

mMIMO 毫米波高速通信系统强鲁棒性 技术研究综述

李松亭, 陈利虎

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: mMIMO 毫米波高速通信系统是未来人类社会构建更好通信体验的关键基础. 受限于集成电路制造过程中存在的较大随机偏差和失配, 弱鲁棒性问题成为制约高速通信系统规模化推广应用的主要瓶颈. 本文深入挖掘影响 mMIMO 毫米波高速通信系统性能的关键因素, 并对收发链路 I/Q 失配校准、数/模混合波束合成收发链路多通道幅相失配校准、发射阵列非线性失真补偿等算法进行归纳和总结, 为未来构建沉浸化、智慧化、全域化的高速通信场景提供坚实技术支持.

关键词: mMIMO 毫米波高速通信; 鲁棒性; 收发链路 I/Q 失配校准; 收发链路多通道幅相失配校准; 发射阵列功率放大器非线性失真校准

基金项目: 国家自然科学基金(No.61804182)

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)12-3643-13

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230789

A Review of the Robust Technology of mMIMO Millimeter-Wave High-Speed Communication System

LI Song-ting, CHEN Li-hu

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: mMIMO millimeter-wave high-speed communication system is the key foundation for the better communication experience in future human society. Limited by the large random deviation and mismatch in the manufacturing process of integrated circuits, weak robustness has become the main bottleneck restricting the large-scale promotion and application of high-speed communication systems. This paper deeply explores the key factors affecting the performance of mMIMO millimeter-wave high-speed communication system, and summarizes the algorithms such as I/Q mismatch calibration of transceiver link, multi-channel amplitude and phase mismatch calibration of digital/analog hybrid beamforming transceiver link, and nonlinear distortion compensation of transmit array, so as to provide technical support for the construction of immersive, intelligent and global high-speed communication scenarios in the future.

Key words: mMIMO millimeter-wave high-speed communication; robustness; I/Q mismatch calibration; multichannel amplitude phase mismatch calibration; transmission array power amplifier nonlinear distortion calibration

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61804182)

1 引言

人类科技的发展持续提出对更极致的信息传输需求, 该主观刚性需求力争突破时间、地域、气候等客观条件的限制, 是推动通信技术迭代发展的内生动力. 移动通信的发展历程就是人类追求极致信息体验的最好佐证. 5G 的规模化商用逐步带动了远程精准医疗、工业控制、车联网、自动驾驶、虚拟现实、数字孪生等高速

通信(或者海量数据需求)应用场景的蓬勃发展, 6G 更是将天地一体化高速互联通信作为预研目标构建沉浸化、智慧化、全域化的极致通信体验. SpaceX 的巨型系统“星链”以及我国在建的“星网”是其中最具代表性的两个天地协同高速通信卫星网络. 从军事应用的角度来看, 未来的战场必将涉及更多的信息战、电子战, 这需要对海量的情报信息在空地、星地等各个作战平台之间进行实时传输, 因此更加快速、可靠的数据传输将

为战争制胜提供重要保证。

极致的信息体验依赖信息的高速传输。传统的 Sub-6 GHz 频谱资源严重拥挤,导致紧张的频谱资源与极致通信的需求之间存在显著的矛盾,这使载波聚合技术以及各种高阶调制方式逐渐被规模化应用,但这种方式也会极大地增加接收机的复杂度。同时,拥挤的低频段无线应用还会导致临近频谱的相互干扰,严重限制接收机的性能提升。为了克服低频段无线应用存在的固有局限,未来的高速无线通信势必会向更高的毫米波段演进。

毫米波段覆盖范围高达上百 GHz,待开发利用的频谱资源非常丰富且世界范围内功能区间分配统一,这为开发高速通用无线应用协议和系统提供了极为便利的条件。同时,在 28 nm 互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺条件下,作为无线通信支撑载体的集成电路技术的截至频率已经突破了 300 GHz(14 nm 以下的鳍式或者环栅工艺由于寄生电容的增加导致晶体管的高频性能被严重恶化),为毫米波集成电路的规模化推广应用奠定了坚实的物理基础。

先进工艺节点是毫米波集成电路设计实现的必要条件,也是产品小型化、低功耗、低成本的必然选择。但是基于先进工艺节点实现的集成电路性能参数对工艺偏差、温度/电压波动非常敏感(晶体管关键参数随机偏差在 28 nm CMOS 工艺下可达 5σ , σ 为标准高斯分布的方差; 100 °C 的温度波动可以导致晶体管关键参数偏差超过 15%; 有限的电源抑制比会将电源电压波动直接反映至电路输出端),极易导致收发链路中的各种失配问题,因此毫米波集成电路规模化使用面临的首要问题就是鲁棒性提升问题。为了进一步降低功耗,毫米波集成电路接收和发射架构通常采用零中频架构。先进工艺节点下集成器件较大的随机偏差以及高度的频率依赖性使得收发链路的正交失配(In-phase and Quadrature mismatch, I/Q 失配)现象相较于窄带通信链路更加严重和复杂,往往导致接收或者发射信号的星座图出现明显的分散和旋转特性,如图 1 所示(正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)通信系统,64 正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM),幅相失配均匀分布),恶化误差向量幅度(Error Vector Magnitude, EVM),极大增加解调的误码率。

大规模多人多出(massive Multiple Input Multiple Output, mMIMO)相控阵技术是毫米波通信系统规模化应用的核心支撑技术。随着通信速率的进一步提升,在功耗敏感的消费级领域或者各种终端/基站/卫星平台领域,必须通过收窄天线波束换取增益的形式补偿降低的信噪比(通过天线增益的提升补偿通信速率的增加导致的带内噪声功率增加)。而天线波束的收窄对应

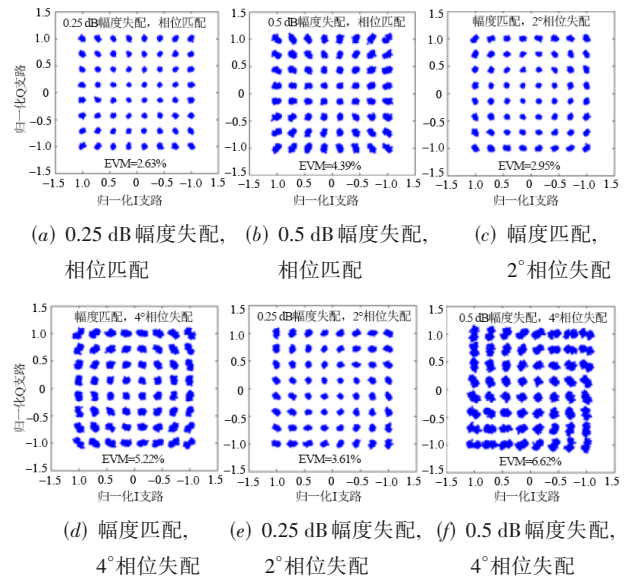


图1 不同I/Q失配条件下OFDM通信系统星座图(64QAM)

着天线阵列单元数量的增加,为了确保同时覆盖的终端数量,还必须相应增加波束的数量。因此仅依靠单一的模拟波束合成方法已经无法满足覆盖的容量需求。4G, 5G(sub-6 GHz)通信中已经规模使用的数字波束合成方法需要的毫米波收发通道数量过于庞大,导致设计复杂度、多波束实现消耗的硬件资源和功耗均会明显增加。而混合波束合成技术结合两者各自的优势,通过将阵列天线划分为多个子阵,每个子阵内天线单元进行模拟波束合成,子阵与子阵之间通过连接相应的收发链路进行数字波束合成,从而保证成本、功耗、复杂度与覆盖范围和覆盖距离之间的折中。混合波束合成中的多通道收发链路由于器件参数的失配同样面临严重的幅相不匹配问题,导致波束合成产生明显的前向波束畸变(导致指向和增益的改变)及侧向旁瓣畸变,如图 2 所示(幅相失配均匀分布)。同时高速通信下的大带宽使得前/侧/后向的各种非线性效应呈现典型的频率分布特性,导致波束呈现较大的交叠区域或者盲区,降低链路通信性能并最终影响接入用户容量。

