

时域有限差分算法与遗传算法在平面螺旋电感设计中的应用

王宏建, 李靖, 刘和光, 姜景山

(中国科学院空间中心微波遥感部, 北京 100080)

[摘要] 文章通过电磁场时域有限差分(FDTD)算法与遗传算法(GA)相结合进行平面螺旋电感设计。通过优化单元网格大小,可优化设计整个平面螺旋电感(包含空气桥)的结构尺寸。介绍了该方法既能够进行严格的电磁场求解,又可以避免繁杂的实验过程,是优化设计的一种有效而准确的手段。

[关键词] 时域有限差分算法;遗传算法;平面螺旋电感;品质因素

[中图分类号] TN34 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)11-0038-05

1 前言

印制板或平板结构近年来得到了广泛应用,用CMOS与Bi-CMOS工艺制造的硅基射频集成电路具有许多优点,可以替代GaAs射频集成电路。尽管硅基半导体会引起较大的衬底损耗,但是硅基材料成本低,而且可以与基带数字信号处理器集中到一块芯片上。无线通信设备低成本、低噪声、低耗能、高工作频率是其必备的技术指标,需要通过射频电感元件来实现,片上电感元件是影响整机性能指标的关键,因此,电感元件的设计十分重要。

长期以来,电感元件设计都是采用等效电路模型实现的。在一定频率范围内等效电路模型可以提供快速的、较为准确的解。然而随着频率的进一步提高,在兆赫级频带上,电磁元件之间的耦合是相当严重的,此时等效电路模型显得无能为力,必须采用严格的电磁场数值法。

已有不少关于平面螺旋电感的电磁场数值解法,并取得了较为满意的解,其中包括时域有限差分法^[1,2]、谱域法^[3]和有限元法^[4]。时域有限差分法(FDTD)具有一次计算可以得到整个频带特性和灵活计入截止等优点,可以作为有效的计算手段,并且由于近似二维结构,整个计算空间和计算

时间都大大压缩,因此,笔者以FDTD作为计算工具进行电感设计。

关于电感问题的分析比较多,但是关于电感的设计相对来说比较少。实际上电感是射频微波电路(RFIC)中占用面积最大的器件,必须进行优化设计。文献[5~7]涉及到平面螺旋电感的设计,但都是基于等效电路模型,至今还没有基于严格的电磁场数值计算方法的设计过程。

遗传算法是一种类似于生物界遗传机制搜索的全局优化算法^[8],其他优化方法,诸如梯度法等,是在猜想的初值附近搜索得到最优解。遗传算法求解搜索不依赖于梯度信息,它采用群体优化策略加上自适应控制搜索过程,以得到全局最优解而不仅仅是局部最优解,然而又比穷举搜索快得多,由于其具有简单、鲁棒性强等优点,近年来被广泛应用于各个领域。

高Q值电感可以提高RF模块电路的可靠性和电路设计效率。提高Q值的办法有很多,比如金属导电率选择、介质材料选取、多层布线技术应用,等等。其中在面积大小允许的范围内,电感本身尺寸的优化是最简单的。笔者在处理FDTD和遗传算法优化时,通过调用单元网格尺寸来响应优化变量的变化,优化目标是电感的Q值。

2 遗传算法用于电磁场计算优化

遗传算法 (genetic algorithms, GA) 是群体运算, 选择、交叉、变异是其三个主要算子; 遗传算法应用到平面螺旋电感设计及优化分析中主要是进行基因串定义、适应度函数设计、优化参数与适应度函数连接等工作, 如将平面螺旋电感结构尺寸 (长、宽) 进行染色体编码及解码, 遗传算法适应度函数构造以及复制、交叉、变异等遗传操作。由于笔者采用微型遗传算法, 故不需要实施变异操作。

采用微型遗传算法 (micro genetic algorithms), 群体数量可以大为减小, 并缩短整个优化进程^[9]。

3 GA 与 FDTD 解法的结合

GA 与 FDTD 相结合需要解决两个问题:

