

S波段16 dB衰减器设计

李万里, 陈昌明, 熊 荣

成都信息工程大学, 四川 成都

Email: 1312213002@qq.com

收稿日期: 2020年11月9日; 录用日期: 2020年11月20日; 发布日期: 2020年12月2日

摘 要

本文设计并制作了一款适用于S波段的高线性16 dB衰减器, 该衰减器由四个PIN二极管组成的两组单刀双掷开关和一个16 dB衰减芯片组成, 通过控制电压实现直通与衰减支路的切换。经测试在频带2~3 GHz内, .6 dB, 且两端口回波损耗小于-20 dB, 测试结果与仿真吻合度较高。由于结构紧凑, 该电路可作为大波动小于0.3 dB, 插入损耗约为0动态范围衰减器的基本单元。

关键词

S波段, PIN二极管, 衰减器

Design of a 16-dB S-Band Attenuator

Wanli Li, Changming Chen, Rong Xiong

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: 1312213002@qq.com

Received: Nov. 9th, 2020; accepted: Nov. 20th, 2020; published: Dec. 2nd, 2020

Abstract

In this paper, an attenuator with high linearity is designed for S-band applications. The proposed module consists of a 16 dB chip attenuator and two single-pole double-throw switches using four PIN diodes. The direct paths or attenuated branch can be controlled flexibly through digital signal. The presented device shows an insertion loss of 0.6 dB, and an ultra-low fluctuation of 0.3 dB in the frequency range of 2~3 GHz. Also, the return losses of the input and output ports are better than -20 dB. The measured and simulated results show good agreement. The designed circuit can be acted as a candidate of the basic unit for the realization of broaden-dynamic range attenuators due to its compact structure.

Keywords

S-Band, PIN Diode, Attenuator

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在现代无线通信中, 衰减器配合功率放大器的使用, 实现对功率的灵活调节, 在相控阵雷达系统中有着重要应用。随着通信技术的发展, 衰减器相关研究不断深入, 向着更高精度、更大动态范围方向发展。对于衰减器的实现方法[1] [2] [3]有较多论述。在最新的研究中, 多使用新型材料、耦合器等完成设计, 如采用 3 dB 耦合器[4]和 0 dB 支线定向耦合器[5]设计的衰减器可实现最大 25 dB 的衰减, 但物理尺寸较大难以向小型化发展; 基于石墨烯材料[6]和改变偏置电流大小实现衰减量控制[7]的可变衰减器能够兼顾较宽的工作频带和输入输出驻波比, 但精度难以保证且性价比较低; 采用 CMOS 等工艺实现的集成衰减器[8] [9]体积小、动态范围大, 但功率容量及响应时间方面比分立式略差。本文所设计的衰减器带内线性度高, 插入损耗低且输入输出端口结构简单紧凑, 便于单元级联, 为大动态范围的衰减器设计提供了一种设计思路和参考方法。

2. 衰减电路设计

本文所设计的电路结构如图 1 所示, 由衰减器和射频开关组成, PIN 二极管 D1 与 D3、D2 与 D4 组成两组单刀双掷开关。在正向直流偏置时, 二极管导通, 特性为线性小阻抗元件, 且对于射频信号无方向性; 反向直流偏置时, 二极管截止, 表现为高阻抗特性。当 D3、D4 导通, D1、D2 截止时, 信号无衰减; 当 D1、D2 导通, D3、D4 截止时, 信号经过固定值衰减器芯片(AT1)实现预定的 16 dB 衰减。电感 L1~L5 的作用是将直流电源和射频信号实现耦合连接, 且在电路阻抗匹配设计中是重要的调谐元件, 为了减小装配误差和便于调试, 均采用平面圆形螺旋电感。

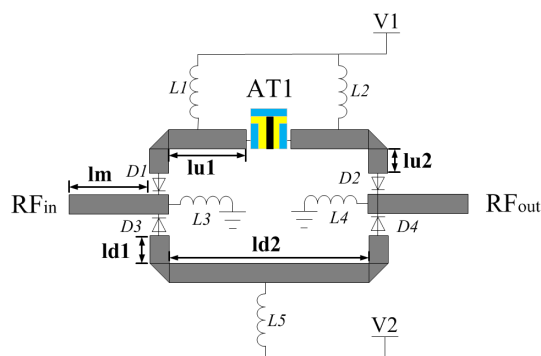


Figure 1. Schematic diagram of circuit structure

图 1. 电路结构示意图

基板材料选用 Rogers5880, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$, 损耗角正切值 $\tan\theta = 0.0009$, 基板厚度为 0.508 mm。由于微带线的分布参数特性, 使其自身具有一定的电感值, 其值的大小与带线横截面的几何平均距离和算术平均距离有关; 同时当两段微带线相隔较近时, 流经其上的信号会相互影响产生互感现象, 并可计算其互感值, 互感值是微带线长度与带线间几何平均距离的函数[10]。充分利用以上两种特性制作的

平面螺旋电感，其电感值可用公式(1)进行计算

$$L_{eff} = 2L \left[\ln \left(\frac{2L}{W+T} \right) + 0.5049 + \frac{W+T}{3L} \right] \quad (1)$$