另外,频谱资源的节制使用原则使通信频段即使位于毫米波,也必须采用高阶调制方式最大限度地折中频谱资源使用效率与收发机复杂度之间的矛盾^[1],同时低阶调制在高速通信下的大带宽通常对收发机中诸如滤波器、模数/数模转换器的设计提出严苛的挑战。但是高阶调制存在明显的峰均比,对功率放大器(Power Amplifier, PA)的线性性能要求非常高。尤其是在高速通信场景下,典型的宽带 PA 通常具有明显的非线性效应和深度记忆效应,致使其存在严重的幅度调制/幅度调制(AM/AM)、幅度调制/相位调制(AM/PM)发散性畸变效应,如图 3 所示^[2],极易导致严重的频谱增

生效应以及有效频谱的失真. 通常采用功率回退的方式确保其高线性,对于 OFDM 通信系统中的 64QAM 调制方式而言,采用简化 Volterra 级数建模的 PA 至少需要回退 10 dB,如图 4 所示,极大地限制了 PA 的功率转换效率. 考虑到 mMIMO 毫米波通信系统的集成紧凑性,在保持发射功率不变的情况下,低转换效率下的散热问题也会导致整个系统无法正常工作. 数字预失真(Digital Predistortion, DPD)技术是目前唯一可以同时保持 PA 高线性性能以及高转换效率的有效手段,采用 DPD 补偿后的幅相,畸变效应会减弱很多,而转换效率基本不受影响,这已经成为高速通信 PA 线性化的主流技术.

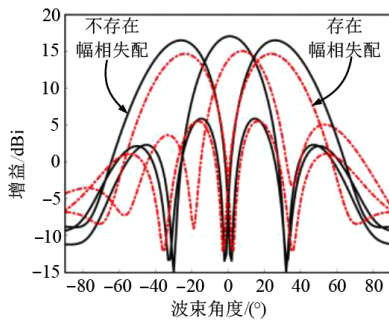


图2 多通道幅相失配导致的波束合成性能恶化 (增益失配 15 dB、相位失配 60°)

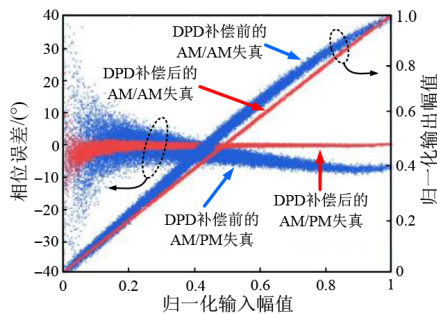
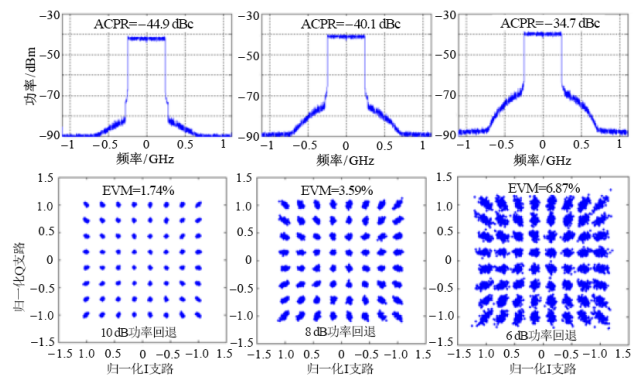


图3 宽带功率放大器非线性效应(40 MHz 通带带宽)

另外,高阶调制方式对收发链路的 EVM 性能要求也非常严苛(例如 BPSK 调制方式正常解调需要的 EVM 不能超过 30%, 256QAM 则为 3.5%),而 EVM 性能直接关联收发链路的星座图是否旋转、偏移或者发散,即 EVM 同样与链路的失配性能密切相关.

从需求、可实现性以及成本三个角度来考虑,基于混合波束合成的毫米波通信是未来一段时间内高速通信的首要选择. 该技术在基站端、星载端以及用户终端的规模化推广和应用必须以毫米波集成电路为载体. 因此除了保证基本的电路模块设计工作之外,还必须克服弱鲁棒性问题,否则会严重限制其极致性能的发挥. 毫米波集成电路的鲁棒性问题涉及的范围非常广泛,共计约 10 种诱发机制可以降低其鲁棒性进而约束使用范围和场景^[3]. 大多数诱发机制,例如

直流偏移校准、滤波器带宽校准、发射/本振泄露校准、频率综合器自动频率校准、频率综合器稳定性校准等,均不存在频率依赖性,同时不受 mMIMO 场景约束,具有高效的物理可实现方法. 但是在高速通信、mMIMO 混合波束合成条件下, I/Q 失配、PA 的非线性特性会呈现非常明显的频率依赖性. 考虑到数字和模拟波束合成中的多通道要求,通道之间的幅相失配及其失配频率依赖性也必须加以考虑. 另外,混合波束合成条件下 PA 的 DPD 补偿机制也与单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)应用场景下具有较大的不同,与合成波束具有强相关性,是一个新的研究课题.



(a) 10 dB 功率回退 (b) 8 dB 功率回退 (c) 6 dB 功率回退

图4 不同功率回退条件下功率放大器输出频谱及相应星座图

需要特别关注的问题是,未来 5G/6G 通信为了满足更高的通信速率需求,即使采用高阶的调制方式,系统带通带宽通常也在 500 MHz 以上. 受限于半导体工艺的发展水平,对时钟频率有较高要求的传统串行调制解调方式很难得到进一步应用. 可以预见的是,并行调制解调必将在未来的毫米波通信场景中占据主导地位. 因此研究并行调制解调下毫米波通信系统的强鲁棒性补偿技术也是一个亟待开展的课题.

综上所述,能够满足高速通信场景的强鲁棒性毫米波通信系统是未来极致通信体验的核心需求. 在电路模块设计方面,基于国内外前期的大量研究,每个电路模块基本都有成熟的方案可供选择,尤其是近几年国内在毫米波集成电路收发链路设计方面的研究已经走在了国际前列. 但是收发链路鲁棒性问题尤其是 mMIMO 高速通信混合波束合成应用场景下通信系统的鲁棒性问题仍是亟待解决的关键问题,如图 5 所示,重点需要关注以下三个方面:

- (1) mMIMO 混合波束合成毫米波高速通信场景下收发链路 I/Q 失配校准;
- (2) mMIMO 混合波束合成毫米波高速通信场景下多通道收发链路幅相失配校准;
- (3) mMIMO 混合波束合成毫米波高速通信场景下

功率放大器数字预失真补偿。

收发链路 I/Q 失配校准、多通道收发链路幅相失配校准以及功率放大器数字预失真补偿均需要考虑频率和波束依赖性,这对校准所用的信号产生机制、失配校准算法、补偿系数生成及补偿机制等均提出了严峻的挑战。同时还必须考虑并行调制解调下各校准算法的优化与改进、多种校准机制并存情况下的硬件资源复用以及最优化校准流程设计等。

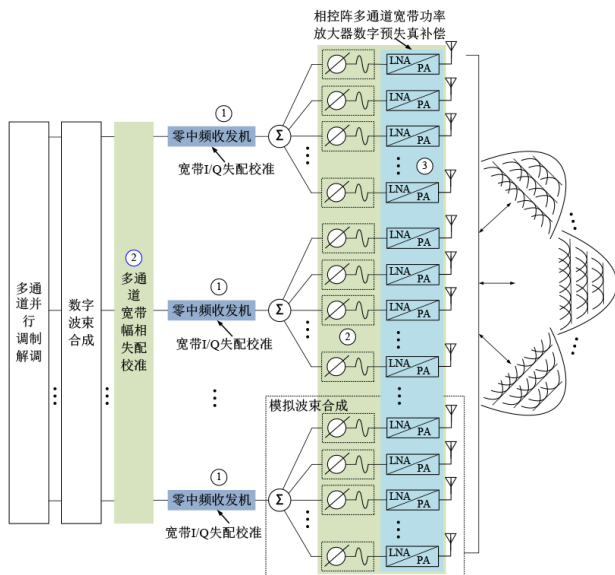


图5 mMIMO混合波束合成毫米波通信系统架构及强鲁棒性技术

2 研究现状

近几年,适用于5G/6G高速通信领域的毫米波集成电路呈现极其快速的发展态势,尤其是毫米波收发链路领域^[4,5],包括前端支持多天线的模拟移相合成芯片^[6,7],已经逐渐趋于成熟化。数字/模拟/混合波束合成算法等支持多波束或者动态波束扫描高速相控阵应用场景的技术体系也日臻完善,为毫米波高速通信的规模化应用提供了坚实的技术基础。但是mMIMO高速通信条件下严重恶化通信性能的弱鲁棒性问题仍亟待解决。

