

文章编号: 2095-4980(2024)12-1324-08

零中频太赫兹通信 I/Q 不平衡数字补偿算法

孟庆博^{a,b}, 林长星^{a,b}, 刘娟^{a,b}, 邓贤进^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为满足传输速率不断提高的要求, 未来的通信技术自然会向更高的载波频率发展, 太赫兹通信技术成为其实现的一种可能。针对太赫兹通信系统零中频在大带宽背景下存在的 I/Q 不平衡问题, 构建了太赫兹零中频架构下的 I/Q 不平衡损伤模型, 完成了对应窄带和宽带场景下的算法推导和补偿架构设计; 针对宽带场景, 通过改进代价函数提升算法性能。仿真结果表明, 提出算法相较于统计量的算法, 均方误差(MSE)提升 15 dB。在 220 GHz 零中频通信系统实验中, 提出的窄带算法 MSE 提升了 7 dB, 宽带算法在此基础上提升了 1 dB。

关键词: 零中频; 太赫兹通信系统; I/Q 不平衡; 数字补偿算法

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024327

Digital compensation algorithm for I/Q imbalance in zero intermediate frequency terahertz communication

MENG Qingbo^{a,b}, LIN Changxing^{a,b}, LIU Juan^{a,b}, DENG Xianjin^{a,b}

(a.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;

b.Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In order to meet the requirement of increasing transmission rate, the future communication technology will naturally develop to a higher carrier frequency, and terahertz communication technology becomes a possibility. Aiming at the I/Q imbalance problem in terahertz communication system under the background of large bandwidth, an I/Q imbalance damage model is constructed under terahertz zero-intermediate frequency architecture. The algorithm derivation and compensation architecture design are completed in corresponding narrowband and broadband scenarios, and the algorithm performance is improved by improving the cost function for broadband scenarios. The simulation results show that the Mean-Square Error(MSE) of the proposed algorithm is improved by 15 dB compared with that of the statistical algorithm. In the experiment of 220 GHz zero intermediate frequency communication system, the MSE of narrowband algorithm proposed in this paper is improved by 7 dB, and that of the broadband algorithm is improved by 1 dB.

Keywords: zero intermediate frequency; terahertz communication system; I/Q imbalance; digital compensation algorithm

根据摩尔定律, 人类对无线通信数据业务的需求呈指数增长的趋势。现有的频率资源已无法满足业务增长的需求, 开发新的频谱资源已势在必行。太赫兹波指波长为 3 mm~30 μ m(频率为 0.1~10 THz)的电磁波, 介于微波和光波之间, 具有超宽带、波束窄、方向性好、传输容量大等特点。太赫兹波作为电磁空间中尚未有效开发利用的频谱资源, 近年来一直受各国政府和研究人员的关注, 而太赫兹通信技术一直是其重要的研究方向之一。

与常规频段类似, 太赫兹通信系统架构主要有基于多级变频的超外差架构和零中频架构。零中频架构因结构简单, 对数模转换器件要求低, 目前已成为研究人员的首选。尤其针对 ≥ 10 Gbps的通信系统, 目前暂无国产可用的数模转换器件等组件可供系统使用。基于零中频架构的太赫兹通信系统中, 发射端主要通过太赫兹正交调制器将基带的 I/Q 信号直接调制到太赫兹频段, 并通过太赫兹高增益天线发射出去; 与之对称的, 接收端

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-08-22

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2020YFB1805702)

通过太赫兹高增益天线和低噪声放大器接收放大后，通过太赫兹正交调制器将太赫兹信号下变频到基带。由于受器件的工艺和成熟度的影响，当前太赫兹组件具有较常规微波频段更为显著的非理想特性，如 I/Q 不平衡、非线性、相噪等^[1]。其中，I/Q 不平衡主要指基带的 I/Q 两路间出现的幅度和相位的差异，主要受太赫兹正交调制器、I/Q 两路的频率响应影响^[2]。研究表明，I/Q 不平衡损伤是影响通信系统性能的关键损伤之一，严重时可能使接收机完全无法解调^[3]。

针对 I/Q 不平衡的矫正有模拟技术和数字技术 2 种解决途径。模拟域通过优化电路结构、改变器件布局方式来提高 I/Q 两路的一致性，减小不平衡度^[4]。但该方法难度较大，成本较高。数字域通过基带信号处理方式，实现数字域的发端“预补偿”和接收端“后补偿”。数字域矫正 I/Q 不平衡的关键是不平衡参数的估计，常见估计方法有盲估计和确定训练序列估计 2 种方式。盲估计通常根据 I/Q 两路随机信号的统计特性实现^[5]，确定训练序列估计通过一段已知序列先估计出幅度和相位不平衡参数而进行补偿，不过该方法的引入会造成频谱资源的浪费。随着近些年机器学习研究的突飞猛进，针对 I/Q 不平衡的 K 均值聚类算法(K-means clustering algorithm)^[6]，将联合信道矫正的扩展卡尔曼滤波算法^[7]等引入到 I/Q 不平衡的矫正中。但由于这些算法结构复杂，实现较为困难，因此需要寻找一个结构简单、易于实现的算法。