其中 L_{eff} 为电感线圈感值，单位是纳亨(nH)； L 为带线长度， W 和 T 为带线长度和厚度，单位均为厘米。

使用仿真软件 ADS 建立原理图文件如图 2 所示，该原理图文件主要包含微带线、二极管、电感及 π 型电阻网络。基本电路结构由微带线确定，电感线圈的带线尺寸和圈数对应不同电感值，当平面电感带线宽度 W 是 0.1 mm，缝隙宽度 S 为 0.2 mm 时，为了使该电路更好工作在频带 2~3 GHz 内，对电感进行仿真优化， S 参数随着电感 L5 线圈数量变化如图 3 所示，经优化，当线圈数量为 4.6 时， S 参数在带内表现最好。使用同样的优化方法可得出 L1 和 L2 的圈数为 4.2，L3 和 L4 的圈数为 4。

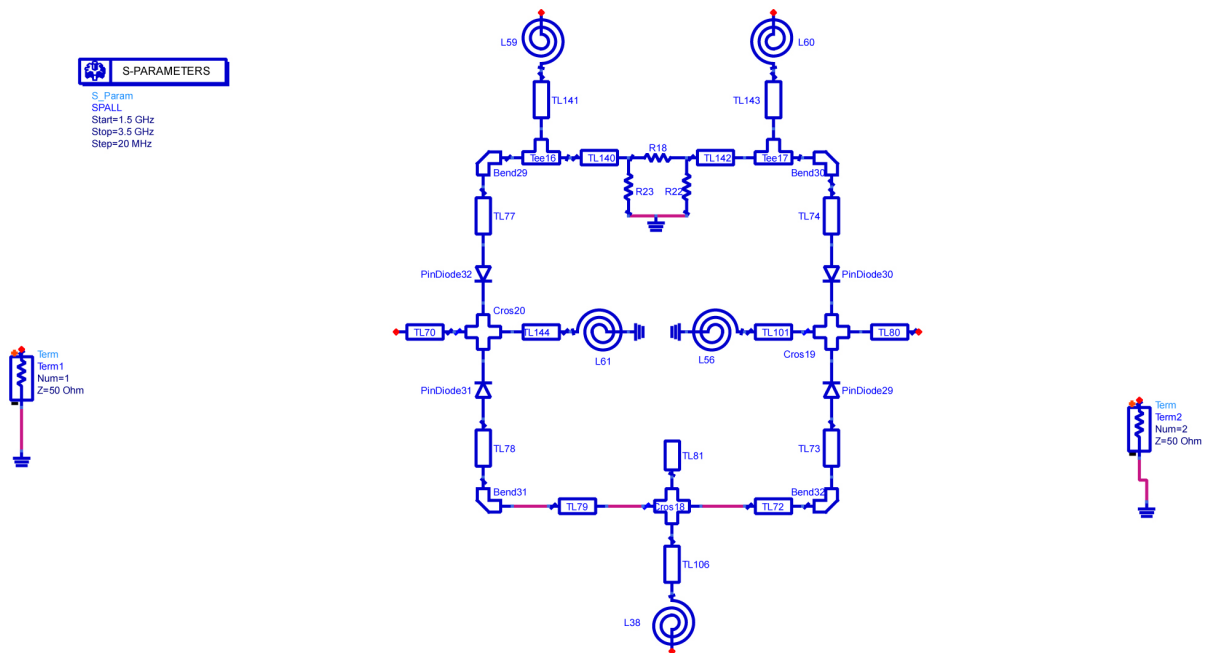


Figure 2. Simulation schematic diagram in ADS

图 2. ADS 仿真原理图

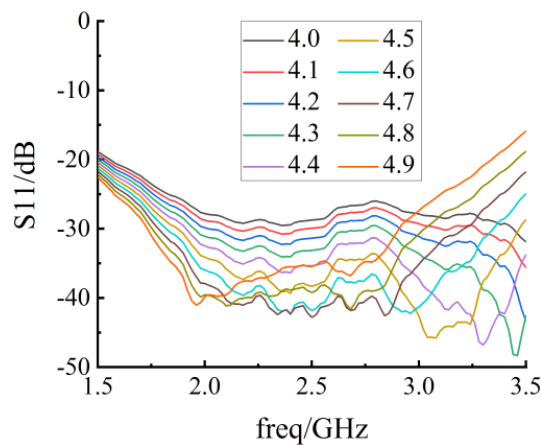


Figure 3. S-parameter simulation diagram

图 3. S 参数仿真图

在设计阶段, 需要综合考虑原理图和版图仿真结果, 根据版图仿真结果, 对原理图进行有针对性的优化, 使版图仿真也得到较理想结果。优化后电路版图的主要尺寸参数如表 1 所示。