2.1 mMIMO高速通信混合波束场景下收发链路 I/Q 失配问题

受制造工艺及外部环境因素的影响,在典型模拟零中频架构或者低中频架构中,I/Q失配所引入的镜像干扰会导致信号星座图的旋转、偏移以及发散,增加系统EVM,降低解调性能,因此收发链路的I/Q失配补偿是设计高性能收发机的关键技术。近几年,随着数模转换器(Analog to Digital Converter, ADC)采样速率以及先进工艺节点下晶体管工作速度的逐渐提升,服务于高速通信的全数字接收机得以实现,其中最具代表性的

产品为浙江城芯科技的CX8242系列数字零中频接收机芯片^[8]。该系列接收机具有极高的I/Q匹配性能,但是受限于前置ADC的采样速率,该系列接收机仅能工作在sub-6 GHz的工作频段,无法满足毫米波段的通信需求。另外,基于数字PA的全数字发射机也得到了广泛应用^[9],但是由于存在数字相位插值器等模拟器件,数字发射机同样存在一定程度的I/Q失配现象,且数字发射机通常需要集成多个数字PA,设计复杂度有所提升,同时基带中的内插操作对基带工作时钟频率的需求更高,同样无法适用于毫米波段的通信场景。

为了进一步缓解对运算放大器增益带宽积的高要求,模拟零中频架构目前仍是高速通信系统的最优选择方案。针对模拟零中频架构的I/Q失配补偿问题,现阶段的研究涉及的领域广泛而深入。

(1)在收发链路方面,单发射链路校准^[10-12]、单接收链路校准^[13-16]以及收发链路分时^[17]或者同时^[18]校准机制已经较为成熟。发射链路的校准通常需要借助接收回环链路进行辅助。收发链路分时校准首先通过内置信号源电路对接收链路进行I/Q失配校准,然后通过收发链路回环连接的形式对发射链路进行校准。为了进一步加快校准速度,利用I/Q失配能够引入镜像信号的原理,采用多个不同频率的单音信号或者设置不同的收发本振频率在频域上对收发链路的镜像信号进行区分,可以同时收发链路进行校准。

(2)在校准算法域,I/Q失配估计及补偿均在数字域进行的全数字域校准^[10-13,19-21]、基于优化混频电路结构的全模拟校准^[14]以及失配估计在数字域、补偿在模拟域的数模混合校准方法^[22,23]被提出并设计实现。

(3)在频率适应性方面,重点关注窄带通信校准^[20-23]和宽带通信校准^[10-13,15-19]两个领域。窄带校准不考虑I/Q失配的频率相关性,将估计出的幅相失配误差反馈至数字域或者模拟域进行单点补偿。但是I/Q通路中运算放大器有限增益带宽积的随机偏差会引入I/Q失配的频率相关性,在宽带通信中必须考虑。宽带校准将估计出的幅相失配误差序列反馈至数字域进行多点FIR滤波补偿,具体实现方法包括自适应算法估计法^[10-12]、频域估计法^[13,15]等。宽带通信校准中多点FIR滤波补偿的一般性工作原理如图6所示,具体工作原理如下。①复用1路发射链路,并通过直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)产生全频段覆盖的多信号作为校准用基带音输入信号,其中多音信号的数量与补偿频率精度及后续的IFFT点数直接相关。为了避免发射链路本身存在的I/Q失配引入的镜像谱线造成补偿性能降级,将复用发射链路正交基带输入端仅保留I或者Q支路而另一支路置0;②频域失配参数估计。将复用发射链路的输出信号分别送入多通道

接收链路中,每个接收链路输出端分别对应一个时分多通道(通过 DDS 将多音信号中的每一路下变频至零中频),分别将每个多音信号对应的 I/Q 幅相失配量通过与一个理想正交参考信号比对进行 I/Q 失配在单频点上的预估. ③时域失配参数估计. 完成了多音信号对应的 I/Q 失配估计后即可得到对应接收链路 I/Q 失配量的幅相谱,经过 IFFT 后得到相应的时域冲击响应. ④宽带 I/Q 失配补偿. 上述冲击响应即为对应接收链路 I/Q 失配补偿模块的系统冲击响应,通过 FIR 滤波器的形式即可在时域进行实现.

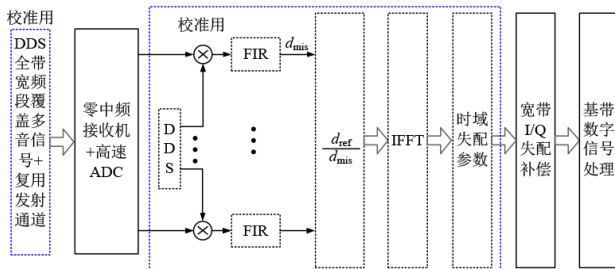


图6 单通道接收链路 I/Q 失配校准^[10-13]

(4)在校准方式上,存在上电后一次性校准^[10,13,19,23]和自适应校准^[11,14,21,24]两种典型的校准方法. 一次性校准上电后通过 I/Q 失配估计提供收发链路基带补偿参数,不具备动态补偿效果. 自适应校准通常采用基于最优梯度下降法的最小均方误差(Least Mean Square error, LMS)算法进行自适应 I/Q 失配补偿,动态跟踪性能较好. 但是自适应校准要求算法对输入信号的适配性较好. 对于发射通路校准,必须占用一路专用的回环接收链路,复杂度较高,同时也不适用于短突发信号.

(5)在校准用数据源上,通常采用预输入数据^[10,13,23,25]或者通信信号源^[21]两种方式. 预输入数据包括多种样式,例如白噪声^[23]、单音/多音信号^[13,25]或者调制类信号^[10]等. 而采用通信信号源作为校准源适用于盲估计算法,对校准算法的调制类型适用性要求较高.

(6)在应用场景方面,大多数校准方法均针对单天线单波束(即 SISO 系统)应用场景^[22-25]. 近几年逐渐有研究成果涵盖多天线多波束领域(即 mMIMO 系统)^[26-28],采用全 MIMO 校准体制,对多通道收发链路的 I/Q 失配性能进行强相关性估计并补偿.

但是针对未来毫米波高速通信应用场景,混合波束相控阵多通道收发机在 I/Q 失配校准问题上面临新的更加严峻的问题.

(1)受限于可用工艺节点的最大开关速度,传统的串行调制解调很难突破 100 Mbps 的信号码速率. 在未来 5G/6G 更高速通信需求背景下,传统的串行调制解调

必须向支持更高码速率的并行调制解调演变. 但是目前已有的研究成果并没有涉及针对并行调制解调的收发链路 I/Q 失配校准技术. 可以采用如图 7 所示的针对并行调制解调的收发链路 I/Q 失配校准技术,其具体工作原理与串行解调相似,不同的是解调链路中存在 Serdes 串并转换结构实现串行信号流的并行处理,并引入并行流水线结构实现 FFT 模块的并行点数与并行解调路数之间的一致性.

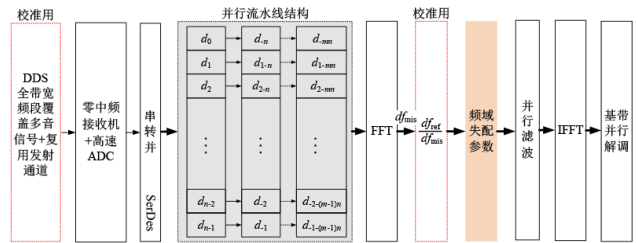


图7 并行解调情况下单通道 I/Q 失配校准

(2)混合波束相控阵收发机中包含多通道收发机用于数字波束合成,而目前已有的研究成果多数仅针对单个收发通路 I/Q 之间的失配,没有提供针对多通道之间的相对失配补偿,会大大影响波束合成性能. 近几年虽有相关文献涉及多通道 I/Q 失配的校准问题,但是均只针对接收机,且采用全 MIMO 校准体制,多通道耦合性过强,导致校准参数过于庞杂,矩阵运算量过大,复杂程度较高,多数不具备物理可实现性. 因此需要采用简单易用的解耦方法降低多通道(包括接收机和发射机)I/Q 失配补偿复杂度,在保证物理可实现的同时提升波束合成质量.

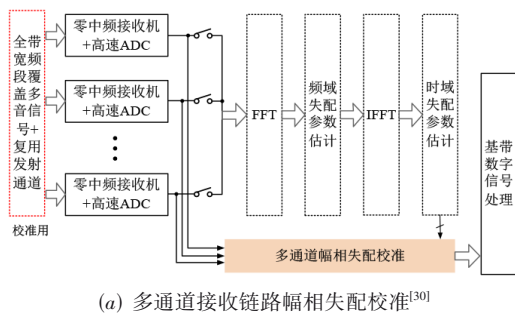
(3)目前已有的 I/Q 失配校准方法针对的校准环境较为单一,即使涉及 mMIMO 相控阵应用场景,也仅仅考虑到单一的鲁棒性加强方式,并没有综合考虑整个电路结构中与其他校准算法资源优化整合的问题,专用性强,适用性差,尤其是本文重点针对的高速通信混合波束相控阵场景.

2.2 mMIMO 高速通信混合波束场景下多通道收发链路幅相失配问题

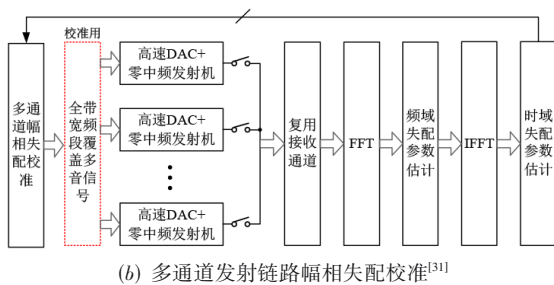
多通道收发链路的幅相失配会导致严重的波束畸变问题. 混合波束合成条件下,多通道的幅相失配校准针对两部分:一部分是用于数字波束合成的多通道收发链路^[29-34];另一部分是用于模拟波束合成的多通道移相器^[35,36].

目前多通道收发链路的幅相失配校准主要采用无线校准方式,多数用于全数字波束合成相控阵通信系统中,分为远场校准和近场校准两种. 远场校准通常采用两种典型的校准方法:一种是任意选择其中的一路收发链路作为参考链路,在远场发射源或者接收链路的辅助下,其他收发链路分别与参考链路进行幅相失

配误差估计并补偿,误差估计方式可以采用直接比较法^[30-32]或者基于LMS算法的矩阵运算^[34],如图8所示;另一种是采用波束合成的形式^[33],即改变校准链路的相位值直至校准链路和参考链路的合成波束出现最大功率值,此相位值即需要补偿的相位值,但是无法对幅度失配进行校准.近场校准的校准装置相较于远场校准更加简单,但是在进行多通道收发链路的校准估计和补偿前,需要首先校准近场天线与各天线阵元之间的位置误差,校准流程较复杂^[37].



(a) 多通道接收链路幅相失配校准^[30]



(b) 多通道发射链路幅相失配校准^[31]

图8 多通道收发链路幅相失配校准

多通道移相器的幅相失配校准存在无线校准^[35]和有线传导校准^[36]两种方式.无线校准方式以波束合成校准为主,同时需要用户终端在通信前发送校准用导频信号,通信过程及实现方式均比较复杂.有线传导方式通过耦合器分别对连接天线阵元的移相器注入校准信号,通过调整数控移相器的相位及可变增益放大器的增益确保校准链路与参考链路之间的幅相平衡,但是需要移相器和可变增益放大器的调整分辨率非常高,设计及实现成本高昂,较难规模化推广应用.

多通道幅相失配校准是伴随着对高性能相控阵技术的需求逐渐发展起来的,但是在mMIMO毫米波通信的应用背景下,面向混合波束合成,仍有多个关键技术问题需要解决.

(1)目前并没有相关研究成果能够对混合波束合成条件下的系统性多通道失配校准进行详细的研究,多数校准算法仅集中在全数字波束合成或者全模拟波

束合成,如何将两者进行有机的融合以满足混合波束合成条件下的高性能相控阵系统需求是一个亟待解决的问题.

(2)多通道幅相失配涉及收发两个通信链路,目前的多数研究成果均是针对接收链路,涉及收发链路共存性校准的较少.后续应立足收发一体化,寻求收发共存性校准的最优化方案.

(3)目前的多通道幅相失配校准均是面向单一的应用场景,并未涉及系统性的鲁棒性提升.后续应立足多种应用场景及相应的性能提升,综合考虑系统软硬件优化,提出最优化幅相失配校准算法及具体的实现电路.

(4)对更高通信速率的功能性覆盖是未来5G/6G通信的必然因素之一,支持并行调制解调的多通道幅相失配校准也是后续需要研究的关键技术之一.支持并行调制解调的多通道收发幅相失配校准可以在图8的基础上基于SerDes高速串并转换接口进行实现,分别如图9和图10所示.

2.3 mMIMO高速通信混合波束场景下功率放大器非线性失真问题

PA的非线性化是制约通信电路鲁棒性能提升的关键因素,尤其是在高速高阶调制的毫米波通信场景中.功率回退的方式会明显降低PA的功率转换效率,在mMIMO毫米波通信中如果保持发射功率不变通信系统的功耗,则会极大地增加,得不偿失.为了在较高效率的情况下减小失真的存在,包络跟踪PA^[38]、class-F PA^[39]、class-G PA^[40]、LINC PA^[41]、多合体(Doherty)PA^[42,43]、Class-G+Doherty混合PA^[44]结构分别被提了出来,但是上述结构仅从PA本身的构造出发,为了保证较高的增益及转换效率,仍无法有效遏制PA线性性能的恶化.预失真技术是目前唯一一种高效的且可以同时兼顾转换效率和线性性能的校准方法,随着5G/6G通信在毫米波方向的拓展和布局,更加成为前沿性的技术研究热点.预失真技术分为模拟预失真(Analog Pre-Distortion, APD)^[45,46]与数字预失真(DPD)两种,但是APD技术需要集成较多的无源非线性器件,面积较大,且受工艺以及环境因素影响较大,通常较少使用.

下面主要从PA行为模型、DPD学习结构、DPD参数辨识方法、DPD补偿模型以及DPD应用场景五个方面对DPD技术进行研究现状分析,深挖目前已有技术在mMIMO毫米波通信场景下的局限性,并提出改进目标.

PA的行为模型包含无记忆行为模型和有记忆行为模型两种^[3].PA的记忆行为表现为电路中电容/电感元件的频率敏感性引入的AM/PM失真.在窄带通信情况下,电容/电感元件的频率敏感性会大大降低,PA的行

