



中国通信学会

CHINA INSTITUTE
OF COMMUNICATIONS

物理层传输体制与波形 前沿报告 (2021年)

**中国通信学会
2022年6月**

版权声明

本前沿报告版权属于中国通信学会，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国通信学会”。违反上述声明者，本学会将追究其相关法律责任。

专家组和撰写组名单

顾问：

姚富强 中国工程院院士

专家组：

组长：

赵先明 中兴通讯前总裁/北京红山科技股份有限公司总裁，哈尔滨工业大学讲席教授

副组长：

张中兆 哈尔滨工业大学教授

沙学军 哈尔滨工业大学教授

成员(以姓氏笔划为序)：

姓名	单位	职务
王文清	大唐移动通信设备有限公司科技发展部	总经理/教授级高工
安建平	北京理工大学	教授/院长
宋志群	中国电科第54研究所	首席科学家
孙鹏飞	海能达通信股份有限公司	技术总监
陈泓	航天科技集团五院钱学森实验室	主任/研究员
张宏纲	浙江大学	教授
陈玉涛	航天科工集团8357所	所长/研究员
郑福春	哈尔滨工业大学	教授
郭庆	哈尔滨工业大学	教授/院长

撰写组(按单位排名)

单位	姓名
哈尔滨工业大学	沙学军

哈尔滨工业大学	吴宣利
哈尔滨工业大学	房宵杰
哈尔滨工业大学	李卓明
哈尔滨工业大学	宋鸽
哈尔滨工业大学	李尊崎
哈尔滨工业大学	殷雪琦
哈尔滨工业大学	廖壮壮
哈尔滨工业大学	吴玮
哈尔滨工业大学	梅林
哈尔滨工业大学	史军
海能达通信科技股份有限公司	孙鹏飞

前 言

移动通信网络的传输基础是物理层的体制和具体波形设计，体制设计与具体传输波形的研究对于传输性能、对于与信道的传输匹配能力有重要意义。

基于这样的设想，本报告针对不同的变换域和信号处理维度开展研究状态、关键技术和研究发展的分析。重点对物理层波形和传输体制提升可能性进行探索和介绍，目标是考虑目前多种针对物理层的技术手段和方法的进一步提升和协同工作的可能性。在此基础上，对后续的物理层信号和通信体制的进展给出研究想法。

赵男坤
2022年6月

目 录

一、研究概述.....	1
二、全球发展态势.....	2
(一) OTFS.....	2
(二) 轨道角动量.....	6
(三) 时频联合波形设计.....	8
(四) 小结.....	13
三、我国发展现状.....	14
(一) OTFS.....	14
(二) 轨道角动量.....	16
(三) 时频联合波形设计.....	17
四、技术预见（国际、国内）.....	22
(一) OTFS 关键技术.....	22
1.OTFS 概述.....	22
2.毫米波 OTFS.....	23
2.MIMO-OTFS.....	26
3.OTFS 多址技术.....	30
4.OTFS 应用场景.....	34
(二) 轨道角动量关键技术.....	36
1.轨道角动量概述.....	36
2.OAM 通信系统的信道建模与信道估计.....	37
3.OAM 物理层安全技术.....	38
4.多模态 OAM 波的收发.....	39
5.OAM 抗干扰技术.....	40
6.远场 OAM 通信技术.....	42
(三) 时频联合波形设计.....	43
1.时频联合波形技术概述.....	43
2.基于时频协同的物理层波形安全设计.....	44
3.时频协同信号扩展性设计.....	47
4.时频协同信号的信道匹配特性研究.....	49
(四) 小结.....	51
五、工程难题（国际、国内）.....	52
(一) 复杂环境下的可靠性问题.....	52
(二) 兼容性问题.....	52
(三) 内生安全问题.....	52
(四) 通用标准化问题.....	52
(五) 人工智能与物理层波形技术融合问题.....	53
(六) 其他工程挑战.....	54
六、政策建议（技术政策建议、产业政策建议）.....	54

一、研究概述

随着时代的发展，人们对信息传递的需要与日俱增。伴随着需求的增加，在过去的几十年中，通信技术每十年就会产生一次变革。从上世纪80年代美国成功研制出了第一代移动通信系到2020年5G无线网络已在全球范围内进行广泛部署，移动通信技术经历了跨越式发展。目前，全球无线通信的研究热点已然转向针对面向6G及更远未来通信技术的备选方案讨论、标准制定等工作当中。纵观移动通信的演进过程，我们不难发现，每一代的技术变革都是由物理层的新技术引领的。可以说，物理层技术的革新是移动通信行业发展的重中之重。

受新的应用需求与技术需求的驱动，下一代通信系统的物理层设计需要考虑新的性能指标，如更高的频谱效率和能效、更高的传输速率、更低的时延、更高的可靠性以及更好的物理层安全性能等。广义上说物理层技术包括波形设计技术、多址技术、编码技术、多天线技术等，其中，物理层波形设计技术，作为物理层设计的重要组成部分，由于具有可配置、易扩展、兼容性强、灵活性高等优势而成为适用于未来通信场景、满足更高通信需求的重要支撑技术。同时，各种新体制波形设计被认为是实现系统的各个性能指标之间平衡的重要研究方向。在该领域，全球主要国家和发达地区均开展了系统性的深入研究，提出了多种物理层波形设计构想并进行了分析和测试。近期，我国也加快了研究进展，在取得丰硕成果的同时，对研究成果的推广工作也给予了高度的重视，总体上处于国际领先地位。

本报告通过分析物理层波形设计在全球发展的态势和国内的发展现状，对物理层波形设计的现状和技术预见进行了预测，探讨了物理层波形设计研究过程中会遇到的工程难题，并对产业政策提出建议。报告可作为高校、研究机构以及通信等行业的技术产业发展参考，也

可作为政府部门制定政策的参考。

二、全球发展态势

(一) OTFS

正交时频空(Orthogonal Time Frequency and Space, OTFS)调制是一项在时延-多普勒(Delay-Doppler, DD)域设计的调制方案。区别于传统基于时间-频率(Time-Frequency, TF)域的调制方案,它通过一系列二维变换,将双色散信道转换到时延-多普勒域中成为近似非选择性衰落的信道。在这个域中,一个数据帧中的每个符号都会经历相同的几乎不变的衰落,从而具有比现有调制方案更显著的性能增益。

OTFS调制可应用于当前通信系统下的通用信号处理框架,该技术可以充分利用双色散信道下的全时间和全频率分集增益。由于可以利用时延-多普勒脉冲响应充分反映无线信道实际物理几何稀疏性,在多普勒频移较大的快衰落信道中,依然表现出良好的性能。因此在技术提案中以对抗多普勒扩展的能力著称。在理想波形情况下,OTFS存在多普勒间干扰(IDI),而在实际波形情况下,由于在时频域的矩形波形具有不完全双正交性,会出现载波间干扰(ICI)和符号间干扰(ISI)。从国际来看,为抢占技术的市场先机,美国、欧盟、日本等国家纷纷针对OTFS调制技术展开研究,其中时延多普勒域上低复杂度的OTFS信号检测、信道估计和均衡技术是近年来研究的重点。

对于OTFS信号检测过程,2018年,K.R.Murali等人利用了时延-多普勒域上的输入输出向量化公式,提出了基于马尔可夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)采样的低复杂度信号检测方案。即使在高多普勒条件下,OTFS系统同样可以获得良好的误码率(BER)性能。P.Raviteja等分析了在多径信道条件下,时延-多普勒域中OTFS调制和解调的输入输出关系,并基于此提出了一种高效、低复杂度的

消息传递 (message passing, MP) 检测算法。该算法通过适当的相移可以消除ISI和ICI, 再通过考虑少量的显著干扰项来减轻IDI, 有效地补偿大范围的信道多普勒扩展。基于稀疏因子图的MP检测算法是使用高斯分布近似干扰项来进一步降低检测算法复杂度的。算法描述如下表所示。

比较OTFS理想脉冲和OFDM系统在不同多普勒频率(UE速度为30、120、500km/h)时延多普勒信道上使用4-QAM的误码率性能。在误码率为 10^{-4} 时, 由于OTFS中所有传输符号的信道增益不变, OTFS的性能比OFDM高出约15dB, 而在OFDM中, 总体误码率受到子载波信道条件较差的限制。此外, 由于MP检测抑制了IDI和ICI, OTFS在不同的多普勒频率下表现出相同的性能。因此, 在MP算法下, OTFS对多普勒的变化是鲁棒的, 远远优于OFDM。

随着神经网络的快速发展, 2021年, Yosef K. Enku提出了一种基于二维卷积神经网络(2D-CNN)的检测器。并采用基于消息传递算法的数据增强技术来提高所提出方法的学习能力。仿真结果表明, 所提出的方法比MP检测器具有更优的性能, 与最优最大后验(MAP)检测器性能几乎相同但时间复杂度非常低。同年, Ashwitha Naikoti等人利用深度神经网络(DNN)对OTFS调制信号进行低复杂度检测。设计一种DNN体系结构, 其中在时延多普勒网格中每一个复用符号都与一个单独的DNN相关联。与将OTFS框架中的所有符号都考虑在内的完整DNN相比, 考虑符号级的DNN需要进行训练学习的参数更少, 因此复杂性更低。仿真结果表明, 在带有高斯噪声的静态多径信道条件下, 符号DNN(symbol-DNN)检测的性能与完全DNN检测和最大似然(ML)检测相似。当噪声模型偏离标准的独立相似分布(iid)高斯模型(例如, 具有t分布的非高斯噪声)时, 由于其学习分布的能力, 符号DNN检测

被发现比ML检测表现更好。在多输入多输出OTFS(Multiple Input Multiple Output-OTFS, MIMO-OTFS)中仍存在性能优势。

就OTFS信道估计的研究，2016年，R.Hadani等人将每一个OTFS帧，发送一个导频符号，几个保护符号嵌入在时延多普勒网格的信息符号中。在接收端，将两组符号分开：一组用于信道估计，另一组用于数据检测。使得信道估计接收的符号不干扰数据符号。设计出时延多普勒域的嵌入式OTFS信道估计技术。该方法假设信道只有整数多普勒频移，即信道抽头对齐到整数网格，因此需要根据信道是否有整数或分数多普勒值设计保护符号的数量和排布。2018年，P.Raviteja等人将简单的阈值方法与MP算法相结合，信道估计和数据检测发生在同一帧内，将信道信息用于数据检测。由于导频和保护符号传输，信道估计的频谱效率损失从1%到8%不等。比较在相似的频谱和能量效率下，该方法与理想信道估计的误差。随着导频码元功率的增加，可以实现更精确的信道估计。特别是当导频码元功率比数据码元功率高22dB时，与理想信道估计的性能差距可以忽略不计。另外，分数多普勒频移比整数多普勒频移需要更大的导频功率，因为在分数多普勒频移需要更精确的信道信息来进行良好的数据检测。同年，K.R.Murali等人将伪随机噪声(pseudo-noise, PN)序列作为导频序列，用以估计信道的信道增益、时延以及多普勒频移。在较大导频序列长度的情况下，该信道估计方法的估计误差较小且误码率降低。但该方法来估计每个路径的多普勒频移，但系统需要大量的计算量来精确估计分数部分。2021年，Himanshu B. Mishra为OTFS系统提出了一种基于叠加导频的信道估计框架，将导频框架扩展到单输入单输出OTFS(Single Input Single Output-OTFS, SISO-OTFS)系统，利用OTFS信道稀疏性，在时延多普勒域进行最小均方误差信道估计，最优地分配数据和导频

符号之间的传输功率，具有更低的误码率和更高的频谱效率(SE)。同年，Noriyuki HASHIMOTO等人针对分数多普勒信道，提出一种利用导频响应在时延多普勒域的信道估计方法。与传统的伪序列信道估计方法相比，该方法的计算复杂度更低。

随着移动通信业务需求的不断增长，必须满足高多普勒扩频场景下对高频谱效率系统的要求。OTFS调制是一种值得研究的技术，它对高多普勒扩频和相位噪声具有更强的鲁棒性，并提供较高的分集阶数。在严重的快速时变信道中，如高速铁路移动通信场景中，传统的OFDM系统单点均衡器无法工作。对于均衡器设计的研究，2017年，Li Li等人推导出时延-多普勒域下SISO-OTFS系统调制的等效信道矩阵，它具有与快速时变信道上OFDM系统的带状信道矩阵相似的结构。等效信道矩阵可以简化发射机侧的OTFS调制，由此提出快速时变信道中OTFS调制简化的两级均衡器。仿真结果表明，该方法在高多普勒扩展场景下，在BER方面优于传统的单抽头均衡器和OFDM系统的全最小均方误差(full MMSE)均衡器。同年，T. Zemen等人设置一个低复杂度的MMSE均衡器，在初始MMSE均衡器均衡步骤后，使用软符号反馈(soft-symbol feedback)进行干扰抵消。OTFS与OFDM相比，在误码率为 10^{-4} 和速度为200 km/h的情况下，实现5dB的增益。2020年，G.D.Surabhi等人利用MIMO-OTFS在时延-多普勒域的等效信道矩阵，为 2×2 的MIMO-OTFS系统设计了一种低复杂度线性均衡器。对于使用 $N \times M$ 的OTFS调制的 2×2 的MIMO-OTFS系统，其中 N 和 M 分别表示多普勒和时延，所提出的线性均衡器计算复杂度为 $O(MN \log MN)$ ，而传统的线性均衡器计算复杂度为 $O(M^3 N^3)$ 。2021年，Tingting Zou等人同样利用OTFS在时延-多普勒域的等效信道矩阵，通过迫零和MMSE两种典型的线性均衡方法，设计出低复杂度线性均衡器。与现有的低复

杂度线性均衡器相比，该均衡器在不增加复杂度的情况下提高了性能。同年，Noriyuki HASHIMOTO等人根据信道的输入输出关系，利用信道估计信息，提出了一种低复杂度的信道均衡方法，实验结果表明，该均衡方法与基于矩阵反转的MMSE均衡器具有较低的复杂度和相似的性能。

(二) 轨道角动量

轨道角动量(Orbital angular momentum, OAM)这一概念的提出起源于国外。1909年，Poynting从理论的角度预测了电磁场角动量的力学效应；而后在光学研究中被广泛关注，荷兰莱顿大学于1992年关于LG (Laguerre—Gaussian)光束的研究发现携带相位因子的LG光束相位面绕传播轴呈螺旋状分布，并且不同离散模态的LG光束之间呈正交，证实了OAM的存在，且是涡旋光束的一种自然属性。1994年，Barnett和 Allen等人指出除了在光域，其他频段内的电磁波如微波、声波等都可以携带OAM且与光学涡旋有相似的性质。理论上，由于OAM具有无穷多个模态，其可以在不依赖时间和频率等传统无线资源的情况下显著提升系统容量，因此具有独特的性能优势和研究潜力。

