

文章编号: 2095-4980(2018)05-0875-04

一种基于“1”型 DGS 的新型幅度均衡器

刘 伶, 夏 雷

(电子科技大学 极高频复杂系统国防重点实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 基于缺陷地结构(DGS)的陷波特性和设计了一种新型幅度均衡器。将电阻直接加载在 2 个“1”型微带 DGS 中, 替代了传统幅度均衡器中加载电阻的谐振结构。通过增加微带线线宽抵消了 DGS 结构带来的特性阻抗变高效应, 极大优化了驻波比。该结构具有均衡量和带宽调节方便, 超宽带, 尺寸小, 结构简单, 易于加工的特点。三维电磁仿真和实测结果表明, 该幅度均衡器可工作在 12~40 GHz(Ku,K,Ka 波段)超宽频带, 输入回波损耗优于 13.5 dB, 最大均衡量优于 17 dB, 边带插损优于 2.1 dB, 面积 8 mm×8 mm。

关键词: 幅度均衡器; “1”型缺陷地结构; 陷波特性

中图分类号: TN715

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0875

A novel amplitude equalizer based on “1” type of DGS

LIU Ling, XIA Lei

(Fundamental Science on EHF Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A novel amplitude equalizer is designed based on the band notch characteristic of Defected Ground Structure(DGS). To replace the resonance associated with resistance in traditional amplitude equalizer, two resistances are put into ‘1’ type of DGS. By increasing the width of microstrip line, the characteristic impedance variation effect of DGS is eliminated, so does the bad Voltage Standing Wave Ratio(VSWR). This kind of equalizer is characterized by convenient regulating, ultra wideband, small size, simple structure and easy to processing. 3D electromagnetic simulation results and testing results have proved that this amplitude equalizer can work at 12–40 GHz (Ku to Ka waveband).The Return loss is less than 13.5 dB. The equilibrium quantity can reach 17 dB. The insertion loss is 2.1 dB at sideband. The size is 8 mm×8 mm.

Keywords: amplitude equalizer; ‘1’ type of Defected Ground Structure; band-notched characteristics

幅度均衡器是改善放大器增益平坦度的器件, 在军事领域应用广泛^[1]。它通常放在被誉为“超级模块”的微波功率驱动模块(Microwave Power Module, MPM)和毫米波功率驱动模块(Millimeter wave Power Module, MMPM)之后, 雷达行波管放大器之前, 起功率均衡的作用, 是整个放大模块中的重要器件^[2]。缺陷地结构(DGS)因为接地板上的缝隙改变了电流路径, 从而改变了微带线的分布电感和分布电容^[3]。它具有类似光子带隙(Photonic Band-Gap, PNG)的特性, 呈现出慢波效应和宽阻带特性^[4], 现已广泛用于超宽带滤波器、功分器、天线等器件设计^[5]。近年来有在幅度均衡器中引入 DGS 改善其特性的报道^[6-7], 但引入的 DGS 只是作为改善幅度均衡器性能的额外结构, 而非主要功能结构。

雷达行波管增益曲线随频率呈现出中间高两边低的特性, 幅度均衡器提供一个与行波管增益相反的衰减曲线, 同时还要保证匹配良好^[8]。传统幅度均衡器有波导型、同轴型、平面传输线型, 其中微带枝节谐振器是最常见的结构。此类幅度均衡器在主传输线上并联多个微带枝节或电容电感构成谐振单元, 具有选频作用; 电阻加载在谐振单元之上吸收微波能量; 主传输线输入输出端口有匹配电路, 改善整个频段内的驻波比。

本文首次直接利用 DGS 的陷波特性和选频, 起到了谐振器的作用; 加宽的微带线作为匹配结构。设计出“1”型 DGS, 不仅结构简单, 电阻安装方便, 而且宽频特性好。

1 “I”型 DGS 幅度均衡器设计

1.1 “I”型 DGS 微带线

常用的 DGS 有哑铃型、螺旋电感型、“C”型、“I”型等结构，DGS 引入的分布电容 C 和分布电感 L 可用具有类似陷波效果的 LC 并联谐振电路等效，其值可由式(1)和式(2)近似求出^[9]。

$$C = \frac{5f_c}{\pi[f_0^2 - f_c^2]} (\text{pF}) \quad (1)$$

$$L = \frac{250}{C(\pi f_0)^2} (\text{nH}) \quad (2)$$

式中： f_0 是“I”型 DGS 的谐振频率； f_c 是小于 f_0 的 3 dB 阻带频率。

“I”型 DGS 结构见图 1，介质基板采用 Al_2O_3 陶瓷基板，厚度 $h=0.254$ mm，缝隙长为 s ，宽为 d ，微带线宽 $W=0.25$ mm。表 1 给出了 f_0 与 f_c 随 s 和 d 的变化情况，表格括号里的值为 $f_c(\text{GHz})$ ，括号外的值为 $f_0(\text{GHz})$ 。