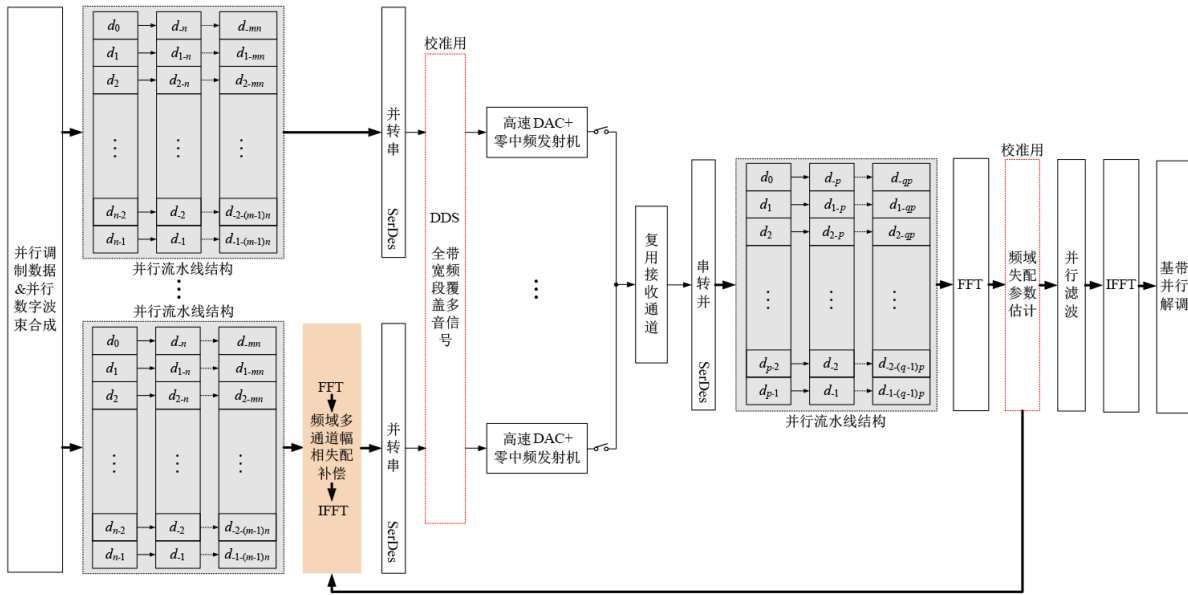


图9 支持并行调制解调的多通道发射链路幅相失配校准

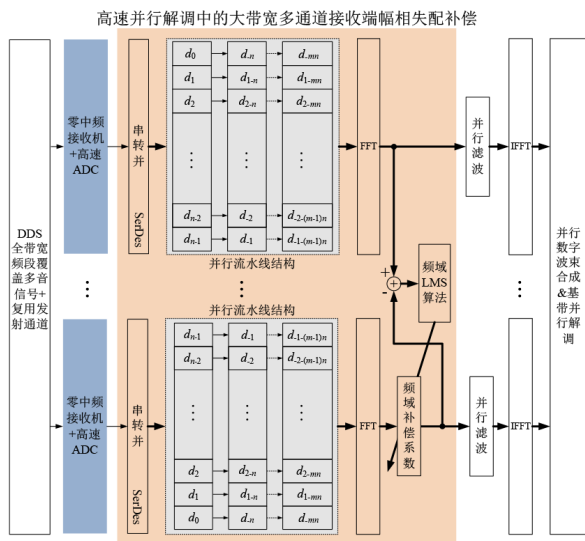


图10 支持并行调制解调的多通道接收链路幅相失配校准

为模型可近似采用无记忆行为模型等效。常用的无记忆行为模型有 Saleh 模型、Rapp 模型、Ghorbani 模型、幂级数模型等。而对于宽带通信系统或者多载波通信系统,常用的有记忆行为模型为 Volterra 级数模型、Wiener 模型、Hammerstein 模型、Wiener-Hammerstein 模型、并联 Hammerstein 模型、并联 Wiener 模型、神经网络模型等。相较于其他有记忆模型,Volterra 级数模型可以方便地将 PA 的非线性和记忆特性结合在一起,能够精准地对 PA 进行建模。但是随着非线性阶次及记忆深度的增加,需要计算的参数量也会迅速增加,很难直接用于高阶有记忆效应的 DPD 的设计中,在大多数设计中通常均采用简化后的基于 Volterra 级数模型的记忆多项式模型^[47-64]对 PA 进行近似建模。

DPD 的学习结构包括直接学习结构^[53,54,56,58,61]、间接学习结构^[47,48,50]、改进型直接学习结构^[51]三种。直接学习结构通过求取功放的前逆对 PA 的非线性进行补偿,但由于预失真器的输出直接影响 PA 的输出,因此是一个闭环反馈系统,存在稳定性问题。如果采用的 DPD 参数辨识方法不收敛或者遇到外界的干扰,可能直接导致系统的非正常工作。而间接学习结构通过增加一个学习器求取 PA 的后逆,再将通过辨识算法计算出的后逆参数送至预失真器来补偿 PA 的非线性,将学习过程开环化,避免了稳定性问题。间接学习结构对大部分 PA 均是成立的,目前的商用化数字预失真器中大多采用此类结构。但是对于部分较复杂的 PA 模型,其后逆与前逆并不一定相等,因此会引入部分补偿误差,同时 PA 中产生的噪声也会导致学习器的收敛值部分偏离预期。而改进型直接学习结构兼顾直接学习结构和间接学习结构的优点,首先求取 PA 模型,再通过求逆运算将预失真器等效为 PA 的前逆,但是求逆运算计算量往往较大。

典型的 DPD 参数辨识方法包括 LMS 算法^[54-64]、递归最小二乘算法 (Recursive Least Squares, RLS)^[65]以及基于深度学习的神经网络参数训练^[66-68]三种。由于 LMS 算法涉及期望值的求解,因此要求输入的信号必须具备广义平稳特性。而 RLS 算法则无此要求,且 RLS 收敛速度快,不存在稳态误差,辨识性能更高。但是由于 RLS 算法涉及矩阵乘法及向量除法运算,消耗的资源量是非常巨大的,目前工程实现中多数仍采用 LMS 算法。考虑到神经网络强大的非线性学习能力,基于深度神经网络的宽带 DPD 算法也在近几年被广泛应用于 PA 的非线性补偿。虽然可以确保 PA 获得优良的线性

性能进一步提升发射效率,但是神经网络的训练过程涉及大量长时的计算和海量的训练数据,因此通常通过基于第三方平台的线下训练方式生成神经网络神经元之间的权重值,并将权重值重新写入DPD补偿神经网络中的权重存储器^[69],这一过程严重限制了此算法的规模化使用.同时为了进一步增加神经网络针对不同功放的适用性,还需要对不同PA类型进行实际数据采样或者高精度建模以便于向第三方平台提供训练数据,进一步加剧了该方法的使用复杂度.

DPD补偿模型包括查找表结构^[3]和矩阵多项式结构^[65]两种.查找表结构又包括映射查找表、复增益查找表^[47]以及极坐标查找表结构.其中映射查找表的补偿速度最快,且需要的资源量最小,但是其通常适用于无记忆PA模型,无法校准PA的AM/PM失真.根据PA是否采用记忆模型,复增益查找表还可分为无记忆查找表和有记忆查找表两类.查找表结构是一种静态DPD机制,通常在上电复位后完成校准并将补偿参数写入查找表.而矩阵多项式结构是一种动态DPD机制,可以根据实时的输入与输出信号动态调整预失真器内的矩阵多项式参数值,跟踪性能优良,但是消耗的计算资源、补偿时长、功耗等均较高.

DPD应用场景包括SISO^[47-53]和MIMO^[55-64]两种.在高速通信背景下,现阶段针对SISO的研究多数集中在不降低DPD补偿精度且尽可能降低反馈链路的ADC采样速率的问题上.基本原则是保证PA的下变频采样输出与发射链路的基带信号采样在频谱上的一致性.典型算法有如下4种.

(1)PA输出端与发射链路基带输入端分别集成基带传输函数一致的模拟域带通滤波器和数字域低通滤波器.但是该方法存在两个问题:一是不同域滤波器的频率响应具有偏差;二是带通滤波器的带外抑制能力极有可能对PA发射信号的带外非线性成分造成明显的压制,DPD补偿性能会明显下降^[48].

(2)采用多音交叠采样的方式,保证在较窄的频带内同时存在PA输出信号的所有线性及非线性频谱信号,以降低反馈链路ADC的采样率.同时输入信号需要做相同的处理,为了保证信号之间的等效性,需要在反馈链路集成一个理想型的数字低通滤波器(通过FFT截断/IFFT实现),计算资源较大,训练时间较长^[50].

(3)采用多音本振信号和多个不同中心频率的窄带带通滤波器对PA输出信号进行频域切割,同时对发射链路的基带输入信号进行类似的操作.但是该方法会遗漏部分PA输出信号,建模精度与本振的多音分辨率和带通滤波器的数量直接相关,分辨率越高电路设计越复杂^[49].

(4)直接对PA输出和发射链路基带输入信号进行

欠采样.该方法最容易进行工程实现,但是由于缺少滤波器,采样后会存在较多的带外杂散,影响DPD的补偿精度^[52,53].