鉴于OAM方案应用在光学、电子学和量子学领域取得的卓越成就，研究人员尝试将OAM的应用思想结合到射频、微波和毫米波波段中，有针对性的开展了大量研究。2007年，Thide等研究人员发表了一篇微波频段OAM应用的文章，首次将轨道角动量引入到微波频段中。文章提出通过均匀分布的圆形阵列天线产生类似拉盖尔高斯涡旋光束的涡旋电磁波来携带不同OAM模式的涡旋电磁波的设想并通过仿真进行了验证。他们的研究开创了将轨道角动量应用在无线通信中的先河，提出了利用涡旋电磁波用于扩大无线通信容量的设想，研究结果表明，矢量天线阵列能够在低于1GHz的频率下产生具有类似光学

中LG波束的自旋和角度特性的无线波束。

Thide的研究为OAM的发展开辟了新的方向，受他工作的启发，研究人员从天线设计等角度针对OAM波束的产生和接收等问题进行了广泛的探索和研究。瑞典空间物理研究所的Mohammadi等人从理论上研究了无线电波频段内的OAM电磁波，并系统地对基于均匀圆形天线阵列产生携带OAM模式的涡旋电磁波的方法进行了研究，进一步分析了涡旋电磁波的产生和指向性问题以及在无线电频率下的测量问题。英国的Tennant等人进一步提出了一种时间开关阵列(Time-switched array, 简称TSA), 该方案可以同时产生多个模态的OAM波。

随着研究的深入，研究人员也对相关理论研究成果进行了测试。2011年，研究人员采用一种螺旋抛物面天线和八木天线验证了携带轨道角动量电磁波在无线通信信息传输中的可行性，在威尼斯圣马可广场（Piazza San Marco）成功地进行了第一次使用多个OAM波束在同一射频上进行室外传输的实验测试。2012年8月，在上述装置的基础上，利用相位干涉仪在接收端测量波束中电场的相位差，验证了电磁涡旋波的抗干扰能力。

以此为基础，OAM的研究领域被不断拓宽，其与现行物理层技术特别是毫米波技术相结合的通信方案得到了更加深入的研究并逐渐取得了大量的有效成果。英国埃塞克斯大学的学者在基于60GHz的无线OAM传输技术下，实现了速率为4Gbit/s视频传输。英国、美国和以色列的学者共同提出了一种新的32 Gbit/s毫米波通信系统，利用4个无线电OAM波束在2.5 m的链路下传输，其频谱效率为16bit/s/Hz。在另一项研究中，美国德克萨斯大学达拉斯分校使用商用脉冲无线电和螺旋相位板（Spiral Phase Plate, SPP），通过2m链路实现双OAM的3Gbit/s室内传输，误码率为 9.65×10^{-10} ，波束间的串扰均为-15 dB。美国亚利

桑那大学的Djordjevic等人为下一代无线通信系统提出了一种基于多维OAM的编码调制方案，实验结果指出该调制技术可实现1Tb/s以上的射频通信，确保高物理层安全性。美国南加州大学研究人员提出将OAM复用和空分复用结合在视距条件下传播多路信号的系统优化设计并进行了论证，实验实现了一种结合传统2×2 MIMO方案的16 Gbit/s双OAM波束毫米波传输系统，研究结果表明短距离通信时两种复用方式结合的新系统(OAM-MIMO系统)性能要优于MIMO通信系统，接收端采用MIMO的信号处理过程降低信道间串扰，进一步提升系统性能。

现有研究成果已经表明，OAM方案具有重要的研究价值。其具有的独特波形结构使其成为下一代物理层波形技术的研究热点，其与现行通信体制的融合特别是其与毫米波的良好互补特性也使其在未来无线通信系统中具有广阔的研究前景。同时也应当注意到，迄今为止，大多数OAM通信方案主要围绕着短距离的近场区通信。但由于OAM波束相比于平面波发散地更快，其在远场区的传输损耗和干扰问题也更为严重，现有研究尚缺少对此的详细分析和解决方案，相关问题有待进一步的研究。此外，如何将OAM模态在光通信领域中的基本特性与无线通信领域的实际传输相结合，尚未有全面完整的研究成果。

(三) 时频联合波形设计

为了满足未来移动通信应用场景的需求，研究人员开发了适用性更强的物理层波形新技术。新型多载波技术是其中的一个重要研究方向。这类波形方案本质上以OFDM为基础，通过引入滤波器降低系统的带外功率泄漏，更灵活的适应各种信道条件，提升通信可靠性。目前，业界已经提出了多种新型多载波技术，主要包括滤波器组多载波技术、广义滤波多载波技术、广义频分复用技术等。

滤波器组多载波 (Filter Bank Multi-Carrier, FBMC) 技术的研究可以追溯到B.Saltzberg等人的工作中, 其采用滤波器阵列方式对每个单独子载波完成滤波, 具有旁瓣干扰较弱, 抗载波间干扰能力强等优势。原型滤波器的设计是FBMC系统研究的一个重要问题, 目前主要分为频率采样法、基于窗函数的方式和滤波器系数的直接优化方式。例如Maeda S等人通过构造最小化滤波器的阻带能量并满足近乎完美的重构条件的约束优化模型实现了对原型滤波器的优化。此外, 针对FBMC系统的同步问题也有一定的研究。Medjahdi等人则结合子载波之间发生的频率偏移现象, 提出了计算平均误差率的一种同步补偿算法, 取得了较好的同步效果。

信道估计技术是FBMC研究的另一个重点。针对这一问题, 导频辅助技术是一类常用的方法。Stitz T H等人提出了一种基于离散导频的信道估计设计方案, 结合FBMC系统的特征, 对导频排布方式进行了设计。在此基础上, Bazzi J等人对离散导频进行改进, 提出了一种非线性的导频结构, 并增加接收端导频符号的功率, 来达到抵抗无线信道中干扰的目的。Nissel R等人则研究了FBMC系统的导频干扰消除问题, 提出了辅助导频法和预编码导频法, 取得了较好的研究结果。此外, FBMC系统的盲信估计方案也具有研究的价值。Bolcskei H等人给出了一种基于子空间的盲信道估计方法, 利用了由重叠脉冲整形滤波器而引起的循环平稳性, 并通过接收数据的二阶统计量来获得信道估计结果, 但其性能受滤波器长度的影响。近年来, 研究人员还对采用机器学习的方法来解决FBMC系统中的信道估计问题进行了探索, 并取得了一定的成果。Waseem等人针对多输入多输出-滤波器组多载波系统提出了一种基于监督式神经网络的信道估计与均衡方法, 研究表明, 该方案相比传统方法具有更低的计算复杂度和更好的性能。

通用滤波多载波(Universal Filtered Multi-Carrier, UFMC)技术是T. Wild等人提出的一种新型多载波方案。UFMC基于子带内连续的子载波进行滤波,相比于OFDM,有着更好的频谱效率、更低的旁瓣电平以及对时频偏移和码间干扰更好的鲁棒性。对UFMC的研究可以大概分为滤波器优化、干扰抑制等方面。针对滤波器的设计问题,Schaich等人以最大化信号和带外功率比为目标给出了适用于UFMC系统的基于SLR和SDLR的滤波器设计方法,并以此为基础考虑了系统存在定时偏差和载波频率偏移的情况下的UFMC系统滤波器优化问题。Mukherjee等人则提出在UFMC系统中引入波束滤波器的脉冲整形以减少带外辐射并提供更好的信号干扰比。针对干扰抑制问题,研究人员主要从信道估计与均衡、载波频率偏移与时间偏移的估计与补偿等方面进行了分析。例如Nithya等人对设备间通信场景下UFMC波形传输过程中CFO的影响进行了建模分析,给出基于CFO的功率谱密度和误码性能评估结果,对UFMC波形技术的性能优势进行了验证。此外,UFMC波形与其他技术的结合也是被关注的方向。研究人员已尝试将其与IDMA多址接入、ATA、MIMO等多种技术手段相结合来进一步提升通信系统性能,取得了较好的研究成果。

相关人员对UFMC的应用实现也进行了研究,其中峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)抑制技术具有的研究价值。分析发现,尽管传统多载波的PAPR抑制技术有很好的借鉴作用,但并不能直接进行套用,还需要考虑UFMC系统的结构特性进行针对性优化。Tipan等人提出了基于UFMC系统的深度削波法,并对其性能进行了分析。Mabrouk等人则研究了基于预编码技术和压扩技术的结合来降低系统PAPR的方法,并指出DFT预编码和改进后的生根压扩技术结合可以取得明显的PAPR抑制效果。此外,系统复杂度也是重要

的考虑因素。为降低系统的计算复杂度，Schaich等人提出了一种在频域实现UFMC的方法，但该方案会丧失部分的信号能量。Matthe等人则利用时域相邻子载波的相似性，通过减少操作数来进行优化，较好的实现了复杂度与工程实际需求的匹配。

广义频分复用（Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM）也未来通信场景的重要备选波形之一。G.Fettweis团队在2009年第一次提出了GFDM系统的框架结构，并论述了其在带外功率抑制等方面的机理优势。研究人员很快对其低复杂度实现结构进行了研究，Matthe说明了GFDM系统的矩阵调制器和Gabor变换的等价性，指出可以利用Gabor逆变换实现GFDM系统的解调。之后的研究者从不同的角度对适用于GFDM系统的发射和接收机结构进行了设计。例如Gaspar等人利用了高效的DFT/IDFT操作大幅度简化了先前的矩阵运算，同时也使其物理意义更加明确，但是该方案所采用的匹配滤波接收机会导致子载波间产生干扰，因此需要串行干扰消除方法保障系统的误码率性能。Nimr等人则利用GFDM传输矩阵具有的循环与分块特征提出了一种低复杂度GFDM传输系统，方案具有较好的可实现性。这些研究成果促进了GFDM的工程实现和推广。

研究人员对GFDM体制的基本性能进行了分析，Michailow等人通过对GFDM系统的自干扰概率分布的分析，推导了AWGN信道下GFDM系统的误码率表达式。此外，他们还研究了GFDM系统在不同接收机、不同信道下的误符号率，并提出了基于空时编码的GFDM系统。Carrillo等人则推导了带有MMSE接收机的GFDM系统的误比特率，进一步完善了GFDM系统的理论研究。在此基础上，研究人员对GFDM系统的干扰抑制等问题进行了深入分析。Fettweis等人阐明了在GFDM中应用干扰消除算法的必要性，并提出可以应用时域串行干

扰消除算法部分消除由GFDM非正交性引起的自干扰。Datta等人对该方案进行了改进,通过多次迭代提升了系统性能。通过进一步的研究,Michailow等人指出GFDM自干扰是由接收矩阵与传输矩阵不匹配造成的,并提出一种规避自干扰的GFDM调制方案,通过构建实部正交的传输矩阵实现GFDM子载波在实数域的正交关系,取得了较好的系统性能。此外,研究人员还提出了结合预编码、块交织滤波器和WFRFT方案的多种GFDM系统自干扰抑制方法,取得了丰富的研究成果。

时频联合波形设计的另一个研究方向是利用各类变换域信号处理手段构造具有时频协同特性的物理层波形方案。由于在反映信号的时频特性上具有先天的优势,分数傅里叶变换(Fractional Fourier transform, FRFT)作为重要时频信号处理方法而得到了关注和重视。研究人员从时频平面旋转等角度对Chirp类分数傅立叶变换的定义形式和物理意义进行了解释。在此基础上,关于FRFT的相关理论快速发展,其应用范围也在迅速扩大,在无线通信抗衰落、图像加密等领域取得了较好的应用效果,但其也存在计算复杂度较高、不利于满足工程实际的要求等问题。

与提出较早的Chirp类FRFT相比,加权类分数傅里叶变换(Weighted fractional Fourier transform, WFRFT)由于其实现简单适应于实际应用而一经提出就引起了广泛的关注。它最初可以追溯到Shih等人提出的对态函数进行加权叠加来构造新的分数傅里叶变换形式的工作中。之后不久,研究人员就将这两种变换形式进行了统一并建立了具有一般性的分数域理论架构。在此基础上,对基于该体系的无线通信物理层波形设计问题进行了探索。随着研究的快速进展,该领域的理论推进取得了良好的进展,逐渐明显的表现出时频协同的

优势特征。在变换形式上，态函数经历了由特殊到一般的变化过程，加权系数也从由单参数计算推广到了多参数形式。理论基础的完善为信号的波形设计研究提供了体系保障，基于该体系的时频协同抗干扰、抗衰落方案表现出较高的研究潜力。另一方面，研究人员对其安全能力也表现出了一定的兴趣，例如英国的Fusco等人提出了一种基于WFRFT的定向调制方案，利用变换域信号处理带来的良好时频协同特性为系统提供了额外安全增益，有效保障了信息安全传输。此外，进一步研究还将其与人工噪声等传统物理层安全技术结合以获取整体保密能力的提升。

可以发现，近年来各种新型时频联合波形的研究取得了良好的进展和广泛的认可，在满足未来通信体制业务需求上相比传统体制波形表现出明显的优势和广阔的前景。但也不能忽视现有的各类时频联合波形设计技术各自仍表现出一定的缺陷，例如一些波形设计方案在复杂度、与现有体制和物理层技术兼容性上仍具有较大的提升空间。如何实现体制的融合、提出具有更好时频协同特性的波形设计优化方案以进一步提升系统性能、满足实际需求仍具有重要的研究价值。

(四) 小结

本部分综述了物理层波形设计领域的研究现状和发展态势，详细介绍了下一代通信系统物理层波形设计的研究热点和各国的研究进展。可以看到，虽然各国家和地区的科研人员在具体的技术路线和研究重点上各有侧重，所推广的波形方案和配套通信体制也不尽相同，但显然均将物理层波形设计技术视为满足未来通信需求的重要手段而给予了高度重视和大量投入。近年来，各国家和地区纷纷加快研究进程和产业布局，通过完善政策法规、制定体系标准等全方位措施，大力推进对本国重要研究成果的推广和相关技术的产业化进程。总体

而言，全球面向未来通信系统的新体制波形设计技术的发展与应用呈现加速趋势。

三、我国发展现状

(一) OTFS

在我国5G技术发展迅速，与此同时，随着高铁的迅猛发展，现代通信系统需要在高速移动环境下提供可靠性高的通信技术，以满足车地通信要求。由于OTFS调制技术能够解决毫米波通信出现的问题，并且可以保证高移动场景下的通信性能，因此OTFS调制技术已经成为目前我国各个高校和研究机构的重点研究项目之一。

