

用改进的遗传算法精确提取 GaAs MESFET 小信号等效电路参数

张有涛^{1,2} 夏冠群¹ 高建峰² 李拂晓² 铁宏安² 杨乃彬²

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 提出了一种改进的遗传算法, 应用于提取 GaAs MESFET 小信号等效电路参数。改进的算法采用浮点编码连续突变, 多种遗传操作合作运行, 并应用子代优化策略克服了传统遗传算法可能出现的种群退化现象, 该算法可快速搜索到全局最优解而不受初始值限制。在 0.1~10GHz 范围内实现了精确、快速地提取 GaAs MESFET 小信号等效电路参数, 并可合理外推至 20GHz, 整个过程无需人工干预。算法用 Matlab 语言实现, 可方便地应用于 HBT 和 HEMT 以及无源元件电容、电感的参数提取。

关键词: 参数提取; 遗传算法; 模型; MESFET

EEACC: 2560B; 0260; 1350F

中图分类号: TN 402; TN 386.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0869-05

1 引言

在集成电路设计过程中, 模型的精确性直接决定仿真结果的可信度。如何精确、快速地提取模型参数始终是研究的热点。对于 GaAs MESFET 器件, 通常的模型参数提取方法可分为直接提取法和数值优化法。直接提取法需要多次对 FET 进行特殊偏置状态下的 S 参数测试, 而后通过剥离寄生参数来逐步获得整个等效电路的参数^[1~3], 整个过程较为繁琐。普通的数值优化法多为局部优化方法, 其结果强烈地依赖于参数的初值, 常常出现不收敛或收敛到无物理意义解的情况。而采用诸如遗传算法(genetic algorithm)、模拟退火算法等全局优化算法, 可摆脱优化结果对初值的依赖, 并快速收敛到全局最优解^[4~6]。因此, 设计高效的全局优化算法是数值优化法提取模型参数的关键。

本文利用改进的遗传算法实现了从测量 S 参数提取 GaAs MESFET 小信号等效电路参数。整个过程收敛速度快, 无不收敛或收敛到无物理意义解的

情况。该遗传算法具有如下与文献[4~6]不同的特点: 采用浮点编码连续突变, 多种遗传操作合作运行, 并应用子代优化策略克服了传统遗传算法可能出现的种群退化现象, 以保证算法的高效性。用本算法可以在 0.1~10GHz 范围内精确、快速地提取 GaAs MESFET 小信号等效电路参数, 并且据此所得等效电路外推至 20GHz 频率范围的 S 参数仍与测试值很好吻合。

2 理论分析

通用的 FET 小信号等效电路如图 1 所示^[7]。图中虚线框内部是器件的本征部分, 外部是器件的寄生部分。由此可知, 该等效电路包括 6 个寄生参数: R_g 、 L_g 、 R_s 、 L_s 、 R_d 和 L_d , 分别对应器件栅、源、漏端的寄生串联电阻和电感。此外, 等效电路还包括 7 个本征参数: 栅源寄生电容 C_{gs} 、栅漏寄生电容 C_{gd} 、漏源寄生电容 C_{ds} 、漏导 g_d 、本征跨导 g_{m0} 、渡越时间 τ 和输入电阻 R_i 。上述 13 个等效电路参数提取的最终结果是保证仿真得到的 S 参数与实测 S 参数很好地吻合并

张有涛 男, 1979 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为 GaAs 超高速集成电路。

夏冠群 男, 1941 年出生, 研究员, 主要研究领域为化合物半导体器件与电路。

2003-07-14 收到, 2003-12-08 定稿

©2004 中国电子学会

具有正确的物理意义. 因此, 我们综合仿真得到的 S 参数与实测 S 参数在各测试频率点上的相对误差的平方和来表征参数提取的优劣:

$$F = \sum_{\text{所有频率点}} \left| \frac{S(1, 1)_{\text{sim}} - S(1, 1)_{\text{mea}}}{S(1, 1)_{\text{mea}}} \right|^2 + \left| \frac{S(1, 2)_{\text{sim}} - S(1, 2)_{\text{mea}}}{S(1, 2)_{\text{mea}}} \right|^2 + \left| \frac{S(2, 1)_{\text{sim}} - S(2, 1)_{\text{mea}}}{S(2, 1)_{\text{mea}}} \right|^2 + \left| \frac{S(2, 2)_{\text{sim}} - S(2, 2)_{\text{mea}}}{S(2, 2)_{\text{mea}}} \right|^2 \quad (1)$$

其中 $S(i, j)_{\text{sim}}, S(i, j)_{\text{mea}} (i, j = 1, 2)$ 分别对应由提取的模型参数计算得到的 S 参数和实测 S 参数. 显然, F 越小, 拟合度越好, 提取的参数越精确.

