方案称为连续时频多址接入 (contiguous time-frequency multiple access, CTFMA) 方案^[22],此时每个用户在局部区域上使用降低点数的 SFFT 检测信号。在 CTFMA 基础上再进行时频域的资源块交织,就是交织时频多址接入 (interleaved time-frequency multiple access, ITFMA) 方案^[23]。但这两种时频多址接入方案的本质都是时频域信号正交,多普勒频移的分辨力或者分辨范围会受到影响。

总之,OTFS 的多址方式较 OFDM 更为复杂,有待进一步研究。此外,OTFS 中的多址方式需要结合导频信号和接收机算法进行研究。

2.3 OTFS 导频设计和信道估计

在 OTFS 系统中,如果时延和多普勒分辨力足够,信道在 DD 域上呈现若干个稀疏的冲激的



形式。因此,目前常见的 DD 域导频周围有多个保护间隔符号的冲激信号^[25,27],如图 3 所示。在无分数多普勒时,DD 域上的信道不会产生弥散,信道冲激响应的范围会局限在最大多普勒偏移和最大时延内。此方案可进一步推广到多输入多输出(multi-input and multi-output, MIMO)和多用户的导频设计^[26,28],可以利用信道在 DD 域上的稀疏性以增强信道估计和跟踪的精度^[26]。基于图 3 中的导频设计,文献[27]中提出了简单的基于阈值的信道估计。

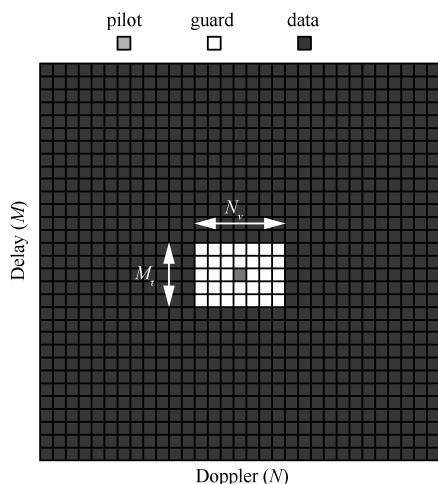


图3 DD域常用导频设计

OTFS 中的信道估计在现实应用中面临的一个重要问题是分数多普勒弥散。若帧长足够长,多普勒频移的分辨率足够高,则不存在分数多普勒弥散问题。此时每个调制符号具有相同且慢变的信道增益。然而,在实际应用中,帧长有限,分数多普勒频移不可忽略,多普勒分辨率的不足导致信道在多普勒域上弥散。文献[28]提出,当分数多普勒频移存在时,需要对导频设计方案进行调整,使得保护间隔包括最大时延范围内的全部多普勒域。此外,采用非双正交波形时,载波间干扰在 DD 域上表现为时延域符号信道的相位差,该相位差的大小与多普勒频移有关。根据导频信号进行信道估计后,还需要对该相位差进行补偿,如图 4 所示,仿真参数参考表 1。尽管文献[14]中

的信道估计考虑了相位差,但其中假设时延域符号信道相位差是理想已知的,并没有给出该相位差的估计方法。由于分数多普勒弥散和时延域相位差的存在,针对多普勒频移的估计方法不可或缺,但在目前的研究中还少有提及。

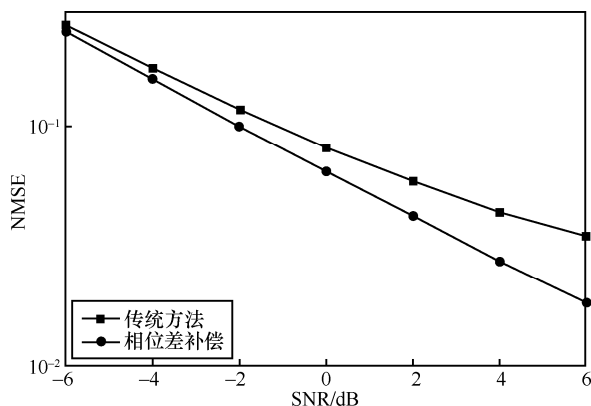


图4 基于矩形波形的 OTFS, 时延域相位差对信道估计性能的影响

2.4 基于 OTFS 的雷达—通信一体化应用

雷达—通信一体化系统对信号波形设计提出了新的要求,传统的雷达信号如调频连续波形(frequency-modulated continuous wave, FMCW)等并不适合高数据速率通信需求。文献[29]和文献[30]中提出将 OTFS 信号用于雷达—通信一体化系统,证明了其用于雷达目标检测和参数估计的性能极限与传统雷达信号一致。目前尚未解决的问题是基于 OTFS 信号的目标探测器复杂度较高。另外,雷达探测器与通信接收机的联合优化也是值得关注的方向。

3 OTFS 接收机研究

OTFS 系统中在 DD 域产生信号,接收信号由发送信号和 DD 域信道二维卷积而得,这区别于传统 OFDM 子载波内平坦的信道。因此,接收机算法是 OTFS 技术中极其重要的研究内容。OTFS 接收机可以分为线性接收机和非线性接收机。非线性接收机具有接近最大似然的性能但复杂度较高且灵活性较差,而线性接收机虽然复杂度低但

性能有损失^[31]。

3.1 非线性接收机

目前常见的非线性接收机是消息传递(message passing, MP)接收机^[32-34]。在无分数多普勒频移时, DD 域信道表现出稀疏性。即使存在分数多普勒弥散, 通过适当方式补偿多普勒间干扰(inter-Doppler interference)后, 信道矩阵仍具备稀疏性。此时, 每个输入(发送)符号仅作用于少数输出(接收)符号, 而每个输出符号也仅与少数输入符号相关。如图 5 所示, 基于迭代的置信传播结构中, 输入符号向输出符号传递概率消息, 而输出符号向输入符号传递干扰和噪声的均值和方差, 干扰项近似为高斯噪声以降低复杂度。MP 接收机的改进, 主要有降低复杂度^[33]和优化性能^[34]两个方向。目前也有其他非线性接收机的研究, 如基于最大比合并的 Rake 迭代接收机^[35]和变分贝叶斯接收机^[36]等。

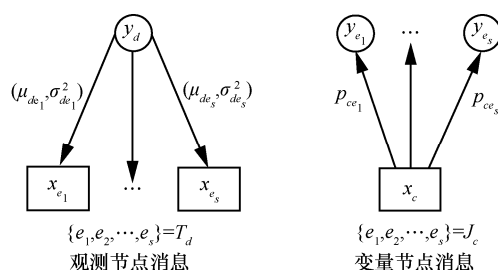


图 5 MP 接收机迭代示意图

3.2 线性接收机

OTFS 中的线性接收机可分为 DD 域线性接收机和时频域线性接收机两类。DD 域接收机的性能相比于时频域更好, 但复杂度更高, 为 $O(M^3N^3)$ 。基于 DD 域信道矩阵的特殊结构, 文献[31]中研究了低复杂度线性接收机。时频域接收机的复杂度很低, 为 $O(MN)$, 但缺点是性能有所损失。时频域接收机的增强, 可以通过 DD 域的均衡器来消除多普勒扩展所带来的影响^[37], 或者是在时频域通过软符号反馈输出进行并行干扰消除^[38]等, 但代价是复杂度的增加。

OTFS 的接收机算法研究需要考虑性能和复

杂度的折中。沿用表 1 中的仿真参数, OFDM 子载波间隔采用 15 kHz。如图 6 所示, 复杂度最高的非线性 MP 接收机性能最好。DD 域线性接收机需要采用大矩阵求逆, 复杂度也不低。时频域(TF)线性接收机复杂度极低, 但是性能最差。非线性接收机复杂度的降低和线性接收机性能的提升, 都是未来 OTFS 接收机研究的方向。

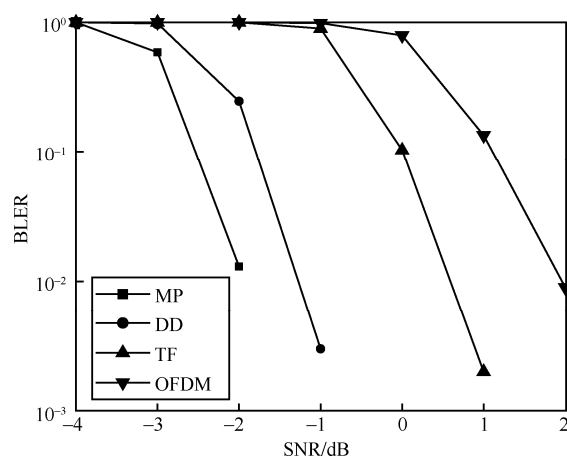


图 6 OTFS 接收机性能对比

4 结束语

OTFS 的导频设计和信道估计、多址接入和接收机技术方向是当前的研究热点, 但是还有许多研究领域尚未充分发掘, 总结如下。

(1) 目前 OTFS 的设计多是占满所有时频资源, 而仅占用部分时频资源的 OTFS 还未经充分研究, 后者虽然会有性能的损失, 但其灵活性可以适应更多场景的需求, 如灵活的多址接入方案等。

(2) OTFS 的导频设计需要与多址方式、信道估计算法、接收机算法等研究结合起来, 在开销—接收性能—复杂度之间取得平衡折中。

(3) 目前 OTFS 和 MIMO 结合的方案都还没有充分利用多天线的优势, 且天线数的增加会导致接收机复杂度急剧增加, OTFS 技术研究需要灵活和低复杂度地支持各种多天线技术。