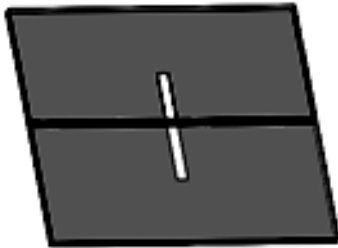


Fig.1 “I” type of DGS
图 1 “I”型 DGS

表 1 f_0 和 f_c 关于 s 和 d 的关系

Table1 Relationship of f_0 and f_c versus s and d				
	$d=0.2$ mm	$d=0.4$ mm	$d=0.6$ mm	$d=0.8$ mm
$s=3.6$ mm	21.6(21.2)	22.9(22.3)	24.3(23.4)	25.5(24.3)
$s=4.4$ mm	17.8(17.5)	18.9(18.4)	20.1(19.3)	21.0(19.9)
$s=5.3$ mm	15.2(14.9)	16.1(15.6)	17.0(16.3)	17.9(17.0)

将表 1 中的值用式(1)~式(2)换算成 L 和 C 可看出，“I”型 DGS 的等效电容 C 具有类似平板电容的特性，与 d 成正比，与 s 成负相关；等效电感 L 则主要与 s 有关， s 越大， L 越大。“I”型 DGS 具有宽阻带陷波特性和，带宽与 d 密切相关，见图 2，故可将其作为具有宽阻带特性的谐振单元。

1.2 “I”型 DGS 幅度均衡器原理

两级“I”型 DGS 级联可取得更好的宽带特性，将电阻加载在“I”型 DGS 中构成的幅度均衡器结构见图 3。介质基板正面是微带传输线，正中间的微带线被加宽；背面是 2 个一样大小、沿主传输线对称分布的“I”型缝隙，电阻采用薄膜工艺将 NiCr 喷镀在“I”型缝隙中间。信号在传输时，背面被“I”型 DGS 阻断的电流经电阻流向另一侧金属，“I”型 DGS 等效的分布电容和分布电感对信号频率具有选择性，故不同频率的信号流经电阻的电流不同。由 $P=i^2 \cdot R$ 知，将电阻放在电压波节点（“I”型缝隙的中间）能取得很大的均衡量，且电阻值越大均衡量越大。中间加宽的微带线抵消了“I”型 DGS 引入的高阻抗，具有阻抗匹配作用，使整个频带具有很好的驻波比。由 1.1 节的讨论可以预知，该类均衡器具有宽频带特性。

1.3 “I”型 DGS 幅度均衡器原理模型等效电路与参数提取

由 1.1 节分析知，加载电阻的“I”型 DGS 等效为并联 RLC 谐振，电阻等效为串联在主传输线上，等效电路见图 4。图 4 中 5 个部分的传输矩阵分别为 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 ：

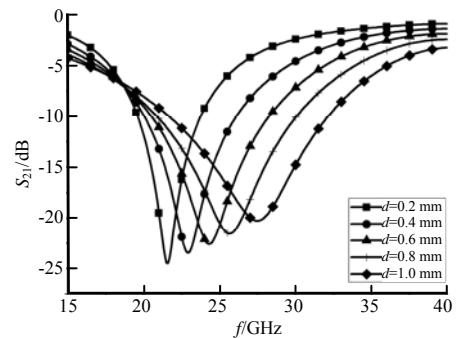


Fig.2 Band notch characteristic of “I” type of DGS
图 2 “I”型 DGS 的陷波特性和

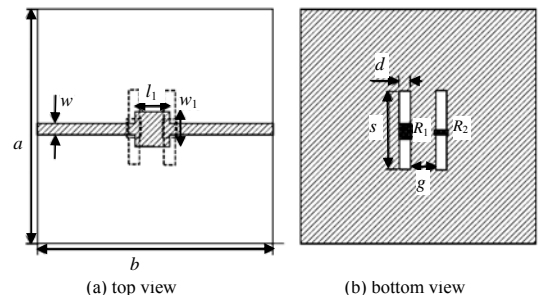


Fig.3 Two-stage “I” type of DGS cascaded amplitude equalizer
图 3 两级“I”型 DGS 级联的幅度均衡器

$$A_1 = A_3 = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ \frac{j \sin \beta l}{Z_0} & \cos \beta l \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_1} + j\omega C & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将 A_1 中的 l 与 Z_0 换成 l_1 与 Z_1 便可得 A_3 , 将 A_2 中的 R_1 换成 R_2 便得 A_4 。可得端口 1 到端口 2 的传输矩阵 A :

$$A = \prod_{i=1}^5 A_i \quad (4)$$

端口采用归一化电压电流, 可将 A 矩阵转换成散射矩阵 S , 可得 S 参数。设置图 4 的参数值 $W=0.25$ mm, $l=3.5$ mm, $L=0.248$ nH, $C=0.158$ pF, $R_1=50$ Ω , $R_2=200$ Ω , $W_1=0.65$ mm, $l_1=1$ mm, 得到了一种性能优良的幅度均衡器, 如图 5 所示。

