

微波多级放大器电路拓扑优化

梁建刚, 王光明, 王积勤

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:采用机辅扰动法(CAP法)进行微波多级放大器电路的优化设计。该方法借助计算机的快速计算和逻辑判断能力,自动设计出合理的多级放大器电路拓扑结构和满足要求的电路结构参数。利用编制的设计程序设计了一个2.5 GHz~4.5 GHz的两级微波放大器,并在微波电路CAD软件MicroScope上进行仿真验证,证明了这种方法的可靠性和实用性。

关键词:机辅扰动法;拓扑优化;微波多级放大器;CAD

中图分类号:TN454 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)06-0041-03

目前,微波电路计算机辅助设计的主要方法是实频技术法和直接优化法^[1-3],并且取得了一定的成就,已有许多商用微波电路CAD软件投入市场。在给定电路的拓扑结构后,利用这些软件设计的电路可以达到几乎不用调试的程度,并且可靠性好、精度高、性能优越。但是现有的微波电路CAD软件只能在给定的电路拓扑结构后对电路参数进行优化设计。是否可以实现从电路拓扑结构到电路元件参数都能进行优化设计,提高微波带电路CAD技术的自动化能力,这是目前微波电路CAD技术所面临的又一挑战。

文献[4]提出了微波放大器电路拓扑结构的优化设计方法——Computer Aided Perturbation Method(简称CAP法),并预示了其应用前景。文献[5]利用CAP法实现了单级微波放大器输入、输出匹配电路的拓扑结构优化,设计并编制了相应软件。本文主要讨论机辅扰动法在微波多级放大器设计中的应用。

1 拓扑优化设计理论

1.1 机辅扰动法原理

框图如图1所示。

机辅扰动法的原理源于实际电路调试过程中的手工试凑法,用计算机代替人为的手工扰动,并进行判别选优。首先设计者给出设计电路的一个简单初形,然后在各个扰动部位用可供选择的扰动元件进行扰动尝试,产生新的电路结构。每次扰动后进行电路参数的优化,计算电路性能,观察扰动效果。如果电路性能改善,则接收扰动,否则拒绝该次扰动。如此反复进行扰动、选择,使电路性能逐步趋近设计指标的要求。

1.2 优化数学模型

微波多级放大器的优化数学模型就是根据匹配网络的结构,考虑放大器的增益、增益平坦度、噪声系数、输入和输出驻波比等各项指标在内的一个总的函数表达式。同时,为了保证优化设计

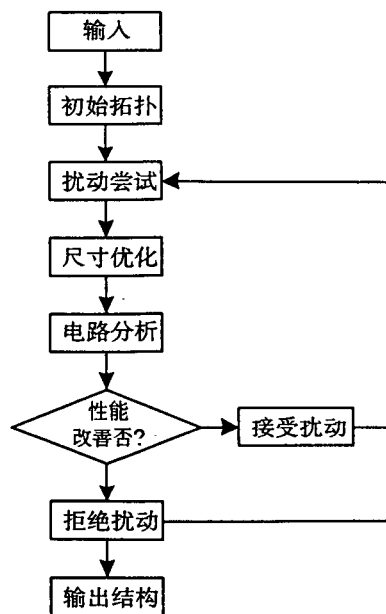


图1 机辅扰动法原理框图

收稿日期:2000-09-06

基金项目:东南大学毫米波国家重点实验室基金资助课题

作者简介:梁建刚(1975-),男,安徽肥东人,博士生,主要从事微波电路CAD、空间大功率无源部件交调特性研究;
王光明(1964-),男,安徽砀山人,教授,博士生导师,主要从事电磁辐射与散射、微波电路研究;
王积勤(1935-),男,山东龙口人,教授,博士生导师,主要从事电磁辐射与散射、微波电路研究。

出的电路具有实际意义及物理可实现性,还要加入一定的约束条件。

各种微波电路元器件都可以看成是双口网络,因此,微波多级放大器电路可以等效为若干双口网络的级联电路,采用双口网络 A 矩阵法来进行分析,其等效电路如图 2 所示。

图中 A_1, A_2, \dots, A_n 分别为输入、输出和级间匹配电路以及放大管的 A 矩阵。

根据级联网络的性质,整个电路的 A 矩阵可以通过级联的各网络的 A 矩阵相乘得到:

$$A = \prod_{i=1}^n A_i = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, A_{11}, A_{12}, A_{21} 和 A_{22} 都是频率和元件值的函数。