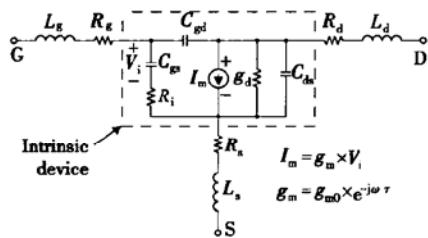


图1 MESFET 小信号等效电路

Fig. 1 MESFET small signal equivalent circuit

3 算法设计

遗传算法的主要特点在于群体搜索策略与群体中个体之间的信息交换, 且整个搜索过程不依赖于梯度信息. 因此, 遗传算法已成功应用于各类工程优化问题^[4, 8]. 标准遗传算法(SGA)的特点是: 采用二进制编码, 应用赌轮选择方法, 随机配对, 单点交叉生成两个子个体, 群体内允许有相同的个体存在. 但是, SGA 已被证明在任意初始化、任意交叉算子作用下难以收敛到全局最优解, 只有改进的遗传算法才可以实现全局最优^[4, 9].

本文提出采用浮点编码连续突变, 多种遗传操作合作运行, 并应用子代优化策略克服传统遗传算法可能出现的种群退化现象, 以此保证算法的高效性, 实现全局最优解的快速搜索. 事实上, 浮点编码并不需要额外的编码操作, 即解空间和遗传空间直接一一对应, 而且后续的遗传算子都可直接对解空间的每一个体直接作用. 这就节省了诸如二进制编码所带来的频繁编解码引入的计算量, 可在相同计算量的条件下获得更优的解. 同时, 为了避免算法陷

入某一局部最优解而跳不出来, 算法设计了多种交叉、变异操作(如: 单点交叉、多点交叉、均匀变异、非均匀变异等)共同作用的方法, 以此提高群体跳出局部最优而进行全局最优搜索的概率, 实现以更快的速度收敛到全局最优解, 这也更符合自然进化的实际情况. 单独采用保留各代最优解策略已经证明可以收敛到最优解^[9], 但是收敛时间可能较长. 而改进的遗传算法采用子代优化策略, 在遗传过程中保留每一代最优个体, 并比较父代与其最近子代最优个体的适应度, 若父代最优个体优于子代最优个体(即出现种群退化), 则用父代最优个体替换子代中最差个体, 反之则不替换. 以此保证经过选择、交叉、变异操作后的子代一定是拥有比父代至少同等的先进性, 避免出现种群退化的情况. 这也是本算法可以更快速地收敛到全局最优解的重要原因. 最终确定的算法流程如图2所示.

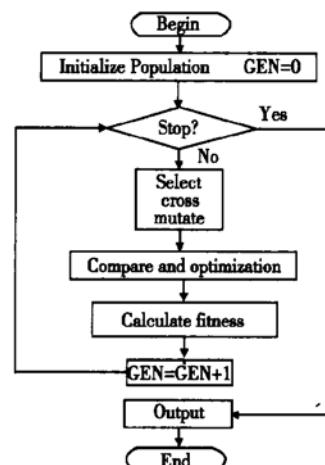


图2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

图中所用的适应度函数取为(1)式的倒数. 适应度越高则表示种群越先进, 对应 S 参数曲线拟合得越好, 说明提取的参数越精确.

4 算法验证

用上述改进的遗传算法提取等效电路参数本质上属于数值优化的方法. 因此, 其惟一受限不可控因素在于测量误差. 为了完全真实地验证上述算法的可靠性, 将图1所示等效电路中的各个参数设置成理想值, 利用ADS软件生成理想情况下1~20GHz

范围内以 1GHz 为步进的 21 个 S 参数。以此 S 参数为优化目标(相当于几乎没有测量误差)来进行算法验证。同时,为了检验算法的有效性,将所有参数的范围至少扩大至理想值的 $10^{\pm 2}$ 倍左右。虽然这么定义参数的边界范围已经明显超出某些参数的经验范围,但是可以以此来检验算法的鲁棒性。设定初始种群为 500 个染色体,以保证群体多样性,固定选择概率 0.8,多种交叉、变异操作(如:单点交叉、多点交叉、均匀变异、非均匀变异)以一定比率结合同步进行。多次随机仿真结果表明:在如此宽的初始参数范围下,用改进的遗传算法仍然能搜索出较理想的解,算法的适应值可以达到一万以上。用所提取等效电路计算得到的 S 参数在全频率范围内几乎与理论生成点完全重合。绝大多数参数与理想值的相对偏差在 5% 以下,其中相当一部分甚至在 1% 以下。但是,栅电阻的误差较大,这与文献[5]中用模拟退火算法优化出现的情况相似,但比其结果更优。在这么大的范围内搜索到上述高质量解所需要的时间较长。当参数初始范围为理想值的 $10^{\pm 1}$ 倍时,达到相同的精度所需的运算时间至少可减少 5 倍以上。