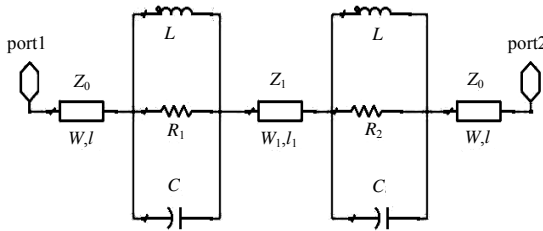


Fig.4 Equivalent circuit of Fig.3
图 4 图 3 的等效电路

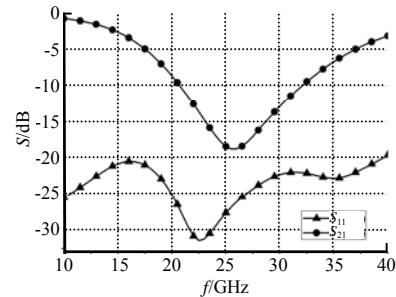


Fig.5 Simulation results of equivalent circuit in Fig.4
图 5 图 4 等效电路的仿真结果

将图 3 中物体的实际参数值设置为上述值, 将 L 和 C 换算成“ I ”型 DGS 缝隙尺寸: $d=0.25$ mm, $s=3.4$ mm, 间距 $g=0.85$ mm。考虑能量耦合, 缝隙参数相比 1.1 节的结果稍有变化。三维电磁仿真软件 HFSS 对实际结构的仿真结果见图 6。图 6 与图 5 吻合较好, 电阻 R_2 越大, 均衡量越大。 R_2 变化时, S_{11} 值始终小于 -15 dB, 验证了等效电路的正确性。图 5 和图 6 结果的差异在于“ I ”型 DGS 的分布特性与集总元件等效电路的差异、2 个“ I ”型 DGS 间的信号耦合, 尤其在高频情况下结果差异显著。

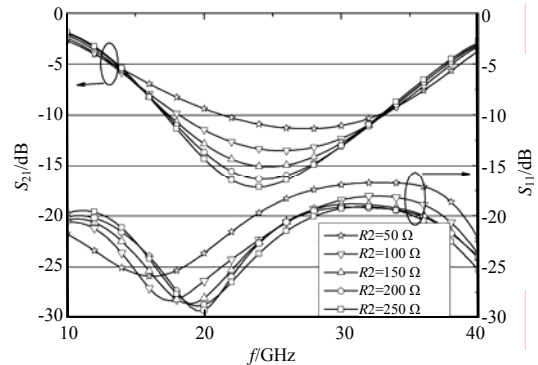


Fig.6 HFSS simulation results of “I” type DGS amplitude equalizer
图 6 “I”型 DGS 幅度均衡器 HFSS 仿真结果

以上分析表明:“ I ”型 DGS 幅度均衡器不同于传统微带枝节型, 它不是将主传输线上的能量耦合到谐振枝节通过电阻吸收, 而是电阻等效为直接串联在主传输线中, 电阻越大, 均衡量越大。“ I ”型 DGS 的长度 s 越短, 频率越高; 宽度 d 越大, 频带越宽, 同时 d 变大, 频率也会变高; 间距 g 主要影响 2 个谐振单元间能量的耦合, 与带宽和驻波密切相关; 增加中间微带线的长度和宽度能极大改善整个频带内驻波比, 原因是更宽的微带线抑制了引入 DGS 后特性阻抗变大。此结构加工实物图及测试结果见图 7 和图 8, 实测结果在 10~40 GHz 内 $S_{11} < -13.5$ dB, 在 25 GHz 处 $S_{21} = -17$ dB, 10 GHz 处插损为 2.1 dB, 40 GHz 处插损为 1.5 dB。

