

用于射频频光通信的小型化RL增益均衡器设计

熊平戡,席虹标,吴淑婷,李荣亮

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:在射频频光通信系统中,电/光与光/电转换器件会导致带内增益不平坦,影响系统性能。设计了一种用于射频频通信的小型化电阻-电感(RL)增益均衡器。通过参数扫描仿真优化,将传统电阻-电感-电容(RLC)电路简化为RL无源网络,将两级RL均衡器级联并应用于L波段射频频光通信系统,并对该均衡器进行加工和实验测试。测试结果表明:RL均衡器应用于L波段(900 MHz~2.5 GHz)系统后,增益平坦度由2.4 dB优化至0.8 dB,改善量达1.6 dB,为系统性能提升提供了一种有效且经济的解决方案。

关键词:均衡器;射频频光通信;平坦度;激光器;探测器

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0021-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.004

Design of a miniaturized RL gain equalizer for radio frequency optical communication

XIONG Pinjian, XI Hongbiao, WU Shuting, LI Rongliang

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In radio frequency optical communication systems, the electrical-to-optical and optical-to-electrical conversion devices can lead to in-band gain non-flatness, which affects system performance. A miniaturized resistor-inductor (RL) gain equalizer designed for radio frequency communication was developed. Through parameter sweep simulation and optimization, the traditional resistor-inductor-capacitor (RLC) circuit was simplified into an RL passive network. A two-stage RL equalizer was cascaded and applied to an L-band radio frequency photonic communication system, and the equalizer was fabricated and experimentally tested. The test results show that the RL equalizer applied to the L-band (900 MHz~2.5 GHz) system optimizes the gain flatness from 2.4 dB to 0.8 dB, with an improvement of 1.6 dB, providing an effective and economical solution for improving system performance.

Key words: equalizer, radio frequency optical communication, flatness, laser, detector

0 引言

在现代通信系统中,为降低天线或雷达系统建设的复杂度和成本,亟需解决天线与数据处理中心之间的高频信号转发问题^[1]。射频频光通信子系统凭借其带宽大、传输距离远、体积小及功耗低等优势,成为解决这一问题的有效方案。

收稿日期:2025-04-02。

作者简介:熊平戡(1984—),硕士,高级工程师,主要研究方向为射频频光通信中的射频电路、控制电路、光-电-电光转换、射频频光通信系统的设计,参与多个省部级、国家级重大项目,获得桂林科学进步二等奖1项。



然而,在射频频光通信系统中,电/光与光/电转换环节以及射频放大器等部件常会引起射频信号在不同频率下的增益起伏,从而导致系统整体增益平坦度恶化。为改善该问题,通常在系统的输入端与输出端级联增益均衡器,以补偿由电光器件和射频放大器引入的增益不平坦^[2,8-9]。其中,电阻-电感-电容(RLC)型增益均衡器因成本低、印刷电路板(PCB)设计难度小、调试简便等优点,在射频频光通信系统中得到广泛应用。

为此,本文为射频频光通信系统设计一款小型化RL增益均衡器。该设计利用RL电路高通滤波的边沿上升特性(即增益随频率升高而增大),从而实现对低频信号衰减大、对高频信号衰减小的均衡功能。

1 均衡器原理与设计

1.1 工作原理

本文设计的均衡器应用于L频段射频光通信系统中,原理框图如图1所示。系统主要由射频光发射模块、射频光接收模块和光纤组成。

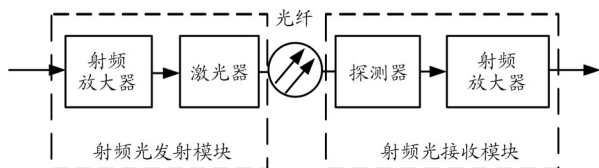


图1 射频光通信系统原理框图

L频段射频光通信系统采用直接调制技术,光链路由射频放大器、激光器和探测器组成,其中激光器完成射频信号的电/光转换、探测器完成光/电转换。射频放大电路与激光器、探测器组成的光通信系统频率响应在各频点不一致,增益平坦度指标较差,当输入相同功率信号时,各频率点输出功率不一致,从而影响系统的使用,因此需要增加增益均衡器对光通信系统的增益进行补偿。

