

基于氮化镓（GaN）的射频功率放大器线性化技术

任雪蕾

北京移动系统集成有限公司 北京

【摘要】氮化镓（GaN）射频功率放大器因其高效能、宽频带和高功率输出特性，成为射频领域的重要器件。GaN 射频功率放大器在实际应用中常面临非线性失真问题，影响其性能和可靠性。为了解决这一问题，本文研究了 GaN 射频功率放大器的线性化技术，重点探讨了常用的数字预失真、反馈控制、前馈校正等方法。这些方法有效地改善了放大器的线性度，提升了系统的整体性能和效率。通过与传统技术的比较，本文展示了新型线性化技术在实际应用中的优势和潜力。研究结果为提高 GaN 射频功率放大器的应用性能提供了理论依据和实践指导。

【关键词】氮化镓；射频功率放大器；线性化技术；非线性失真；数字预失真

【收稿日期】2025 年 4 月 13 日

【出刊日期】2025 年 5 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250210

Linearization technology of radio frequency power amplifiers based on Gallium Nitride (GaN)

Xuelei Ren

Beijing Mobile System Integration Co., Ltd., Beijing

【Abstract】Gallium nitride (GaN)-based radio frequency (RF) power amplifiers have become important devices in the RF field due to their high efficiency, wide bandwidth, and high power output characteristics. In practical applications, GaN RF power amplifiers often face the problem of nonlinear distortion, which affects their performance and reliability. To address this issue, this paper studies the linearization technology of GaN RF power amplifiers and focuses on commonly used methods such as digital predistortion, feedback control, and feedforward correction. These methods effectively improve the linearity of the amplifier and enhance the overall performance and efficiency of the system. By comparing with traditional technologies, this paper demonstrates the advantages and potential of the new linearization technology in practical applications. The research results provide a theoretical basis and practical guidance for improving the application performance of GaN RF power amplifiers.

【Keywords】Gallium Nitride; Radio frequency power amplifier; Linearization technology; Nonlinear distortion; Digital Pre-distortio

引言

氮化镓（GaN）射频功率放大器因其出色的功率密度和效率，在无线通信、雷达系统等领域得到了广泛应用。随着功率放大器输出功率的增加，其非线性失真问题也愈发显著，导致信号质量下降和系统效率降低。如何有效地实现 GaN 射频功率放大器的线性化，成为当前射频技术中的一个重要研究课题。通过采用先进的线性化技术，能够有效克服非线性失真，提高系统的整体性能和稳定性。本文将探讨多种线性化方法，并通过实验验证其在 GaN 射频功率放大器中的应用效果。通过这项研究，期望为未来射频放大器技术的发展提供理论支持和技术保障。

1 GaN 射频功率放大器的非线性特性分析

GaN 射频功率放大器由于其高效能和宽频带特性，成为射频应用中的重要器件。随着输出功率的增大，GaN 放大器不可避免地会面临非线性失真问题。这种非线性失真主要表现在放大器的增益与输入信号之间的关系不再保持线性。当输入信号的功率超过放大器的线性工作区时，增益会出现压缩，导致输出信号失真。非线性失真不仅影响信号的质量，还可能导致频谱扩展、互调失真等问题，从而降低整个射频系统的效率和性能。为了确保 GaN 射频功率放大器在高功率和高效率下正常工作，深入了解其非线性特性显得尤为重要。

GaN 放大器的非线性特性可以通过三大主要因素来分析。GaN 材料本身的物理特性决定了其非线性行为。GaN 具有较宽的带隙和较高的电子饱和速度，这

使其在高功率下的表现优异，但也加剧了其非线性响应。放大器内部的偏置点设置、功率管的饱和特性以及工作频段等因素都会对其线性度产生重要影响。当放大器工作在高功率区域时，非线性效应更为显著，导致信号失真问题愈发突出。最后，GaN 放大器的结构设计、热管理等方面也对其线性性能起到了重要作用。工作温度的升高可能导致热失真，进一步加剧非线性效应。