本文构建了太赫兹零中频架构下的 I/Q 不平衡损伤模型，提出一种基于最小均方误差(Least Mean Square, LMS)算法的盲估计 I/Q 不平衡矫正方法，并完成了对应窄带和宽带场景下的算法推导和补偿架构设计。针对宽带场景，提出了利用最小化 L2 范数平方的代价函数，对宽带算法进行改进。最后，对提出的 I/Q 不平衡损伤模型、补偿算法和架构基于 Matlab 进行仿真和性能对比。

1 系统模型

1.1 窄带信号的 I/Q 不平衡模型

窄带信号的 I/Q 不平衡接收机框图如图 1 所示，包括噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)、功率放大器(Power Amplifier, PA)、模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)、数模转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)、同相基带信号(In-phase Baseband, I-BB)、正交基带信号(Quadrature Baseband, Q-BB)、低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)等。

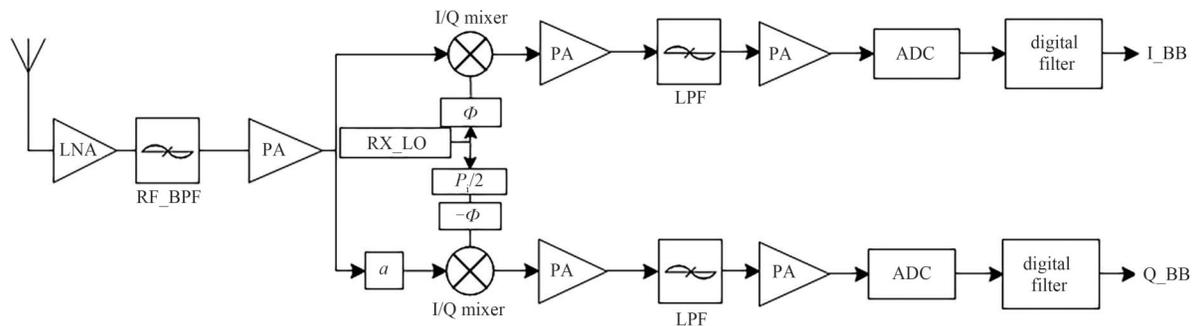


Fig.1 Block diagram of narrowband signal I/Q imbalance receiver
图1 窄带信号 I/Q 不平衡接收机框图

对信号中的 I/Q 不平衡进行深入分析。假设发射端符号映射后的信号为 $x(t)$ ，接收端接收信号为 $s(t)$ ：

$$s(t) = I_0 \cos(\omega t + \theta) + \alpha Q_0 \sin(\omega t - \theta) \tag{1}$$

式中： θ 、 α 分别为发射端的 I/Q 相位不平衡、幅度不平衡参数； I_0 为接收端同相支路信号； Q_0 为接收端正交支路信号； ω 为信号角频率。

经过理想的 I/Q 混频器下变频，得到信号 $r(t)$ ：

$$r(t) = I_0 \cos \theta + \alpha Q_0 \sin \theta + j(I_0 \sin \theta + \alpha Q_0 \cos \theta) \tag{2}$$

将 $r(t)$ 转化为包含 $x(t)$ 及 $x^*(t)$ 的镜像分量，其中 $x^*(t)$ 为 $x(t)$ 的共轭：

$$r(t) = (e^{j\theta} + \alpha e^{-j\theta})x(t) + (e^{j\theta} - \alpha e^{-j\theta})x^*(t) \tag{3}$$

1.2 宽带信号的 I/Q 不平衡模型

宽带信号 I/Q 不平衡接收机框图如图 2 所示。信号设置同 1.1 节，I/Q 两路由于宽带信号的特性影响，等效于在两路分别通过一个实数滤波器，滤波器的时域响应表示为 $[h_{I_0}, h_{I_1}, h_{I_2}, \dots, h_{I_n}]$ 和 $[h_{Q_0}, h_{Q_1}, h_{Q_2}, \dots, h_{Q_n}]$ 。