1.2 基本理论

在增益均衡器的设计中,选择合适的均衡结构非常重要,均衡器的基本组成单元是谐振器。均衡器的基本电路图^[3,4-5]如图2所示。该电路由 R 、 L 、 C 元件级联构成,其传输特性随频率变化,从而实现对增益斜率的补偿。图中, R 为谐振电路上的电阻器; L 为谐振电路的电感器; C 为谐振电路的电容器;PORT₁、PORT₂为射频输入、输出端口。本文以此作为设计起点,并通过后续仿真分析对其进行优化与简化。

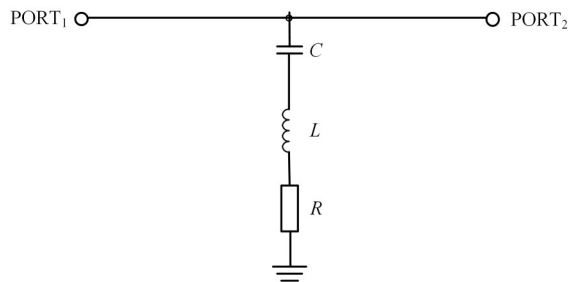


图2 射频增益均衡基本电路图

1.3 增益均衡器的设计及改进

本文利用网络分析仪对射频光传输设备进行测试,结果表明其增益平坦度较差。在900 MHz~2.42 GHz的工作频带内,增益由2.38 dB(900 MHz)下降至0.02 dB(2.42 GHz),带内波动达2.4 dB。为补偿这一增益起伏,需在系统中引入增益均衡器。在传统

RLC均衡电路的基础上,提出一种结构简化的RL增益均衡器。其核心设计方法是通过系统的参数扫描仿真,识别各元件对均衡性能的影响,并以此为指导对电路进行优化和级联设计。均衡器工程实现包含微带等效 R 、 L 、 C 实现均衡电路^[7-8],以及分立器件搭建均衡电路等。为最大限度地降低成本,本文设计的均衡器采用分立器件搭建,且所选 R 、 L 、 C 均为批产型常用规格,其感值、阻值和容值均为标准值。受限于此,均衡器的均衡量无法实现连续调节,需在固定取值范围内进行优化设计。

1.3.1 电感 L 优化设计

为确定RL均衡器电路的最佳元件参数,本文采用参数扫描法对图2中 R 、 L 、 C 进行仿真分析。首先,在电容 C 短路和电阻 R 短路的情况下,对电感 L (10、20、30、40 nH)进行参数扫描,结果如图3所示。可以看出,均衡电路的均衡低频端增益(S_{21} 曲线)小,高频端增益大。为尽量减少带内各分频段的增益波动,可选择增益曲线线性度较好的电感感值。图3中,当 $L=20$ nH时,均衡曲线具有良好的线性度,有利于减小带内波动,故电感取值定为20 nH。