针对MIMO的研究主要集中在3个方面.

(1)数字波束合成.通常采用单PA DPD补偿的形式,每个PA均对应一个DPD模块,反馈链路可以采用分时复用形式逐一进行校准以节省硬件资源.

(2)模拟波束合成^[55-57].反馈链路针对合成波束进行DPD补偿,反馈链路中需要内置反波束合成链路模拟空间传输信道^[55],或者通过空间波束合成链路进行DPD补偿^[56,57].但是仅能针对固定的波束指向进行校准,动态性能较差.由于模拟相控阵仅提供瞬时单波束,因此仅需1路DPD.

(3)混合波束合成.混合波束合成存在部分连接^[58-62]和全连接^[63,64]两种结构.全连接结构中天线与射频通道完全连接,每个射频通道对应所有天线单元,同样针对合成波束进行DPD补偿,DPD数量与合成波束数相同.由于射频通道之间交调效应的存在,每个PA输出端均需要引出一个反馈链路进行反馈波束合成,在5G/6G海量天线阵元应用场景下,设计复杂度极高;且每个反馈链路之间的随机延迟误差还会恶化反馈波束合成性能,导致DPD补偿效果下降,在未来高速通信的应用场景下较难得到推广使用.而部分连接结构中天线与射频通道部分连接,每个射频通道对应一个天线子阵.由于射频通道之间不存在交调效应,因此混合波束合成与模拟波束合成的DPD方法类似,且DPD数量与射频通道数相同.为了降低反馈链路在进行反波束合成时模拟移相器引入的偏差,可以将该相位补偿放至数字域进行^[60],或者针对PA非线性模型逆模型的分时预估再分配不同的权重后进行DPD补偿.为了避免各支路相对相位误差,可以通过空间反馈链路进行相位误差补偿^[61].为了进一步降低反馈链路硬件复杂度,可以近似认为每个子帧中的PA模型是等效的,因此仅需要单支路反馈,不需要时分开关,不需要每个PA输出端均引出反馈线,极大减小天线阵元设计复杂度.同时建立PA高阶非线性共用模型,并根据每个PA输出幅度的大小建立每个PA的细分幅度非线性模型,组合后进行DPD估计,极大减小计算复杂度^[62].

DPD补偿算法从各种算法模型提出至今已经发展得较为成熟.在高速通信毫米波混合波束合成领域,也存在大量已有的研究成果较好地解决了很多实际问题,包括针对更高速通信的并行调制情况下的DPD补偿^[54],如图11所示.考虑到多路发射机各通道自身的I/Q失配会通过天线阵元在波束合成方向进行线性叠加,且在整个混合波束合成体系中数字合成与模拟合成增益及相位的改变均不会改变各通道的I/Q失配性

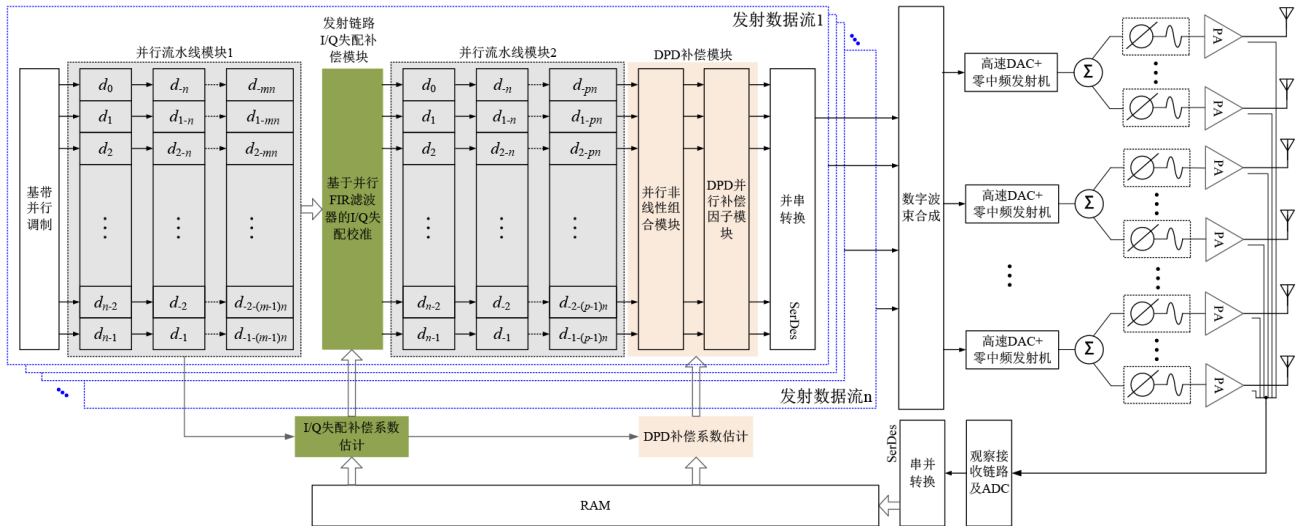


图 11 相控阵发射链路宽带 I/Q 失配校准以及功率放大器数字预失真补偿(部分连接混合波束合成结构)

能,因此多通道发射机的 I/Q 失配校准可以用一个补偿模块进行实现,且不受合成波束指向的影响,同时可以与 DPD 补偿电路共用硬件资源,大大降低设计复杂度。但是仍有几个关键问题需要解决:

(1) 目前已有的研究成果均是对主波束方向进行 DPD 补偿,没有考虑相位因素对旁瓣性能的影响,导致 DPD 补偿后的波束旁瓣出现明显恶化的情况,严重影响毫米波通信系统的抗干扰能力,降低了系统容量。后续需要在已有成果的基础上重点考虑加入相位制约因素,在不影响波束主瓣性能的基础上进一步优化旁瓣的 DPD 补偿性能。

(2) 目前存在的全反射链路(每个 PA 对应一条反射链路)导致系统硬件过于复杂,在高速毫米波应用场景下基本不具备实现的可能性。而基于子阵的稀疏波束反馈链路又不能充分考虑天线阵元之间的串扰和互扰现象,明显降低了波束的 DPD 补偿精度。后续应重点考虑进一步折中反馈颗粒度,引入阵元之间的各种扰动效应,并以波束 DPD 校准和最小计算量为出发点,提升混合波束合成毫米波发射机的线性性能。

(3) 模拟波束合成部分中,当天线阵元数为 4 时,移相器和 PA 的随机偏差导致的 ACPR 损失典型值在 4 dB 左右^[56]。可想而知,在 mMIMO 应用场景下,ACPR 损失值基本无法接受。而目前已有的研究成果均没有考虑此情况。后续应重点考虑各模拟波束合成通道的增益/相位误差补偿问题,在保证硬件复杂度可接受的情况下最优化波束合成网络通道中的匹配性能,确保 DPD 补偿算法能够发挥更高效的作用。

(4) 针对校准过程中的收发信号同步问题,目前典型的算法均是基于混合波束成形后的输出信号与基带输入信号进行对齐校准,需要反馈链路中加入反波束成形模块或者基带输入信号中加入基带波束成形模

块。当 mMIMO 天线规模比较庞大时,设计复杂度过高,计算量过大,较难在实际工程中进行实现。后续需要考虑更加简洁有效的信号同步方案,保证设计复杂度和计算量均在工程可实现的范围之内。

3 发展趋势

mMIMO 毫米波高速通信技术是未来 5G/6G 等高速通信系统规模化应用的基础支撑,但是弱鲁棒性问题导致的性能损失是限制其发挥应有效能的关键,后续应立足高性能 mMIMO 毫米波高速通信系统的强鲁棒性机理研究,并重点解决如下关键问题:

(1) 高速通信中信号的宽频属性与鲁棒性的关联关系及并行调制解调情况下的校准补偿机制。未来 5G/6G 等高速通信系统中,即使采用高阶调制方式,信号的通带带宽通常也会超过 500 MHz。由于当前工艺条件下电路模块有限的增益带宽积,各通信系统的失配参数会呈现严重的频率依赖性。应建立模块增益带宽积与失配参数之间的模拟曲线或者拟合方程定量描述高速通信信号的宽频属性与鲁棒性之间的关联关系,并基于此指导校准过程中输入多音校准信号(或者线性调频信号)的频率间隔、时频域转换周期点数以及并行调制解调中的流水线深度,建立针对高速通信的通用型支持并行调制解调的鲁棒性校准算法和补偿模型。

