

引用本文:王丽萱,马健新. 基于 RoF 和 OTFS 调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构[J]. 光通信技术,2023,47(3):56–61.

基于 RoF 和 OTFS 调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构

王丽萱, 马健新 *

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100089)

摘要: 为了克服高铁移动通信场景下传输容量和多普勒频移带来的困难,提出一种基于光纤无线电(RoF)和正交时频空间(OTFS)调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构。在高铁移动通信场景下,有线部分使用 RoF 技术作为沿铁路分配高频宽带无线信号的解决方案;无线部分使用 OTFS 调制,通过将时频域信号转换为相对稳定的时延多普勒域信号来解决多普勒频移(DFS)破坏现行宽带正交频分复用(OFDM)信号子载波间正交性的问题。仿真结果表明:在相同传输条件下,当 OFDM 调制的误码率降为 10^{-1} 以下时,OTFS 调制的误码率已经降低到 10^{-4} 量级,因此 OTFS 调制的传输性能更优。

关键词: 光纤无线电; 高速铁路; 多普勒频移; 正交时频空间; 双层通信架构

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)03-0056-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Novel high-speed railway mobile communication two-layer link structure based on RoF and OTFS modulation technology

WANG Lixuan, MA Jianxin*

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to overcome the problems of transmission capacity and Doppler frequency shift in high-speed environments, a novel high-speed railway mobile communication two-layer link structure based on radio over fiber(RoF) and orthogonal time frequency space(OTFS) modulation technology is proposed. In the high-speed railway communication environment, wired part uses RoF technology as a solution for distributing high-frequency broadband wireless signals along the railway. The wireless part uses OTFS modulation to solve the problem of Doppler frequency shift (DFS) destroying the orthogonality between subcarriers of existing wideband orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals by converting time-frequency domain signals into relatively stable time-delay Doppler domain signals. The simulation results show that under the same transmission conditions, when the bit error rate of OFDM modulation drops below 10^{-1} , the bit error rate of OTFS modulation has dropped to the order of 10^{-4} , and the transmission performance is better.

Key words: radio over fiber, high-speed railway, Doppler frequency shift, orthogonal time frequency space, two-layer communication architecture

0 引言

近年来,高速移动通信场景(如高铁移动通信)对密度和吞吐量的要求越来越高,这不仅带来了巨大的

数据流量问题^[1-2],也使得毫米波通信受到了广泛的关注。基于毫米波频段的第五代移动通信技术(5G)可用带宽能够达到数十吉赫兹^[3-4],且能提供高速数据传输,但会导致无线接入网络(RAN)中的数据流量严重过载。通常使用的数字光子链路(如公共无线电接口)会使 RAN 所需的容量呈爆炸式增长,在使用多输入多输出(MIMO)技术时这个问题更为显著^[5-7]。另外,由于公共无线电接口格式数字帧的射频(RF)信号数字化过程需要非常大的传输容量。因此,在基于毫米波的 5G 网络中,移动前传链路的带宽瓶颈将无法避免^[8-9]。

文献中关于网络融合的典型研究方向包括正交频分复用(OFDM)在光纤无线电(RoF)系统中的应用方

收稿日期:2022-04-26。

基金项目:国家重点实验室基金项目(IPOC2020ZT06)资助。

作者简介:王丽萱(1997—),女,硕士研究生,现就读于北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业,主要从事光通信与无线通信融合技术、微波光子学等方面的研究,并重点研究与仿真验证了高速铁路移动通信质量的优化方案。