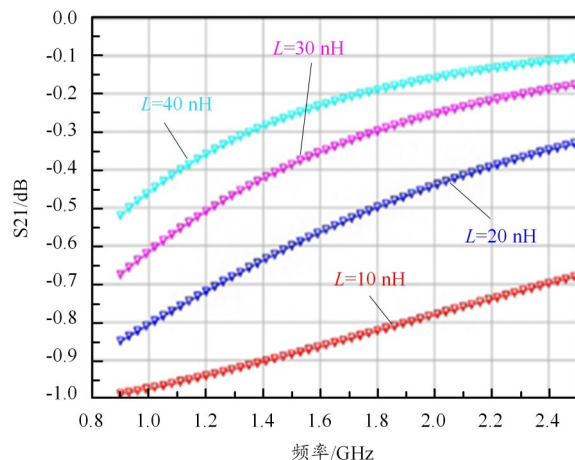


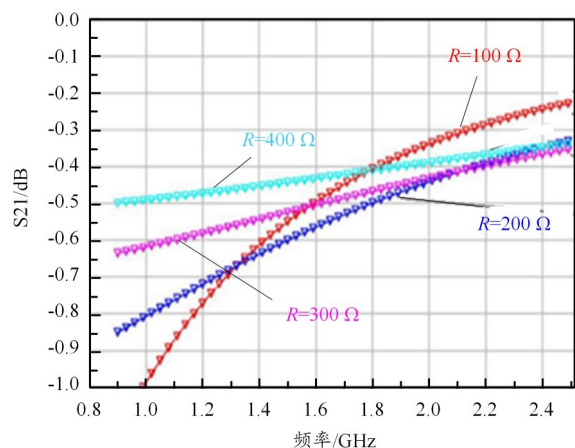
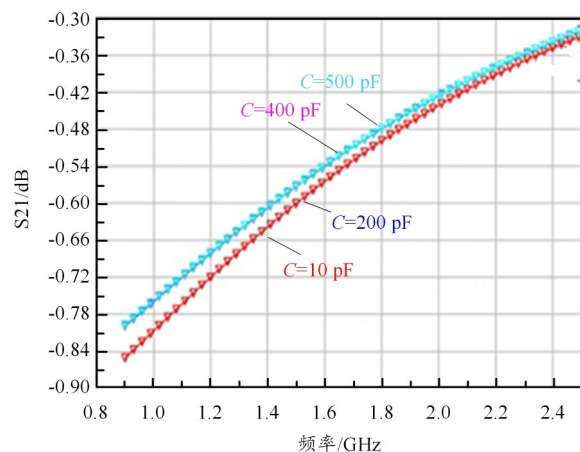
图3 均衡电路 L 的扫描结果

1.3.2 电阻 R 优化设计

在电容 C 短路和电感 L 短路的情况下,对电阻 R (100、200、300、400 Ω)进行参数扫描,结果如图4所示。可以看出,电阻 R 减小则均衡量增大,增益曲线弯曲加剧;阻值增大则均衡量减小,增益曲线更平直。综合均衡量和增益曲线的变化趋势,同时尽量减少带内各分频段的增益波动,选定 R 取值定为200 Ω 。

1.3.2 电容 C 优化设计

在电阻 R 短路和电感 L 短路的情况下,对电容 C (10、200、400、500 pF)进行参数扫描,结果如图5所

图4 均衡电路 R 的扫描结果图5 均衡电路 C 的扫描结果

示。电容 C 的变化对均衡量影响较小,且 C 为400 pF和500 pF时的曲线重合, C 为200 pF和10 pF时的曲线重合,同时考虑到分立器件会占用电路板的面积,增加整个电路的面积,因此可将电容器从电路中去掉。

1.3.3 性能提升设计

综合上述计算机对均衡电路扫描和分析结果,本文将均衡电路由基本RLC电路优化为RL电路,电阻 L 取值为20 nH、 R 取值为200 Ω ,得到的该单级RL电路的均衡量约为0.475 dB,无法满足系统补偿需求。因此,本文采用两级级联方案提升均衡量,并对该电路进行仿真,其电路原理图和仿真结果如图6、图7所示。通过图7计算均衡量 m_2 与 m_1 的差值可得到两级级联均衡器的均衡量为0.889 dB,相比单级均衡器的均衡量有明显的提升。