从而,可以求出放大器的转换功率增益为:

$$G = 201g \frac{Z_L}{A_{11}Z_L + (A_{12} + A_{21})Z_L Z_S + A_{22}Z_L} \quad (2)$$

求出增益后,可构造出增益的优化目标函数为:

$$\delta_1(x) = \sum_{i=1}^m [G_0 - G(f_i, x)]^2 \quad (3)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为待优化变量,对于微带线匹配网络,分别表示微带线的特性阻抗和电长度, G_0 是参考增益, $G(f_i, x)$ 为所关心频率点上的计算增益, m 为取样频率点数。

在计算放大器的增益时,对于微波多级放大器来说,频率较高,精确设计时必须要考虑电路的微带不连续性。目前文献中提供的不连续性模型主要有^[6]:微带终端开路线、终端段路线、T型接头、阶梯结构以及微带缝隙等。

若要考虑输入、输出驻波比,可根据下列公式计算。

输入反射系数:

$$\Gamma_{in} = (Z_{in} - Z_s^*) / (Z_{in} + Z_s) \quad (4)$$

式中, $Z_{in} = (A_{11}Z_L + A_{12}) / (A_{21}Z_L + A_{22})$ 为输入阻抗。

输出反射系数:

$$\Gamma_{out} = (Z_{out} - Z_s^*) / (Z_{out} + Z_L) \quad (5)$$

式中, $Z_{out} = (A_{22}Z_s + A_{12}) / (A_{21}Z_s + A_{11})$ 为输出阻抗。

输入、输出驻波比分别为:

$$\rho_1 = (1 + |\Gamma_{in}|) / (1 - |\Gamma_{in}|) \quad (6)$$

$$\rho_2 = (1 + |\Gamma_{out}|) / (1 - |\Gamma_{out}|) \quad (7)$$

从而形成驻波比的优化数学模型:

$$\delta_2(x) = \sum_{i=1}^m \{ [\rho_{01} - \rho_1(f_i, x) - |\rho_{01} - \rho_1(f_i, x)|]^2 + [\rho_{02} - \rho_2(f_i, x) - |\rho_{02} - \rho_2(f_i, x)|]^2 \} \quad (8)$$

式中, ρ_{01} 和 ρ_{02} 分别为输入驻波比参考值和输出驻波比参考值, $\rho_1(f_i, x)$ 和 $\rho_2(f_i, x)$ 分别为取样频率点处输入、输出驻波比的计算值, m 为取样频率点数。

由以上各数学模型便可形成多级级联微波放大器的总数学模型:

$$\delta(x) = W_1 \delta_1(x) + W_2 \delta_2(x) \quad (9)$$

其中 W_1 为加权系数。

1.3 优化方法

在拓扑扰动法中,电路的初始拓扑和元件的初始值是任意给定的,并且随着扰动的进行,电路的结构不断变化,变量不断增加,其目标函数非常复杂,呈现高度的非线性,目标函数值随变量的变化剧烈,优化结果存在多值性,若采取单一的优化方法,往往会陷入局部最小点。因此我们采用若干优化方法的组合来避免这个问题。

但是,优化结果随初始值变化剧烈,这一给优化带来很大不利的因素,对优化求解全局极小点也有它有利的一面。根据优化结果随初始值变化很大这一特点,利用 FORTRAN 语言所提供的随机函数在规定的范围内,产生一组组随机值,作为优化的初始值,优化出一组组最优值,将这些最优值相互比较,从而求出全局极小值。这种方法称之为随机初始值优化法^[7],它实际是随机法与典型优化方法的结合。在实际编程过程

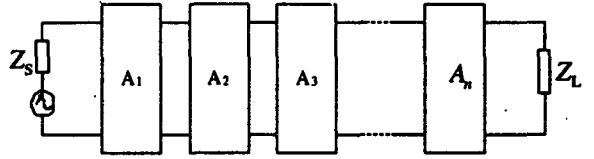


图2 微波多级放大器等效电路

中,我们采用了随机法与步长加速法(一种直接搜索法)的结合,根据规定的电路参数限制条件范围,产生一组组初始值,再用步长加速法优化出一组组最优值,比较求出全局极小值。