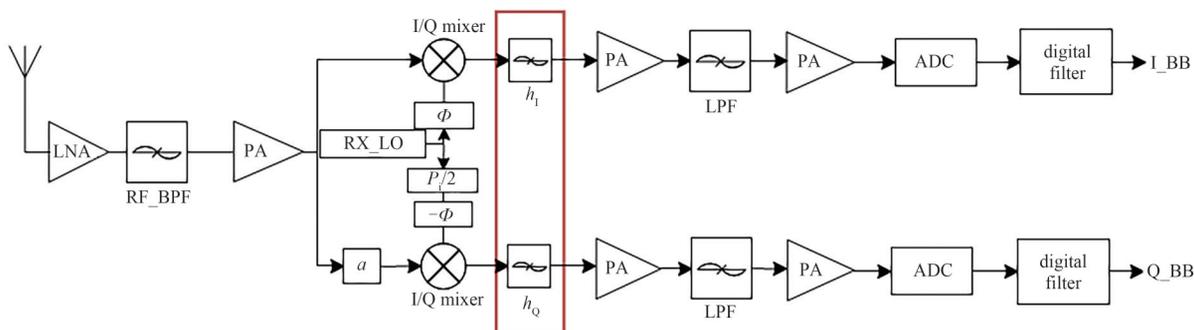


Fig.2 Block diagram of wideband signal I/Q imbalance receiver

图2 宽带信号 I/Q 不平衡接收机框图

受宽带 I/Q 不平衡影响的接收机接收信号 $s(t)$ 表示为：

$$s(t) = (I_0 h_{I_0} + I_1 h_{I_1} + \dots + I_n h_{I_n}) \cos(\omega t + \theta) + \alpha (Q_0 h_{Q_0} + Q_1 h_{Q_1} + \dots + Q_n h_{Q_n}) \sin(\omega t - \theta) \quad (4)$$

下变频后得到信号 $r(t)$ ：

$$r(t) = \cos \theta \left(\sum_{i=0}^n I_i h_{I_i} \right) + \alpha \sin \theta \left(\sum_{i=0}^n Q_i h_{Q_i} \right) + j \left(\sin \theta \left(\sum_{i=0}^n I_i h_{I_i} \right) + \alpha \cos \theta \left(\sum_{i=0}^n Q_i h_{Q_i} \right) \right) \quad (5)$$

宽带信号的镜像损伤表示为：

$$r_{\text{err}}(t) = \sum_{i=0}^n s_i(t) (h_{I_i} e^{-j\theta} + \alpha h_{Q_i} e^{j\theta}) + s_i^*(t) (h_{I_i} e^{j\theta} - \alpha h_{Q_i} e^{-j\theta}) \quad (6)$$

2 I/Q 补偿方法与架构

针对窄带信号在不同频点处的幅相不一致，参数不同，本文提出一种基于最小均方(LMS)误差算法的宽带 I/Q 不平衡补偿方法。先推导窄带信号 I/Q 不平衡的参数估计和补偿模型，利用 LMS 算法对幅度和相位不一致参数进行迭代估计；再将模型扩展至宽带信号传输时的 I/Q 不平衡模型，引入实数滤波器拟合 I/Q 两路幅度相位不一致参数在不同频点的冲激响应值，将宽带 I/Q 不平衡损伤分离为幅相不一致和 I/Q 两支路冲激响应不一致。

2.1 窄带信号 I/Q 不平衡补偿方法

窄带 I/Q 不平衡对信号的影响如式(2)所示，期望响应为：

$$d(n) = d_1(n) + j d_Q(n) = I_0 + j Q_0 \quad (7)$$

当前估计误差为：

$$e(n) = d(n) - w^H(n)r(n) \quad (8)$$

式中： $w^H(n)$ 为估计的权系数； $r(n)$ 为接收信号。

代价函数定义为估计误差的 L2 范数平方：

$$J(n) = e^*(n)e(n) = \text{err}_I(n)^2 + \text{err}_Q(n)^2 \quad (9)$$

式中： $e^*(n)$ 为估计误差 $e(n)$ 的共轭； $\text{err}_I(n)$ 和 $\text{err}_Q(n)$ 分别为 I/Q 路的估计误差。

随机梯度为代价函数 $J(n)$ 对不平衡参数 α 、 θ 的导数，

$$\nabla J_\alpha = 2 \text{err}_Q (r_I \sin \theta + r_Q \cos \theta) \quad (10)$$

$$\nabla J_\theta = 2 \left(\text{err}_I \frac{\partial \text{err}_I}{\partial \theta} + \text{err}_Q \frac{\partial \text{err}_Q}{\partial \theta} \right) = 2 \left(\text{err}_I (-r_I \sin \theta + r_Q \cos \theta) + \alpha \times \text{err}_Q (r_I \cos \theta - r_Q \sin \theta) \right) \quad (11)$$

