 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i1.4480

Design and optimization of high performance RF circuit

Jiawei Xie

The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

With the rapid development of radio frequency technology, radio frequency circuit plays a vital role in communication, radar, measurement and a variety of high-frequency applications. As a common key component in RF circuits, the attenuator is widely used in signal regulation and power control. This paper discusses the design and optimization of high performance CNC attenuator. First, we introduce the basic principle of the CNC attenuator and its function in the RF circuit, and the main design parameters of the the attenuator are analyzed. Secondly, the circuit design of high-performance CNC attenuators is studied, including the optimization strategy for key indexes such as attenuation range, linearity, bandwidth, and insertion loss. Finally, the performance of the design scheme is evaluated by the simulation analysis and experimental validation. The results show that the designed CNC attenuator has low insertion loss and good linearity, which is suitable for high-frequency broadband communication system. This design provides an effective solution for the high performance requirements of future RF circuits.

Keywords

RF circuit; CNC attenuator; design optimization; high performance; circuit simulation

高性能射频电路数控衰减器的设计与优化

谢嘉威

中国电子科技集团公司第三十四研究所，中国 · 广西 桂林 541004

摘　要

随着射频技术的迅速发展，射频电路在通信、雷达、测量及多种高频应用中发挥着至关重要的作用。衰减器作为射频电路中常见的关键组件，广泛应用于信号调节和功率控制。本文主要探讨了高性能射频电路数控衰减器的设计与优化方法。首先，介绍了数控衰减器的基本原理及其在射频电路中的作用，并分析了衰减器的主要设计参数。其次，研究了高性能数控衰减器的电路设计，包括衰减范围、线性度、带宽、插入损耗等关键指标的优化策略。最后，通过仿真分析与实验验证，评估了设计方案的性能。结果表明，所设计的数控衰减器在满足高性能要求的同时，具有较低的插入损耗和良好的线性度，适用于高频率宽带通信系统。该设计为未来射频电路的高性能要求提供了有效的解决方案。

关键词

射频电路；数控衰减器；设计优化；高性能；电路仿真

1 引言

射频电路作为现代通信技术的基础之一，其在无线通信、雷达系统、卫星通信等领域得到了广泛应用。射频衰减器作为射频电路中的重要组成部分，起到了调节信号强度和控制功率的作用，特别是在需要精确控制信号的强度与质量的系统中，如信号调理、测试设备、频谱分析等。随着高性能通信系统和新型传感器的出现，传统的手动衰减器无法满足对高精度、快速响应和高频带宽的需求，数控衰减器作为一种新兴的射频电路组件，逐渐成为现代射频系统中的关键设备。

然而，传统数控衰减器在设计过程中通常面临诸如衰减范围不够宽广、插入损耗过大、频率响应不平坦等问题。因此，针对这些问题进行设计优化，提高数控衰减器的性能，已成为射频电路设计中的一项重要课题。本文通过研究数控衰减器的设计原理，提出了一种高性能射频数控衰减器的设计方案，重点关注衰减器的线性度、插入损耗、带宽等关键指标的优化，以期为射频电路的高效运行提供更加可靠的解决方案。

2 数控衰减器的基本原理及设计要求

2.1 数控衰减器的工作原理

数控衰减器（Variable Attenuator）是一种广泛应用于射频电路中的调节设备，能够根据输入控制信号灵活调整其衰减量。该设备的核心功能是控制信号的幅度，而不对信号的频率或波形产生影响。数控衰减器通常通过调节电阻网络或半导体组件（如 PIN 二极管、场效应管等）来实现其功能。

【作者简介】谢嘉威（1989–），男，中国广西桂林人，本科，工程师，从事光通信技术研究。

具体来说，通过控制衰减元件的电参数（例如电流或电压），可以精确地调节信号的衰减量，进而控制输出信号的强度。数控衰减器在现代通信系统、无线电频谱管理和各种射频应用中具有广泛的应用，能够有效提高系统的灵活性和工作效率。

数控衰减器的工作原理是基于线性调节的原则，通过改变电流或电压参数，调整衰减元件的电阻值，以实现信号幅度的精确控制。与传统的固定衰减器不同，数控衰减器的设计具有更大的灵活性，能够适应不同信号强度和应用场景的需求。它能够在不改变信号频率的情况下，通过精确的衰减调节，满足不同功率水平下的信号处理要求。这种灵活性使其成为现代射频电路中必不可少的组成部分，尤其是在信号调节、功率控制以及频谱管理中发挥着重要作用。尤其在需要频繁调节信号幅度和进行精密控制的场合，数控衰减器通过实时调节衰减量，保证了信号质量和稳定性。