(2) mMIMO 混合波束合成条件下以波束合成为导向的校准补偿机制。mMIMO 混合波束合成技术是未来 5G/6G 等高速通信系统规模化应用的核心支撑。从典型的 SISO 系统中衍生出的校准算法已经严重受限于电路设计复杂度、软硬件资源占用率、功耗、成本等,无法适用于 mMIMO 相控阵系统。应以波束合成为导向,建立波束合成反馈参数与典型 SISO 系统反馈参数之间的

对应关系,充分考虑天线阵元耦合性互扰,优化反馈链路中波束合成机制,提出硬件资源最优化的并行调制 I/Q 失配校准模型、多通道幅相失配校准模型以及数字预失真补偿模型。

(3)混合波束合成收发链路一体化条件下各校准补偿机制最优化协同工作机理。混合波束合成收发链路一体化是实现未来 5G/6G 等高速通信系统高容量、低复杂度、低成本、小型化的必然需求。为了保证高质量通信业务的规模化开展,系统内部必须集成多种高效的校准机制。应针对多种校准机制在混合波束合成收发链路一体化场景下的有序功能发挥展开研究,充分考虑软硬件资源的可复用化、校准流程的最优化以及校准算法的高效简洁化,确保收发链路 I/Q 失配校准、多通道幅相失配校准、发射阵列数字预失真补偿三种校准机制的有效融合,提升波束合成性能,改善通信质量。

参考文献

- [1] YI Y, ZHAO D, ZHANG J, et al. A 24-29.5 GHz highly linear phased-array transceiver front-end in 65-nm CMOS supporting 800-MHz 64-QAM and 400-MHz 256-QAM for 5G new radio[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2022, 57(9): 2702-2718.
- [2] YU C, YANG N, LU Q, et al. High-precision joint in-band/out-of-band distortion compensation scheme for wideband RF power amplifier linearization[J]. *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, 2018, 28(11): 1044-1046.
- [3] 李松亭, 颜盾. 射频集成电路校准技术综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(11): 4058-4074.
LI S T, YAN D. An overview on calibration techniques for radio frequency integrated circuits[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(11): 4058-4074. (in Chinese)
- [4] ZHOU P, CHEN J, YAN P, et al. A -28.5 dBm EVM 64-QAM 45-GHz transceiver for IEEE 802.11aj[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, 56(10): 3077-3093.
- [5] 池保勇, 马凯学, 虞小鹏. 硅基毫米波集成电路与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 150-179.
- [6] KIBAROGLU K, SAYGINER M, REBEIZ G M. A low-cost scalable 32-element 28-GHz phased array transceiver for 5G communication links based on a 2×2 beamformer flip-chip unit cell[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(5): 1260-1274.
- [7] FAN C, RAN Y H, YE L Q. Ultra wideband CMOS digital T-type attenuator with low phase errors[J]. *Journal of Semiconductors*, 2022, 43(3): 032401.
- [8] 杭州城芯 CX8242K. CX8242K 2 路射频直采收发器数据手册[EB/OL]. (2022). <http://www.cxsemi.cn/product/detail?id=106>.
- [9] 廖怀林. 硅基射频集成电路和系统[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 161-173.
- [10] CHUNG A, REJEB M B, BELTAGY Y, et al. IQ imbalance compensation and digital predistortion for millimeter-wave transmitters using reduced sampling rate observations[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2018, 66(7): 3433-3442.
- [11] ALMONEER M, MITRAN P, BOUMAIZA S. I/Q imbalance compensation in wideband millimeter-wave transmitters using a single undersampling ADC[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2020, 67(8): 2730-2738.
- [12] DOAN N G, LIU H C, JEN C W, et al. Digital self-healing using smart sensing technique for IQ mismatch and LO leakage against non-flat path response in mmWave communication system[C]//*IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Seville: IEEE, 2020: 1-5.
- [13] GUAN S J, CAI D L, WU B. Estimation and correction of I/Q imbalance in wideband zero-IF receiver[C]//*International Conference on Information Technology and Computer Applications*. Guangzhou: IEEE, 2019: 50-54.
- [14] HAN J, KWON K. I/Q balance-enhanced wideband receiver front-end for 2G/3G/4G/5G NR cellular applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2020, 67(6): 1881-1891.
- [15] JIAN P, SHOTARO M, SEITAROU K, et al. 50.1-Gb/s 60-GHz CMOS transceiver for IEEE 802.11ay with calibration of LO feedthrough and I/Q imbalance[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(5): 1375-1385.
- [16] ROSOLOWSKI D W, KOPAS P. IQ-imbalance and DC-offset compensation in ultrawideband zero-IF receiver [C]//*International Microwave and Radar Conference*. Warsaw: IEEE, 2020: 209-212.
- [17] YE H, LI B, HUANG M, et al. A digital IQ imbalance self-calibration in FDD transceiver[C]//*International Symposium on VLSI Design, Automation and Test*. Hsinchu: IEEE, 2017: 1-4.
- [18] KHANDELWAL A, VERMA A. A novel gain, phase and offset calibration scheme for wideband direct-conversion transmitters[C]//*IEEE 81st Vehicular Technology Conference*. Glasgow: IEEE, 2015: 1-5.
- [19] ZHU Y, HALL C, SAYEED A. I-Q mismatch estimation and compensation in millimeter-wave wireless systems

- [C]//Global Symposium on Millimeter Waves. Boulder: IEEE, 2018: 1-7.
- [20] LIU H C, HUANG Z C, DOAN N G, et al. Joint digital online compensation of TX and RX time-varying I/Q mismatch and DC-offset in mmWave transceiver system[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2022, 69(2): 919-932.
- [21] PAIREDER T, MOTZ C C, KANUMALLI R S R S, et al. Ultra-low complex blind I/Q- imbalance compensation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2019, 66(9): 3517-3530.
- [22] ZHANG W, HE H, WANG R, A 2.0 GHz IQ imbalance compensator with programmable switch biases in a passive mixer[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2018, 65(8): 989-993.
- [23] LI S T, LI J C, GU X C, et al. Reconfigurable all-band RF CMOS transceiver for GPS/GLONASS/Galileo/Beidou with digitally assisted calibration[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2015, 23(9): 1814-1827.
- [24] KAWAI S, TTO R, NAKATA K, et al. An 802.11ax 4x4 high-efficiency WLAN AP transceiver SoC supporting 1024-QAM with frequency-dependent IQ calibration and integrated interference analyzer[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(12): 3688-3699.
- [25] SHUSUKE K, TOSHIYUKI Y, YOSUKE H, et al. A 1024-QAM capable WLAN receiver with -56.3 dB image rejection ratio using self-calibration technique[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Baltimore: IEEE, 2017: 1-4.
- [26] MAHENDRA R, MOHMED S K, MALLIK R K. Downlink multi-user hybrid beamforming systems with receiver IQ imbalance: Pre-compensation and performance analysis[J]. IEEE Communication Letters, 2022, 26(4): 927-931.
- [27] MAHENDRA R, MOHMED S K, MALLIK R K. Compensation of receiver IQ imbalance in mm-wave hybrid beamforming systems[C]//IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Victoria: IEEE, 2020: 1-6.
- [28] SUN J, LIANG Y, LI T, et al. Low-complexity calibration scheme of channel reciprocity for massive MIMO-OFDM system with IQ imbalance[C]//IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Istanbul: IEEE, 2019: 1-5.
- [29] DUSARI N R, RAWAT M. Phase calibration of multiple software defined radio transmitters for beamforming in 5G communication[C]//National Conference on Communications. Kanpur: IEEE, 2021: 1-5.
- [30] YU S Q, CHEN L H, FAN C G, et al. Integrated Antenna and receiver system with self-calibrating digital beamforming for space-based ADS-B[J]. Acta Astronautica, 2020, 170: 480-486.
- [31] ZHOU Y, LI J, ZHUANG H, et al. Internal calibration for airborne X-band DBF-SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 4008105.
- [32] FAN Z, DU H, SHI H, et al. Design and experimental verification of the digital array calibration[C]//IEEE International Conference on Communications Technology. Chongqing: IEEE, 2018: 26-29.
- [33] YU Y, HONG W, JIANG Z H, et al. A hybrid radar system with a phased transmitting array and a digital beamforming receiving array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(4): 1970-1981.
- [34] CAI Y, DENG Y, ZHANG H, et al. An image-domain least L1-Norm method for channel error effect analysis and calibration of azimuth multi-channel SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5222914.
- [35] 周世东, 刘羽, 马赫. 一种联合时变信道跟踪与移相器网络实时校准方法及装置: 202110900489.8[P]. 2021-08-06.
- [36] 田岭, 郭翀, 洪伟, 等. 混合波束成形接收阵列自校准装置: 202010842626.2[P]. 2020-08-20.
- [37] CHEN T, ZHUANG L, DU H. An amplitude-phase measurement method of phased array antenna based on self-calibration RF channel[C]//IEEE International Conference on Communication Software and Networks. Chengdu: IEEE, 2018: 460-464.
- [38] MAHMOUDIDARYAN P, MANDAL D, BAKKALOG-LU B, et al. Wideband hybrid envelope tracking modulator with hysteretic-controlled three-level switching converter and slew-rate enhanced linear amplifier[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(12): 3336-3347.
- [39] LIU C. Analysis of class-F power amplifier with a second-harmonic input voltage manipulation[J]. IEEE Transactions on Circuits and systems-II: Express Briefs, 2020, 67(2): 225-229.
- [40] YOO S W, HUANG S C, YOO S M. A Watt-level quadrature class-G switched-capacitor power amplifier with linearization techniques[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(5): 1274-1287.
- [41] BANERJEE A, DING L, HEZAR R. A high efficiency