1) 计算空间的重新分配, 即网格的重新划分。由于 FDTD 是在对被研究对象进行严格网格剖分的基础上进行的, 而平面螺旋电感的电性能指标与几何结构密切相关, 因此, 结构和电性能是相互制约的。遗传算法的每次迭代对于平面螺旋电感几何尺寸都会有或多或少的改变, 故必须进行网格的重新剖分。网格的重新剖分有三种办法: 一是网格大小不变而网格数改变; 二是网格数不变而网格大小改变; 三是两者都改变。无论那种方法, 都需要在每次调用 FDTD 时对计算对象进行适当调整。显然第一种方法优化空间十分有限, 因此, 笔者对网格大小进行了优化。

2) 每个 FDTD 周期的计算时间。由于遗传算法是多群体多世代的迭代计算, 每个 FDTD 计算周期对整个计算时间的贡献几乎是相等的, 压缩每个 FDTD 计算时间就十分重要。近似二维结构使得每次数值计算时间维持在几分钟内, 从而使得整个优化过程可以在较短的时间内完成, 既保证了计算精度, 又保证了优化时间。

采用 FDTD 计算时吸收边界是需要特别注意的, 这里采用 Mur 二阶吸收边界, 采用高斯脉冲作为激励源。

4 采用遗传算法的平面螺旋电感优化

4.1 平面螺旋电感的 FDTD 分析

图 1 为平面螺旋电感的结构示意图, 通过空气桥将里外微带线联系起来, 首先对现有模型进行 FDTD 计算。对于图 1 平面螺旋电感而言, 其结构

尺寸同文献 [3] 完全一致, ϵ_r 为介电常数, $\epsilon_r = 9.8$, $d = 635 \mu\text{m}$, $w = 625 \mu\text{m}$, $s = 312.5 \mu\text{m}$, $h = 317 \mu\text{m}$, $\Delta z = 158.75 \mu\text{m}$, $\Delta x = \Delta y = 156.25 \mu\text{m}$, 这里 d 为高度; w 为微带条带宽度; s 为间隙; h 为空气桥高度。

计算所得输入阻抗 Z 与参数 S 的关系为

$$\frac{Z_L}{Z_0} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (1)$$

式中 $Z_0 = 50 \Omega$, 是微带线特征阻抗。输入阻抗的虚部和实部分别为 ωL_S 和 R_S , $Z_L = R_S + j\omega L_S$ 。

平面螺旋电感的品质因子为

$$Q = \frac{\omega L_S}{R_S} \quad (2)$$

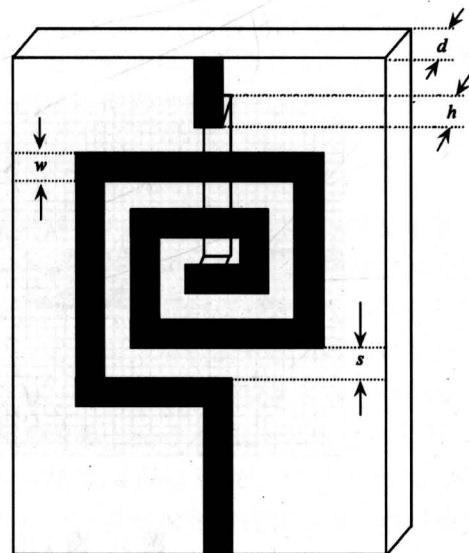


图 1 平面螺旋电感结构示意图

Fig.1 The profile of planar spiral inductor

图 2 为 FDTD 计算与实验结果对比。可以发现在整个频带 (0~20 GHz) 范围内, 除了在低频段 S_{11} 的 FDTD 计算与实验结果有些微差别外, 其他频带范围的 S_{11} 及整个频带内的 S_{12} 的 FDTD 计算与实验结果是基本一致的。经分析认为, 这是因为参考面的选择是不同的。事实上 S 参数对于参考面的选择是比较敏感的, 可以看出 FDTD 是整个优化过程的可信赖的工具。

电感工作在射频频段时, 涡流效应特别明显, 可以清晰地看到电感各个条带部分电流是不同的, 即使同一条带上电流分布也是不一样的; 越靠近电感中心, 电流分布越不均匀, 这意味着阻抗随着电感中心结构空间的缩小而增加, 造成 Q 值的减小。