北京交通大学的研究团队结合OTFS和串联扩展多址接入(tandem spreading multiple access, TSMA)设计出用于未来智能高速铁路的海量物联网(Massive internet of things, mIoT)的OTFS-TSMA技术。通过提出的资源分配和交错方案，将OTFS中DD域元素与CIR之间的二维循环卷积转化为基于DFT序列的四类循环移位，并给出了数据恢复方法，从而实现了用户干扰的大量减少。研究表明，OTFS-TSMA可以在高铁的海量物联网中有利保障用户的连通性和传输的可靠性。此外，OTFS-TSMA方案中改进的非迭代TSMA的复杂性较低，OTFS-TSMA的复杂性主要由OTFS主导，在用户识别和数据检测方面均优于原TSMA。对OTFS-TSMA的以下几个方面进行了深入的研究。首先，可以研究实际OTFS脉冲下的资源分配方案和系统性能。在这种情况下，DD域资源元素可以引入符号间干扰，因此需要提出新的资源分配和干扰缓解方案。其次，在资源有限的情况下，可以考虑联合设计无授权随机访问和重传机制的方案。第三，OTFS-TSMA可以推广到其他高移动性的大规模物联网场景。

北京理工大学研究团队推导出OTFS系统基于阈值辅助的信道估

计的可行性。考虑到经典阈值辅助方案在高噪声条件下单脉冲性能较差，提出了一种新的基于先验信道信息的信道估计方案，即最大多普勒频移和最大多径时延，用多个脉冲提取分集增益以提高性能。此外，在统计信号处理的基础上给出了阈值选择的具体方法。仿真结果表明，与经典方案相比，所提出的方案可以获得更好的信道状态信息。

南方科技大学研究人员为基于集成传感和通信 (ISAC) 信号和 OTFS 调制的车载网络开发了一种新颖的下行链路传输方案。基于 ISAC-OTFS 信号，路边单元 (RSU) 能够估计各种与运动相关的参数，例如基于反射回波的车辆位置和速度，这些参数用于预测时延多普勒域下行链路通道参数。RSU 可以创建有效的发射波束成形器，在发射 ISAC 信号之前补偿信道路径损耗和多普勒频移。

对于 OTFS 的研究在我国的高校和研究所正如火如荼进行中，例如，通信网络科学与技术实验室和北京邮电大学发表了关于设计 OTFS 系统的低复杂度迭代均衡器的研究成果。北京理工大学、清华大学和中国移动研究院绿色通信研究中心提出了一种基于 3D 结构正交匹配追踪 (3D-SOMP) 算法的信道估计技术。为大规模 MIMO-OTFS 面临的下行链路信道估计问题提供了解决方案。厦门大学和天津工业大学提出了基于 OTFS 的水声通信 (UAC) 方案。基于 OTFS 的 UAC 系统与 OFDM 和 DFT-s-OFDM 系统相比，在误码率、频谱效率以及 PAPR 方面具有优势，成为水声通信的备选方案。上海交通大学发表了关于利用信道的先验信息优化 OTFS 信道估计开销的方案，解决了由于 OTFS 需要大量的保护符号和导频符号而使得信道容量减低的问题，最大化系统遍历容量，同时确保 OTFS 在时延多普勒信道上的高质量性能。在我国政府的大力支持下，行业资本与技术研究相辅相成，实现共建充满活力的通信产业环境。其中，我国在通信传输的技术研发上发挥

了重要作用，并取得突出成效。目前，我国的5G技术处于全球领先地位，产业生态正逐步完善。随着5G的商用，其中存在的问题逐步改善，推陈出新。

（二）轨道角动量

在研究的初期，国外对于轨道角动量这一技术的提出和验证领先我国。但随着研究的进展，近年来我国诸多大学及机构对该项技术予以关注，愈来愈多的人力和物力投向了轨道角动量的无线通信研究，我国研究人员为该领域做出了诸多贡献。

由于OAM最开始是在具有螺旋波阵面的光束中发现的，所以我国早期利用OAM进行信息传输的研究主要也集中在光波段，如华中科技大学的研究人员利用4路OAM光波传输16QAM调制信号，实现了1.37Tbps的大容量传输，其频谱效率达到25.6bps/Hz；当复用OAM光束增加到16时，可以实现2.56Tbps的系统传输速率和95.7bps/Hz的频带利用率。

随着研究的推进，我国也逐渐将OAM理论和相关研究引入到下一代通信系统的设计中，取得了丰硕的研究成果。浙江大学的研究人员采用同轴叠加的两个环形行波缝隙天线实现了 ± 2 ， ± 3 四种模态OAM波束的复用通信，在10m传输距离下系统频带利用达到18.75bps/Hz，此外该实验还证明了OAM复用通信具有比MIMO通信更低的信号处理复杂度。

在此基础上，OAM复用和其他复用方式的结合有望进一步提高系统频带利用率。华中科技大学的一项研究表明，OAM复用和空分复用结合的新系统性能优于传统的MIMO无线通信。研究人员实现了60GHz频段下16Gbit/s的通信链路，并进一步证明了高频载波有助于降低OAM波束的传输损耗、减小收发设备的尺寸。除此之外，该团队

还提出了OAM空间调制下的毫米波通信系统(OAM-SM系统),在该方案中,对于多发射天线系统,在给定时隙仅设置一个天线来发射OAM波束,该方案与OAM-MIMO方案相比,最大能量效率提高了200%以上并且展现出更强的抗路径损耗衰减能力。

无线通信中的干扰问题在OAM波束中依然存在,针对这一问题国内也有诸多研究,例如西安电子科技大学的研究人员提出了一种利用OAM模式的正交性新型跳模方案,可以在窄带范围内获得较好的抗干扰性能,后续研究还将其与传统跳频方案相结合来进一步提升系统性能。该团队还提出了OAM技术与OFDM系统结合,利用相位差补偿法来减轻多径造成的模式间干扰的具体方案以实现稀疏多径环境中的高容量无线通信,并对系统性能进行了详细分析。此外,他们还通过实验分析了大气湍流对OAM方案传输性能的影响,研究结果表明,和光波相比OAM毫米波受大气湍流影响更小,更易于取得较好的接收性能。

在OAM的远距离通信上,我国也有着突出的进展。2016年12月,清华大学相关研究团队成功完成了世界首次微波频段轨道角动量电磁波27.5公里长距离传输实验,标志着我国在轨道角动量电磁波的研究上取得了重大突破,该研究成果具有重要价值和意义。

(三) 时频联合波形设计

与国外研究态势类似,在时频联合波形设计领域,我国的研究也可以主要分为新型多载波技术和时频协同的混合载波技术两大类。不难发现,对于包括FBMC、UFMC、GFDM在内的各类新型多载波技术的研究,在起步阶段,国外的研究进展明显领先我国。但近年来,随着企业、高校和科研机构全方位开展面向未来的通信体制研究和推广,我国逐渐在技术及标准领域取得了一系列的成果,对全球的物理层波

形技术研究的发展做出了突出贡献。

我国对研究滤波器组多载波技术的研究主要可以归为峰均功率比抑制、信道估计技术和信道均衡技术等几个方面。北京交通大学的研究人员就PAPR抑制问题进行了研究，在充分考虑FBMC信号结构的基础上，提出了基于遗传算法的双层部分传输序列方案，在取得良好PAPR性能的同时还降低了计算复杂度。针对FBMC系统的信道估计问题，目前的研究主要包括基于导频的信道估计方法、基于压缩感知(CS)的信道估计方法和基于深度学习的信道估计方法等。西安电子科技大学的研究人员分析了各类导频辅助信道估计方案的性能，在此基础上，提出一种基于块状导频的信道估计优化方案，通过对导频结构的设计减小相邻固有干扰的影响，在不降低系统传输效率的同时提高信道估计精度。华东理工大学的研究人员则将信道估计与深度学习相结合，采用神经网络模型对信道估计、均衡、符号检测模块进行建模和集成，实验结果表明，该方案的抗噪声能力、鲁棒性和误码率性能均优于OFDM系统和基于导频估计的FBMC系统。此外，上海交通大学研究人员对FBMC系统的信道均衡算法进行了研究，提出了一种基于判决反馈的干扰消除方案，该方案克服了单抽头迫零均衡算法和ERIP均衡算法中存在误码平层的问题，有效地增强了系统抗固有干扰的能力，提升了其在多径信道下的误码率性能。

对于广义滤波多载波技术，我国的研究主要集中在干扰抑制领域并取得了丰富的研究成果。浙江大学研究人员提出一种采用主动干扰消除的解决方案来应对UFMC相邻用户间干扰问题，该方案通过在功率约束下自适应优化干扰消除子载波的加权因子来最大化提升信噪比性能。西安电子科技大学研究人员设计了一种基于训练符号的鲁棒混合CFO估计方案，对于大范围频偏估计具有较好的性能优势。东南

大学的研究人员提出了一种自适应滤波器配置算法以解决上行多用户UFMC系统中CFO引起的干扰问题。该方案可自适应设计FIR滤波器的参数，有效的提高了传输速率。该单位研究人员还提出了基于干扰消除的Zero-Forcing均衡算法和基于迭代干扰消除的均衡算法。研究表明，所提方案能有效消除UFMC在多径信道下的ISI、ICI和IBI，提升其在传输可靠性。此外，还对UFMC与MIMO技术结合进行了研究，提出一种基于截断循环前缀UFMC的UFMC-MIMO传输方案，在保留UFMC技术优点的同时，能够减少为抵抗多径信道所使用的开销，系统表现出了良好的抗干扰能力。另一方面，对UFMC系统的工程应用问题，我国也有一定的研究。例如国防科技大学提出在发射机中引入轻量化方法和采样率转换滤波器来简化计算，有效实现了计算复杂度的降低，对UFMC系统的工程实现有积极的作用。

我国对于广义频分复用的研究在原型滤波器设计、峰均功率比抑制、干扰消除、信道估计和低复杂度接收机设计等多个领域均取得了良好的进展。南开大学的研究人员对原型滤波器的设计问题进行了研究，并提出了一种根据干扰信号能量预估值来调整原型滤波器参数的具体方法，实现了较好的BER性能。此外，还采用结合压缩感知预编码算法，在降低计算复杂度的同时能进一步提高频谱效率。西安电子科技大学的相关人员系统的研究了GFDM信道估计的相关问题，对现行的各类信道估计方案进行了对比和分析，并提出了改进算法。此外，该团队还研究了MIMO技术的结合问题，并对MIMO-GFDM方案进行了优化，取得了系统性能的提升。对于峰均功率比抑制问题，北京邮电大学的研究人员分析了各类PAPR抑制方法的性能，在此基础上，针对GFDM信号的循环块结构提出一种基于符号重叠特性的改进选择性映射算法，该优化方案充分考虑了GFDM符号之间在时域上的重

叠性，在不提升复杂度的同时获得更好的PAPR抑制性能。东南大学的研究人员提出了一种低复杂度的GFDM系统结构，通过对发射机调制矩阵的拆分，在不损失任何系统性能的前提下，显著降低了GFDM发射机的计算复杂度。此外，该团队还对GFDM系统的同步、射频非理想特性补偿等问题进行了研究，取得了大量成果。

在时频协同的混合载波体制的研究上，虽然最初的数学工具的提出和理论基础的发展主要由国外研究人员完成，但自从哈尔滨工业大学的L.Meier等人将离散加权分数傅里叶变换形式引入到提升数字通信系统性能的研究中并给出了对其物理意义的详细分析，该领域很快引起了国内研究人员的关注，近年来，随着研究的进展，我国的研究成果逐渐得到了广泛的认可。

作为一种新型波形设计体制，研究人员首先分析了其基本信号特征，说明其兼具单、多载波体制的抗衰落特性，具有理论体系和工程实现上的优势。研究表明，由于具有良好的时频协同特性，该方案弥补了现有载波体制的缺陷，可以获得更鲁棒的误码率性能，特别是在时频双选信道等复杂信道条件下表现出明显的性能优势。在此基础上，为了更好的利用这种混合载波体制的时频协同特性，信号的时频能量分布程度的设计也被认为是值得研究的问题。西安电子科技大学的Li B等人通过对混合载波系统在双选择性衰落信道下的载波干扰比进行推导，得到了计算特定场景下混合载波系统最优阶数的一种方法。后续研究人员对场景进行了扩展，得到了更为普适的设计方法。同时，时频协同的混合载波方案与现有通信体制及通信方法具有良好的兼容性。大量研究论证了其于信道均衡、多输入、扩频以及预编码等技术结合以进一步提升系统抗干扰、抗衰落性能的可行性和机理优势并进行了实验验证。

此外，时频协同的混合载波体制在信号的抗检测和抗截获上也有着广阔的研究和应用前景。利用其独特的时频协同信号结构，混合载波系统可以构造出具有类高斯特性的信号来实现通信的隐藏，也可以通过参数设计对信号波形进行伪装。南京航空航天大学的B Jiang等人从理论上推导了混合载波信号星座裂变的原理，分析了关键参数对信号调制特征的影响，并进行了硬件验证。此外，时频协同安全方案具有变换参数的敏感性，接收端只有掌握准确变换参数才能正确恢复信号，这对系统安全性也有着积极的作用。在此基础上，为进一步对信息的窃取制造困难，研究人员针对不同场景对混合载波保密性增强方案进行了研究并评估了其性能。例如南京邮电大学的研究人员将其引入到卫星通信系统的抗截获中，研究表明该方案弥补了卫星场景原有安全体制的缺陷，有效保障了通信的保密性。除了对时频协同信号本身的安全特征进行研究和利用，联合其他物理层安全手段的混合载波融合安全方案也逐渐成为被关注的重点。西北工业大学的F Liu等人，提出了多参数加权分数阶傅里叶变换和混沌置乱辅助的定向调制技术并从多个角度分析了系统的安全能力，研究结果指出，该方案相对于人工噪声辅助方案有明显的优势。近年来，随着针对混合载波系统的截获方法也有了一些基本的研究，例如空军工程大学的X Da等人提出了基于高阶累积量的阶数搜索算法用于时频协同信号的识别和截获，取得了一定的研究成果。

可以发现，时频协同的混合载波体制在较好的实现了对现有载波体系进行融合这一符合未来载波体制发展趋势的目的的同时，对现行通信系统和各种信号处理方法也有着较好的兼容性。此外，还具有可扩展性好、复杂度低、易于工程实现等优势。这对其发展、推广和与下一代通信体制的融合有着积极的作用，总体来说具有广阔的研究前

景和重要的研究价值。

四、技术预见（国际、国内）

（一）OTFS关键技术

1. OTFS概述

OTFS体制的主要思想是将传输的数据符号放置于时延-多普勒域。由于实际传输的波形为时间域的波形，因此这涉及时延-多普勒域与时间-频率域的二维转换，OTFS体制采用SFFT(Symplectic Finite Fourier Transform)和其逆变换ISFFT来实现时间-频率域和时延-多普勒域的相互转换，如下图所示。