考虑实际系统中 I/Q 两路相位损伤参数较小，因此取 $\sin \theta = 0$ ， $\cos \theta = 1$ ，基于 LMS 算法的更新规则，参数迭代公式为：

$$\alpha(n+1) = \alpha(n) - \mu \times err_Q r_Q \tag{12}$$

式中 μ 为迭代步长。

$$\theta(n+1) = \theta(n) - \mu(err_I r_Q + \alpha \times err_Q r_I) \tag{13}$$

补偿过程采用逆矩阵相乘，补偿矩阵为：

$$\begin{bmatrix} I_{com} \\ Q_{com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_I \\ r_Q \end{bmatrix} \tag{14}$$

2.2 宽带信号 I/Q 不平衡补偿方法

宽带 I/Q 不平衡对信号的影响如式(6)所示，利用式(9)的代价函数，则随机梯度为代价函数 $J(n)$ 对不平衡参数 h_I, h_Q 的导数：

$$\nabla J_{h_I} = 2err_I [r_Q(i) \sin \theta + r_I(i) \cos \theta] \tag{15}$$

$$\nabla J_{h_Q} = 2\alpha \times err_Q [r_I(i) \sin \theta + r_Q(i) \cos \theta] \tag{16}$$

采取相同的近似条件，得到两路权系数迭代公式为：

$$h_I(n+1) = h_I(n) - \mu \times err_I r_I(i) \tag{17}$$

$$h_Q(n+1) = h_Q(n) - \mu\alpha \times err_Q r_Q(i) \tag{18}$$

通过权系数可以看出，I/Q 两路的权系数只需本路的信号及误差信号即可估计得出，简化了原本需要复数滤波器进行的 LMS 算法。补偿过程仍采用逆矩阵相乘方法，补偿过程分为 2 步：先进行幅相不一致参数的补偿，而后分别对两路信号进行等效滤波器补偿。

2.3 不同的 I/Q 不平衡补偿架构

在通信系统中，接收机往往要承担各项数字信号处理任务，接收机的低复杂度成为算法设计标准之一。借鉴射频器件中功率放大器的非线性损伤的预失真补偿方法，将 I/Q 不平衡的补偿模块置于发射端，形成预失真的 I/Q 不平衡补偿模型。图 3 和图 4 分别为 I/Q 不平衡发射端预补偿和接收端均衡后补偿框图。

与在接收机侧进行 I/Q 不平衡校正相比，预校正的 I/Q 不平衡补偿模型可在发射机的数字链路中预先进行自环回矫正，避免了由于信道等对 I/Q 不平衡校正的影响，同时降低了接收机侧数字信号处理的复杂程度。

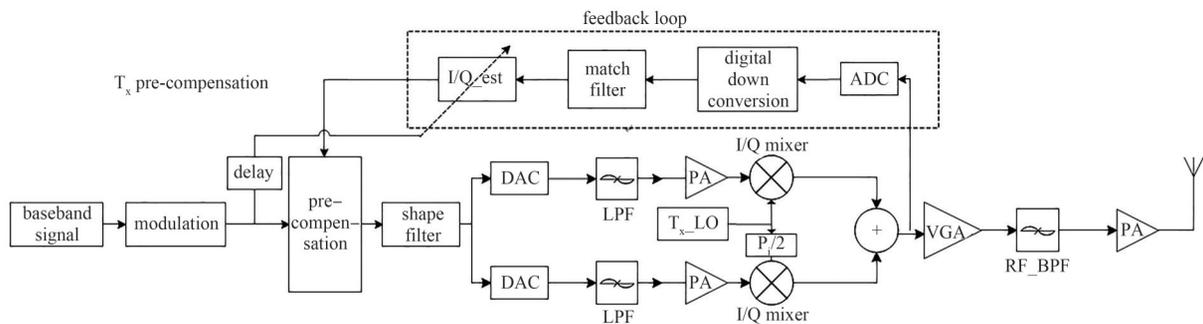


Fig.3 Block diagram of unbalanced pre-compensation for I/Q at the transmitter
图 3 发端 I/Q 不平衡预补偿框图

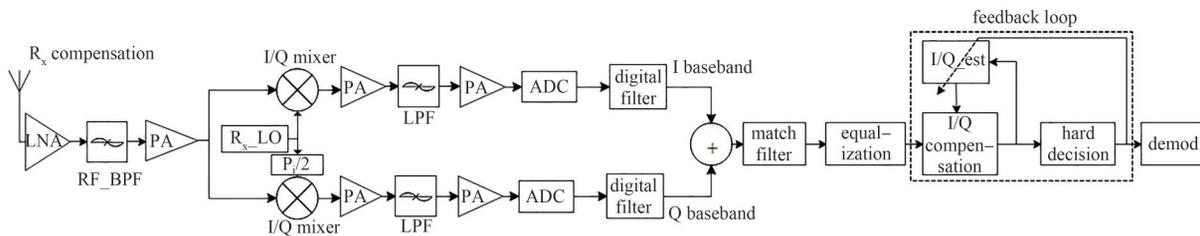


Fig.4 Block diagram of receiving end I/Q imbalance compensation
图 4 收端 I/Q 不平衡补偿框图