为了解决 GaN 射频功率放大器的非线性失真问题，科学家们已提出多种线性化技术。这些技术通过对非线性行为的补偿或控制，显著提高了 GaN 放大器的线性度和效率。其中，数字预失真技术是目前应用最广泛的解决方案之一。通过对输入信号进行预处理，消除由放大器引入的非线性失真，数字预失真能够有效恢复输出信号的质量。前馈控制和反馈控制技术也在一定程度上改善了 GaN 放大器的线性性能。这些线性化技术不仅有效提升了 GaN 射频放大器的工作稳定性，还为其在高功率应用中的推广奠定了基础。

2 常见的 GaN 射频功率放大器线性化技术

GaN 射频功率放大器的线性化技术旨在通过补偿或抑制放大器中产生的非线性失真，以提高其信号质量和系统性能。目前，几种常见的线性化技术已经在 GaN 放大器中得到了广泛应用，其中数字预失真(DPD)技术被认为是最为有效的解决方案之一。数字预失真技术通过在输入信号中预先加入一个与放大器非线性失真相反的信号，从而在放大器输出端实现补偿。通过对放大器工作点的动态调整，数字预失真能够在高功率输出时有效抑制增益压缩和相位失真等问题，显著提高系统的线性度。尤其在无线通信等领域，DPD 技术在 GaN 放大器中的应用已证明能够大幅提升整体系统的效率与可靠性。

除数字预失真外，前馈控制技术也在 GaN 射频功率放大器的线性化中得到了广泛应用。前馈技术通过引入一个副通道，对输入信号进行实时监测，并基于此反馈调整主信号的放大过程。该方法能够实时捕捉和补偿非线性失真带来的影响，从而在保持高功率输出的尽可能地减小失真度。前馈控制通常与其他线性化技术配合使用，以进一步增强 GaN 放大器的工作稳定性和精度。尽管前馈控制在实现高性能的线性化方面有着明显优势，但其复杂的结构和对硬件的要求也使得该技术的实施成本相对较高。

反馈控制技术也被应用于 GaN 射频功率放大器的线性化处理。反馈控制通过对输出信号进行反馈采样，

并与输入信号进行对比，实时调整放大器的工作状态。该方法能有效抑制由功率放大器非线性引起的增益不稳定问题，并在一定程度上提高其工作效率。与前馈控制技术不同，反馈控制通常侧重于局部区域的优化，特别是在低功率和中等功率输出时，能够较好地解决非线性失真问题。虽然反馈控制的性能在某些场合下可能不及数字预失真和前馈控制，但其结构相对简单，且成本较低，因此在实际应用中具有一定的市场需求。

3 数字预失真技术在 GaN 射频功率放大器中的应用

数字预失真技术(DPD)在 GaN 射频功率放大器中的应用主要是为了补偿由放大器非线性引起的失真。GaN 射频功率放大器通常在高功率工作时会出现增益压缩和相位失真，这种非线性失真会对信号的质量和频谱产生不利影响。数字预失真技术通过引入一个经过精确计算和设计的预失真信号，使得输入信号在通过放大器后，失真部分得到有效抑制。该技术可以实现对 GaN 放大器的动态补偿，尤其是在大信号输入情况下，能够大幅提升放大器的线性度和频谱纯度。通过对输入信号的适当调整，数字预失真能够最大限度地恢复输出信号的质量，从而提高射频系统的整体性能。

为了确保数字预失真技术在 GaN 射频功率放大器中的有效应用，需要对放大器的非线性特性进行精确建模。通过对 GaN 放大器的增益和相位特性进行实时监测与建模，DPD 技术能够生成一个与放大器失真效应相反的信号。该信号会被加入到输入端，以抵消放大器输出端的失真。为了实现这一目标，通常采用基于傅里叶变换和多项式拟合等方法对非线性失真进行建模。通过这些建模手段，数字预失真技术能够在保持较高输出功率的有效控制非线性失真，从而提高信号的保真度。数字预失真不仅在 GaN 射频功率放大器中表现出了强大的性能提升能力，还在实际应用中展示了较高的灵活性和适应性。

在实际应用中，数字预失真技术通常需要与其他线性化技术结合使用，以发挥其最大效能。比如，与前馈控制或反馈控制相结合，DPD 技术可以进一步优化 GaN 放大器的线性性能。通过集成数字信号处理单元，数字预失真技术能够在实时系统中实现快速响应和高精度控制，这对于高动态范围和高频带宽的 GaN 射频功率放大器尤为重要。尽管数字预失真技术的实现需要较高的计算能力和较复杂的硬件支持，但其在提高放大器线性度、降低非线性失真以及提升系统整体性能方面的优势使其成为现代射频功率放大器中不可或缺的