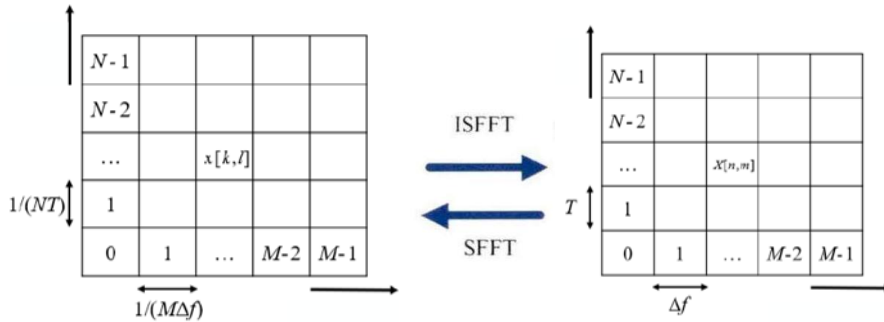


图1 时延-多普勒域和时间-频率域的相互转换

在系统设计上，OTFS相当于在OFDM系统基础上添加了一个预编码模块，可看作对OFDM系统的扩展，接收端再进行对应逆过程即可恢复数据，这一结构实现了与现有通信系统的基本兼容。OTFS调制/解调流程图如图2所示。



图2 OTFS调制/解调流程图

OTFS调制方案可分为两个阶段，第一阶段，通过ISFFT将时延-多普勒域中的一组数据符号转换为时间-频率域上的信号；在第二阶段，将得到的时频域信号送入多载波调制器以形成时域发射信号。在接收

端执行相反的操作将接收到的信号从时域映射回到时延-多普勒域上。另外，在发射端ISFFT模块之后以及接收机的SFFT模块之前都用适当的窗函数对信号进行处理以此来进一步改善时延-多普勒域中的信道的稀疏性。

2.毫米波OTFS

下一代无线通信网络，特别是超五代（B5G）和6G网络需要解决现有无线通信网络在更高数据速率、低时延和更高频谱效率方面的局限性。除此之外，在高移动性条件下支持可靠通信是B5G和6G的关键要求之一。对高数据速率的需求和毫米波频段中的大量可用频谱使毫米波通信系统的设计具有研究的前景。然而，也有相关的一些问题需要解决。例如在毫米波系统中使用的高载波频率会导致更高的多普勒频移，此外，高频振荡器的高相位噪声也是有害的。由于OTFS调制适用于高多普勒衰落信道，因此具有与毫米波结合的天然优势。研究振荡器相位噪声和多普勒频移对毫米波通信中OTFS调制性能的影响是十分必要的。

为研究这一问题，首先需要进行系统建模和理论分析，推导出时延多普勒域中OTFS调制输入-输出关系的矢量化公式，在有效信道中加入了振荡器相位噪声。在高多普勒毫米波信道中，OTFS对振荡器相位噪声的鲁棒性比OFDM强。在SNR为14dB、28GHz的系统中存在振荡器相位噪声的情况下，OTFS与OFDM相比实现了两到三个数量级的BER性能。

在高多普勒和高峰值平均功率比的信道中，为了降低PAPR，LTE和5G NR系统上行采用单载波频分多址(single carrier frequency division multiple access, SC-FDMA)方案，下行采用OFDM方案，以提高频谱效率。SC-FDMA将符号均匀地分布在频域的所有子载波上，

以降低PAPR。OTFS具有OFDM和SC-FDMA波形的优点。曾提出将OTFS波形作为5G NR的候选波形的想法，由于OTFS在各种信道条件下的评估和现场测试不够充分，也无法保持与LTE的向后兼容，而未能实现。现今有很多研究者以OTFS波形在各种信道条件下的评估研究课题。已经使用5G NR发射机(Tx)和接收机(Rx)链模块评估毫米波信道下的OTFS波形，并使用最小均方误差和判决反馈均衡器(DFE)，将其与OFDM在多种移动性条件下进行比较。在所有调制方案中，以及在30km/h、120km/h和500km/h等多种移动性条件下，OTFS的性能都优于OFDM。使用DFE均衡器的64-QAM调制方案，OTFS比OFDM有更优的信噪比增益。接下来的研究内容在于探索时延多普勒域的信道估计和均衡技术，以降低复杂度。值得注意的是，在实践中，毫米波通信有非常重要的硬件损害，OTFS系统的发射机和接收机出现损害的情况下，可能会出现系统性能严重下降的问题。

由无线信道的时变特性引起的载波间干扰是OFDM系统面临的主要问题之一。ICI不仅降低了系统性能，而且影响了信道估计和信号检测。克服快速时变信道特性的传统解决方案是在时域设计一个更短的OFDM符号。因此，可以认为无线信道在几个连续的OFDM符号内是时不变的。然而，这种经典的方法在即将到来的超5G(B5G)或6G系统中降低了传输效率，因为每个符号在传输过程中都添加了循环前缀(CP)或保护间隔(GI)，且CP或GI的大小应大于最大信道长度，以避免码间干扰。与OFDM技术不同的是，OTFS可以在时延多普勒域将时变信道转换为不变信道，避免了ICI。与其他通信系统一样，信道估计在OTFS通信系统中也起着重要的作用。现有的对OTFS系统的研究大多考虑单输入单输出情况，并提出了基于阈值估计器、伪随机噪声序列、turbo压缩感知(turbo-CS)等不同的信道估计算法。考虑到毫米波

(mmWave)波段的丰富频谱资源 and 大规模多输入多输出技术的高频谱效率和能量效率，毫米波大规模MIMO与OTFS相结合也是一种很有研究价值的提高频谱效率的技术。毫米波大规模MIMO-OTFS系统如下图所示。

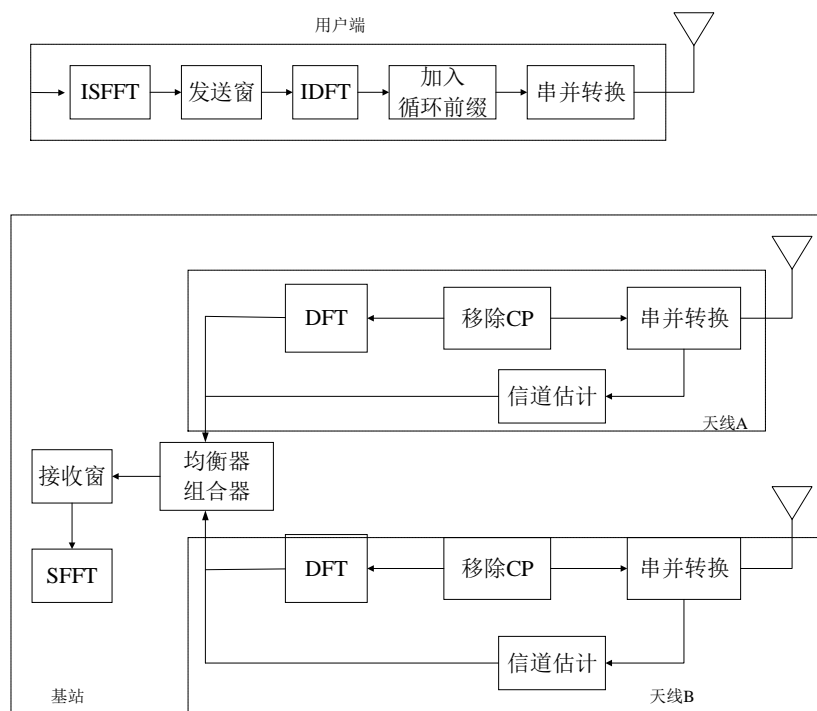


图3 毫米波大规模MIMO-OTFS系统的框图

现有研究已经将基于阈值的方法扩展到海量的MIMO-OTFS系统，导频长度与接收端和发送端天线对的数量成正比。然而，随着天线数量的增加，这种方法极大地限制了频谱效率。为了克服这一问题，出现了在角域估计MIMO-OTFS信道的方法，待估计参数的数量与天线的数量无关。同时基于信道在时延多普勒角域的稀疏特性，提出了一种三维结构正交匹配追踪(3D-SOMP)信道估计算法。但该算法每次迭代都需要在时延多普勒角 (Delay Doppler Angle) 域计算每个候选项的权重，导致计算复杂性高，当时延多普勒角域的候选数变大时，阻碍了3D-SOMP算法的实际应用。为了解决这个问题，提出了一种基于张量的正交匹配追踪(OMP)信道估计算法。首先，在时频域中为OTFS

符号结构提出了一种新的导频设计。然后，将信道估计表述为一个稀疏信号恢复问题，并将张量分解和并行支持检测引入到基于张量的OMP算法中，以显著降低信号处理维度，可以以较低的计算复杂度估计毫米波MIMO-OTFS系统中的信道。数值模拟验证了的优越性和鲁棒性。

毫米波频段拥有大量未充分利用的频谱，有可能在未来的无线网络中提供每秒千兆位的通信服务。当增加载波频率时，多普勒效应会变得更加严重。尽管增加子载波间隔以减轻由此产生的ICI是行得通的，但时域符号持续时间将更短，并且插入用于削弱ISI的循环前缀将引入大量开销。高频振荡器相的相位噪声也会影响通信效果。OTFS对振荡器相位噪声具有很强的适应性，这对于毫米波通信至关重要。

2.MIMO-OTFS

大规模多输入多输出已经成为5G无线网络最重要的实现技术之一，它极大地提高了频谱和能量效率。为了充分发挥大规模MIMO的优势，提出了一套降低大规模MIMO实现成本和复杂度的设计策略。然而，在高移动性的场景中，由于信道变化过快，这些方法大多不能有效地工作。为了克服这一挑战，研究者对时变的MIMO信道进行了大量的研究，如针对时变和空变情况下MIMO系统的信道跟踪，通过时空基展开模型降低上行(UL)/下行(DL)信道的有效维数。或者利用基于期望最大化(EM)的稀疏贝叶斯学习(SBL)框架来学习时变的MIMO信道模型的时空参数，并采用降维卡尔曼滤波(KF)进行信道跟踪。但是，上述方法只考虑了块衰落信道，即信道仅从块到块。这种假设在低速情况下是合理的，不适用高速情况下。同时MIMO信道可能会经历频率选择性衰落。为了解决这个问题，引入OTFS，MIMO-OTFS可以在快速变化的MIMO信道中实现更高的频谱、能量效率和在高多普勒衰落信道中的鲁棒性。如下图所示。

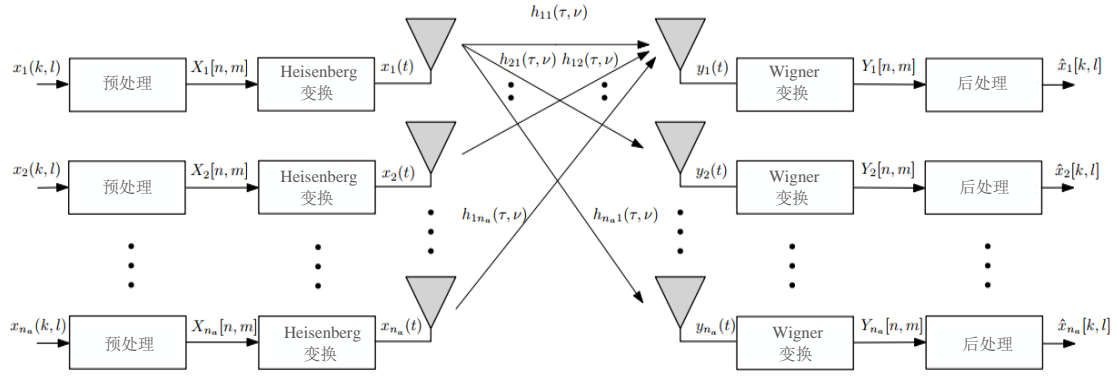


图4 MIMO-OTFS调制方案

针对MIMO-OTFS中的信号检测和信道估计问题展开研究。OTFS信道符号和信道脉冲响应特性使得在高多普勒环境中实现高效的MIMO信道估计。首先推导出了MIMO-OTFS系统的矢量化输入-输出公式。通过基于消息传递的迭代算法提出了MIMO-OTFS信号检测方案，在 2×2 MIMO系统中，即使在高多普勒频率（如1880Hz）下，该算法也能实现非常好的BER性能。

在传统的大规模MIMO-OFDM中，可以将数字预编码器放置在不同的子载波上，以获取频域的信道分集。然而，大规模MIMO-OTFS的数字预编码器在时延多普勒域。在这种情况下，基站(BS)应该在时延多普勒域获得信道状态信息(CSI)。此外，用户还需要相应的CSI来实现时延多普勒域的译码。因此，将重点研究在大规模MIMO-OTFS上沿着DL的信道估计。由此，提出了一种高速移动下用于大规模MIMO-OTFS网络的上行辅助的DL信道估计方案。首先，建立了上行链路(UL)的时域大规模MIMO-OTFS信号模型，采用基于期望最大化的变分贝叶斯(EM-VB)框架，恢复各物理散射路径的上行信道参数，包括角度、时延、多普勒频率和信道增益。然后，利用快速贝叶斯原理设计了一个复杂度低的EM-VB，充分利用上行链路和下行链路(DL)之间的角度、时延和多普勒互易性，重构基站下行海量信道的角度、时延和多普勒频率。同时研究了时延多普勒域下的下行海量MIMO信

道估计。采用最小二乘估计来捕获下行时延多普勒角信道。仿真结果表明，该方案具有较强的鲁棒性。

在高多普勒传播场景下，为了利用大规模MIMO和OTFS集成的优势，基站需要下行CSI进行预编码。在传统的时分双工(TDD)系统中，上行可以利用信道互易性来获取下行CSI。但是，当系统工作在频分双工(FDD)模式时，用户终端需要通过BS传输的导频来获取CSI并反馈。因此，需要对大规模MIMO-OTFS系统进行下行信道估计。通过论证MIMO-OTFS下行信道的三维稀疏性，提出一种三维结构正交匹配追踪(3DSOMP)方法来获取下行CSI。然而，用于信道估计的导频是随机导频，由于其随机性，在实际系统中难以实现，且占用大量内存。若是利用上行训练得到的信道参数进行下行信道估计，必须在上行信道估计后才能进行下行CSI采集，下行CSI采集不能单独进行。现在已经用于CSI采集的低开销导频模式，并且可以通过获取的信道信息对从各个角度接收的信号进行均衡。但是以上方案只有将信道的每个路径的多普勒频率映射为一个整数点时，系统模型才是准确的。

然而，时延多普勒域信道并不总是稀疏的，特别是在存在分数多普勒的情况下。由于这种信道扩展，导频符号周围需要更大的保护空间，以避免未知数据符号对信道估计造成的干扰，这会带来较大的训练开销。当考虑分数多普勒的情况时，需要提出新的方案。如路径分多址(PDMA)方案。开发了角度时延多普勒(angle-delay-Doppler, ADD)域中的高移动性UL信道模型和OTFS信号模型。采用3D牛顿正交匹配追踪(3D-Newtonized OMP, 3D-NOMP)算法在天线时频(antenna-time-frequency, ATF)域上恢复UL信道参数，包括信道增益、到达方向(DOA)、时延和多普勒频率。并仔细分析了3D角时延多普勒信道的能量色散和功率泄漏现象。提出的UL路径调度方案在角度时延多普勒