3 I/Q 不平衡校正仿真及实验

仿真参数设置如下：信号采用 16 进制的正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)，中心频率为 25 GHz，带宽 8 GHz；成型滤波器为滚降系数为 0.2，8 倍过采样的根升余弦滤波器；载波信号为 220 GHz 的单音信号，信道为加性高斯白噪声，信噪比为 30 dB。接收端采用同样阶数的根升余弦滤波器作为匹配滤波器，均衡器采取迫零均衡，23 阶抽头。发射端 I/Q 不平衡参数设置如下：幅度不一致参数 $\alpha=1.1$ dB，相位不一致参数 $\theta=3^\circ$ 。接收端采用理想混频器进行下变频。

3.1 不同补偿架构仿真性能对比及资源比较

利用本文提出的窄带 LMS 算法对比 2 种补偿架构性能及资源，结果如图 5 所示。仿真中设定 1×10^5 个符号后进行预校正补偿，对应时间为 0.2×10^{-5} s，未补偿时接收信号 MSE 为 -15 dB，提出的窄带算法在接收端补偿架构中可提升 20 dB。采取预校正结构经过算法收敛稳定后，可以看出预校正结构性能逼近并略优于均衡后补偿结构性能。在资源利用方面，接收端补偿每符号需 16 个实数乘法器和 7 个加法器，而预补偿结构每符号校正需 11 个实数乘法器和 5 个加法器，资源消耗降低约 31%。在性能近似的情况下，预补偿架构资源利用少于接收端补偿架构，但算法收敛时间较接收端补偿架构有所增加。

3.2 宽带 I/Q 不平衡算法性能对比

仿真中宽带 I/Q 不平衡用两路不同的冲激响应表示，其中 I 路冲激响应 $h_1 = [0.95 \ -0.3 \ 0.165 \ -0.018]$ ，Q 路冲激响应 $h_0 = [1 \ -0.2 \ 0.1 \ 0.06]$ 。仿真理想传输情况下文献[5]中算法以及本文提出的 2 种算法校正后的 MSE，并针对宽带算法进行不同阶数性能的仿真，仿真结果如图 6 所示。

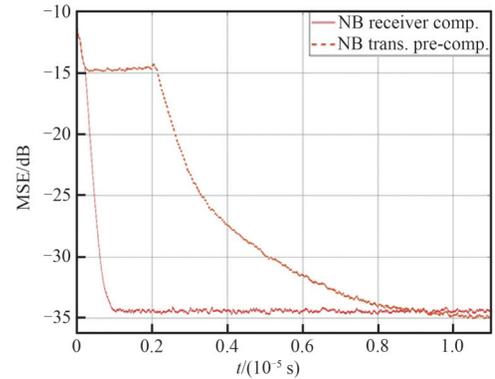
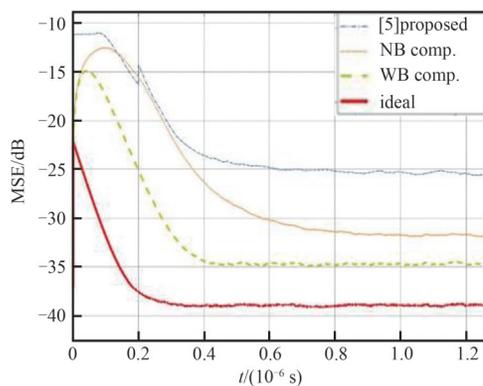
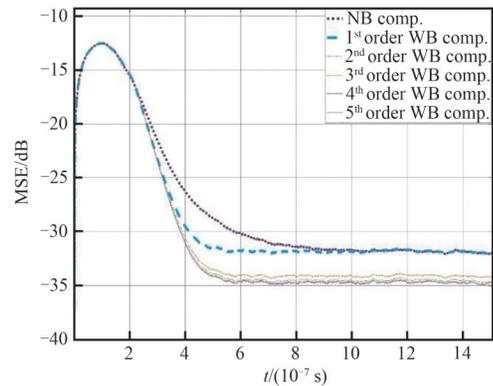


Fig.5 Comparison of MSE between narrowband LMS algorithms under two different architectures