- multi-mode outphasing RF power amplifier with 31.6 dBm peak output power in 45 nm CMOS[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2020, 67(3): 815-828.
- [42] JUNG D, LI S, PARK J S, et al. A CMOS 1.2-V hybrid current- and voltage-mode three-way digital Doherty PA with built-in phase nonlinearity compensation[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(3): 525-535.
- [43] YIN Y, XIONG L, ZHU Y, et al. A compact dual-band digital polar Doherty power amplifier using parallel-combining transformer[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(6): 1575-1585.
- [44] HUNG S C, YOO S W, YOO S M. A quadrature class-G complex-domain Doherty digital power amplifier[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, 56(7): 2029-2039.
- [45] KUMAR A, RAWAT M. Adaptive dual-input analog RF predistorter for wideband 5G communication systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2021, 68(11): 4636-4647.
- [46] GUMBER K, RAWAT M. Low-cost RFin-RFout predistorter linearizer for high-power amplifiers and ultra-wideband signals[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(9): 2069-2081.
- [47] CAMPO P P, BRIHUEGA A, ANTTILA L, et al. Gradient-adaptive spline-interpolated LUT methods for low-complexity digital predistortion[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2021, 68(1): 336-349.
- [48] ZHANG Q, NIU J, ZHANG L, et al. A novel undersampling architecture for wideband digital predistortion[C]// *IEEE MTT-S International Wireless Symposium*. Shanghai: IEEE, 2020: 1-3.
- [49] ZHANG Q, CHEN W H. Digital predistortion for 5G wideband power amplifiers using multiple band-limited feedback signals[C]// *2017 89th ARFTG Microwave Measurement Conference*. Honolulu: IEEE, 2017: 1-4.
- [50] PENG J, YOU F, HE S B. Under-sampling digital predistortion of power amplifier using multi-tone mixing feedback technique[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2022, 70(1): 490-501.
- [51] TOMOYA O, TOSHIO K, SHIGEKAZU K K, et al. A novel multi-band look-up table based digital predistorter with a single common feedback loop[C]// *Asia-Pacific Microwave Conference*. Kyoto: IEEE, 2018: 551-553.
- [52] YU C, LU Q, YIN H H, et al. Linear-decomposition digital predistortion of power amplifier for 5G ultrabroadband applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2020, 68(7): 2833-2844.
- [53] GUAN N, WU N, WANG H. Digital predistortion of wideband power amplifier with single undersampling ADC[J]. *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, 2017, 27(11): 1016-1018.
- [54] HUANG H, XIA J, BOUMAIZA S. Novel parallel-processing-based hardware implementation of baseband digital predistorters for linearizing wideband 5G transmitters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2020, 68(9): 4066-4076.
- [55] HAUSMAIR K, LANDIN P N, GUSTAVSSON U, et al. Digital predistortion for multi-antenna transmitters affected by antenna crosstalk[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2018, 66(3): 1524-1535.
- [56] NG E, BELTAGY Y, SCARLATO G, et al. Digital predistortion of millimeter-wave RF beamforming arrays using low number of steering angle-dependent coefficient sets[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2019, 67(11): 4479-4492.
- [57] LUO Q, ZHU X W, YU C, et al. Single-receiver over-the-air digital predistortion for massive MIMO transmitters with antenna crosstalk[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2020, 68(1): 301-315.
- [58] LOZHKIN A, MANIWA T. New predistorter architecture for hybrid beamforming transmitter[C]// *IEEE 92nd Vehicular Technology Conference*. Victoria: IEEE, 2020: 1-6.
- [59] YAN J, WANG H, SHEN J. Novel post-weighting digital structures for hybrid beamforming systems[J]. *IEEE Communication Letters*, 2021, 25(12): 3980-3984.
- [60] LIU X, ZHANG Q, CHEN W H, et al. Beam-oriented digital predistortion for 5G massive MIMO hybrid beamforming transmitters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2018, 66(7): 3419-3432.
- [61] TERVO N, KHAN B, KURSU O, et al. Digital predistortion of phased-array transmitter with shared feedback and far-field calibration[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2021, 69(1): 1000-1015.
- [62] LIU X, CHEN W H, CHEN L, et al. Power scalable beam-oriented digital predistortion for compact hybrid massive MIMO transmitters[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2020, 67(2): 4994-5006.
- [63] ZHAO L, WAN S, KANG K, et al. A general digital pre-

distortion linearization scheme for hybrid beamforming system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 654-663.

- [64] LIU X, CHEN W H, CHU J, et al. Multi-stream spatial digital predistortion for fully-connected hybrid beamforming massive MIMO transmitters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2021, 68(7): 2998-3011.
- [65] 兰榕, 胡欣, 邹峰, 等. 基于循环平稳特性的欠采样宽带数字预失真研究[J], 电子与信息学报, 2020, 42(5): 1274-1280.
- LAN R, HU X, ZOU F, et al. Research of low sampling frequency broadband digital predistortion with cyclostationary characteristics[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(5): 1274-1280. (in Chinese)
- [66] LIU Z, XU L, WANG W. Low computational complexity digital predistortion based on convolutional neural network for wideband power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2022, 69(3): 1702-1706.
- [67] KOBAL T, LI Y, WANG X Y, et al. Digital predistortion of RF power amplifier with phase-gated recurrent neural networks[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2022, 70(6): 3291-3299.
- [68] HU X, LIU Z, WANG W, et al. Low-feedback sampling rate digital predistortion using deep neural network for wideband wireless transmitters[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(4): 2621-2633.
- [69] WANG Z, YE L, LIU Y, et al. A 148 nW general-purpose event-driven intelligent wake-up chip for AIoT devices using asynchronous spike-based feature extractor and convolutional neural network[C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco: IEEE, 2021: 200-201.



陈利虎 男, 1980年8月出生于江西省萍乡市. 现为国防科技大学空天科学学院研究员、硕士生导师. 主要研究方向为天基物联网关键技术、高通量卫星通信载荷及地面终端.
E-mail: clh2055@163.com

作者简介



李松亭 男, 1985年10月出生于河南省安阳市. 现为国防科技大学空天科学学院副研究员、硕士生导师. 主要研究方向为天基物联网关键技术、高通量卫星通信载荷及地面终端.
E-mail: songtingl@sina.com