* **通信作者:**马健新(1977—),男,博士,教授,主要研究方向为微波光子学、光通信与无线通信融合技术、光电子学与光通信等。



案^[10-11],以提高频谱利用率并减少符号间干扰(ISI)。但该方案没有处理由高迁移率引起的双重色散,即多径传播效应引起的时间色散和多普勒频移引起的频率色散。同时,在实际高铁移动通信场景中,还存在信号接收和发射天线无法做到绝对垂直,以及列车高速变化的相对位移会引起多普勒频移,导致 OFDM 中的载波间干扰(ICI)大幅增高并降低无线链路的传输性能^[12]等情况。联合对抗 ISI 和 ICI 的一种典型方法是使用脉冲整形系统来优化时频域中的脉冲形状^[13-14]。但该方法不能有效地满足多普勒频移的需要^[15]。除此之外,与 RoF 链路相关的损耗(例如非线性失真和噪声)将对生成的毫米波信号质量产生不利影响,信号与毫米波频段之间上变频和下变频时的损耗也会对传输的无线信号(尤其是基于 OFDM 的无线信号)造成较大影响^[16-18]。虽然 5G 系统中的 OFDM 采用了更大、更灵活的子载波间隔设计,但子载波间隔的增加将导致循环前缀(CP)和抗多径干扰能力较差,不能同时满足时频双选信道的要求^[19]。另外,由于列车与地面的高速相对运动和实际无线传输系统内天线的倾角等问题,多普勒频率高且变化快,会引起接收信号的不稳定性,严重影响列车的通信性能和质量。

为实现高带宽需求、高服务质量(QoS)的高铁专用接入网,有学者提出了一种基于 RoF 技术的线性蜂窝网络,结合“移动蜂窝”的概念^[20-21],无需执行基站(BS)间的硬切换过程^[22-23],可用于高铁移动通信场景中移动用户高效通信,并且针对 RoF 技术在高铁移动通信场景中的应用做了仿真和现场验证^[24-25]。然而,如何克服多普勒频移对高铁移动通信质量的影响仍然是一个尚未解决的问题。

正交时频空间(OTFS)技术^[26]可被直接用在时延多普勒(DD)域中调制数据,并在时频域中传播,在双色散信道中具有比 OFDM 更好的性能,被认为是 OFDM 或单载波频分多址(SC-FDMA)的扩展。与 OFDM 相比,OTFS 不仅可以很好地利用接收信号的衰减和功率变化来最大化系统容量,还可以有效抵抗多普勒引起的频移^[27-29]。因此,具有稳

定数据速率和较低误包率的 OTFS 调制为解决高铁移动通信场景中的一系列难题提供了新的途径^[26],可以考虑将该调制方式运用在 RoF 前传链路中。

为实现宽带无线信号分配,抵抗多普勒引起的高铁信号频移,本文提出将 RoF 和 OTFS 调制技术融合应用于高铁移动通信链路中。

1 基于 RoF 和 OTFS 调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构原理

1.1 结构组成

基于 RoF 和 OTFS 调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构示意图如图 1 所示,该结构由中心站(CS)、列车轨道一侧的 BS、列车顶部的接收天线以及它们之间的通信链路组成。无线电信号在 CS 中进行电/光转换,通过基于 RoF 技术的光纤传输到轨道侧的 BS。BS 进行光/电转换后,无线传输到列车顶部接收天线,再由该天线发送到车顶接收单元,进一步传递给列车用户。

为了实现这些功能,链路结构采用了蜂窝通信系统。该系统使用多路波分复用(WDM)环路^[30],并在 CS 处生成由多个 RoF 信号组成的多波长信号。光开关用于从产生的多波长信号中选择对应波长的 RoF 信号,然后送到相应的马赫-曾德尔调制器(MZM)中进行数据调制。此处可以使用具有高频谱效率的同相/正交(I/Q)调制,有助于提高光网络的传输容量。调制后的 RoF 信号由 WDM 多路复用器(MUX)组合,合并后的信号通过光缆传输,并在 BS 内分离出该 BS 对应