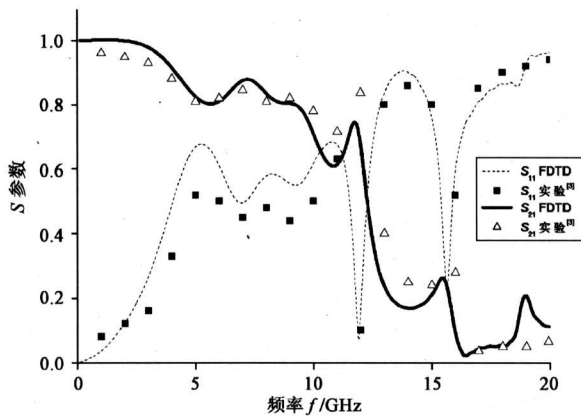


图2 平面螺旋电感的 FDTD 计算与实验结果对比^[3]

Fig.2 S parameters of the planar spiral inductor obtained by FDTD and experiment

实际上, 如果圈数增加或者电感中心空间较小时, 该效应更为明显。由于电感线圈的涡流效应, 使得同一条微带线内外边缘的电流不同; 靠近内侧的电流大于靠近外侧的电流; 总的说来, 靠近中心的线圈对电感量贡献很小, 又增加了射频时的串连电阻, 使得电感的 Q 值降低。图3为横向切面电流等值线图, 横轴代表电感(含介质板)宽度, 纵轴代表电感(含介质板)长度, 这里的计算空间(网格数)是 $54 \times 98 \times 16$ 。

等效电路法无法对电感各部分的电流进行准确模拟, 由此可见严格的电磁场数值解法的必要性。

4.2 平面螺旋电感的 FDTD 与 GA 优化

采用 FDTD 与 GA 对一个螺旋电感进行优化设计与分析的电感结构如图1所示, 介电常数 $\epsilon_r = 9.8$, $d = 635 \mu\text{m}$, $w = 312.5 \mu\text{m}$, $s = 312.5 \mu\text{m}$,

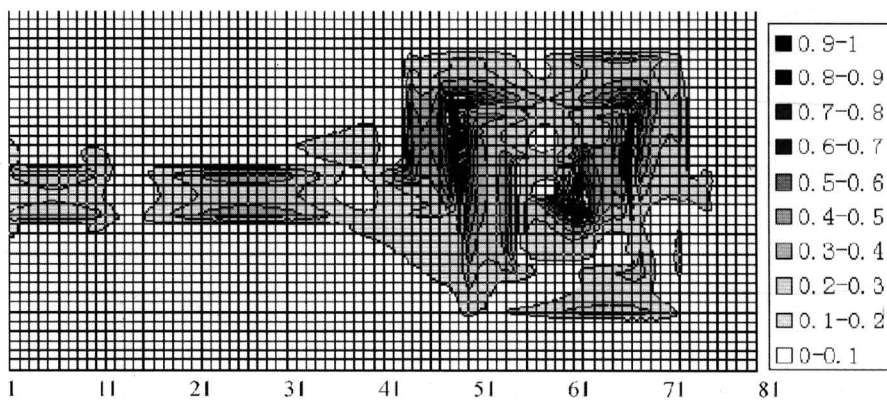


图3 图1所示电感横向切面电流等值线图

Fig.3 The contour of current along the cross section of the planar spiral inductor

$h = 312.5 \mu\text{m}$, $\Delta z = 158.75 \mu\text{m}$, $\Delta x = \Delta y = 156.25 \mu\text{m}$, 计算空间(网格数)为 $54 \times 78 \times 16$ 。由于电感的结构比较简单, 需要优化的结构实际上就是线圈的长度、高度、宽度以及介电常数。如果单独优化计算空间(网格数), 由于网格数必须是整数, 因此优化范围很小, 达不到优化目的。这里采用优化单元网格的尺寸来实现, 只就单元网格在长和宽两个方向上的尺寸进行优化, 即电感上各个点在 x 和 y 向的相对位置保持不变。优化目标是螺旋电感在特定频率下的 Q 值。

目标函数为 $F(x) = c_1 \times f_1 + c_2 \times f_2 + \dots + c_{n-1} \times f_{n-1} + c_n \times f_n$, 其中 $c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, c_n$ 是系数, $f_1, f_2, \dots, f_{n-1}, f_n$ 是在目标频率点周围的频率上电感的品质因子 Q 值。由于目标频率为 $4 \sim$