2 实验验证与结果分析

为验证上述设计优化方法的有效性,本文对所设

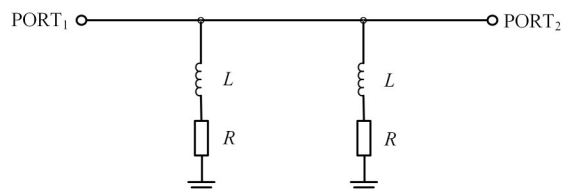


图6 两级RL均衡电路原理图

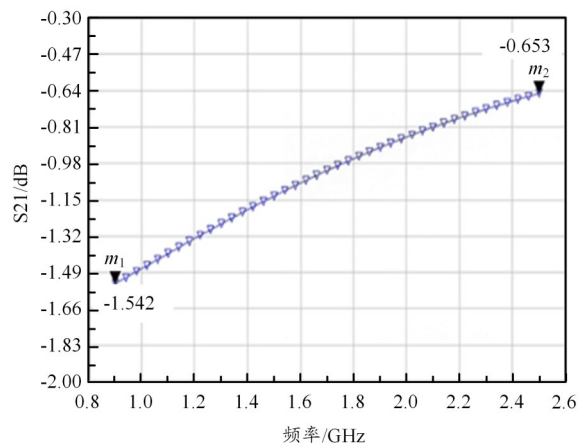


图7 两级RL均衡电路均衡量仿真图

计的增益均衡器进行了加工制作与实验测试。首先,在射频光通信系统的发射端与接收端均接入该两级均衡器,系统优化框图如图8所示,形成前后级联的均衡方案,理论上可将系统增益平坦度优化1.778 dB。

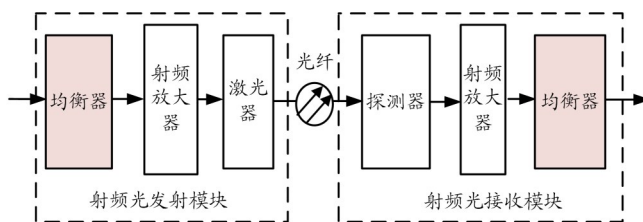


图8 射频光通信系统增益平坦度优化框图

基于仿真确定的参数,设计并加工了含有两级RL增益均衡电路的射频光发射模块与射频光接收模块的PCB,实物如图9所示。

利用网络分析仪对未增加均衡器与增加均衡器的L频段射频光通信系统S21曲线进行测试,测试结果如图10所示。可以看出,在未加均衡器的原系统中,增益平坦度(S21曲线最大点与最小点的差值)为2.4 dB;增加均衡器后,系统的增益平坦度优化至0.8 dB,改善了1.6 dB。该实测结果与理论预计值(1.778 dB)趋势一致且数值接近,充分验证了设计方法的正确性与可行性。