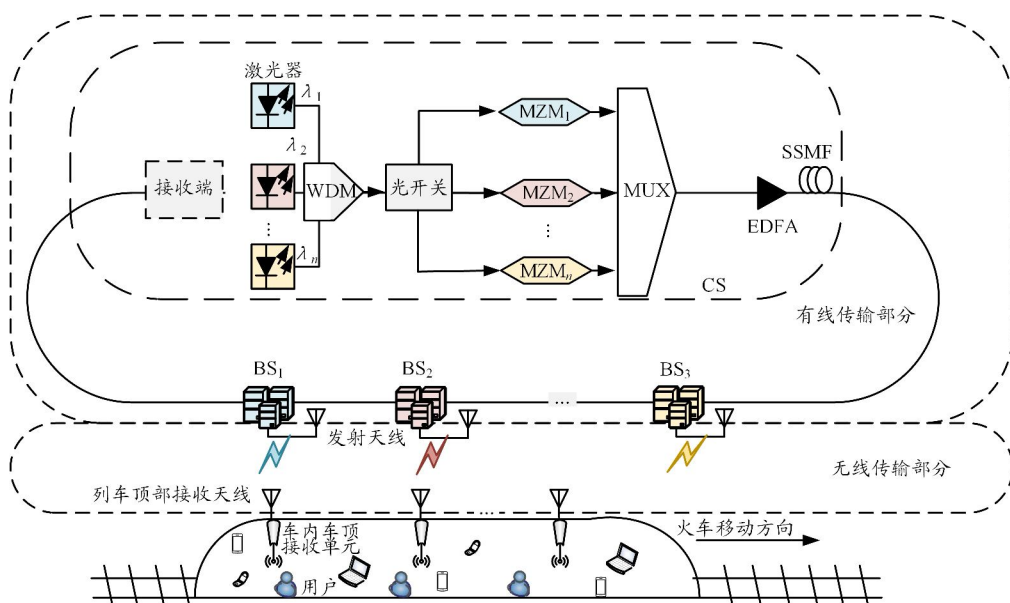


图 1 基于 RoF 和 OTFS 调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构示意图

的波长信号,最后对该信号进行电信号解调。在以上配置中,每个 BS 可以由 CS 分配一对固定的光波长,不仅使系统结构简化,而且还保留了 RoF 技术的大带宽和高速率特性。

1.2 RoF 技术

RoF 技术利用光纤的大带宽和低损耗等特性,实现 RF 信号的远距离传输,可用于远距离分配低损耗、高频谱效率的高频宽带无线信号,实现 RF 信号从 CS 传输到路侧 BS 网络。

当信号以数字基带传输时,系统一次只能传输一项业务。而本文提出的双层链路结构采用 RoF 技术可以直接利用光子上变频技术将光信号转换为高频无线电信号,直接以模拟 RF 格式传输信号,系统能够容纳多个无线电信号在链路上共存。此外,直接从 RoF 链路生成毫米波信号不仅能保持远程基本单元结构简单、经济高效和节能,而且还能够确保无线信号的透明性和低延迟传输。所有信号处理功能,包括数字基带处理单元,都可以集中在 CS 中。

1.3 OTFS 技术

OTFS 信号传输和接收流程图如图 2 所示。首先,调制器利用逆辛有限傅里叶变换(ISFFT)将 RoF 链路传输后的时频域电信号映射信息符号 $x_{N_{\text{bs}}}(k, l)$ 映射到 DD 域,得到时频域符号 $X_{N_{\text{bs}}}[n, m]$,其中 k, l 和 n, m 分别为 ISFFT 对原矩阵作二维正弦波复数扩展(域变换)的 2 个二维矩阵中的符号点坐标。然后,对时频符号 $X_{N_{\text{bs}}}[n, m]$ 进行海森堡变换,得到时域信号 $s(t)$ 。 $s(t)$ 通过天线发射和大气无线传输后,假设接收天线接收到的时域信号为 $r(t)$ 。 $r(t)$ 通过魏格纳变换映射到时频域符号 $Y_{N_{\text{bs}}}[n, m]$ (可以认为是海森堡变换的逆变换),再通过辛有限傅里叶变换(SFFT)得到 DD 域符号 $y_{N_{\text{bs}}}(k, l)$,完成解调。

DD 域数据 $x_{N_{\text{bs}}}(k, l)$ 是排列为 $N \times M$ 的二维信号,对 $x_{N_{\text{bs}}}(k, l)$ 进行 ISFFT 得到时频域信号 $X_{N_{\text{bs}}}[n, m]$ 为

$$X_{N_{\text{bs}}}[n, m] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x_{N_{\text{bs}}}(k, l) \exp(j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})) \quad (1)$$

由于 $X_{N_{\text{bs}}}[n, m]$ 是传统的 OFDM 信号,所以式(1)中

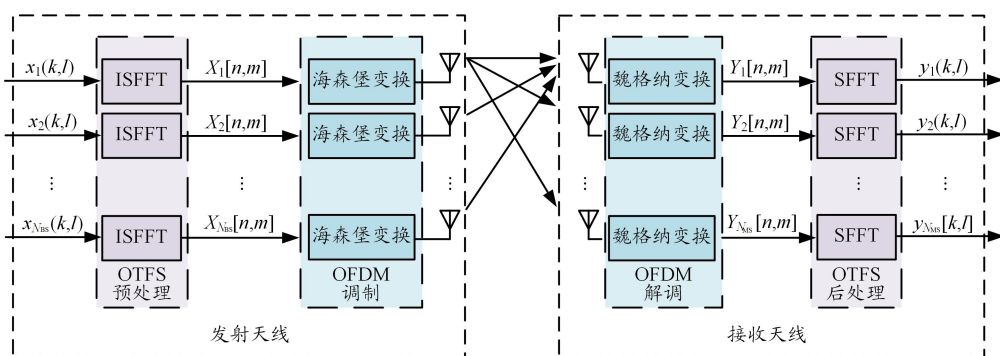


图2 OTFS 信号传输和接收流程图

的 N 和 M 分别代表传输的符号数和载波数,这两者的选择会影响信道估计的准确性,并受环境相干时间的限制。OFDM 信号经过海森堡变化得到时域信号 $s(t)$ 为

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} X_{N_{\text{bs}}}[n, m] g_d(t-nT) \exp(j2\pi m \Delta f (t-nT)) \quad (2)$$

其中, T 是符号的持续时间(可以理解为载波间隔), Δf 为频率间隔。 $g_d(\cdot)$ 为发送脉冲,当 $g_d(\cdot)$ 是一个持续时间为 T 的矩形滤波函数时,式(2)可以简化为传统的离散傅里叶逆变换(IDFT)。当 $N=1$ 时,OTFS 系统被简化为一个近似于 OFDM 的系统。因此,一个 OTFS 数据可以看作是对具有 M 个子载波的 N 个连续独立 OFDM 符号的一种 SFFT 预编码。

解调过程中, $r(t)$ 采用匹配滤波器计算互模糊函数 $Y(t, f)$, 其表达式为

$$Y(t, f) = A_{g, r}(t, f) \triangleq \int g_r'(i-t) r(i) \times \exp(-j2\pi f(i-t)) di \quad (3)$$

其中, $A(\cdot)$ 是互模糊函数, $g_r'(\cdot)$ 为对带通信号 $g(\cdot)$ 进行频率补偿后的复包络, i 表示时刻, t, f 是时间和频率的偏移参数,在 $t=nT, f=m\Delta f$ 处对上述函数进行采样,可以得到匹配滤波器在时频域的输出 $Y_{N_{\text{bs}}}[n, m]$, 其魏格纳变换过程为

$$Y_{N_{\text{bs}}}[n, m] = Y(t, f) |_{t=nT, f=m\Delta f} \quad (4)$$

魏格纳变换是 OFDM 接收机功能的扩展,可以将接收到的时域信号映射到频域调制符号。当 $g(\cdot)$ 为矩形滤波函数时,魏格纳变换对应于 OFDM 中的离散傅里叶变换(DFT),此时 $g_d(\cdot)$ 和 $g_r(\cdot)$ 为任意具有良好的时频局部特性的函数组。魏格纳变换后得到的时频域信号 $Y_{N_{\text{bs}}}[n, m]$ 经过式(5)所示的 FFT 变换,可以在 DD 域被接收。