2 仿真验证

为了验证多级放大器拓扑优化设计的有效性,利用编制的程序设计了一个 2.5 GHz ~ 4.5 GHz 波段的两级微波放大器电路。设计指标:中心频率: $f_0 = 3.5$ GHz;带宽: 2.5 GHz ~ 4.5 GHz;功率增益: ≥ 28 dB;增益起伏: $\delta < \pm 1$ dB。

设计结果在 Microscope 软件上进行仿真验证,其增益曲线如图 3 所示,达到了设计指标。

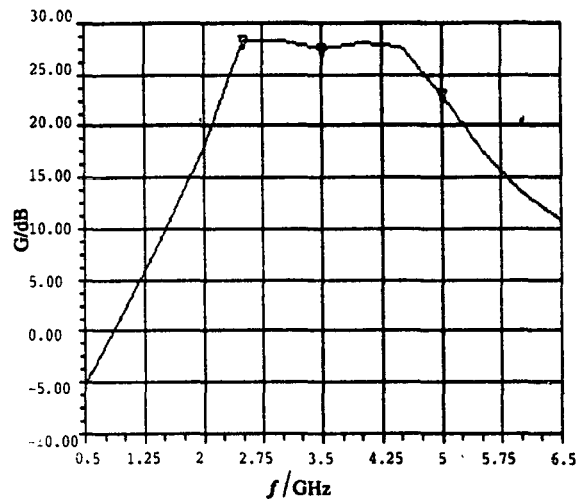


图3 增益特性曲线

3 结论

采用机辅扰动法来进行微波多级放大器的设计,可以减少对设计者经验的依赖程度。从设计结果可以看出,在给定的简单初始拓扑结构下,经过拓扑优化设计出的微波电路,能够达到预定的设计指标,证明了这种方法的可行性和有效性。拓扑优化和现有的微波电路 CAD 技术相结合,是微波电路设计工作“智能化”发展的一个方向,它在微波电路设计中有着很好的发展和应用前景。

参考文献:

- [1] Carlin H J. A New Approach to Gain - Bandwidth Problems[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1977, 24(4): 170 - 175.
- [2] Pandel J, Fettweis A. Broadband Matching Using Parametric Representations[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. IEEE, 1985. 143 - 149.
- [3] 林杞楠, 刘月秋, 王安国. 微波多级 FET 宽带放大器的实频直接设计法[J]. 天津大学学报, 1990(4): 52 - 60.
- [4] 陈旭. 微波匹配电路的结构优化[D]. 陕西三原: 空军导弹学院, 1995.
- [5] Fei J F, Wang J Q. A New Method for Microwave Circuits Topology Optimization[A]. 6th International Recent Advances in Microwave Technology Proceedings[C]. Bei Jing: Publishing House of Electronics Industry, 1997. 98 - 101.
- [6] 梁昌洪. 计算微波[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [7] 陈书田, 梁昌洪. 利用随机初始值法优化微波 FET 小信号模型[A]. 97' 全国微波会议论文集[C]. 青岛: 1997. 454 - 456.

Topology Optimization of the Multi - Stage Microwave Amplifier Circuits

LIANG Jian - gang , WANG Guang - ming , WANG Ji - qin

(The Missile Institute of the Air Force Engineering University, Shaanxi, Sanyuan 713800 The State Key Laboratory of Millimeter Waves Southeast University, Jiangsu, Nanjing 210096)

Abstract: In this paper, the method, which is called Computer Aided Perturbation (CAP), is used for the optimization design of the multi - stage microwave amplifier circuits. The justified topology structures and required parameters of the circuits are designed automatically by this method, with the aid of the high - speed calculation and logical judgement of the computer. A two - stage microwave amplifier in the band of 2.5GHz ~ 4.5GHz is designed by use of the compiled design program, and the results are simulated in the microwave circuits CAD software Microwave - Scope, which proves the reliability and utility of the method.

Keywords: CAP; topology optimization; multi - stage microwave amplifier; CAD