图 5 窄带 LMS 算法在 2 种不同架构下 MSE 对比图



(a) MSE comparison of different algorithms



(b) comparison of broadband algorithms of different orders

Fig.6 Comparison chart of MSE for I/Q imbalance algorithms

图 6 I/Q 不平衡算法 MSE 对比图

仿真结果表明，在宽带 I/Q 不平衡的影响下，窄带算法的 MSE 相较于宽带算法的 MSE 降低约 3 dB。从收敛速度看，由于宽带算法对 I/Q 两路信道进行估计迭代的同时对两路的幅度进行了小幅度的矫正，无论是宽带 I/Q 不平衡还是窄带 I/Q 不平衡，宽带算法收敛速度均优于窄带算法。在不同阶数的情况下，宽带算法的补偿性能从二阶开始，提升阶数对于宽带算法的性能提升不大。在资源利用上，宽带算法每符号需要 $(8k+6)$ 个实数乘法器和 $(7k+1)$ 个实数加法器实现，其中 k 为宽带算法阶数。

4 实验验证

本文设计了基于 I/Q 混频器和 LNA 的分立器件 I/Q 不平衡离线验证平台，如图 7 所示。在发射端，利用电脑产生伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)码流，在数字域进行映射、成型滤波等操作后，经过任意波发生器发送至模拟端。模拟端链路采用“背靠背”模型，减少其他射频损伤对本实验的影响。下变

频后的信号利用高速示波器进行采集，送回计算机进行后续的数字信号处理，比较算法性能。调制信号的符号率为 5×10^9 symbol/s，采样率为 5×10^{10} sample/s；信号采取 16QAM 调制方式，上采样 8 倍，滚降系数为 0.4。利用 Matlab 平台生成发送数据，加载至任意波发生器进行发送。信号分为 I/Q 两路信号，通过 I/Q 混频器和直插波导，经过上下变频后送入示波器进行离线数据采集；再将信号送入 Matlab 平台进行参数估计与补偿。实验测试链路实物图及完整链路实物图如图 8 所示。

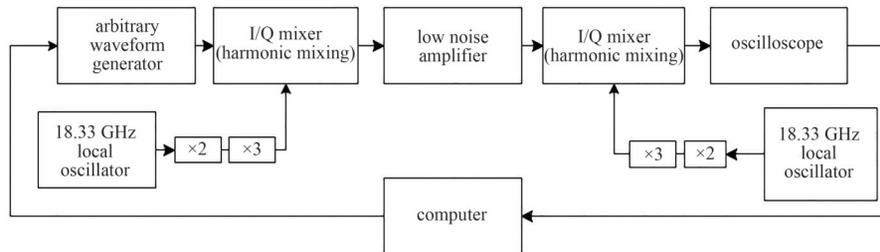


Fig.7 Diagram of I/Q unbalanced experimental link
图 7 I/Q 不平衡实验链路图

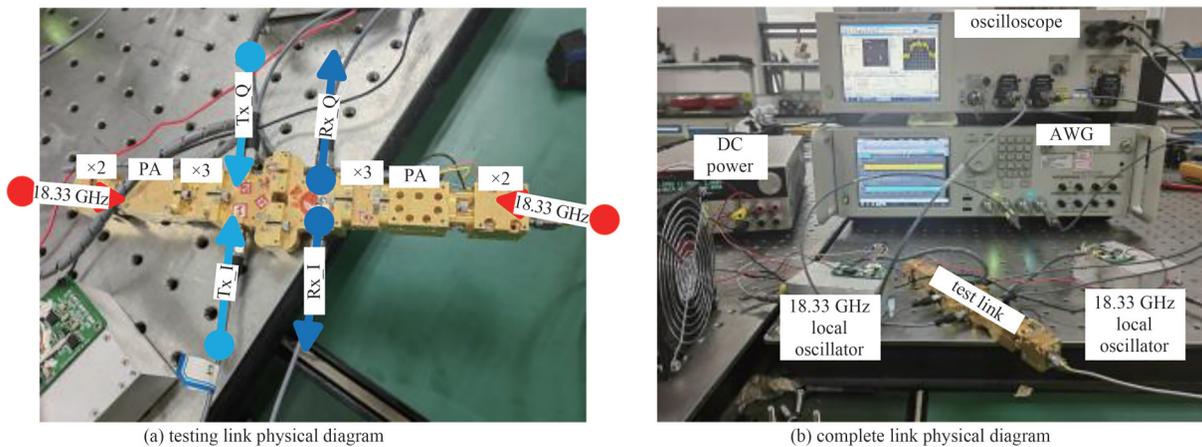


Fig.8 Experimental testing diagram
图 8 实验测试图

采集数据利用 Simulink 平台搭建数据处理模块，主要包含定时同步、匹配滤波、时域均衡、载波恢复、I/Q 不平衡校正、功放非线性校正模块。测试结果如下，宽带信号补偿算法的 I/Q 不平衡校正前后的星座图如图 9 所示，正交调制增益补偿(Quadrature Multiplexing Carrier, QMC)。