实际应用时,根据经验和理论估算给出合理的参数初始范围,即可以用该算法做到精确地拟合 S

参数,高效快速地提取等效电路参数。采用南京电子器件研究所 75mm 标准 GaAs 工艺线获得的低噪声 MESFET 为实例,提取 0.1~10GHz 范围内的等效电路参数。器件栅长 $0.5\mu\text{m}$,单指栅宽 $50\mu\text{m}$,栅指数 10,器件夹断电压 -2.6V 。在 $V_{gs} = -0.4\text{V}$, $V_{ds} = 3\text{V}$ 工作点下测量 S 参数。图 3 为在 0.1~10GHz 频率范围内采用本算法的 S 参数拟合结果。为了便于查看,特将 $S(1, 2)$ 放大 100 倍。

对 0.5~10GHz 均匀分布的 20 个频率点(0.5GHz 步进)进行适应值统计,结果表明只需 1000 代左右的遗传操作即可获得图 3 所示的结果。适应值为 26.791,即 20 个点的 S 参数提取值与测试值的相对误差平方和小于 4%,参数提取速度快,效果好。所定初值范围及最终得到的等效电路参数如表 1 所示。

表 1 中初值范围的设定是根据器件物理及经验值所定,因此所得结果具有明确的物理意义,可以直接应用于电路设计。为了进一步说明该算法提取模型参数的合理性,直接用表 1 所得的等效电路计算 10~20GHz 范围内的 S 参数(本频率范围没有参与算法的参数提取过程),并与实际测量的 S 参数进行比较,结果如图 4 所示($S(1, 2)$ 放大 100 倍)。

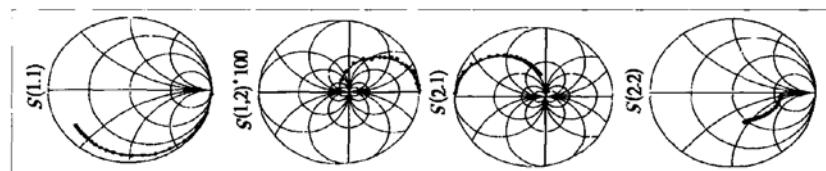


图 3 低噪声 MESFET S 参数拟合结果(0.1~10GHz, 圈: 实测点, 线: 模型)

Fig. 3 LN MESFET S parameters agreements of simulation with measurements (frequency: 0.1~10GHz; circle: measurements, line: simulation)

表 1 实际低噪声 MESFET 参数提取初值范围及结果

Table 1 Extraction results of LN MESFET parameters and initial bounds

Parameter	Initial bound		Result	Parameter	Initial bound		Result
	Lower bound	Upper bound			Lower bound	Upper bound	
R_g/Ω	0.1	5	2.7924	C_{gs}/fF	10	1000	653.74
R_s/Ω	0.1	5	0.60961	C_{gd}/fF	10	1000	45.802
R_d/Ω	0.1	5	0.1005	C_{ds}/fF	10	1000	114.11
L_g/pH	1	100	62.108	g_{ad}/ms	0.1	10	5.3482
L_s/pH	1	100	1.0024	g_{m0}/ms	50	200	85.847
L_d/pH	1	100	57.701	τ/ps	0.5	10	3.4237
R_i/Ω	0.1	10	0.10218	Fitness	26.791		

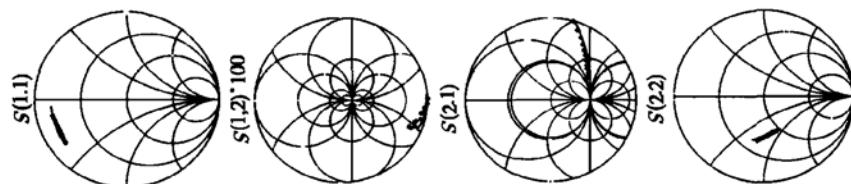


图4 模型参数外推10~20GHz S参数与实测值比较

Fig. 4 Comparison of extrapolated S parameter with measurements in the range of 10GHz to 20GHz (circle: measurements; line: simulation)