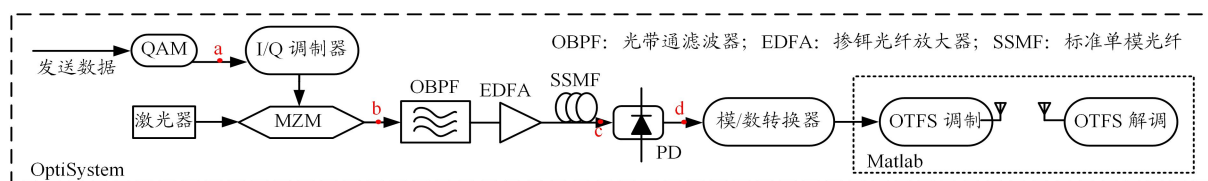


图3 仿真链路示意图

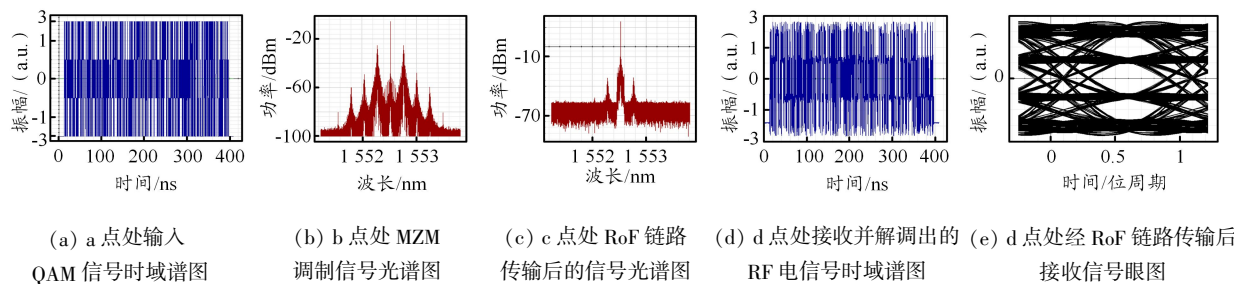


图4 图3中仿真链路重要节点a~d处的信号谱图和经RoF传输链路后的信号眼图

$$y_{N_{\text{as}}}(k, l) = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} Y_{N_{\text{as}}}[n, m] \times \exp \left[-j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right) \right] \quad (5)$$

从图2可以看出,相较于OFDM调制,OTFS的调制与解调过程仅需前后多加一层ISFFT和SFFT。实际应用中,在与RoF链路的衔接处(路侧的BS内及车顶天线)加入预处理和后处理部分即可,无需改动原本的通信系统基本框架和原始结构^[31]。

2 模拟演示

为了验证基于RoF和OTFS调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构的可行性,本文以下行链路为例,采用OptiSystem和Matlab仿真平台分别搭建了双层链路结构的有线传输部分(RoF链路)和无线传输部分,仿真链路如图3所示。在RoF链路中,输入的RF信号以正交振幅调制(QAM)信号为例,激光器发射的光进入MZM完成RF信号的搭载后进行滤波、放大等处理,进入光纤传输到BS的光电探测器(PD)进行接收,此时BS接收到的信号是模拟信号,需要在BS中经过模/数转换成数字信号,然后作为Matlab模块的入射信号被OTFS调制解调。

RoF链路仿真参数设置如表1所示,仿真得到的链路传输结果如图4所示。输入的QAM信号(信号时域谱图如图4(a)所示)经过MZM调制后得到光信号(信号光谱图如图4(b)所示),该光信号经RoF链路传输后,接收天线接收到的信号光谱图如图4(c)所示。此时已引入传输链路中的噪声,但该噪声对接收信号

的影响不大。相比原RF信号,解调出的RF电信号(其时域谱图如图4(d)所示)因受到传输链路损耗影响幅度有下降,但波形基本一致。从接收信号的眼图(如图4(e)所示)可以看出,眼图张开效果较好,说明该频段的RF信号在RoF链路中的传输质量良好,基本能符合实际的应用需求。

表1 RoF链路仿真参数设置

参数	值
光功率/dBm	10
频率/THz	193.1
线宽/MHz	10
OBPF带宽/GHz	15
I/Q调制器频率/GHz	30
EDFA增益/dB	20
SSMF长度/km	0.2

Matlab 仿真参数设置

如表2所示。其中,SNR的步进量为2 dB。在下行链路的末端,使用Matlab对比OTFS解调计算后的信号与Matlab模块的入射信号,根据误码率(BER)曲线评估无线信道信噪比(SNR)对OTFS调制解调的影响;同时,对比了OTFS调制和OFDM调制在相同传输条件(除有无预处理、后处理外其余条件全部一致)下的误码性能,其传输BER曲线图如图5所示。

从图5可以看出,SNR会影响调制信号的传输性能,信号BER随SNR的增大而降低;同时,在OFDM

表2 Matlab仿真参数设置

参数	值	参数	值
符号数	8	星座点数	$\log_2 16 = 4$
载波数	4	每个网格承载符号数	$N \times M = 23$
SNR/dB	0~20	每个网格承载比特数/bit	$N \times M \times M = 128$

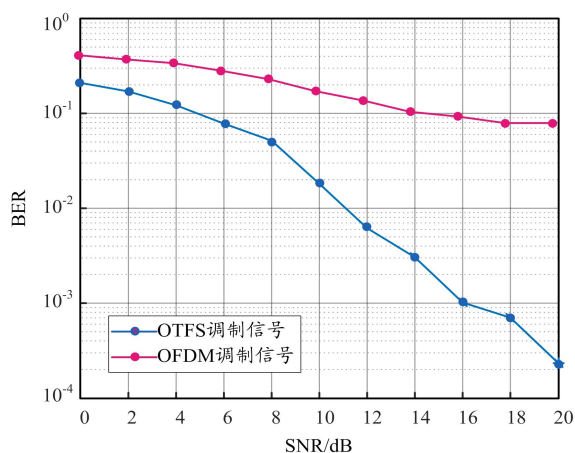


图5 OTFS 与 OFDM 传输 BER 曲线图

调制信号的 BER 降为 10^{-1} 以下时,OTFS 调制信号的 BER 已经低到 10^{-4} 量级,表明采用 OTFS 调制技术的链路传输质量更优。另外,在高铁移动通信场景中,OTFS 的传输效果要远胜于 OFDM。因此,相比 OFDM 调制,OTFS 调制在高铁移动通信链路的无线传输部分具有更大的应用潜力。

3 结束语

本文提出了基于 RoF 和 OTFS 调制技术的新型高铁移动通信双层链路结构,并通过 OptiSystem 和 Matlab 仿真平台联合仿真验证了在高速移动通信场景中,OTFS 的性能优势比 OFDM 更大,推测其在 5G 通信融合中可以替代 OFDM 技术。本文的研究既能够利用 RoF 技术大带宽、高速率的传输特性,又可以在无线传输时尽量避免高移动性带来的信号不稳定困扰。尽管如此,该项技术仍需改进,未来可能的研究和探索的相关方向总结如下:

1)OTFS 导频设计、信道估计、多址接入和接收机技术是国内外当前的研究热点,但 RoF 技术在 5G 高铁通信领域的融合方面并没有得到充分的探索。在现有的高铁移动通信双层链路方案中,为了简化 BS 接收机,降低成本,所有转换模块都尽可能放在 CS,以提高信号的传输速率,文献[32]提到的正交时间序列复用(OTSM)技术可将所有的转换模块都尽可能地放在 CS,以提高信号的传输速率的问题;

2)基于 OTFS 调制的系统设计需要兼容现有通信标准中的 OFDM 调制。在解决 OFDM 调制面临的高速移动时频双信道选择问题的同时,尽可能保持其灵活性和固有优势,推测可以通过前向纠错编码方式能进一步降低其 BER;

3)在仿真中无法完全模拟实际应用中需要考虑的地形、风向、天气等因素,并且与仿真实验不同的是,现实条件下无线链路的传输损耗会增大且损耗的类型也会更为复杂,现场实验时应注意对该部分先进行勘测和估计。

参考文献:

- [1] XIONG W, KONG L, KONG F, et al. Millimeter wave communication: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1616–1653.
- [2] RAPPAPORT T S, XING Y, MACCARTNEY G R, et al. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks-with a focus on propagation models[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(12): 6213–6230.
- [3] CHIH-LIN I. RAN Revolution with NGFI (xHaul) for 5G[C]//IEEE. 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Los Angeles: IEEE, 2017: 1–4.
- [4] RANAWEERA C, WONG E, NIRMALATHAS A, et al. 5G C-RAN with optical fronthaul: an analysis from a deployment perspective [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2059–2068.
- [5] LIU X, ZENG H Y, CHAND N, et al. Efficient mobile fronthaul via DSP-based channel aggregation [J]. Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication, 2016, 34(6): 1556–1564.
- [6] DAT P T, KANNO A, YAMAMOTO N, et al. 190-Gb/s CPRI-equivalent rate fiber-wireless mobile fronthaul for simultaneous transmission of LTE-A and F-OFDM signals[C]//VDE. 42nd European Conference on Optical Communication, Dusseldorf: VDE, 2016: 1–3.
- [7] CHO S H, PARK H, CHUNG H S. Cost-effective next generation mobile fronthaul architecture with multi-IF carrier transmission scheme[C]//IEEE. OFC 2014, San Francisco: IEEE, 2014: 1–3.
- [8] MA Y, XU Z, LIN H, et al. Demonstration of CPRI over self-seeded WDM-PON in commercial LTE environment[C]//IEEE. 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Los Angeles: IEEE, 2015: 1–3.
- [9] BAE S H, SHIM H K, HONG U H, et al. 25-Gb/s TDM optical link using EMLs for mobile fronthaul network of LTE-A system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1825–1828.
- [10] CAO Z, YU J, XIA M, et al. Reduction of intersubcarrier interference and frequency-selective fading in OFDM-ROF systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(16): 2423–2429.
- [11] KHWANDAH S A, COSMAS J P, GLOVER I A, et al. Direct and external intensity modulation in OFDM RoF links [C]//IEEE. Photonics Journal, [s.l.]: IEEE, 2015: 7902710-1–7902710-10
- [12] ROBERTSON P, KAISER S. The effects of Doppler spreads in OFDM (A) mobile radio systems[C]//IEEE. Gateway to 21st Century Communications Village, Netherlands: IEEE, 1999: 329–333.
- [13] MOURAD H A. Reducing ICI in OFDM systems using a proposed pulse shape[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 40(1): 41–48.
- [14] ZHAO Z, SCHELLMANN M, GONG X, et al. Pulse shaped OFDM for

- 5G systems[EB/OL]. [2022-04-26]. <https://arxiv.org/pdf/1605.03731.pdf>
- [15] REN X M, WEI-MING N I. A channel estimator for multi-carrier system in fast time-varying fading channels [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2007, 46(1): 101–105.
- [16] DAT P T, KANNO A, INAGAKI K, et al. High-capacity wireless backhaul network using seamless convergence of radio-over-fiber and 90GHz millimeter-wave [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32: 3910–3923.
- [17] JAMES J, SHEN P, NKANSAH A, et al. Nonlinearity and noise effects in multi-level signal millimeter-wave over fiber transmission using single and dual wavelength modulation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(11): 3189–3198.
- [18] NKANSAH A, DAS A, GOMES N J, et al. Multilevel modulated signal transmission over serial single-mode and multimode fiber links using vertical-cavity surface-emitting lasers for millimeter-wave wireless communications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(6): 1219–1228.
- [19] TIWARI S, DAS S S, RANGAMGARI V. Low complexity LMMSE receiver for OTFS[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2205–2209.
- [20] LANNOO B, COLLE D, PICKAVET M, et al. Radio-over-fiber-based solution to provide broadband internet access to train passengers [Topics in Optical Communications][J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(2): 56–62.
- [21] ZHANG J Y, TAN Z H, YU X X. Coverage efficiency of radio-over-fiber network for high-speed railways [C]//IEEE. 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), Chengdu: IEEE, 2010: 1–4.
- [22] KANNO A, DAT P T, UMEZAWA T, et al. High-speed railway communication system using linear-cell-based radio-over-fiber network and its field trial in 90-GHz bands [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 39(1): 112–122.
- [23] KANNO A, DAT P T, YAMAMOTO N, et al. Radio over fiber signal generation and distribution and its application to train communication network[C]//IEEE. 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Singapore: IEEE, 2017: 1–2.
- [24] DAT P T, KANNO A, YAMAMOTO N, et al. WDM RoF-MMW and linearly located distributed antenna system for future high-speed railway communications[J]. Communications Magazine IEEE, 2015, 53(10): 86–94.
- [25] SUNG M, KIM J, KIM E S, et al. RoF-based radio access network for 5G mobile communication systems in 28 GHz millimeter-wave [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 409–420.
- [26] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]// IEEE. 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu: IEEE, 2017: 681–683.
- [27] 龙航, 王森, 徐林飞, 等. OTFS 技术研究现状与展望[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 57–63.
- [28] 徐湛, 李青宇, 巩译, 等. 正交时频空: 适用于高多普勒扩展场景的调制技术[J]. 西安邮电大学学报, 2021, 26(5): 5–18.
- [29] RAMACHANDRAN M K, SURABHI G D, CHOCKALINGAM A. OTFS: a new modulation scheme for high-mobility use cases [J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2020(4): 315–336.
- [30] DAT P T, KANNO A, KAWANISHI T. Performance of a 90-GHz radio-on-radio-over-fiber system suitable for communications in high-speed railways [C]// IEEE. 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Tampa: IEEE, 2014: 1–4.
- [31] 郑凯航. 基于高铁大规模 MIMO 系统的信道状态信息获取技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [32] THAJ T, VITERBO E. Orthogonal time sequency multiplexing modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 7842–7855.