Table 1. Main dimensions of microstrip circuit

表 1. 微带电路主要尺寸

参数	值/mm	参数	值/mm
lm	9	lu1	2.75
lu2	1.5	ld1	1.5
ld2	9.52		

3. 仿真和测试结果分析

选用 SKYWORKS 公司 APD2220 二极管和 EMC technology 公司 TS03XXF 系列 16 dB 衰减器芯片, 与微带电路装配在金属屏蔽腔体后的实物照片如图 4(a)所示。使用矢量网络分析仪(Agilent N5244A)对该电路进行 S 参数测试。图 4(b)和图 4(c)分别是直通、衰减时 S 参数测试与仿真的结果对比。

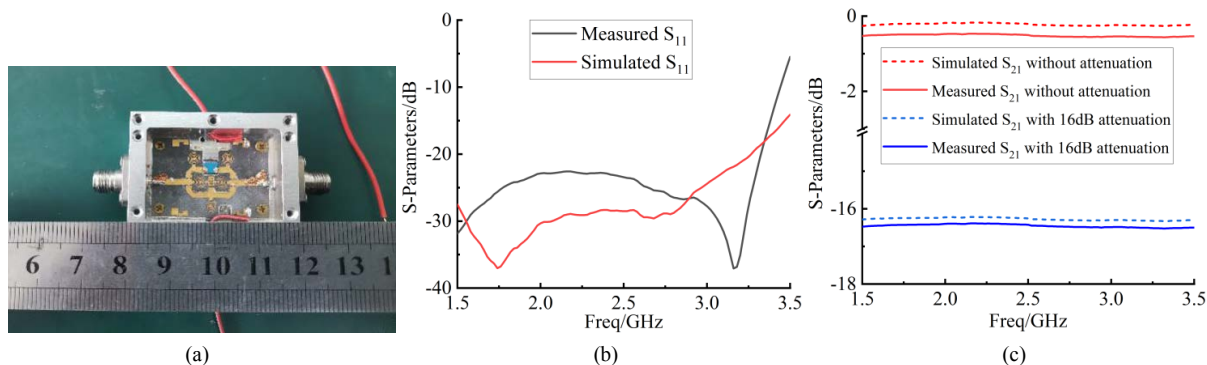


Figure 4. (a) The actual circuit; (b) The simulation and measured results comparison of S_{11} ; (c) The simulation and measured results comparison of S_{21}

图 4. (a) 电路实物; (b) S_{11} 仿真与测试结果对比图; (c) S_{21} 仿真与测试结果

对比回波损耗, 测试与仿真的最佳匹配频率点不同, 差距来源可能为加工误差, 但均保持在 -20 dB 以下, 说明两端口阻抗匹配仍较好。测试结果表明, 衰减时 S_{21} 最大值为 16.6 dB, 直通时为 0.5 dB, 在频带 2~3 GHz 内, 波动均小于 0.3 dB, 且测试结果与仿真结果吻合度较高。

4. 结论

本文设计并制作了一款适用于 S 波段的 16 dB 衰减器。该衰减器使用两个 PIN 二极管构成单刀双掷开关, 通过控制二极管的导通与截止, 实现直通信号路径和衰减信号支路的切换。并且由于输入输出端口结构简单紧凑, 便于单元串联, 为大动态范围衰减器提供了一种设计方案。

参考文献

- [1] 范海斌. L 波段限幅衰减组件的设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [2] 邓玉芬, 朱蕾. 小步进功率数控衰减器的设计及实现方法[C]//中国电子学会, /2010 年全国军事微波会议论文集, 2010: 314-316.
- [3] 秦建峰, 谢晓宇, 涂明, 等. CINRAD/SA 型天气雷达射频数控衰减器的电路原理及故障维修[J]. 气象水文海洋仪器, 2019, 36(2): 103-109.

-
- [4] Bulja, S. and Grebennikov, A. (2012) Variable Reflection-Type Attenuators Based on Varactor Diodes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **60**, 3719-3727. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2216895>
- [5] Sun, K.O., Choi, M.K. and Vand, W.D. (2005) A PIN Diode Controlled Variable Attenuator Using a 0-dB Branch-Line Coupler. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, **15**, 440-442. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.850568>
- [6] Yasir, M., Bozzi, M., Perregini, L., *et al.* (2017) Highly Tunable and Large Bandwidth Attenuator Based on Few-Layer Grapheme. 2017 *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications*, Pavia, 20-22 September 2017. <https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2017.8247336>
- [7] Beyragh, D.S., Pahlevaninezhad, H. and Motahari, S.R. (2007) A Broadband Low Reflection Electronically Variable PIN Diode-based Attenuator. *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Singapore, 24-26 September 2007. <https://doi.org/10.1109/ICUWB.2007.4381053>
- [8] Song, I., Cho, M.K. and Cressler, J.D. (2018) Design and Analysis of a Low Loss, Wideband Digital Step Attenuator with Minimized Amplitude and Phase Variations. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **PP(99)**, 1-12. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2018.2827934>
- [9] 刘志军, 高学邦. 一款高精度大衰减量单片数控衰减器[J]. 半导体技术, 2012, 37(1): 59-62.
- [10] 杨卓, 董天临. 射频电路中平面螺旋电感的计算[J]. 电子元器件应用, 2007, 9(1): 57-60.