技术手段。

数字预失真技术(DPD)在GaN射频功率放大器中的应用极大地提升了放大器的性能,特别是在大功率输出时。通过对非线性失真进行实时建模与补偿,DPD技术能够有效改善增益压缩和相位失真,确保信号质量不受损失。该技术通过与前馈控制或反馈控制等其他线性化技术结合,进一步优化了GaN放大器的线性度,使其在高功率和高频率工作条件下依然能够保持稳定性能。尽管实施DPD技术需要较高的计算能力和复杂的硬件支持,但其能够显著提升射频系统的整体效能,特别是在需要高动态范围和大带宽的应用场景中,DPD已经成为提高GaN射频功率放大器性能的关键技术。

4 线性化技术的优化与性能提升分析

随着GaN射频功率放大器应用的不断扩展,线性化技术的优化显得尤为重要。为了应对高功率和高频带宽下的非线性失真问题,研究者们提出了多种优化策略,以提升GaN放大器的线性度和性能。这些优化不仅体现在理论模型的精确度提升上,还在于硬件实现上的改进。通过引入更高效的数字信号处理算法和硬件架构,线性化技术在GaN射频功率放大器中的应用得到了极大的性能提升。优化的数字预失真技术不仅能更准确地预测和补偿非线性失真,还能在更宽的频率范围内维持稳定的线性度,从而提高系统的可靠性和功率效率。

性能提升还体现在控制策略的创新上。传统的前馈控制和反馈控制方法虽然在某些条件下能有效抑制失真,但在高动态范围下的表现仍存在一定局限。通过结合机器学习等先进技术,线性化过程中的非线性建模和误差补偿得到了显著改善。机器学习模型能够从大量的实时数据中自适应地调整补偿参数,以应对复杂的非线性失真情况。这种自适应优化方法不仅提高了线性化的精度,还减少了对硬件资源的需求,使得GaN射频功率放大器能够在更复杂的环境中稳定工作。

线性化技术的优化还在功率效率方面带来了显著提升。通过精细调整放大器的工作点,并结合高效的热管理技术,GaN射频功率放大器的整体效率得到了提高。优化后的线性化技术能够确保在高功率输出的减少功耗和热损耗,从而提升系统的能效和稳定性。随着技术的不断发展,线性化方法的优化趋势将更加注重

智能化、集成化和高效性,未来的GaN射频功率放大器将在性能、功耗和成本控制方面实现更为平衡的发展。

5 结语

GaN射频功率放大器的线性化技术通过有效解决非线性失真问题,显著提升了放大器的性能和效率。数字预失真、前馈控制和反馈控制等技术在实际应用中展现出巨大的潜力,并且随着优化和创新,线性化效果不断得到增强。尤其是结合机器学习等先进方法,线性化技术在提高系统稳定性和适应性方面表现优异。未来,随着技术的不断进步,GaN射频功率放大器的线性化技术将在更高频率、更大功率以及更复杂环境下发挥重要作用,推动射频技术向更高水平发展。

参考文献

- [1] 魏巍.射频溅射制备铟掺杂及铟镱共掺杂氮化镓薄膜及其光学性质研究[D].兰州大学,2024.
- [2] 王鹏飞.毫米波GaN HEMT器件级线性化技术研究[D].西安电子科技大学,2024.
- [3] 陈亚新.Ka波段氮化镓低噪声放大器与射频开关MMIC的研究与设计[D].湖北大学,2024.
- [4] 郭方金.毫米波氮化镓功放芯片及其工程化应用[D].电子科技大学,2024.
- [5] 周英杰,侯文杰,张翼,等.大功率低插损氮化镓单刀双掷射频开关[J/OL].微电子学,1-6[2025-05-09].
- [6] 廖梓宏.硅上氮化镓射频器件的场板结构研究[D].华南理工大学,2023.
- [7] 刘思雨.氮化镓增强型射频功率器件研究[D].西安电子科技大学,2023.
- [8] 关广豪.硅基氮化镓片上宽阻带5G射频滤波器研究[D].华南理工大学,2023.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