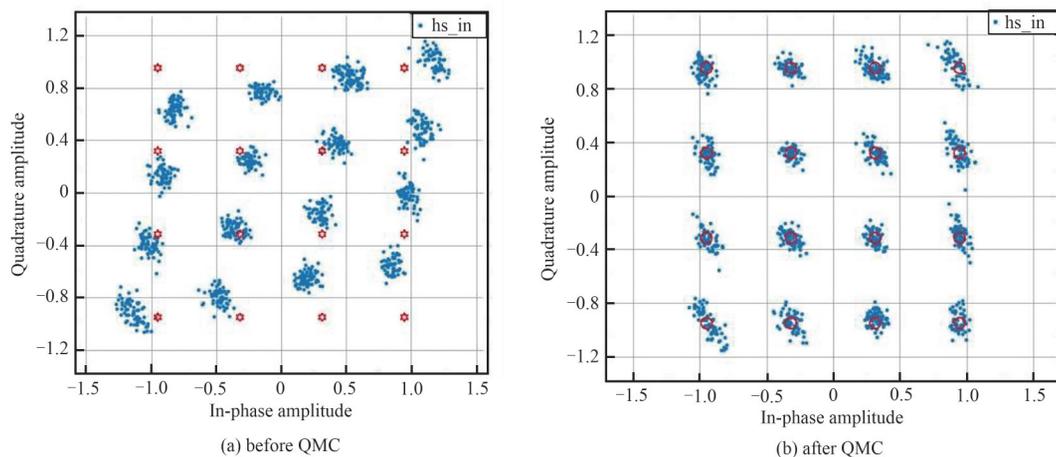


Fig.9 Constellation before and after calibration
图 9 校正前后星座图

不平衡参数迭代曲线如图 10 所示，窄带算法和宽带算法 MSE 对比如图 11 所示。从图 11 中可以看到，在 I/Q 矫正算法未开始工作时，MSE 仅为 -13.4 dB，采取窄带算法校正后，MSE 有 7 dB 的提升，而宽带算法相比窄带算法额外有 1 dB 的提升。