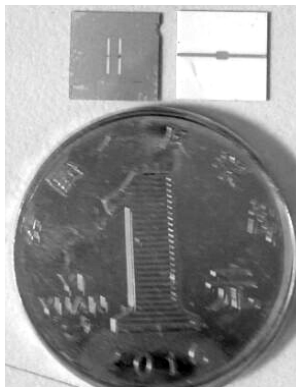


Fig.7 “I” type DGS amplitude equalizer object
图 7 “I”型 DGS 幅度均衡器实物

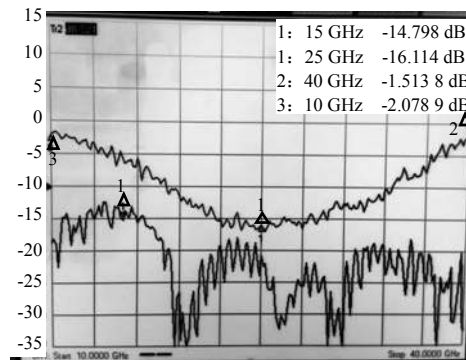


Fig.8 Testing results of “I” type DGS amplitude equalizer
图 8 “I”型 DGS 幅度均衡器实物测试结果

2 结论

本文基于 DGS 的陷波特设计了一种新型幅度均衡器, 将电阻直接加载在 2 个“I”型 DGS 结构中, 利用 DGS 的陷波特代替传统幅度均衡器中的加载电阻的谐振单元, 而不仅仅是将 DGS 结构作为改善微带枝节均衡器带宽和陷波特性的措施, 实现了超宽带均衡特性并简化了结构。与传统微带枝节幅度均衡器将能量耦合到支路吸收不同, 本幅度均衡器的电阻等效为直接串联在主传输线中, 通过增加微带线线宽很好地抵消了引入 DGS 结构导致的特性阻抗变大的效应, 从而解决了宽带匹配问题。此“I”型 DGS 幅度均衡在 12~40 GHz 超宽带频内取得了非常好的均衡特性, 实测回波损耗优于 13.5 dB, 频带内 S_{11} 大部分小于 20 dB, 最大均衡量优于 17 dB, 端点处插损分别为 1.5 dB 和 2.1 dB, 面积为 8 mm×8 mm, 且结构简单, 体积小, 易于调节和加工。

参考文献:

- [1] 郎小元, 夏雷, 延波. 一种 LTCC 小型化增益均衡器设计[J]. 微波学报, 2016, 32(S2): 328-330. (LANG Xiaoyuan, XIA Lei, YAN Bo. A novel broad-band microwave equalizer based on LTCC technology[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S2): 328-330.)
- [2] 周太富. 宽带毫米波功率模块驱动技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(5): 749-752. (ZHOU Taifu. Broadband millimeter wave power module driven technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(5): 749-752.)
- [3] AHN D, PARK J S, KIM C S, et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2001, 49(1): 86-93.
- [4] 张友俊, 张海峰, 肖建康, 等. 1D 非周期缺陷地结构微带线[J]. 电子元件与材料, 2006, 25(1): 66-68. (ZHANG Youjun, ZHANG Haifeng, XIAO Jiankang, et al. 1D nonperiodic defected ground structure for microstrip line[J]. Electronic Components & Materials, 2006, 25(1): 66-68.)
- [5] APRIYANA A A A, ZHANG Y P, CHANG J S, et al. Single-pole multiple-throw switches with defected ground structure low-pass filter[J]. Microwaves Antennas & Propagation Iet, 2014, 8(14): 1241-1249.
- [6] 花证, 夏雷, 延波. 一种基于 C 环型缺陷地结构的均衡器的设计[J]. 微波学报, 2016, 32(S2): 351-353. (HUA Zheng, XIA Lei, YAN Bo. Microstrip equalizer based on C-DGS[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S2): 351-353.)
- [7] 刘红杰, 张德斌. 缺陷地结构在微带均衡器设计中的应用[J]. 微波学报, 2010, 27(S1): 268-271. (LIU Hongjie, ZHANG Debin. Application of DGS in the design of microwave power equalizer[J]. Journal of Microwaves, 2010, 27(S1): 268-271.)
- [8] 江栋一, 夏雷. 新型结构 LTCC 小型化 6~18GHz 均衡器仿真设计[J]. 微波学报, 2016, 32(S2): 317-319. (JIANG Dongyi, XIA Lei. Design of new structure miniature LTCC 6-18 GHz equalizer[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S2): 317-319.)
- [9] ABDEL-RAHMAN A B, VERMA A K, BOUTEJDAR A, et al. Control of bandstop response of Hi-Lo microstrip low-pass filter using slot in ground plane[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2004, 52(3): 1008-1013.

作者简介:



刘 伶(1992-), 男, 湖北省潜江市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统. email: lingzi1049@163.com.

夏 雷(1976-), 男, 天津市人, 副研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统.