熊平骥, 席虹标, 吴淑婷, 等: 用于射频光通信的小型化RL增益均衡器设计

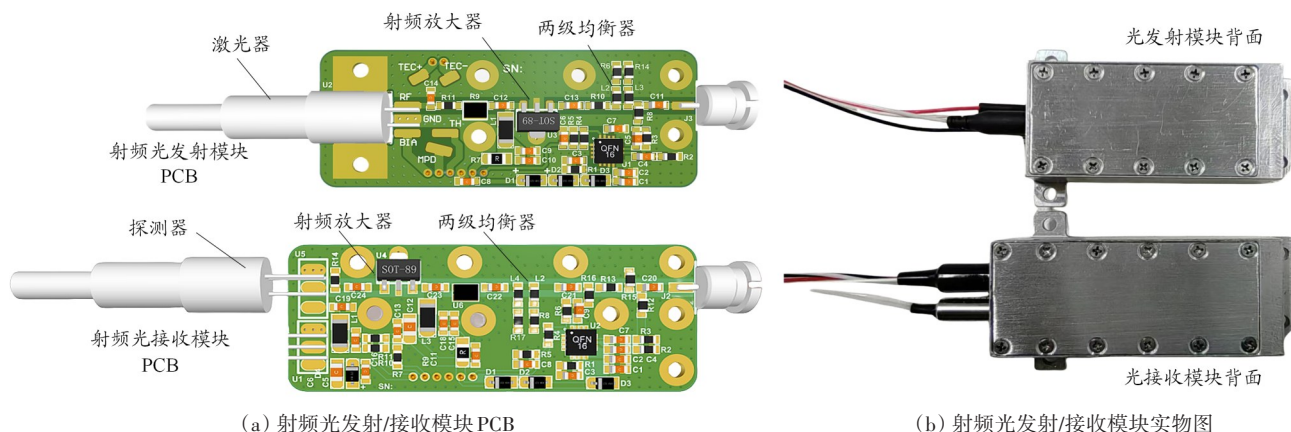


图9 射频光发射模块与射频光接收模块PCB及实物图

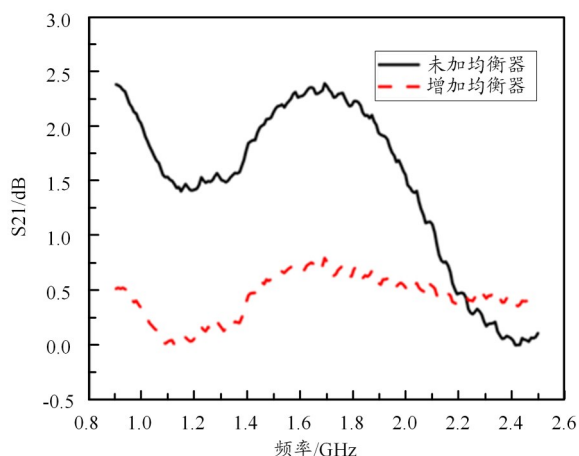


图10 2种情况下射频光通信系统S21曲线对比图

3 结束语

本文基于理论分析与电路仿真,对RLC型均衡电路进行了研究,并结合实际PCB布局中对小型化的要求,将传统RLC结构优化为RL型增益均衡电路,有效减少了电路板面积。此外,为提升均衡性能,设计了基于两级RL电路的增益均衡器,并分别在射频光通信系统的发射端与接收端进行级联补偿。仿真结果表明,该结构预计可实现约1.778 dB的均衡量。实际测试中,将所设计的均衡器应用于系统后,增益平坦度由2.4 dB优化至0.8 dB,改善幅度达1.6 dB,达到了预期设计目标。本研究验证了所设计的RL均衡电路在提升系统增益平坦度方面的有效性,为实现低成

本、小型化的射频光通信系统增益补偿提供了一种可行的技术途径。若需进一步提高均衡量,可采用更多级均衡电路级联的方式实现。

参考文献:

- [1] 姚宜杭. 模拟直调RoF链路性能优化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [2] 宋翠莲, 马慧, 马显超, 等. 一种新型双层双模微带均衡器设计[J]. 现代雷达, 2025, 47(1): 91-95.
- [3] 刘长军, 黄卡玛, 闫丽萍. 射频电路设计[M]. 北京: 科学出版社: 2007.
- [4] 钟清华. 小型化2-6.2GHz增益均衡器[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [5] 王国栋, 华伟. 一种宽带小型化微波增益均衡器设计[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014, 51(4): 764-768.
- [6] ZHOU T F, HUANG J. A novel wideband microwave gain equalizer using SIR branch lines[C]//IEEE. Proceedings of Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Harbin: IEEE, 2014: 1377-1379.
- [7] CHATURVEDI G, ANAND G. Non-reflective broadband microwave gain equalizer for EW applications[C]//IEEE. Proceedings of the MTT-S International Microwave and RF Conference. Mumbai: IEEE, 2019: 1-4.
- [8] SCHEDER A, PFAHLER T, BRIDIER A, et al. An ultra-wideband microstrip gain equalizer on thin-film ceramic for future millimeter wave applications up to and beyond 120 GHz[C]//IEEE. Proceedings of 2024 IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). Clearwater: IEEE, 2024: 1-4.
- [9] ZHANG Y, XU J, HE C. A directivity-compensated wideband microstrip coupler based on capacitive-loading patches and reflectionless amplitude equalizers[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2025, 35(2): 189-192.