域上实现基于3D信道估计和最大比合并(MRC)的数据恢复。此外,将UL路径调度算法的思想应用于DL上的多用户服务,并为角度时延多普勒域上的大规模MIMO-OTFS的DL设计了一种低复杂度的波束成形策略,以实现用户间无干扰的DL通信。为了描述该方案的不同部分之间的关系,总体框图如下图所示。

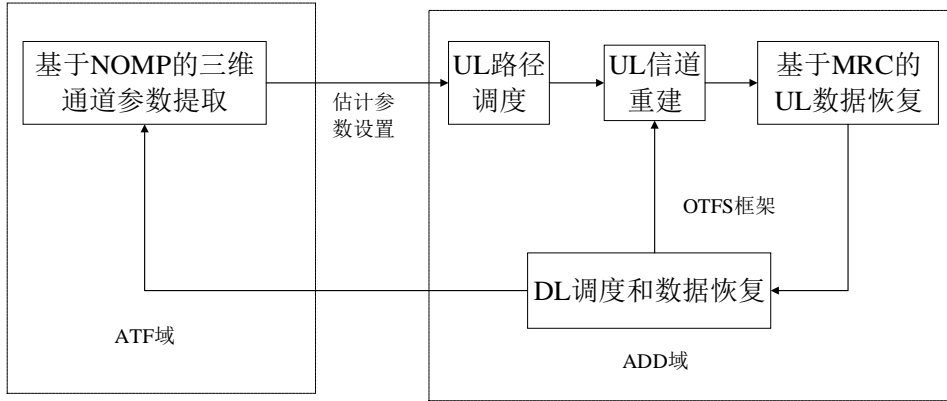


图5 PDMA方案的总体框图

然而,该方案只考虑了TDD系统,其中下行CSI可以通过上行和下行信道之间的互易性得到。对于存在分数多普勒的下行链路,还有一种CSI获取方案,包括确定性导频设计和信道估计算法。首先分析了基于OFDM调制解调器的SISO-OTFS的输入输出关系,并将其扩展到大规模MIMO-OTFS。而且为实际系统制定了一个准确的模型,考虑到分数多普勒并揭示子路径的影响。然后基于该模型和导频矩阵的结构提出确定性导频设计,以减少导频开销并节省内存消耗。并且提出了一种改进的基于感知矩阵的信道估计(MSMCE)算法来获取下行链路CSI。该下行链路CSI获取方案相比传统算法具有显著优势。

无线MIMO的信道随着速度的增加变得更加复杂,传统的MIMO辅助技术会遇到重大问题,如多普勒引起的载波间干扰、天线间干扰(IAI)和天线间同步(IAS)。DD域信道的稀疏性使得OTFS在抑制高阶MIMO系统中信道均衡和预编码的复杂性方面具有重要的应用,具有显著的频谱效率优势。但MIMO-OTFS系统中有大量天线,就会导致

导频的开销过大。同时,若将该时延多普勒域的导频转换到时域发送,其峰均功率比过高的问题也不利于实际的硬件设计。MIMO-OTFS系统以及相关的信号检测和信道估计具有深远的研究价值。

3.OTFS多址技术

在高移动性和时延传播的无线信道中实现高数据速率是IMT-2020的目标。在正交频分多址(OTFS multiple-access, OTFS-MA)中,高移动性会导致载波间干扰,降低信道容量。由此,引入OTFS,与基于OFDM的系统相比,它对多普勒传播具有更强的鲁棒性。OTFS调制每个信息符号看到相同的恒定信道增益,这大大简化了发射和接收设计。整个DD域的恒定信道增益也有助于减少频繁信道估计和反馈的开销。考虑在基站和用户终端(UTs)使用单天线的基于OTFS的上行多路访问。之前方法通过在DD域中分配非重叠区域来复用UT。当时延和多普勒扩展很高时,在时延多普勒资源块(DDRB)上传输的信息可能会扩展到相邻的DDRB,从而导致严重的多用户干扰(MUI)。利用保护频带来增加分配给不同UT的DDRB之间的间隔,虽然MUI减少,但会降低有效系统容量。针对问题提出一种新的基于OTFS的通信系统多址访问方法,该方法在DD和TF域复用UT是没有MUI并且不需要保护频带。分配给UT的DDRB在时延域和多普勒域中以相等的间隔隔开。因此,相应的TF信号仅占整个TF域的一部分,能够将TF域的非重叠部分分配给不同的UT,这允许BS将接收到的不同UT的TF信号分开。分析表明该方法是无MUI的。数值仿真结果表明,该方法能够在高多普勒和时延信道中获得较高的频谱效率。

关于OTFS调制中检测和信道估计,目前已经有很多研究成果。使用消息传递算法、基于马尔可夫链蒙特卡罗的算法检测OTFS信号;基于伪随机噪声导频的信道估计方案,并利用估计的信道进行信号检

测；使用DD域中的脉冲作为导频的信道估计技术；基于正交匹配追踪的多用户下行OTFS信道估计方法。针对OTFS-MA系统中上行链路的时延多普勒信道估计进行研究。如下图所示，一个OTFS-MA系统，上行用户与基站接收机通信，每个用户配备一个发射天线，上行传输采用OTFS调制。BS的接收器配备了一个接收天线。来自不同用户的信息位在时延多普勒网格上被复用。由于认识到时延多普勒表示中的时变信道是稀疏的，因此可以使用基于压缩感知的估计技术，由此，将时延多普勒信道估计问题建模为稀疏信号恢复问题。提出了基于正交匹配追踪(OMP)和改进子空间追踪(MSP)的上行链路OTFS-MA信道估计算法。与基于脉冲的信道估计方案相比，本文提出的基于CS的信道估计算法具有更好的归一化均方(NMSE)和BER性能

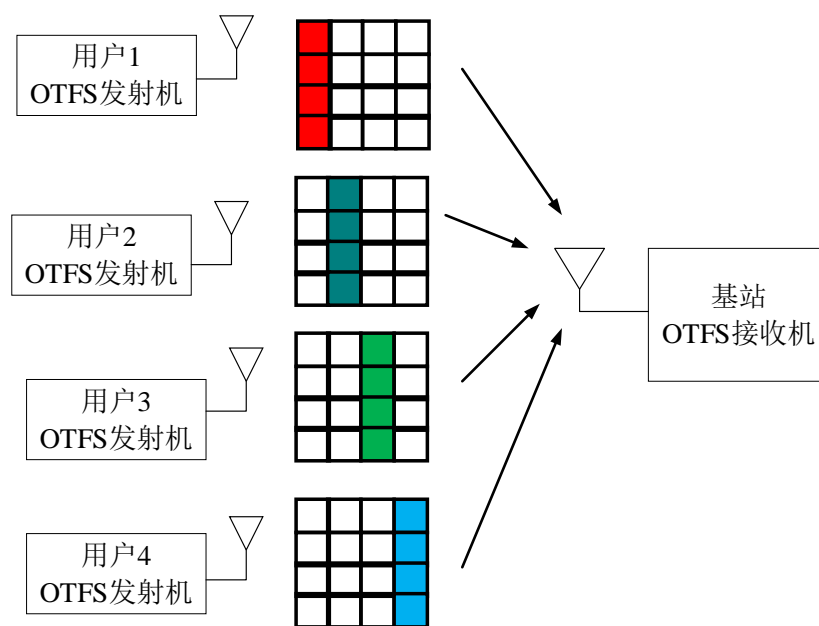


图6 上行链路的多用户OTFS

无线电接入技术 (RAT) 包括传输技术和多址接入。MA技术可以大致分为两类，即第一类，正交多址接入(OMA)，第二类，非正交多址接入(NOMA)。在OMA中，保持了资源分配的正交性，即一个资源单元只分配给一个用户。OTFS技术的两种类型：OMA-OTFS和TFMA-OTFS中用户被分配不同的TF资源；DD MA-OTFS中用户被分配

的地方不同的DD资源。与OMA方法不同，NOMA方案在一个资源单元中分配一个以上的用户。功率域NOMA(PD-NOMA)方案通过在发射机处使用叠加编码(SC)以及在接收机处使用连续干扰消除(SIC)实现，可以实现高斯广播信道的容量。PD-NOMA方案在总频谱效率性能方面明显优于OMA和码分NOMA方案。为了获得最佳增益，NOMA发射机必须知道用户的瞬时信道系数，在高移动性场景中反馈到发射机的CSI很快就过时了，这限制了TF域NOMA可实现的增益。由于OFDM处理高多普勒的能力有限，限制了NOMA-OFDM作为高移动性场景下无线接入技术(radio access technology, RAT)的应用。由于与OFDM相比，OTFS更适合于高多普勒环境，因此研究在OTFS中使用NOMA，在高移动性条件下实现OTFS的多用户扩展，有利于发展在高移动性场景下的多用户SE增强技术。在有多天线基站的情况下将OTFS用以辅助NOMA网络的波束形成，以最大限度地提高低移动性NOMA用户的数据速率，同时保持高移动性OTFS用户的目标数据速率。现在已经展开对NOMA-OTFS系统的研究，并为NOMA-OTFS提出了一种基于最小均方误差(MMSE)的连续干扰消除接收器。开发功率分配方案，最大化NOMA的高移动环境下的SE的总和。设计一种码字级SIC(CWIC)接收器，它使用基于MMSE的抵消ICI接收机的符号级对数似然比(log-likelihood ratio, LLR)值。利用低密度奇偶校验(LDPC)码和MMSE均衡来评估NOMA-OTFS系统的性能，将NOMA-OTFS系统的性能与基准OMA-OTFS、OMA-OFDM和NOMA-OFDM方案进行比较，结果显示，NOMA-OTFS在高移动环境下的性能高于OMA-OTFS和NOMA-OFDM。

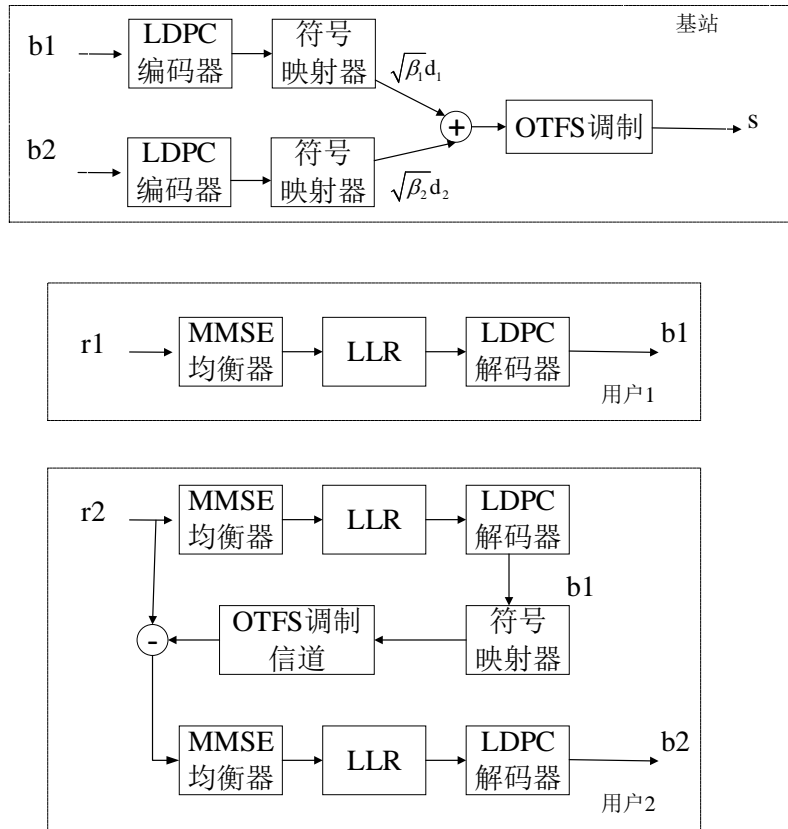


图7 下行链路中双用户NOMA-OTFS系统图

用于下行传输的双用户LDPC码字级SIC OTFS-NOMA接收机的实际实现，如上图所示。基站为两个用户生成数据(分别表示为**b1**和**b2**)，使用LDPC编码器编码，然后使用用户支持的调制对数据进行调制。在图中，两个用户的编码信号分别为**d1**和**d2**。被调制的符号与分配的功率($\sqrt{\beta}$)进一步叠加。利用SFFT和Heisenberg变换对叠加的时域信号进行OTFS调制。由此产生的信号**s**通过时延多普勒信道广播给两个用户。两个用户都首先执行MMSE均衡化，以减轻ISI和ICI。此外，由于假设第二个用户的信噪比高于第一个用户，因此第二个用户执行SIC。

现代通信系统中高移动性场景，如高速铁路、无人机通信、车辆对车辆通信等，使用现有的传输技术提供高质量的无线通信服务是一个挑战。OTFS多址技术造频谱效率、发送器接收器的设计等方面优于OFDM技术，成为现在具有广阔研究前景的研究项目。

4. OTFS应用场景

1) 物联网

大规模物联网(mIoT)可以在未来的智能高速铁路(HSR)中发挥重要作用，在未来的智能高速铁路中，需要免授权的多址技术。最近，针对没有移动性的mIoT提出了串联扩展多址(TSMA)，以实现高连接性和可靠性。为HSR mIoT设计OTFS-TSMA，可以在HSR海量物联网中实现高用户连通性和传输可靠性，还可以推广到其他高移动性的大规模物联网场景。对于小的IP包，可以设定专门的OTFS传输模式，可以将链路预算（以焦耳/比特为单位）最大化，在功率和时延限制时最小化重传数量，以此延长电池寿命获得扩展覆盖。对比OFDM，发送时使用OTFS信号，能在获取完全的时间分集增益的同时，保证低PAPR与最大持续时间，从而最大化链路预算并最小化重发送的次数。

(2) 高速通信

对于通信终端处于高速运动状态下的通信，如V2V（交通工具间通信）与HSR。OTFS具有提升吞吐率，增强可靠性的能力。OTFS技术提取了频率扩展特性，将在时频域复杂的特征转化成缓慢变化的时延多普勒域特性，避免了子载波间干扰的影响的同时，利用多普勒效应作为一种新的分级来提升通信质量的。

(3) 车载网络

车载网络允许各种车辆相互或与路边单元(RSU)无线交换信息，以提供各种好处，包括协作交通管理、道路安全改进和自动驾驶支持。因为OTFS系统适合高移动性信道，可以在未来的车载网络中发挥关键作用。当前的车载通信标准，如IEEE802.11bd和5GNRV2X，主要考虑基于OFDM的波形，通过插入midamble码或增加子载波间隔来减轻信道变化的影响。相比之下，OTFS在DD域中表现出的潜在信道稳定