(4) 基于 OTFS 技术的系统设计需要兼容现



有通信标准中的 OFDM 技术, 在解决 OFDM 面向高速移动时频双选信道时的问题的同时, 尽可能保持其灵活性和固有优势。

参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求白皮书[R]. 2014. IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper on 5G vision and demand[R]. 2014.
- [2] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987. ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(8): 963-987.
- [3] 陈亮, 余少华. 6G 移动通信发展趋势初探(特邀)[J]. 光通信研究, 2019(4): 1-8. CHEN L, YU S H. Preliminary study on the trend of 6G mobile communication[J]. Study on Optical Communications, 2019(4): 1-8.
- [4] TIWARI S, DAS S S, RANGAMGARI V. Low complexity LMMSE receiver for OTFS[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2205-2209.
- [5] HADANI R, RAKIB S S. OTFS methods of data channel characterization and uses thereof: US9444514[P]. 2016-09-13.
- [6] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [7] HADANI R, MONK A. OTFS—a novel modulation technique meeting 5G high mobility and massive MIMO challenges[R]. 2017.
- [8] 李伶俐. 抗多普勒频移正交时频空系统性能分析与优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. LI L J. Performance analysis and optimization of Doppler resilient orthogonal time frequency space systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [9] SURABHI G D, AUGUSTINE R M, CHOCKALINGAM A. Peak-to-average power ratio of OTFS modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(6): 999-1002.
- [10] NIMR A, CHAFII M, MATTHE M, et al. Extended GFDM framework: OTFS and GFDM comparison[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [11] REZAZADEHREYHANI A, FARHANG A, JI M Y, et al. Analysis of discrete-time MIMO OFDM-based orthogonal time frequency space modulation[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [12] 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, 2018, 7(3): 344-347.
- [13] 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.
- [14] TIWARI S, DAS S S. Circularly pulse-shaped orthogonal time frequency space modulation[J]. Electronics Letters, 2020, 56(3): 157-160.
- [15] HOSSAIN M N, SUGIURA Y, SHIMAMURA T, et al. Waveform design of low complexity WR-OTFS system for the OOB power reduction[C]//2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [16] MARSALEK R, BLUMENSTEIN J, PROKES A, et al. Orthogonal time frequency space modulation: pilot power allocation and nonlinear power amplifiers[C]//2019 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [17] GAO S, ZHENG J P. Peak-to-average power ratio reduction in pilot-embedded OTFS modulation through iterative clipping and filtering[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(9): 2055-2059.
- [18] NAVEEN C, SUDHA V. Peak-to-Average power ratio reduction in OTFS modulation using companding technique[C]//2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 140-143.
- [19] DING Z G, SCHÖBER R, FAN P Z, et al. OTFS-NOMA: an efficient approach for exploiting heterogeneous user mobility profiles[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(11): 7950-7965.
- [20] CHATTERJEE A, RANGAMGARI V, TIWARI S, et al. Non-orthogonal multiple access with orthogonal time-frequency space signal transmission[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1): 383-394.
- [21] SURABHI G D, AUGUSTINE R M, CHOCKALINGAM A. Multiple access in the delay-Doppler domain using OTFS modulation[EB]. 2019.
- [22] KHAMMAMMETTI V, MOHAMMED S K. OTFS-based multiple-access in high Doppler and delay spread wireless channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 528-531.
- [23] AUGUSTINE R M, CHOCKALINGAM A. Interleaved time-frequency multiple access using OTFS modulation[C]//2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [24] RAKIB S, HADANI R. Multiple access in wireless telecommunications system for high-mobility applications: US9722741[P]. 2017-08-01.

- [25] 刘天俊. 基于正交时频空(OTFS)系统的导频序列设计与信道估计[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- LIU T J. On pilot sequence design and channel estimation in OTFS system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [26] SHEN W Q, DAI L L, AN J P, et al. Channel estimation for orthogonal time frequency space (OTFS) massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(16): 4204-4217.
- [27] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Embedded delay-Doppler channel estimation for orthogonal time frequency space modulation[C]//2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [28] 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.
- [29] GAUDIO L, KOBAYASHI M, BISSINGER B, et al. Performance analysis of joint radar and communication using OFDM and OTFS[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [30] GAUDIO L, KOBAYASHI M, CAIRE G, et al. On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 5951-5965.
- [31] SURABHI G D, CHOCKALINGAM A. Low-complexity linear equalization for OTFS modulation[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 330-334.
- [32] 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.
- [33] LI L J, LIANG Y, FAN P Z, et al. Low complexity detection algorithms for OTFS under rapidly time-varying channel[C]//2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [34] ZHANG M C, WANG F G, YUAN X J, et al. 2D structured turbo compressed sensing for channel estimation in OTFS systems[C]//2018 IEEE International Conference on Communication

Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 45-49.

- [35] THAJ T, VITERBO E. Low complexity iterative rake detector for orthogonal time frequency space modulation[C]//2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [36] YUAN W J, WEI Z Q, YUAN J H, et al. A simple variational Bayes detector for orthogonal time frequency space (OTFS) modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 7976-7980.
- [37] LI L, WEI H, HUANG Y, et al. A simple two-stage equalizer with simplified orthogonal time frequency space modulation over rapidly time-varying channels[EB]. 2017.
- [38] ZEMEN T, HOFER M, LOESCHENBRAND D. Low-complexity equalization for orthogonal time and frequency signaling (OTFS)[EB]. 2017.

[作者简介]



龙航(1984-), 男, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为无线通信技术。

王森(1983-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院高级研究员, 主要研究方向为移动通信技术。

徐林飞(1996-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为多载波调制技术。

贾寅华(1998-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为多载波调制技术。

代璐(1998-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为多载波调制技术。