5 GHz , 因此在该频率上系数最大。

优化前需要确定 dx 和 dy 的取值区间, 由于网格大小与数值色散、空间分辨率、与时域脉冲参数的选取相匹配等有密切关系, 故通过自动选取时间间隔 dt 来响应, 同时网格单元相差不太大; 网格单元大小受电感结构空间的限制。这里 dx 和 dy 的取值区间为 $dx: [0.145 \text{ mm}, 0.172 \text{ mm}]$; $dy: [0.145 \text{ mm}, 0.172 \text{ mm}]$ 。

微型遗传算法具体优化参数为: 群体数量 5; 优化世代 200; 交叉概率 0.5。

采用 7 位二进制编码, 把 dx 和 dy 网格单元进行二进制编码, 参与遗传操作, 再进行解码, 还原成具体网格大小。

表1为优化前后对应单元网格的结构尺寸及电

感品质因子 Q 值比较。可以发现，一般认为电感占据的结构空间越大（对应电感条带本身以及间距越大）， Q 值就越高。然而事实并非如此。优化结果显示，电感的横向尺寸比原来还有所降低，出现这种情况主要是由于结合电感空间、电感中心处内径大小之间的平衡所致，也就是在有限的空间内电感条带尺寸、间隙以及内径空间结合介质板材料之间结构关系导致电性能关系的折中，属于多目标优化问题。为简化起见，本例介质板材料是固定的。

表 1 优化前后对应单元网格的结构尺寸及电感品质因子 Q 值比较 ($f = 4.5 \text{ GHz}$)

Table 1 The Q values and the dimensions of the cells of inductor comparison before and after GA

优化前后	d_x / mm	d_y / mm	Q
GA 优化前	0.156 25	0.156 25	3.84
GA 优化后	0.144 91	0.172	4.84

同样，图 4 为优化前后平面螺旋电感的 Q 值随频率的变化。可以看出，在整个频带（0~6 GHz）范围内， Q 值是有所提高的，尤其是在目标频率 $f = 4.5 \text{ GHz}$ 上， Q 值比优化前提高了 26%。虽然 Q 值仍处在较低的量级，但这是受结构所限，是平面电感介质材料与条带数目等外形结构基本确定的情况下所能得到的最佳值，与螺旋电感本身结构有关，与算法无关。图 5 为优化后电感的 S 参数变化，可以看出， S 参数变化不大。值得一提的是实际优化过程可以把电感值以及电感值的频率特性作为目标函数，这需要结合实际工程来进行，也是以后要做的工作之一。