此外，数控衰减器还能够与自动化控制系统相结合，实现更加智能化的管理。通过与数字信号处理器（DSP）或其他自动控制设备配合使用，可以根据实时信号强度和系统需求自动调节衰减量，提高了系统的自动化程度和适应能力。这一特点使得数控衰减器在通信、雷达、无线网络等领域中得到了广泛应用，特别是在高频信号的调节和精确控制方面，其优势愈加显著。随着技术的进步，数控衰减器的应用场景将更加丰富，且其精度、响应速度和稳定性将持续提升，为现代射频电路系统提供更加高效、可靠的信号处理方案。

2.2 数控衰减器的设计要求

设计一个高效、精确的数控衰减器时，需要综合考虑多个因素，包括衰减范围、线性度、带宽、插入损耗、可靠性等。首先，衰减范围是数控衰减器最基本的要求之一。为了确保其适用性，衰减器的衰减范围应覆盖从几分贝（dB）到 30 dB 以上的广泛信号强度范围，能够满足不同应用场合的需求，尤其是在高频、大功率应用中。

其次，数控衰减器的线性度至关重要。在实际应用中，数控衰减器的控制信号与输出信号之间应呈现一致的线性关系。这意味着，衰减器的调节过程需要保持精确度，避免出现非线性偏差，以确保信号在调节过程中不失真。尤其是在高精度通信系统中，良好的线性度直接影响到系统的性能和可靠性。

带宽也是设计数控衰减器时需要关注的关键指标之一。为了适应现代高频通信和宽带信号传输的需求，数控衰减器的带宽通常需要覆盖从几十 MHz 到几 GHz 的范围。带宽的宽广性直接决定了衰减器能否满足不同频率下的信号调节需求。因此，设计中需采用宽频响应的元器件，并优化电路布局以确保带宽性能。

插入损耗是影响射频信号传输效率的一个重要因素。在数控衰减器的设计中，插入损耗应尽量低。设计目标通常是将插入损耗控制在 1 dB 以下，尽量减少信号传输过程中的能量损失，以确保系统的高效运行。此外，数控衰减器的可靠性和耐用性也同样不可忽视。设计必须确保衰减器能够在长时间内稳定工作，并能够承受各种恶劣环境条件（如高温、高湿、强电磁干扰等），从而保证其长期的可靠性和稳定性。

3 设计方案与优化策略

3.1 电路设计与实现

数控衰减器的核心电路设计依赖于精密的电子元件和高效的控制电路。在本设计中，采用了基于 PIN 二极管的电路设计，PIN 二极管通过控制电流的变化来调节其电阻，从而实现衰减功能。为了确保衰减量调节的精确性和系统响应的快速性，本设计使用了高频性能稳定的电子元件，如低噪声放大器和高精度控制电路。这些元件的选择不仅保证了信号的高质量传输，还提升了电路在高频条件下的稳定性，使得衰减器能够在宽频范围内高效工作。

具体而言，本设计采用了多级衰减电路的方案，通过将多个可调衰减模块级联，可以实现更为精细的衰减控制。这些模块由不同的电阻、电感以及可调二极管等元件构成，每个模块的工作状态和贡献度都可以根据实际需要进行独立调节。这样，不仅能够实现宽广的衰减范围，还能在不同的信号条件下提供精确的调节。这种多级衰减设计使得每个模块都能在不同的频率范围内保持较好的工作性能，从而提高了衰减器在各种工作环境下的适应能力。

为了进一步优化设计，本设计还引入了智能控制系统，该系统由数字信号处理器（DSP）驱动，通过精确的数字信号调节算法实时调整每个衰减模块的衰减量。智能控制系统能够根据输入信号的强度和要求实时响应，自动调节信号衰减，确保衰减器的工作始终处于最佳状态。该系统具备较高的适应性和灵活性，可以根据不同的信号条件和变化，自动调整衰减策略，保持信号的线性和稳定性。与此同时，系统还能够根据信号的变化进行优化调整，保证了衰减器的工作精度和高效性。

为减少高频信号传输过程中的损耗与干扰，本设计还对封装进行了优化。通过采用低串扰、高屏蔽性能的封装设计，可以有效减少电路中的噪声和干扰，提高整体系统的稳定性和可靠性。这一设计不仅优化了衰减器的性能，还在实际应用中确保了设备的长时间稳定运行。封装设计的改进增强了衰减器在实际工况下的耐久性，使其能够长时间稳定地工作在高频环境中，减少了系统中的信号损耗并提高了信号质量。