性能够实现快速的初始链路设置、灵活的侧链调度以及预测性资源调度。

(4) 非地面网络

非地面网络(NTN)提供基于卫星、无人机或高空平台(HAP)所需要的基础设施。它们能够为地面5G网络提供全球覆盖、移动性、无处不在的连接性以及强大的网络可靠性。由于机载和星载飞行器通常移动速度很快, NTN所经历的高多普勒传播对其空中接口设计提出了新的挑战。由于其处理多普勒效应的突出能力, OTFS调制在NTN中具有丰富的潜力。此外, 机载和星载飞行器的机载电源和计算能力有限, 因此OTFS的低PAPR和低复杂度至关重要。

(5) 水下声学通信

水下声学信道(UACs)被认为是最具挑战性的无线信道之一, 传统的水声通信不能很好地工作, 因为水声信道具有固有的双色散特性(即多径传播和普遍的相对移动性), 水声信道具有时延扩展高、带宽有限等特征。使用DFE、OFDM和正交信号分复用(OSDM)的单载波调制是UWA通信最流行的方案。但是这些调制方案都在时频域中传输信息, 其中ISI和ICI均衡较难消除。为了消除或减少水下声学信道场景中存在的双色散影响, 提出了一种基于OTFS的UAC方案, 如下图所示, 该方案在时变多径水声信道中的性能优于OFDM和DFTs-OFDM。

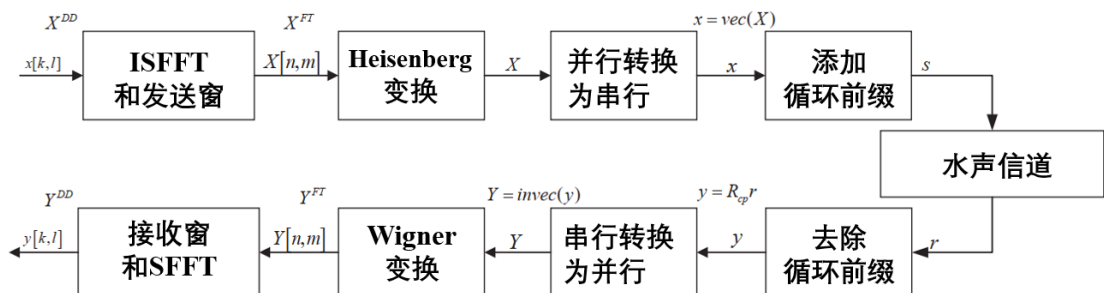


图8 基于OTFS的水声通信系统

(二) 轨道角动量关键技术

1. 轨道角动量概述

基于电磁理论，电磁波沿着光束传播方向上不仅具有线性动量，而且还具有垂直于波束传播方向的角动量。即一种是由于电磁波束的偏振特性产生的自旋角动量（Spin Angular Momentum, SAM），用于描述极化状态。另一种则是由于波束具有螺旋相位结构而产生的轨道角动量（Orbital Angular momentum, OAM），如下图所示。

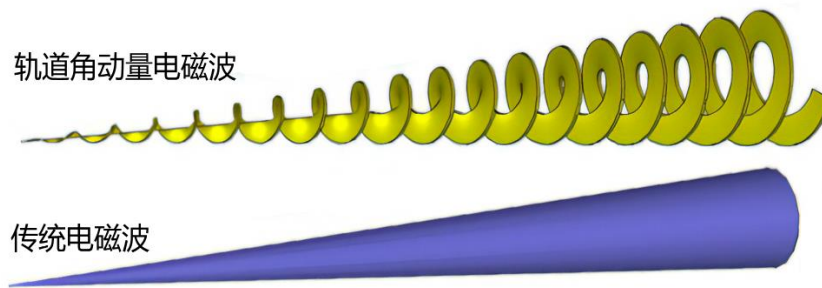


图9 OAM波与传统电磁波的比较

相位旋转因子 $\exp(il\varphi)$ 决定了涡旋波束空间相位分布结构，不同OAM模态涡旋波束的空间结构不同，涡旋波场的振幅沿轴中心为零。模式值 $l=0$ ， $l=1$ ， $l=3$ 的空间螺旋相位波前如下图所示

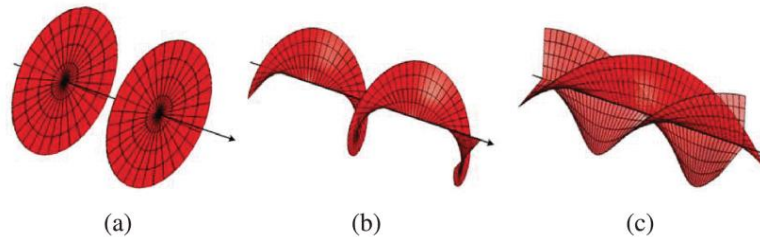


图10 不同OAM波的螺旋相位波前：(a) $l=0$ ，(b) $l=1$ ，(c) $l=3$

对于携带OAM模式的涡旋电磁波的研究主要集中在波束的产生、大容量高速率传输及高效准确接收解调三个方面。产生高质量的涡旋电磁波是系统功能优劣的基础条件，空间无线通信信道环境是影响涡旋电磁波传输质量的决定因素，而接收解调技术直接影响系统的性能指标和复用效率。由于空间信道中的多径效应无法避免，因此，提高

无线通信系统的信道容量和通信质量的关键是补偿信道衰落造成信号畸变，以提高接收端接收解调的准确性。下面将分别介绍目前QAM系统的关键技术和研究方向。

2.OAM通信系统的信道建模与信道估计

OAM的多模态特性在理论上能够提供大容量、多终端和高速率通信服务，这恰与下一代通信系统的基本需求相符合。为充分发挥OAM技术的性能优势，进一步提升无线通信系统的容量，客观上要求对该方案在实际信道下的传输特性进行深入研究。由于其波形结构的特殊性，如何对OAM通信系统进行信道建模并实现准确的信道估计成为需要研究的关键问题。

具体而言，太赫兹频段下的OAM无线通信场景具有快速时变特征，信道表现出更高的复杂性，这在对信道建模技术提出了极高的要求。目前已经有研究对OAM方案在多径信道下的传输进行了相关实验与理论分析，该类研究从传统的路径衰减角度研究了信道多径对OAM传输特性的影响，证实多径会显著降低系统的传输性能。在这一部分研究中，已经对信道模型进行了基本构建，例如将多径下OAM无线通信信道建模成多元离散无记忆信道模型，多径效应的OAM与MIMO通信系统的双射线模型以及视距路径和稀疏多径环境下的OAM信道模型。但这些方案是以海量数据带来的高冗余性为代价，未能实现复杂性和准确性的良好折中。同时无线通信中的多径效应会影响OAM模态转移特性，这就使得OAM无线通信系统信道模型有别于传统无线衰落模型，不仅要分析路径衰减，还要分析因多径而产生的模态跃迁的分布规律，这对信道建模带来极大挑战。

低时延、高可靠性的传输需求也给OAM系统的信道估计带来了速度和精度的双重考验。就速度而言，为了应对高速传输场景，必须

在极短时间内估计出OAM无线通信信道参数，同时为了应对可能随时变化的OAM无线通信信道，信道估计方法应当具备一定的智能学习能力，能够动态的自主完成信道估计。就精度而言，OAM无线通信室内场景下的多径传播会使OAM波束发生严重的相位畸变，不仅造成了当前用户的功率损失，也造成了多用户间的相互干扰。由于精准的信道估计是干扰信号恢复的重要依据，而现有的信道估计方案无法满足OAM无线通信传输系统的要求。因此，亟待针对OAM无线通信系统复杂多变、易失真的信道条件，设计实时高精度的智能信道估计算法。

可以发现，现有的统计性信道建模方案和信道估计技术或多或少地进行了理想性模型的简化，且局限于特定传输场景，对实际传输中更加复杂的多径环境缺乏普适性。同时，现有方案缺乏对OAM模态的功率分布的考虑，这降低了系统多个模块间的匹配性，限制了联合优化以进一步提升整体性能的研究空间。更加普适准确的建模和实时高精度的信道估计都是未来研究的重要领域。

3.OAM物理层安全技术

研究发现，由于具有更多的自由度，OAM波本身也具有一定的物理层安全能力，利用OAM波形设计来进行信号的保密传输表现出了一定的优势。这一研究主要是利用OAM波的自身特性和独特的模态体系进行加密，由于窃听者难以实现与发射端的严格匹配，其窃听能力受到限制，进而在不影响合法接收者获取OAM体制性能优势的前提下保障OAM通信系统的传输安全。进一步的研究考虑其与传统物理层安全技术的结合，以更好的发挥其多自由度的安全能力。

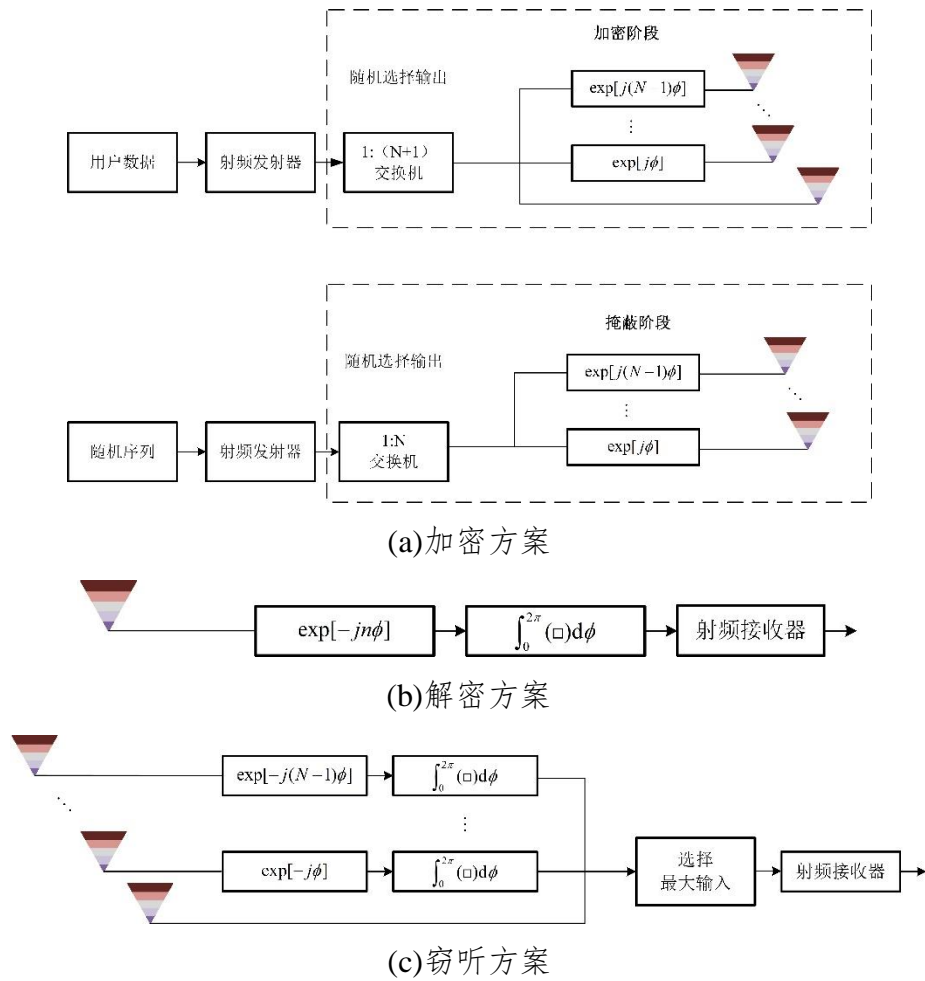


图11 OAM波的物理层安全

图11即给出了一种基于OAM的无线通信加密方案的系统结构示意图。可以看出，轨道角动量的引入有效增加了窃听者截获信号的难度，系统具有一定的安全性。然而OAM的物理层安全问题研究尚处于起步阶段，研究虽然表明，利用其固有安全特性实现保密通信的设想具有可行性，但缺乏具体的理论分析和基于经典物理层安全框架对其性能的评价，此外，OAM模式之间的串扰也对其安全性有不利影响。如何最大限度的对OAM本身的安全能力进行利用，或通过兼容其他物理层安全技术取得系统整体性能的优化都是未来需要进一步研究和解决的问题。

4. 多模态OAM波的收发

对于轨道角动量的产生，根据希尔伯特空间理论，任意OAM态的

电磁涡旋波均可在特征模态空间上进行分解，张成一个无穷维的Hilbert空间，即理论上可以调制无限多信息，目前离理论预期仍相差较远，无论对于多模态的产生发射还是接收检测都有待于更深入的研究。

OAM波的发射可以由多种天线产生与接收，在愈发丰富的射频场景和需求下，将会有着更加广阔的应用。通常，由于螺旋相位板（Spiral Phase Plate, SPP）和全息光栅的尺寸取决于信号波长，因此它们适合于在高频（如毫米波）下产生涡旋波，而螺旋反射器和均匀圆形阵列（UCA）更适合于在低频下产生OAM。此外，SPP还具有成本低、转换效率高、结构简单等优点。由于螺旋抛物面天线在产生OAM波时可以实现OAM波的聚焦，因此它更适合于远距离传输。异向介质则由于尺寸小、成本低，更适合于小型集成电路。在此基础上，SPP、螺旋抛物面天线和其他单发射天线有望与MIMO技术结合以进一步增加系统容量。对于这些天线设计方案，可以进一步对发射天线的结构进行优化，以此来抑制辐射涡旋电磁波的能量发散，简化接收难度，并据此设计匹配的接收技术。同时，新型天线结构的设计也是未来研究的重点。

对于现有的检测模态方法，如单点测量的相位梯度法、不同距天线相位梯度测量、迭代失调测量法、相位补偿与检测一体化法以及图像处理OAM谱方法都或多或少的存在着精度不足、效率太低、混叠或失调模态的接受场景下性能较差的问题，各类检测方法各有优势，但都无法兼顾复杂的传输场景，更加准确高效且广阔覆盖多种接收场景的检测方法对于OAM传输十分重要。

5.OAM抗干扰技术

由于涡旋电磁波具有特殊的螺旋相位波前结构，在电磁波传播过

程中，极易受到传输环境因素的影响，例如天气、大气对电磁波的影响以及自身的发散效应与多径效应的影响，如何高效的应对多干扰因素的共同影响是未来一个有意义的研究课题。

与传统无线通信的抗干扰技术相结合来实现更加稳定的信号传输是一个有效的方法。例如，跳频技术由于具有较强的抗干扰能力而在通信中被广泛应用，但随着无线频谱越来越拥挤，其发展受到了限制。而将OAM波束与跳频系统相结合则为其发展提供了新的研究思路，利用不同模态的OAM相互正交的特点，发展出了适用于OAM波的跳模技术和跳模-跳频技术，可以在窄带频谱内表现出优秀的误码率性能和抗干扰能力。此外，基于空间调制(SM)的毫米波通信系统也展现出了良好的联合优化潜力，将其与OAM技术相结合，利用OAM-SM毫米波通信系统的设计弥补OAM的技术缺陷。相比于传统系统，该方案在通信容量、能量效率以及路径损耗衰减的鲁棒性均有较好的表现，这使其更适合于远距离通信。