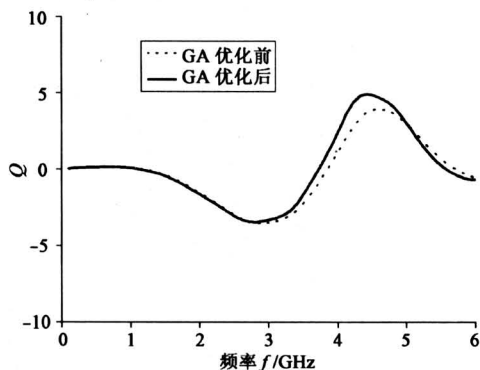


图 4 优化前后电感的品质因子 Q 随频率变化

Fig.4 The Q values of inductor vary with the frequencies

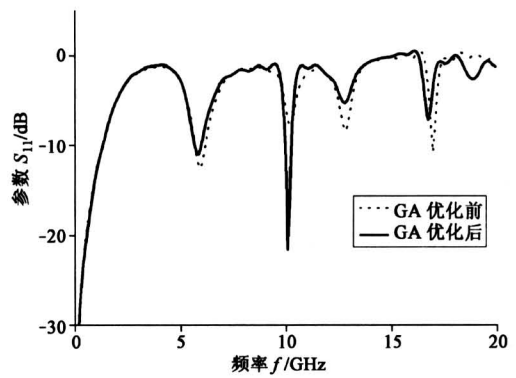


图 5 优化前后电感的 S 参数随频率变化

Fig.5 The S parameters of inductor vary with the frequencies

在电感设计时，提高 Q 值的方法还有很多，比如减小电感衬底损失等通过改变底层介质材料的方法，也可以提高电感 Q 值。

5 结语

笔者采用 FDTD 与 GA 对平面螺旋电感进行了优化设计和分析。结果表明，由于存在涡流、趋肤效应等因素，等效电路模型对于电感的分析精度是有限的，必须采用精确的电磁场数值计算方法。在电感设计过程中，采用微型遗传算法使得整个优化过程大为缩短，结合 FDTD 对电感的优化设计表明，该方法既可以得到较为准确的高 Q 值电感，又能在较短的时间内完成优化设计，可以避免重复的试验验证。

参考文献

[1] Rittweger M, Wolff I. Analysis of complex passive MMIC components using the finite difference time domain approach [A]. IEEE - MTT - S Dallas [C], 1990. 1147~1150

[2] Tsai Huan-shang, Lin Jenshan, Frye R C. Investigation of current crowding effect on spiral inductors [A]. IEEE MTT - S International Topical Symposium on Technologies for Wireless Applications, Proceedings [C], 1997. 39~142

[3] Becks T, Wolff I. Analysis of 3D metalization structures by a full wave spectral domain technique [J]. IEEE Trans on MTT, 1992, 40(12): 2219~2227

[4] Pan G W, Tan J, Gibert B K. Full wave edge element

- based analysis of 3D metal-dielectric structures for high clock rate digital and microwave applications [J]. IEEE Proceedings: Microwaves, Antennas and Propagation, 2000, 147(5): 391~398
- [5] Post J E. Optimization the design of the spiral inductors on silicon [J]. IEEE Trans on Circuits Sys I (II), 2000, 47(1): 15
- [6] 林敏, 李永明, 陈弘毅. 一种基于物理模型与遗传算法的平面螺旋电感的优化技术[J]. 半导体学报, 2001, 22(7): 897~903
- [7] 王涛, 王勇, 陈杭生. 一种基于二分搜索法的平面螺旋电感的快速优化技术[J]. 半导体学报, 2003, 24(9): 999~1004
- [8] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning [M], Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989
- [9] Sinton Seelig, Robinson Jacob, Rahmat-Samii Yahya. Standard and micro genetic algorithm optimization of profiled corrugated horn antennas [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 35(6): 449~453

The Application of FDTD and Micro Genetic Algorithms to the Planar Spiral Inductors

Wang Hongjian, Li Jing, Liu Huguang, Jiang Jiangshan

(National Microwave Remote Sensing Lab., Center for Space Science and Applied Research, C A S, Beijing 100080, China)

[Abstract] High Q inductors are the important elements for RF circuit design. In this paper, the FDTD method is applied to explain the crowding effect of the spiral inductor, which can never be accurately analyzed by analytical solutions. The experimental results verify the FDTD simulation. The micro genetic algorithms and FDTD are combined to design the high Q inductor. The results show the efficiency of this exploration.

[Key words] FDTD; genetic algorithms(GA); spiral inductor; quality factor

《中国工程科学》2004年第6卷第12期要目预告

- | | | |
|-----------------------|-----------------------|------|
| 突发性特大自然灾害触发因子的发现 | 知识创新随机过程最大熵模型 | 陈欣等 |
| 及其物理研究方案 | 下降敲入续租期权定价研究 | 吴云等 |
| 任振球 | 基于以人为本的矿山机械设计理念 | 彭佑多等 |
| 新京沪铁路最优化选择——时速200公里 | 锌空燃料电池电站 | 朱梅等 |
| 快速轮轨 | 求解复杂集装箱装载问题 | 王涛等 |
| 李玉山 | 住宅厨房通风的数值分析 | 邹声华等 |
| 长江口深水航道治理工程创新 | 一种新型的动态路由和波长分配 | |
| 范期锦 | 综合算法 | 李雷等 |
| 新型双馈便速凸极同步电机 | 质子交换膜燃料电池的研究进展 | 任学佑 |
| 宁玉泉 | | |
| 一种模糊 Rough 决策方法 | | |
| 罗党等 | | |
| 千米级斜拉桥空间非线性合理恒载 | | |
| 索力分析 | | |
| 张建民等 | | |