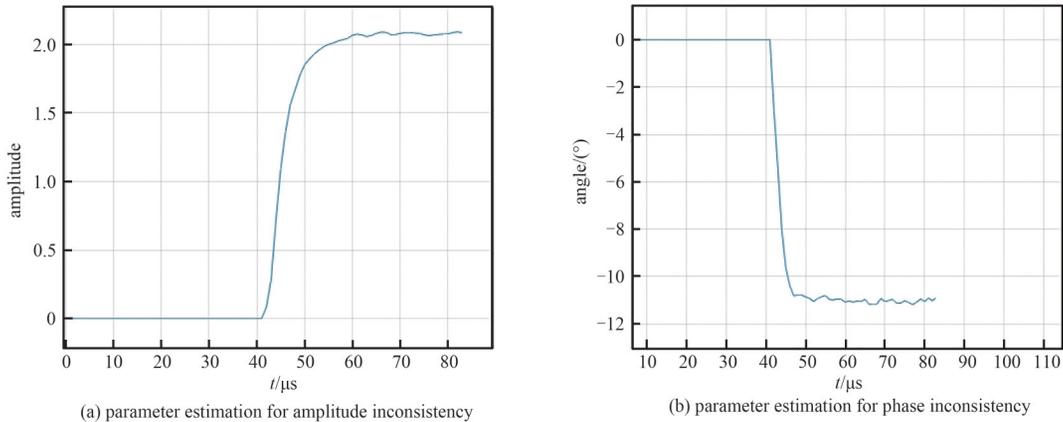


Fig.10 Diagram of parameter estimation for amplitude and phase inconsistency

图 10 幅相不一致参数估计示意图

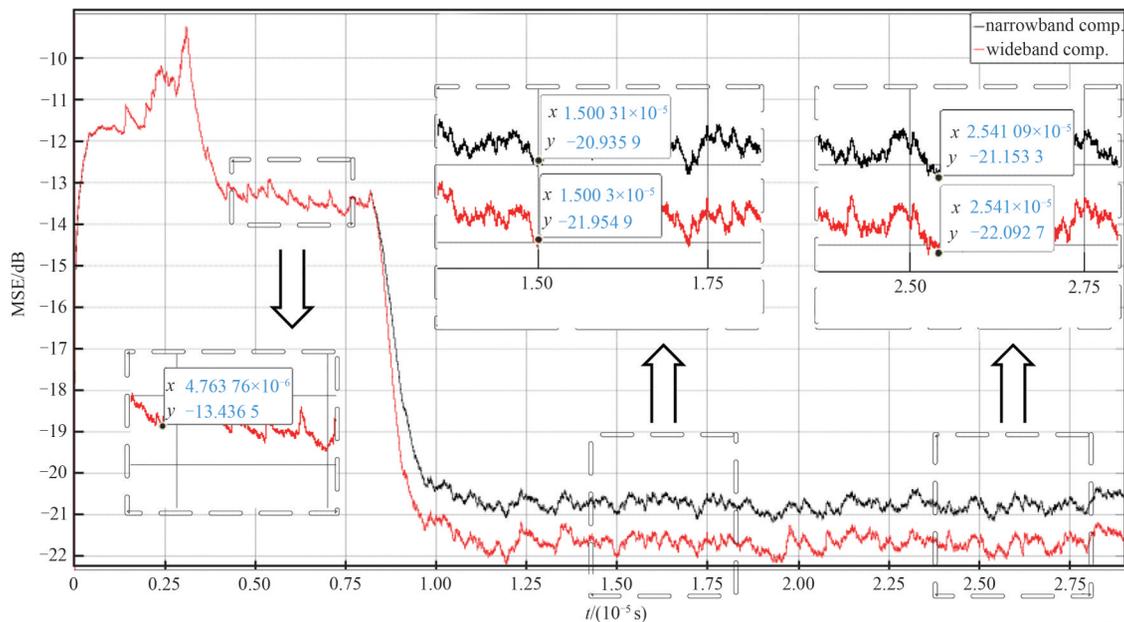


Fig.11 Comparison chart of MSE for measured I/Q imbalance wide and narrow band algorithms

图 11 实测 I/Q 不平衡窄带算法 MSE 对比图

5 结论

本文分别针对宽带和窄带应用场景，构建了太赫兹零中频架构下的 I/Q 不平衡损伤模型。提出了一种基于 LMS 的盲估计 I/Q 不平衡矫正方法，完成了窄带和宽带应用场景下的算法推导和补偿架构设计；并针对宽带场景通过改进代价函数的方法提升性能。仿真结果表明，相较于传统基于统计量的补偿算法，本文提出算法能有效提升系统 MSE 约 15 dB。另外，从实现资源角度出发，本文仿真验证了所提的发端校正和收端校正 2 种补偿架构，结果表明发射端预校正架构与接收端基带补偿架构性能相当，资源消耗减少约 31%。对窄带 I/Q 不平衡模型进行扩展，提出了一种宽带 I/Q 不平衡的补偿算法；并明确算法阶数对宽带算法性能的影响，当阶数达到三阶以上时，补偿性能趋于稳定。为评估相关算法在实际太赫兹通信系统的性能，进行了离线实验，实验结果表明，窄带算法 MSE 提升了 7 dB，宽带算法在此基础上有 1 dB 的提升。

参考文献：

- [1] 刘伟,刘德峰,杨超,等.收发异源FMCW太赫兹系统误差分析[J].太赫兹科学与电子信息学报,2022,20(1):74-79. (LIU Wei,

- LIU Defeng, YANG Chao, et al. Error analysis for the FMCW terahertz system with different sources of transmitter and receiver[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(1):74–79. doi:10.11805/TKYDA2021035.
- [2] HE Yue, LIU Ge, LIU Juan, et al. A 220 GHz orthogonal modulator based on subharmonic mixers using anti-parallel Schottky diodes[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022,31(3):562–568.
- [3] 邓贤进. 亚太赫兹高速无线传输技术及试验研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (DENG Xianjin. Asia pacific hertz high speed wireless transmission technology and experimental research[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2021-005100.
- [4] 马雅男, 徐卫. 宽带发射机 I/Q 不平衡的矫正方法[J]. 科技传播, 2019,11(23):140–142,12. (MA Yanan, XU Wei. Correction method for I/Q imbalance in broadband transmitters[J]. Science and Technology Communication, 2019,11(23):140–142,12.) doi:10.16607/j.cnki.1674-6708.2019.23.070.
- [5] 曹钰琛, 万建, 陶加祥. 基于统计特征的 I/Q 不平衡高效校正算法[J]. 电子器件, 2022,45(2):468–473. (CAO Yuchen, WAN Jian, TAO Jiexiang. Efficient I/Q imbalance correction algorithm based on statistical features[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022,45(2):468–473.) doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2022.02.036.
- [6] 吴屹. 太赫兹通信 I/Q 不平衡与相位噪声补偿技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (WU Yi. Research on I/Q imbalance and phase noise compensation technology for terahertz communication[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.000726.
- [7] SHA Ziyuan, WANG Zhaocheng. Channel estimation and equalization for terahertz receiver with RF impairments[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021,39(6):1621–1635. doi:10.1109/JSAC.2021.3071824.

作者简介:

孟庆博(1995–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为数字信号处理. email:2871225378@qq.com.

林长星(1986–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹通信、高速通信调制解调技术及 FPGA 实现技术研究、高速实时信号处理系统设计及嵌入式系统设计.

刘娟(1984–), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹通信系统设计、移动自组网技术.

邓贤进(1973–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹科学技术、微波电路与系统、太赫兹通信系统等.