复用方式的结合和优化也是有价值的研究方向，将OAM复用和正交频分复用(OFDM)结合提出的混合正交分复用(HODM)方案是一次有益的探索，该方案利用二维FFT和IFFT来代替常规OFDM系统中的FFT与IFFT，同时采用多路并行子载波和多模式值的OAM波相结合共同复用，并对反射路径引起的直视距和反射路径之间的信道幅度增益的相位差进行了补偿，在散射体稀疏的稀疏多径环境中实现大容量无线通信。但这种通信方案仅专注于小于或等于三次反射路径的情况，场景具有局限性，对于更多场景下的抗干扰传输仍值得未来继续探索。

OAM系统的编码技术也是其抗干扰性能的重要研究方向。LDPC码作为一种优秀的信道编码，近年来被广泛应用于传统的通信体制中，

也表现出了引入OAM系统抗干扰研究的良好前景。图12给出了一种LDPC编码的多维度信号方案系统示意图。该方案利用OAM波自身携带的更多自由度，包括振幅、相位、极化状态和OAM模式等来提高频谱效率和能量效率，并利用SLEPIA序列作为基带中的基函数或天线阵列的脉冲响应以进一步增加无线系统的维数、提升传输速率。研究表明，LDPC编码的引入使传输可靠性得到了进一步的提升，在此基础上，该方案的多维度信号设计还提供了额外的性能增益，系统具有很高的抗衰落能力。

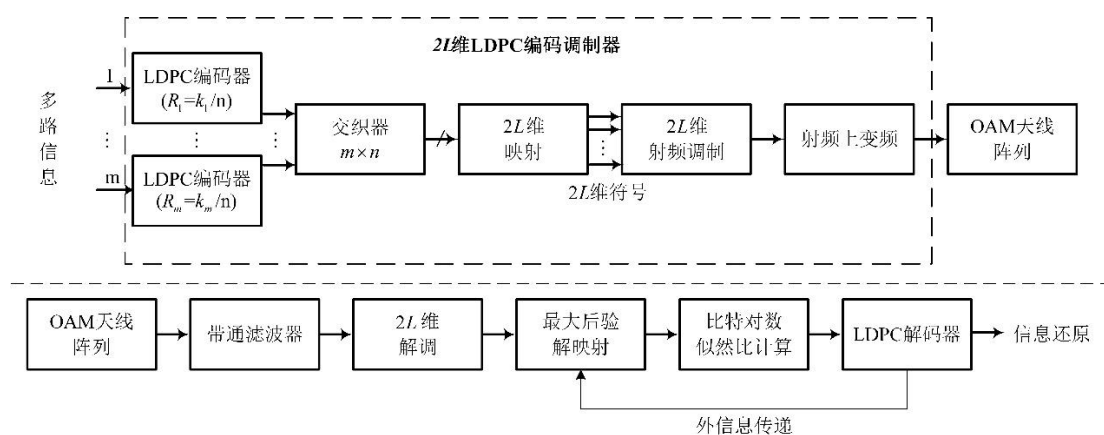


图12 LDPC编码的多维度信号方案

传统无线通信的抗干扰、抗衰落技术在OAM波束中的应用和改良是一个一直以来的趋势，但是诸多技术结合方案是基于理想仿真下进行的，例如无限多正交模式的OAM波的收发与分辨，在实际过程中是难以实现的，因此更加实际可靠的结合方案未来仍有较大的研究前景。

6.远场OAM通信技术

迄今为止，大多数OAM射频通信方案主要围绕着短距离的近场区通信，实现了较为稳定的高速率通信，而当场景应用到远场区时，OAM射频通信独特的物理波形会导致干扰与衰落相比短距离更为明显，远场区的OAM通信更加具备挑战性，当前的远场区相关研究较

少，在远场区实现稳定的高速率通信，对于OAM的无线射频通信有着重要的意义，这仍有待于更加系统性的设计优化和技术上的突破。

（三）时频联合波形设计

1.时频联合波形技术概述

为了满足未来应用的需求，同时考虑到高可靠低时延、零碎频谱使用、非严格同步以及高速场景下系统鲁棒性等挑战，时频联合波形设计成为重要的研究方向。目前，该领域的研究主要可以归为新型多载波技术和时频协同的混合载波技术两类。

现有的新型多载波技术主要是传统多载波OFDM技术的进一步延伸，主要包括FBMC、UFMC和GFDM三种。这些波形设计方法彼此之间性能侧重不同，各有其优势特性和适用场景。其中，FBMC技术采用OQAM调制，对每一个子载波进行单独滤波处理从而进行有效的带外抑制，但其滤波器的长度较长，实现复杂度高，资源分配不够灵活。相比之下，UFMC技术提出采用基于子带的滤波方案，即将星座映射后的多个子载波信号划分为多个子带，然后基于每个子带分别进行滤波处理，从而在有效带外抑制的同时降低对滤波器的要求，具有频谱效率高、抗时频偏能力强、配置灵活等优点。GFDM技术则是基于循环滤波的，该方案采用升余弦或者根升余弦脉冲整形，可以实现较好的带外抑制效果，且由于块传输设计，在每一块的载波分配上有较大的灵活性。但其也具有频谱效率降低、矩阵接收机复杂度较高等问题。

与新型多载波技术不同，混合载波体制主要是基于载波融合构想而提出的，通过变换域信号处理来设计具有时频协同特性的物理层波形以获取多体制优势、提升系统性能。图13给出了这种混合载波体制的框图。从实现结构中可以清晰的看出，该体制同时包含了单载波分

量和多载波分量，即其可以同时表现出时域和频域能量平均化的特征。相比于传统载波方案，混合载波系统在时频平面上可以得到更为均匀的能量分布，具有更好发挥信号时频协同特性的潜力，这使其表现出抗干扰、抗截获上的重要研究价值。同时，其独特的信号结构和设计灵活性也在抗截获等多个方面表现出了良好的研究前景。

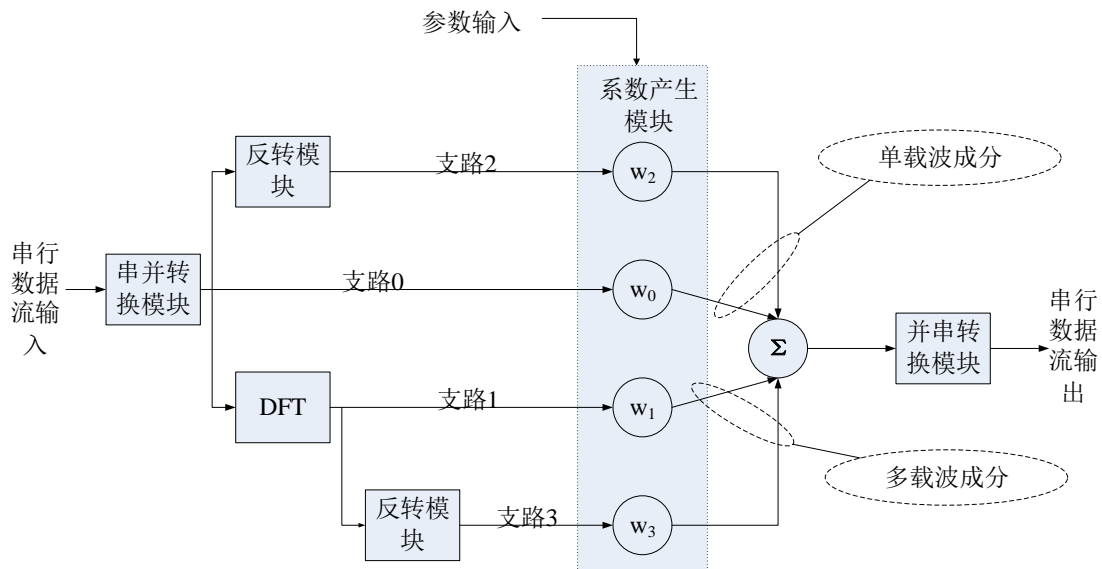


图13 混合载波体制的框图

2. 基于时频协同的物理层波形安全设计

随着信息和通信技术的迅速发展，人们对通信系统保密性能的要求日渐增高，信息安全已成为未来通信系统构建不可忽视的问题。作为对上层加密体制的有效补充，物理层安全技术展现出了重要的研究价值。然而，在物理层波形设计领域，现有方案大多以提升可靠性作为主要设计准则，对波形本身的安全能力发掘不足，忽视了时频联合设计下的安全性潜力。

在时频联合波形设计技术中，UFMC等大部分新型多载波方案并未关注其波形的安全性设计问题。与之不同的是，时频协同的混合载波体制由于具有独特的信号结构而表现出物理统计特征可控、具备信息隐藏能力等天然优势，并因此被纳入了物理层安全的研究范畴。但

深入研究发现，尽管其具有一定的抗检测、抗截获的能力，仍有一些安全隐患逐渐显露出来，阻碍了其性能的进一步增强。研究表明，时频协同混合载波体制的安全能力受到变换参数的约束，这使得变换的自由度较低，因而存在被破解的风险。特别是近年来，随着时频协同安全理论的广泛研究，窃听者逐渐可以掌握与合作方相同的分数域先验知识，以此为基础，针对性截获手段迅速发展，这使得该系统的安全性能将不能得到有效保障。

应当注意到，时频协同混合载波方案的安全隐患实质上主要来源于现有变换域信号处理手段安全能力的不足，特别是需要应对计算能力愈加强大的窃听者时。因此，如何通过对时频变换形式进行改进来补足现有体制的固有安全缺陷成为被关注的问题。在这一方向上也有一些研究设想和探索。多参数加权分数傅里叶变换首先被尝试引入到该领域的研究中，通过对系数参数向量的构造展现了变换扩展的可行性。更进一步的，广义加权分数傅里叶变换通过放宽约束条件的加权系数设计，一定程度上实现了参数维度的有效提升，可以认为其增强了窃听者截获信息的难度，实现了物理层安全性的改进。

事实上，时频协同信号处理过程可以看做将信号能量按一定比例分散到时频平面各个分量中的过程，对于窃听端，其需要准确判断具体分散模式和能量分配方案，才能以一定概率恢复原信号。因此，能量分散模式的多样性越强，即时频协同设计的可扩展性越丰富，则越具有信号抗截获上的优势。

基于这种想法，扩展的时频协同混合载波体制具有研究的价值，一方面，可以通过基础算子的设计使变换突破现有的以四分量时频关系为基础的构建模式约束，将符号能量分散和重构过程通过多个分量扩展到整个时频平面上，这样时频协同物理层安全波形的设计灵活性

得到了实质的大幅度增强。此外，通过对变换系数形式的设计提高参数维度也有着重要的价值。另一方面，考虑到全新变换设计的困难性和计算复杂度可控性要求，也可以通过多级迭代的方式实现信号能量的时频分布设计。由于变换域迭代基函数均具有良好酉变换特性，系统的抗截获设计并不影响合作方接收机对信号的无失真恢复，因此可以构造多样化的迭代方式，系统具有较强的可扩展性。实际应用时，可以根据系统复杂度限制和安全通信需求合理地选择具体波形方案以保证系统的整体性能。

除了对时频协同波形本身的安全能力提升，为了应对现有体制的安全性缺陷，另一个重要的研究方向是通过将物理层安全波形设计与其他传统抗检测、抗截获技术，如定向调制技术、多中继协作方案、混沌加扰等结合，以规避其安全隐患、实现系统间的优势互补，并以最大限度提升整体安全性能为目标对联合系统进行优化。

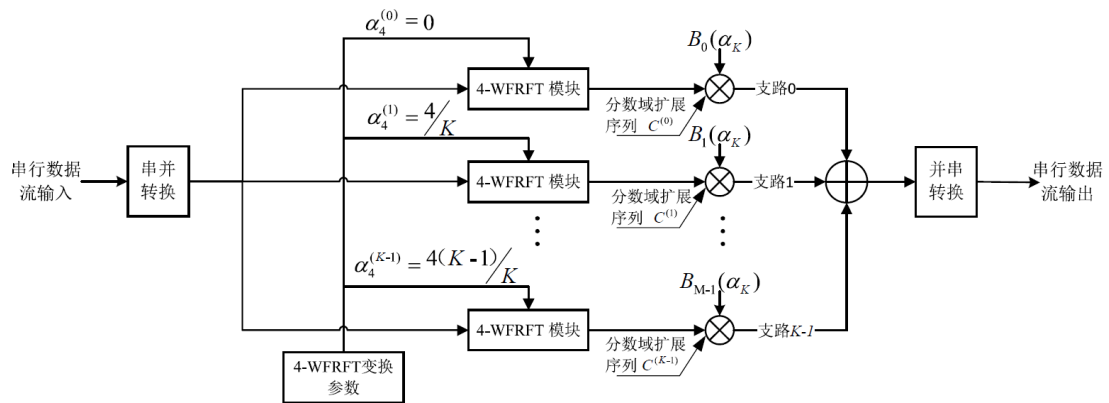


图14 多序列扩频WFRFT的物理实现流程

图14给出了一种多序列扩频的时频协同混合载波物理层安全传输系统设计框图，该系统在保留混合载波体制信号时、频域协同传输的优势下，通过引入分数域扩频码之间的正交性实现了各子路信号可分离性并增强了信源传输的安全性。可以发现，这一设想并非是将两种抗检测手段进行了简单级联，而是将直接序列扩频有效地融合入时

频协同信号的生成过程中，在扩频系统固有的低检测概率特性的基础上将两者的有机结合来获取额外的安全增益，有效实现了对通信系统的抗检测、抗截获性能的进一步提升。

不难发现，由于时频协同的混合载波体制本身具有良好的兼容性，适用于与其他技术的结合和联合优化，该方向的研究设想具有较高的可实现性和工程价值。随着各类物理层抗检测技术的快速发展，时频协同的融合物理层安全系统设计表现出广阔的研究前景，也将是未来研究的重点。

3.时频协同信号扩展性设计

近年来，时频联合的物理层波形设计在无线通信的信号抗衰落、抗干扰领域已经表现出了独特的性能优势。然而，随着研究的深入，一些局限性也逐渐显露出来。无论是以GFDM为代表的一系列新型多载波技术，还是基于时频协同的混合载波体制，其符号能量的时频分布都局限于较为固定的模型，这使得这些方案各有其优势场景和不足，在复杂信道条件下的抗衰落性能上表现出一定的缺陷。尽管研究人员为此提出了一系列针对性解决方案，但由于局部技术优化难以突破各类波形体制固有信号结构的限制，现有方案尚不能充分发挥时频协同的体系优势。

为弥补这一缺陷，从波形设计的理论基础入手进行适应通信需求的优化被认为是可行的研究方向，即通过对现有的变换域信号处理手段进行特定的改进，可以实现对信号的时频结构的优化设计以增强系统的抗衰落性能。广义加权分数阶傅里叶变换就是基于该想法而提出的。由于放宽了变换的边界条件，该方案在时频平面上可以实现更为均匀的能量分布，具有更好的误码性能。同时，改进的广义混合载波系统具有更高的参数维度，即具有多样性和适配信道的研究潜力。因

此被认为是一种更有前途的对抗信道衰落和干扰的解决方案。然而，尽管相比之前的研究有了一定的进展，该领域的发展尚处于起步阶段，对信号时频特性的设计仍具有一定的局限性。图15给出了该方案的时频能量分布示意图。可以发现，由于受到变换形式的限制，时频协同的广义混合载波波形设计只能实现分量间的能量分配方式优化，而无法将这种改进扩展到整个时频平面上。

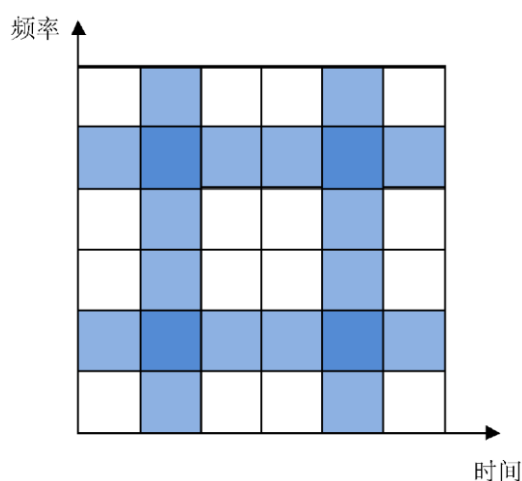


图15 通信信号的时频能量分布

我们应当注意到，现有的各种时频联合波形设计方案均尚不能实现信号能量在时频平面的完全平均化分布，时频协同信号分散和补偿信道衰落的能力未能得到最大限度的利用，系统误码性能仍有提升的空间。图16给出了一种较为理想的信号时频分布设想的符号能量示意图，在这种情况下，信号能量均匀的分布在整个时频平面上，具体来说，在一个数据块内每时隙、每谱线均包含所有符号的能量，且每个符号能量完全等量化。不难发现，在该体制下信号在信道中无论是经历时间选择性的深衰落还是频率选择性的深衰落，单个符号的能量损失都会被其余全部符号所分担，其能量得到了最大限度的保留，大幅度降低了出现大功率信号畸变而导致接收端发生误判的概率，因此可以有效降低衰落信道下的误码率，实现了对无线通信系统的抗干扰、抗衰落能力的进一步提升。

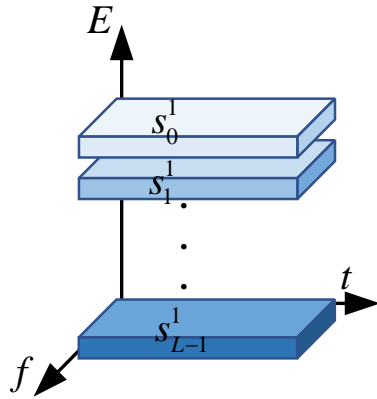


图16 通信符号能量平均化的分布图

可以发现，具有符号能量完全平均化特征的时频协同波形设计方案具有信号抗干扰、抗衰落上的机理优势，但其低复杂度实现方案的研究尚存在缺陷。另一方面，目前时频协同波形方案对符号能量分布的设计也缺乏灵活性。虽然大部分方案均可以通过参数特殊取值回退到传统波形，或进行一定的转换和扩展，但仍难以满足复杂信道条件的应对需求，这也对时频协同体制的进一步推广和应用形成了制约。

总体而言，时频协同的物理层波形技术具有较高的研究潜力，其扩展性设计具有可预见的良好研究前景和机理优势，将是应对未来通信需求的研究重点。对于下一代通信系统的物理层波形设计，如何能实现时频完全平均化的信号能量分布方案以最大化时频协同的体系优势将是一个有意义的研究方向。同时，如何构造具有高设计灵活性的时频协同波形方案以使其适应于复杂通信场景也具有重要的研究价值。

4.时频协同信号的信道匹配特性研究

信号与信道之间的匹配问题是如何设计信号是的在经历信道的传输后，信号畸变量最小，即经历传输后的信号与原始信号之间差异最小化。

针对这一问题，一个可以研究的方向是将这种信号与信道之间的

匹配问题被归结为系统自身的参数设计问题，通过设置目标函数对参数进行选择，将能取得的最优解作为实际发送信号的参数。但一方面，由于这种匹配关系十分复杂，目标函数的选取常忽视系统中其他必不可少的模块的影响，而简化模型分析得出了最优参数在实际中未必能够取得预计的系统性能。另一方面，目标函数与待求解参数之间常不能找到明确的显函数关系，这使得最优参数的解析解推导过程变得难以实现。实际应用中常采取一定精度的参数遍历方法代替精确求解的过程。

在进一步的研究中，考虑到信号与信道衰落特性的匹配取决于信号时/频域分量的功率与信道时/频域衰落剧烈程度之间的关系，可以将这一问题分解为两个部分分析，即基于匹配准则求取信号时/频域分量功率分配方案的方法研究和符合匹配信号的时/频域功率分配关系的信号设计方法研究。此外，为解决代数运算推导解析表达式有较大困难的障碍，通过信号功率与系统参数的关系映射，将复杂的参数求解问题转化为复平面上的几何问题来完成信号设计也是一种值得研究的应对方案。

不难发现，基于参数匹配的时频协同信号波形设计方案可以实现对信道一定程度的匹配，并因此可以取得时频衰落信道下的误码性能的提升。但从结果上看，考虑到数学推导的复杂性，实际研究常常会对模型进行简化以得到特定场景下的解析表达式，这使其缺乏对实际信道条件的普适性。如何实现信号波形与信道特性的实时匹配，最大程度的对物理层波形的时频协同特征进行利用以进一步增强系统应对复杂场景的能力将是值得重点研究的问题。

从另一个角度，不应忽视的是，时频联合波形设计与其他物理层波形设计方案具有一定的融合潜力，多波形设计体制联合以实现整体

系统性能的最佳信道匹配方式也是重要的发展方向之一。图17给出了一种时频协同扩展的OTFS波形设计框架示意图，该设想通过将时频协同变换域信号处理和正交时频空技术结合获取二者的增益，提升系统对抗信道衰落的能力。同时，对于这一设计，可以通过灵活的二维参数选择使系统回退为OTFS、HC、OFDM、SC等经典方案，较好的兼容性使其符合对未来通信系统设计的基本要求。此外，应当注意到，波形设计体制的联合不应当仅局限于多体制方案的简单叠加，如何实现波形体制的有机融合以使联合设计方案的新波形能充分发挥多体制的优势，进而实现对实际复杂多变信道条件的最优匹配将是另一个值得重点研究的问题。

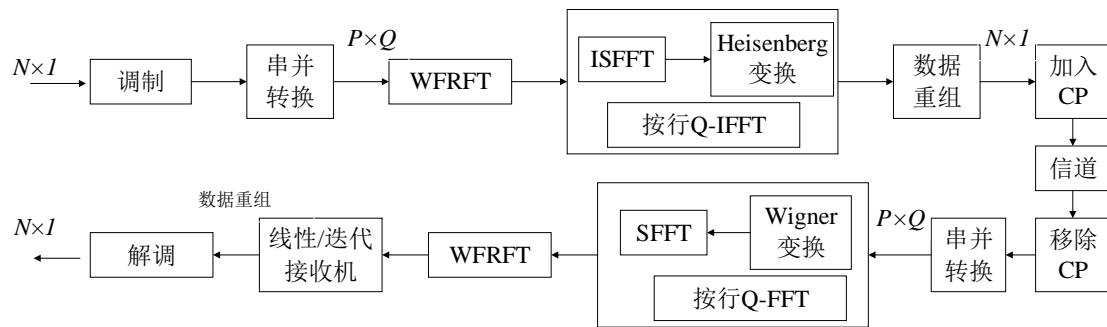


图17 时频协同扩展的OTFS波形设计框架

（四）小结

本节主要对物理层波形设计领域的关键技术进行了研究，详细介绍了面向未来通信系统的新体制波形的研究热点，分析了其性能优势和待解决的问题，并对未来的研究方向进行了预见。可以发现，物理层新型波形体制发展迅速，表现出广阔的研究前景和应对下一代通信需求的巨大研究潜力。但也应当注意到，目前各种新型波形体制的性能优化往往局限于特定信号形式和局部优化目标，对其与现行通用的常规通信技术的匹配和联合优化问题缺乏总体设计，难以结合实际复杂系统结构的具体情况，这将是后续研究重点关注的问题。另一方面，各种新体制波形的融合方案也具有较高的研究价值。如何通过波形融

合获取多体制协同优势以实现系统整体的性能的进一步提升将是未来重要的研究方向。

五、工程难题（国际、国内）

（一）复杂环境下的可靠性问题

在传统的信道中，新型信号的设计在取得优势的同时，面临着信道扰动带来的性能恶化，例如在OFDM信号提出后的ISI/ICI等问题，都需要后续技术保证优势实现同时，抑制本身的不足。

目前的多种物理层体制也会在实际应用中遇到环境与信道多样化带来的复杂问题，此类问题可能是各种变换/反变换对信道敏感性，或者是不同信号设计维度之前的相关性，或者是环境时变速度的动态影响。这一类因素来源于信道和使劲应用场景，随着通信网络 and 用户需求进一步变化，多样化的需求会进一步增加，传输可靠性的影响因素也会进一步扩展，就会不断产生新问题并催生新的解决技术。

（二）兼容性问题

无线通信物理层波形设计，既需要考虑面向下一代通信系统新业务、新需求的设计原则，又需要考虑与现有通信体系的兼容性以及业务的继承性。

（三）内生安全问题

传统移动通信网络缺乏安全内生的设计，未来的网络对于安全问题的需求进一步加强，如何在增加新的体制和波形下，提升空口传输的内在安全，自主识别风险和入侵预警，在于物理层信号的多样化下，将有明确的新技术和手段的研究需求。

（四）通用标准化问题

在现有的通信体制中，标准是多样化的，不同网络标准不同，例如地面蜂窝、星地卫星、自组织网络。从网络发展看，每种标准都有

基础硬件和软件平台的制约。发展过程也经历了硬件多样化过渡到SDR定义的硬件通用化、软件多样化的过程，未来很可能向着软件通用化、参数多样化的方向发展，并制定通用化的标准体系，通过一个标准体系内的参数集合，实现匹配系统业务和实际环境。以现有系统为例，可以示意如图18。

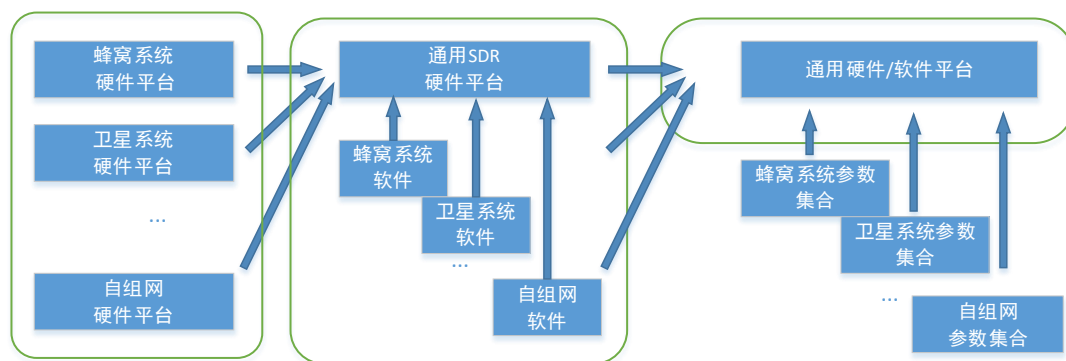


图18 标准化演进示意图

图中可以看到，多个系统从多种硬件平台标准和多个软件协议标准，演化为统一的SDR平台标准和不同协议标准，未来很可能是SDR的通用平台加上通用协议软件的整体框架，仅仅调整不同的参数集，既可以无缝隙的实现多种体制多种架构的连续过渡，实现传输与信道和环境的有效匹配。

（五）人工智能与物理层波形技术融合问题

近年来，人工智能（Artificial Intelligence, AI）技术迅速发展，已在多个领域取得了丰硕成果。AI算法具有出色的学习能力和泛化能力，应用于信道估计、信道编码和信号检测等方面，可以有效提高通信能力。此外，AI算法还可以在物理层的各个模块间实现联合优化。人工智能的快速发展为无线通信系统的设计提供了新的视角。AI技术在难以用具体数学模型描述的复杂通信场景中具有明显优势，减少了在通信系统设计方面对数学模型的依赖。然而，一方面，人工智能技术的实现效果是难以预知的，考虑到复杂的环境、多变的无线信道可

能产生不可预知的影响，且神经网络的设计理论尚不完善，人工智能技术难以保证无线通信的鲁棒性和实时性。另一方面，人工智能的成功很大程度上要归功于海量数据。然而在实际的无线通信应用场景中，很难获得足够大的数据量支撑AI算法的实现，计算资源和存储资源都会受到不同程度的限制。不仅如此，如何将人工神经网络集成到无线通信网络的体系结构中，也是待克服的问题。因此，将AI技术应用至通信系统中仍有较多的挑战和待解决的难题。

（六）其他工程挑战

针对物理层波形体制和信道环境的匹配，还会涉及较多的制程技术与工程实现方法的调整，例如在OFDM体制发展中的同步方法、频偏补偿等细节实现技术，在工程实现上是保证取得优化性能的具体支撑，而传统的信道补偿等方法，例如均衡技术也会有不同演进和变化。从现有系统发展看，每个不同体制实现中都对同一类问题的实现提出不同的修改，这些改进是支撑工程实现的多方面保障。

六、政策建议（技术政策建议、产业政策建议）

从移动通信的发展看，未来为了实现新技术的赶超和完全自主、独立可控，需要在技术研究层面开展：（1）物理层传输新机理的理论研究，突破时频等传统因素的限制，促进理论和机理的创新探索；（2）在技术转化上，鼓励兼容平滑过渡，并支持不同技术之间的一体化框架设计，融合SDR架构和参数多样化，软硬平台一体化的融合技术；（3）产业上，以6G为方向，鼓励多种空口平滑融合的演示验证系统的产业转化储备和验证。

中国通信学会

地址：北京市海淀区万寿路 27 号院 8 号楼

邮政编码：100840

联系电话：010-68203021

传真：010-68203004

网址：<https://www.china-cic.cn/>