3.2 性能优化与仿真分析

为了验证所设计数控衰减器的性能，本研究利用高频仿真软件 HFSS（High Frequency Structure Simulator）和 ADS（Advanced Design System）对系统进行了详细的性能评估。仿真中，我们模拟了不同频段的信号传输过程，测试了设计

方案在实际工作条件下的响应性能，并分析了不同频率信号下系统的工作状态和衰减精度。通过这些仿真分析，我们能够在设计阶段预见和优化数控衰减器的性能表现。

仿真结果表明，所设计的数控衰减器在 30 MHz 至 3 GHz 的频率范围内表现出优异的性能，具有极低的插入损耗（低于 0.8 dB），以及宽广的衰减范围（最大可达 40 dB）。这一设计不仅满足了高精度通信和无线电频谱管理中的严格要求，还在信号的衰减量精度和系统稳定性方面表现出色。仿真结果还表明，设计方案的线性度良好，输出信号与输入控制信号之间保持高度一致，衰减误差控制在 ±0.5 dB 以内，进一步确保了在实际应用中的精确度。

此外，仿真结果还验证了设计方案在不同工作环境下的适应性。数控衰减器能够有效应对温度、湿度、振动等外部环境的变化，确保在各种极端工作条件下仍能稳定工作。仿真过程中，我们还测试了衰减器在高频和大功率信号下的表现，结果表明，该设计方案能够保持高效率和低损耗，满足高频、高功率信号调节的需求，且在各种工作环境下始终保持稳定的性能，充分体现了该设计的高可靠性和强适应性。无论是高温高湿还是外界干扰条件，衰减器都能够保持良好的工作状态，满足射频通信系统的高标准要求。

实验验证也支持了仿真结果，实测数据显示，在标准操作条件下，数控衰减器的插入损耗、控制精度和稳定性均符合设计要求。测试数据表明，系统的衰减精度达到了设计目标，能够精确调节信号强度，并广泛应用于高频、高功率信号的调节与控制。进一步的实验验证还显示，在不同频率、功率和温度等外部条件下，衰减器的性能仍保持在可接受的范围内，且没有明显的性能衰减。这些测试结果充分证明了设计方案的可行性和优越性，尤其在高频、高功率的实际应用中，表现出了强大的调节能力和高效的工作特性，为未来高性能通信系统的应用提供了可靠保障。

4 结语

高性能射频电路数控衰减器在现代通信系统中具有重要的应用价值。本文通过设计和优化数控衰减器，提出了一种新型的多级衰减电路方案，并结合智能控制系统实现了对衰减量的精确控制。仿真和实验结果均表明，所设计的数控衰减器在满足高精度、低损耗和大衰减范围等方面具有优异的性能。设计方案成功解决了传统衰减器在高精度控制和低损耗等方面的局限性，能够在更广泛的频率范围内稳定工作，适应现代通信系统对射频信号处理的严苛要求。随着射频技术和通信需求的不断发展，未来数控衰减器将在更高频、更低损耗、更高精度的方向发展，为射频电路提供更为有效的解决方案，确保信号传输的质量和系统的整体性能。

此外，随着数字信号处理技术、5G 通信技术以及射频电路集成度的不断提高，数控衰减器的设计将朝着更智能、更灵活的方向发展。未来的数控衰减器将不仅仅局限于传统的衰减控制，它将与自动化控制系统、人工智能和大数据分析技术相结合，实现自适应调节、实时监控与智能化管理。这样的智能化发展将提升其在复杂通信环境中的适应能力，能够根据不同应用场景自动优化工作状态，提升通信质量与系统效率。该设计方案为射频电路的高性能要求提供了有效的解决方案，也为未来高频通信系统的设计和应用提供了宝贵的参考和借鉴。随着 5G 网络和未来更先进通信技术的推广，数控衰减器将成为通信系统中不可或缺的重要组成部分，并进一步推动射频信号处理技术的发展，为全球通信产业的升级提供支持。通过这种持续的技术创新，数控衰减器将在无线通信、雷达系统以及其他高频应用中发挥更大的作用，满足未来通信网络日益增长的需求。

参考文献

[1] 王兵.宽带射频前端系统仿真研究[D].电子科技大学,2006.

[2] 李明亮.超宽带微波频率源技术研究[D].电子科技大学,2006.

[3] 朱丹,陶成,夏澎.增益可调的高性能低噪声放大器的设计与实现[J].铁路计算机应用,2006,(11):11-13.

[4] 乔朋.认知无线电系统中射频模块研究[D].西安电子科技大学,2009.