虽然在10~20GHz范围内的 S 参数并未参与算法的参数提取过程,但是利用已提取的等效电路计算该频率范围内的 S 参数仍然能够与实测值很好地吻合。这也进一步证明了模型参数提取的合理性以及算法的正确性、高效性。

5 结论

本文提出了一种改进的遗传算法,应用于提取GaAs MESFET小信号等效电路参数。该算法采用浮点编码连续突变,多种交叉、变异操作(如:单点交叉、多点交叉、均匀变异、非均匀变异等)共同作用。在遗传过程中,采用子代优化策略克服种群退化现象。针对低噪声GaAs MESFET实测数据,在0.1~10GHz范围内也能精确、快速地提取小信号等效电路参数,很好地拟合实测 S 参数曲线,并可合理外推至20GHz且仍与实测 S 参数吻合很好。整个参数提取过程无需人工干预。算法用Matlab语言实现,可方便地扩展应用于HBT、HEMT以及Si微波MOS-FET器件的小信号等效电路参数提取,也可将该算法思想用于对无源元件如电感、电容的模型参数提取,应用范围广泛。

参考文献

- [1] Gilles D, Alain C, Frederic H, et al. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1988, 36(7): 1151
- [2] Julio C, Monte M, Mike G, et al. Fast, accurate, on-wafer extraction of parasitic resistances and inductances GaAs MESFET and HEMTs. IEEE MTT-S Digest, 1992: 1011
- [3] Eric A, Michael G, Monte M, et al. Direct extraction of GaAs MESFET intrinsic element and parasitic inductance values. IEEE MTT-S Digest, 1990: 359
- [4] Chen Guoliang, Wang Xifa, Zhuang Zhenquan, et al. Genetic algorithm and its application. Beijing: Post & Telecom Press, 1996(in Chinese)[陈国良, 王熙法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996]
- [5] Chen Jun, Liu Xunchun. HFET small model extraction from S parameters using simulated annealing algorithm. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(1): 79(in Chinese)[陈俊, 刘训春. 用模拟退火算法从 S 参数提取HFET小信号等效电路参数. 半导体学报, 2001, 22(1): 79]
- [6] Shi Ruiying, Liu Xunchun, Qian Yongxue, et al. GaInP/GaAs HBT small-signal model extraction using a improved genetic algorithm. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(9): 957(in Chinese)[石瑞英, 刘训春, 钱永学, 等. 用改进的遗传算法从 S 参数中提取HBT交流小信号等效电路模型参数. 半导体学报, 2002, 23(9): 957]
- [7] Ladbrooke P H. MMIC design: GaAs FETs and HEMTs. Artech House, 1989
- [8] Haupt R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(2): 7
- [9] She Chunfeng, Yang Huazhong, Hu Guanzhang, et al. The convergence of floating genetic algorithms and application in model parameter extraction. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 134(in Chinese)[余春峰, 杨华中, 胡冠章, 等. 浮点遗传算法的收敛性及其在模型参数提取问题中的应用. 电子学报, 2000, 28(3): 134]

Precise Extraction of GaAs MESFET Small Signal Model Using Improved Genetic Algorithm

Zhang Youtao^{1,2}, Xia Guanqun¹, Gao Jianfeng², Li Fuxiao², Tie Hongan² and Yang Naibin²

(1 Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016 China)

Abstract: An improved genetic algorithm is proposed for the extraction of GaAs MESFET small signal model. It has the following characteristics: floating encoding and continuous mutation; many genetic operators working together; individual optimized. The improved genetic algorithm can quickly search the global optimum independence of the initial values. This algorithm is successfully used to determine the small-signal equivalent circuit of GaAs MESFET from the measured S parameters in the range of 0.1GHz to 10GHz and can fit measured S parameters very well. The results can be extrapolated well up to 20GHz. It is implemented by Matlab and can be easily applied to the model parameter extraction of HEMT, HBT, capacitor, and inductor.

Key words: parameter extraction; genetic algorithm; model; MESFET

EEACC: 2560B; 0260; 1350F

Article ID: 0253-4177(2004)07-0869-05

Zhang Youtao male, was born in 1979, PhD candidate. His research interest is in GaAs VHSIC.

Xia Guanqun male, was born in 1941, professor. His research interest includes GaAs device and circuits.

Received 14 July 2003, revised manuscript received 8 December 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics