

文章编号: 1001 - 9014(2008)02 - 0157 - 04

空间功率合成模块中鳍状天线阵的分析和设计

武 锦, 欧阳思华, 阎跃鹏, 刘新宇

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要:采用小波反射理论分析 Klopfenstein结构的鳍状天线阵的传播特性,设计优化出应用于空间功率合成模块的输入输出鳍状天线阵.优化后的鳍状天线阵不仅表现出宽频带特性而且还有比较好的回波特性,可以有效地提高功率合成模块的效率. 2×2 鳍线阵在端接 120 Ω 负载时的实测结果为:在 C 波段 (3 ~ 4.9GHz) 内回波损耗大于 20dB,驻波比小于 1.25. 本文是国内第一篇详细介绍鳍状天线阵的设计和优化的文章,该项研究填补了我国在相关领域中的研究空白.

关键词:空间功率合成模块; Klopfenstein结构; 鳍线阵

中图分类号: TN73 文献标识码: A

ANALYSIS AND DESIGN OF FINLINE ARRAYS FOR SPATIAL POWER COMBINER

WU Jin, OUYANG Si-Hua, YAN Yue-Peng, LU Xin-Yu

(Institute of microelectronics Chinese academy of sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The propagation characteristic of Klopfenstein tapered finline array was analyzed by using the theory of small reflections. As a result, the input and output optimal finline array for spatial power combiner was obtained. The finline array has the broadband characteristics and the better return loss, which will directly enhance the combiner efficiency. When the 2×2 finline array was terminated with 120 Ω chip resistor, the return loss is better than 20dB and the VSWR is less than 1.25 for the entire C-band (3 ~ 4.9GHz). It is first time in China that the designs and optimization of the finline array are described in detail.

Key words: spatial power combiner; Klopfenstein taper; finline array

引言

在微波和毫米波的各种应用系统中如:雷达、制导、遥感以及通讯系统,作为其主要组成部分,毫米波固态功率放大器犹如这些设备的“心脏”,成为毫米波研究领域最为重要的研究方向.行波管放大器(TWTA)由于其大功率、宽带以及高效率等优点是目前应用最为广泛的毫米波功率源.然而 TWTA 自身存在体积大、重量重以及造价高等固有的缺点.随着 MMIC 技术的发展,固态微波和毫米波放大器表现出体积小、重量轻、低电压、线性好和可靠性高等优点,从而使得固态放大器及其功率合成技术逐渐被国内外的研究机构所重视.

基于波导技术的宽带空间功率合成模块结构最

早由 Alexanian 和 York 在 1997 年提出^[1].一般采用立体多层结构,如图 1 所示.在每一层上集成了输入输出鳍线阵、阻抗匹配微带线阵和微波单片集成功率管(MMICPA).空间功率合成模块工作时,从波导中入射的电磁波耦合到输入鳍线阵中,其总功率被分割成相等的若干份,每一份沿着对应的渐变鳍线无反射的传输,通过输入阻抗匹配微带线阵传输到 MMICPA 中,经过 PA 管放大后又通过输出匹配微带线和输出鳍状天线阵无反射的传输,并辐射到输出波导空间,从而最终得到功率的放大.这种结构同传统的平面结构的功率合成器比较主要体现在大的功率输出、好的散热、宽的带宽以及小的体积.

由于输入输出鳍线阵在整个模块中不仅起到了功率分配和合成的作用,而且还起到了阻抗变换的

收稿日期: 2007 - 03 - 22, 修回日期: 2007 - 08 - 30

Received date: 2007 - 03 - 22, revised date: 2007 - 08 - 30

基金项目: 973 (2002CB311906) 和中国科学院国防科技创新 (CXJJ - 150) 资助项目

作者简介: 武 锦 (1978-), 女, 河南平顶山人, 中国科学院微电子所助理研究员, 硕士, 主要研究方向为微波功率模块的设计和测试.

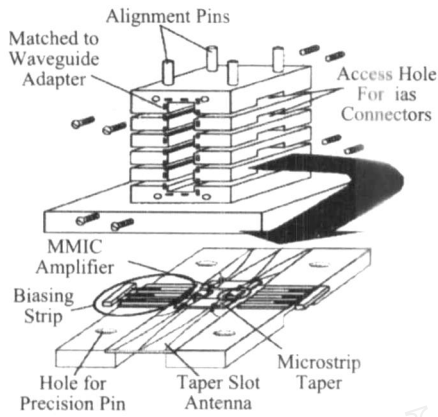


图 1 基于波导技术的空间功率合成放大模块的结构图
Fig 1 Schematic plot of the waveguide-based spatial power combiner

作用,因此鳍线阵的设计和优化成为空间功率合成模块研究的主要内容,国外有很多文章和论文针对鳍线阵的结构设计开展了相关研究^[2-4].本文则主要研究采用小波反射理论和 Klopfenstein 结构来分析鳍状天线阵的传播特性,并且借助于高频电磁场仿真软件开发了一套完整的鳍线阵的优化设计流程,最终设计出了能够应用于空间功率合成模块中的鳍状天线阵.实测性能指标为:2 * 2 鳍线阵在端接 120 欧姆负载时,3 ~ 4.9 GHz 频带内回波损耗 > 20 dB,驻波比 < 1.25.

1 鳍线的优化和设计

1.1 鳍线阵形状的优化

通过查阅相关鳍线形状设计的文献^[2-4],本文最终选择了 Klopfenstein 形状,它是基于小波反射理论,将变换长度划分为多节,在保证每一节均存在有最小反射系数而推导出来的^[5].对于 TEM 结构,在给定的渐变长度(大于某一临界值)下利用输入输出特征阻抗求出每一节上的反射系数从而最终确定每一节对应的特征阻抗.而对于 Non-TEM 结构,由于传播常数是色散的,因此采用波阻抗来代替特征阻抗,从而求出每一节上的传播常数.其对应的公式为^[6]

$$(f, z) = \sqrt{L_0} \exp \left[-m A^2 \phi \left(\frac{2(f, z)}{L_0} - 1, A \right) \right], \quad (1)$$

$$(z_i) = \sum_{k=0}^{i-1} 2(z_k) z = (z_{i-1}) + 2(z_{i-1}) z, \quad (2)$$

$$= \frac{L_0}{Z_{TE}}; \quad A = \cosh^{-1} \left(\frac{Z_0}{Z_1} \right); \quad \phi = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{Z_1}{Z_0} \right), \quad (3)$$

其中

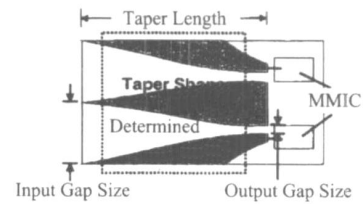


图 2 空间功率合成中鳍线阵的优化结构图
Fig 2 Optimization of finline array used in power combining circuits

$$\phi(x, A) = -\phi(-x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A \sqrt{1-y^2})}{A \sqrt{1-y^2}} dy.$$

为了求解上面的式子,需要设置几个变量的初始值,它们分别是输入波阻抗 Z_L 、输出波阻抗 Z_0 、鳍线长度 L 以及节点数 N .选取 L 的时候应该满足 $L > A$,一般来讲 N 的取值越大设计精度越高,但是计算速度会越慢,因此选取 N 值时需要折中考虑这两方面的因素.图 2 给出了空间功率合成模块中鳍线的优化结构图,从图中可以看到鳍状天线的输入缝隙完全由波导的窄边 b 所决定,输出缝隙取决于所需要的特征阻抗.

在设定了输入输出波阻抗 Z_L 、 Z_0 后,采用式 (3) 可以确定 z_0 和 L . 计算过程中首先给定 z_1 一个初始值,在已知了 z_1 和 (z_0) 后,根据式 (2) 可以求出 (z_2) ,然后将 (z_2) 代入到式 (1) 中可以求出 (z_3) ,再将 (z_3) 代入式 (2) 中可以求出 (z_4) ,依次叠代,可以得到一系列 (z_i) 和 (z_i) ($i = 1$ to N). 之后将 $z_1 = (z_N)$ 作为初始值重新代入到式 (1) 和式 (2) 中又可以求出一系列新的 (z_i) 和 (z_i) ,最终以 $|z_i - z_{i-1}| < 0.001$ 为判定条件从而结束叠代.该程序可以在 Matlab 软件中实现,通过运行程序,可以得到优化后的鳍状天线不同节处对应的相传播常数.鳍线的有效介电常数同相传播常数始终满足下面的关系式

$$\epsilon_{eff} = \frac{2}{\mu_0 \epsilon_0}, \quad (4)$$

根据式 (4),最终可以得到优化后的 Klopfenstein 形状的鳍线的不同节点所对应的有效介电常数.

1.2 鳍线的设计

关于鳍线的有效介电常数和特征阻抗与鳍线尺寸的关系曾经开展了很多方面的理论研究,目前已经提出了许多方法,如改进的传输矩阵法、横向谐振法、谱域法等^[7-9].这些方法虽然有比较高的精度,但计算复杂而且数值结果必须通过计算机求解,为了简化算法,本文采用了基于有限元算法的电磁场

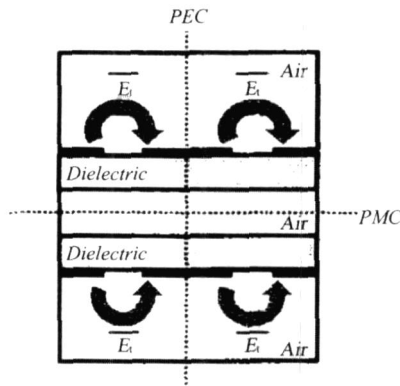


图3 方波导中2*2的鳍线阵的截面图及对应的边界
Fig.3 The cross section of a 2*2 finline array

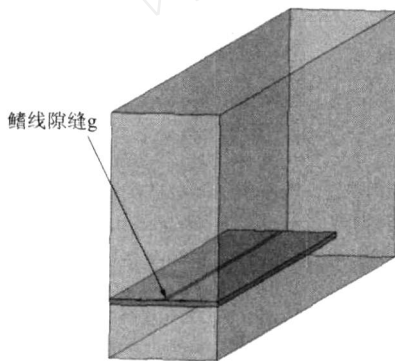


图4 方波导中2*2的鳍线阵仿真模型图
Fig.4 The schematic model of a 2*2 finline array

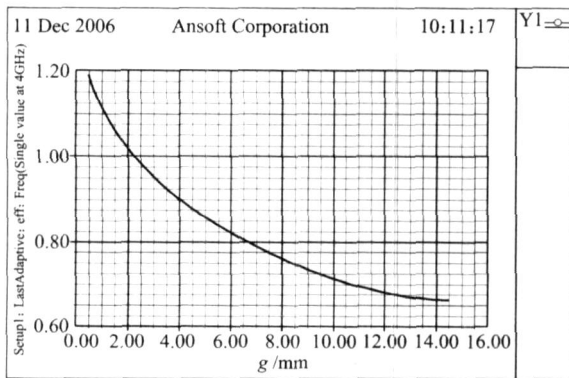


图5 2*2 鳍线阵在4GHz下有效介电常数随鳍线隙缝g的变化曲线
Fig.5 Effective dielectric constant vs. slot width at 4GHz for a 2*2 finline array

仿真软件 HFSS来建立鳍线阵的有效介电常数随鳍线隙缝的变化曲线。

图3是2*2的鳍线阵的截面示意图.从图中可以确定仿真区域的边界特性,包括3个PEC边界(其中2个是实际的波导壁)以及一个PMC边界.基于对称性的考虑,在HFSS中仅建立示意图中左上

方四分之一区域的仿真模型,如图4所示.其中方波导的截面尺寸为29.1mm x58.2mm,介质基板采用Rogers UL2000.

依据建立的模型,在固定频率下通过改变不同的鳍线隙缝得到了鳍线的传播常数、有效介电常数以及特征阻抗的变化曲线.图5为2*2的鳍线阵在4GHz下其有效介电常数随鳍线g的变化曲线.

将仿真结果制作成鳍线的有效介电常数与鳍线隙缝g的对应表格.依据上一步所得的鳍线不同节点对应的有效介电常数,查阅表格,可以得到不同节点处对应的鳍线的隙缝g,从而完成了鳍线的形状的优化设计.实验中选取46个节点(每个节点长度为1mm),按照该设计流程最终实现了总长度为46mm的优化后的Klopfenstein形状的双鳍线,其中输入隙缝为14.55mm,输出隙缝为0.5mm.

2 鳍线的仿真

在确定了鳍线的 Klopfenstein 形状之后,为了进一步满足空间功率合成模块的需要,我们又开展了鳍线侧挖曲线的研究工作,今后将有相关文章来详细介绍侧挖曲线的大小对鳍线性能的影响.将优化后的 Klopfenstein 形状的鳍线阵放置在C波段标准波导腔体中(a=58.2mm, b=29.1mm)进行高频电磁场仿真.通过在鳍线终端连接负载的方式来确定鳍线的输出阻抗以及其对应的吸收特性.当鳍线终端接120Ω负载时,仿真结果显示了其吸收特性在3.3GHz到4.9GHz内其回波损耗均>20dB,完全满足设计的要求.

3 鳍线的制作和测量

在完成了鳍线阵的仿真之后,将设计出来的鳍线制作在Rogers UL2000的介质基片上,其对应的参数为:ε_r=2.55, h=1mm.波导腔体的内截面尺寸为29.1x58.2mm,图6是制作的波导腔体和双鳍天线的实物图.

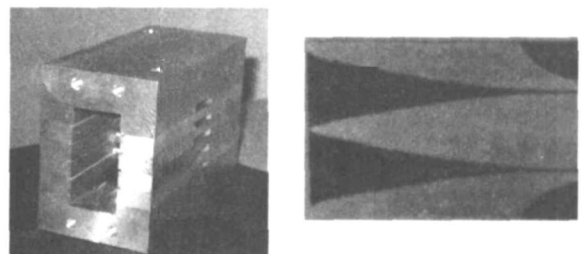


图6 制作的波导腔体及优化后的鳍状天线的实物图
Fig 6 Photographs of the waveguide and the finline antenna

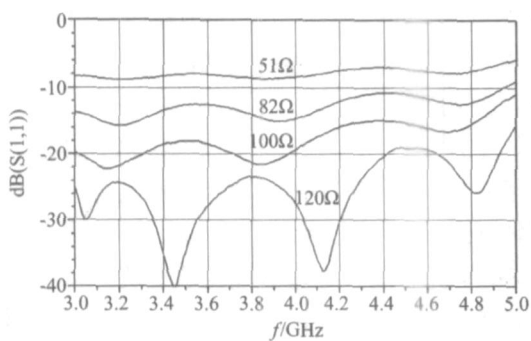


图7 当 2×2 鳍线阵分别接 51Ω 、 82Ω 、 100Ω 和 120Ω 时吸收特性的测试结果

Fig.7 Measurement results for the optimized taper structure for a 2×2 finline array terminated with various chip resistor

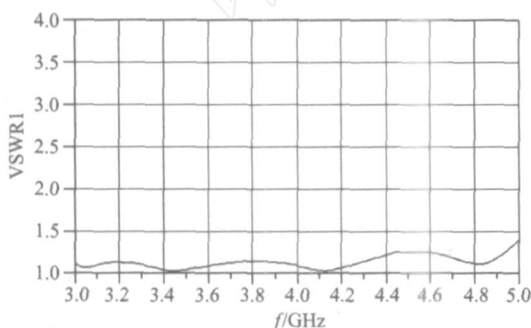


图8 当 2×2 鳍线阵接 120Ω 负载时VSWR随频率的测量曲线

Fig.8 VSWR result for the optimized taper structure for a 2×2 finline array terminated with 120Ω chip resistor

当双鳍线阵的输出端分别接 51 、 82 、 100 和 120 负载时,通过agilentE8363B矢量网络分析仪进行了 2×2 鳍线阵的回波损耗的测试.图7是测试结果的比较图,从图中可以看到当鳍线的终端接 120 负载时,在 $3 \sim 4.9$ GHz宽频带内其回波损耗均大于 20 dB.图8给出了当 2×2 鳍线阵终端接 120 负载其驻波比在 $3 \sim 4.9$ GHz范围内均 < 1.25 ,该性能完全满足空间功率合成模块输入输出鳍线阵的要求,为下一步开展空间功率合成模块的研究提供了非常好的基础.此外本文中所提到的鳍线阵的设计优化方法同样适用于其它频段的鳍线阵的设计,这为今后开展不同频段的空间功率合成模块提供了一种普遍适用的方法.

4 结语

本文详细地介绍了应用于空间功率合成模块中的输入输出鳍状天线阵的设计、优化和制作.采用数值计算和商用高频电磁场仿真软件相结合,从而提供了一种简单实用的设计流程.测试结果显示了所设计的Klopfenstein形状的 2×2 鳍线阵在 3 GHz~ 4.9 GHz内均表现出非常好的宽带吸收特性.这为空间功率合成模块的进一步研究提供了扎实了理论基础,具有非常重要的实际意义.

致谢 衷心感谢中国科学院微电子研究的同事们给与的帮助和鼓励.

REFERENCES

- [1] Alexanian A, York R A. Broadband waveguide-based spatial combiner [J]. *IEEE MTT-S international microwave symposium digest*, 1997, **3**: 1139—1142
- [2] Cheng Nai-Shuo, York R A. Analysis and design of tapered fin line arrays for spatial power combing [J]. *Antennas and Propagation society international symposium*, 1998, **1**: 466—469.
- [3] Adalbert Beyer, Ingo Wolff. Fin line design made easy [J]. *IEEE MTT-S Intemet Microwave Symp Digest*, 1985, **85**: 493—496.
- [4] Ahmed M J. Impedance transformation equation for exponential, cosine-squared and parabolic tapered transmission lines [J]. *IEEE transactions on microwave theory techniques*, 1981, **29**: 67—68.
- [5] Klopfenstein R W. A transmission-line taper of improved design [J]. *Proc IRF.*, 1956, **442**: 31—35.
- [6] Jia Peng Cheng, Chen Lee-Yin, Cheng Nai-Shuo, et al. Design of waveguide finline arrays for spatial power combining [J]. *IEEE transactions on microwave theory techniques*, 2001, **49**: 609—614.
- [7] Pramanick P, Bhartia P. Accurate analysis equations and synthesis technique for unilateral finlines [J]. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1985, **33**: 24—30.
- [8] Bomenann J, Amdt F. Calculating the characteristic impedance of finlines by transverse resonance method [J]. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1986, **34**: 85—92.
- [9] Shama A K, Costache G I, Hofer W J R. Cutoff in finlines evaluated with the spectral domain technique and with the finite element method [J]. *IEEE NT. Antenna propagation symp dig*, 1981: 308—311.