

# 含磁性金属纤维的多层雷达吸波材料的设计

高正平, 毕兆亿

(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种设计多层雷达吸波材料的方法。在使用普通的损耗材料进行设计时,很难在低频段获得较低的反射率。磁性金属纤维在低频段比普通损耗材料具有更大的磁导率,此前还没有包含磁性金属纤维的吸波材料的设计。文中的设计将磁性纤维作为一层,其他层由普通的损耗材料构成,利用设计的一个程序对这几层材料的参数和厚度进行了优化,该程序利用了改性的遗传算法。得到的结果显示反射率在低频段有了明显的改善(-8 dB对比普通设计的-3 dB)。此设计提供了一种获得优良吸波材料的方法。

**关键词** 磁性纤维; 多层雷达吸波材料; 反射系数; 遗传算法  
中图分类号 TB34 文献标识码 A

## Design of Multilayer Radar Absorbing Material Containing the Composite of Magnetic Metal Fiber as One Layer

GAO Zheng-ping, BI Zhao-yi

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, Univ. of Elec. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, we present a method for designing multilayer-radar-absorbing material. Generally, low reflectance within low frequency band is difficultly obtained by using ordinary lossy material. Magnetic metal fiber may have larger permeability at low microwave band than ordinary lossy materials have, but until now, no design has been performed for absorbing material containing magnetic fiber. We design the absorbing material by using magnetic fiber composite as a layer together with several ordinary material layers. The parameters and thicknesses of these layers are optimized by a modified genetic algorithm. The obtained results show that the reflectance at low frequency have been improved considerably.

**Key words** magnetic fiber; multilayer radar absorbing material; reflection coefficient; genetic algorithm

磁性金属纤维混合物具有许多不同于普通吸收剂(吸波粉料)的特点,文献[1-3]对不同形貌和导电性的磁性金属纤维与树脂混合物做了较深入地理论分析,计算了不同纤维以不同的成型方式得到的混合物的有效磁导率 $\mu_{\text{eff}}$ 和有效介电常数 $\varepsilon_{\text{eff}}$ ,揭示出金属纤维的 $\mu_{\text{eff}}$ , $\varepsilon_{\text{eff}}$ 具有如下特点:(1)磁性金属纤维混合物在半径很小( $1 \sim 3 \mu\text{m}$ )、长径比很大( $a/2 \approx 30$ )时,具有比相同金属材料的球形颗粒混合物更高的 $\mu_{\text{eff}}$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}$ 。(2) $\mu_{\text{eff}}$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}$ 都随频率增高而减小, $\mu_{\text{eff}}$ 减小更快,纤维越细减小越快。(3)电导率对磁性金属纤维的特性有很大的影响,采用电导率较小的合金或羰基制造纤维,对整个微波频段的 $\mu_{\text{eff}}$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}$ 有显著的提高,但 $\mu_{\text{eff}}$ 随 $f$ 增加而减小的速度变慢。本文对包含一层磁性金属纤维混合物的三层雷达吸波材料进行了优化设计,其中另外两层为吸波粉料。

### 1 基本参数

设计多层吸波材料实际上是优化每一层的试验解,使在工作频段内反射系数小于指定值。通常用的优化方法(爬山法、最优控制等)结合传输线理论的设计方法往往不能达到设计要求。遗传算法(GA)是一种多变量实数优化的方法,它可以搜索到系统的全局最优点,具有方法简单,同时对多个试验解进行优化等优点。本文采用的遗传算法,优化的变量是每层材料的编号和厚度,即在材料库中选择适当的材料组合,而不是以材料的电磁参数作为优化变量,因而设计完成后即可实现所需的材料。

考虑到磁性金属纤维的特殊性质,可以人为地选择某一种纤维混合物作为底层材料,即不把纤维材料

的种类作为优化变量,而只优化其厚度。对上层的普通吸收剂(吸波粉料)(通常是 $\mu_{\text{eff}}$ 和 $\varepsilon_{\text{eff}}$ 更小的材料)则材料的种类和厚度都是优化的变量。对于宽频带吸波材料应采用电导率较低的磁性纤维混合物。表1为本文设计所用到的铁纤维混合物的电磁参数,分别列出了铁纤维半径为0.8  $\mu\text{m}$ 和0.5  $\mu\text{m}$ 时的情形。

表1 铁纤维混合物的电磁参数

| $f/\text{GHz}$ | $\varepsilon'$    |                   | $\varepsilon''$   |                   | $\mu'_r$          |                   | $\mu''_r$         |                   |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                | 0.8 $\mu\text{m}$ | 0.5 $\mu\text{m}$ | 0.8 $\mu\text{m}$ | 0.5 $\mu\text{m}$ | 0.8 $\mu\text{m}$ | 0.5 $\mu\text{m}$ | 0.8 $\mu\text{m}$ | 0.5 $\mu\text{m}$ |
| 2              | 61.586            | 69.961            | 9.125             | 4.562             | 5.362             | 6.025             | 4.012             | 4.036             |
| 6              | 56.846            | 65.955            | 7.099             | 4.300             | 2.240             | 2.701             | 3.090             | 3.535             |
| 10             | 55.022            | 64.63             | 3.424             | 2.394             | 1.102             | 1.194             | 2.246             | 2.695             |
| 14             | 55.395            | 65.021            | -1.737            | 0.658             | 0.394             | 0.216             | 1.691             | 2.012             |
| 18             | 56.541            | 66.017            | -3.973            | 1.817             | 0.224             | -0.006            | 1.267             | 1.461             |

本文首先简单介绍所用GA的编码方法,最后给出的设计实例显示含磁性金属纤维混合物的吸波材料具有比普通吸收剂(吸波粉料)更好的反射特性。

## 2 编码

本文采用二进制编码,虽然二进制并不是最后的编码方法,但是它最简单,应用也最广泛。设为三层材料,最底层为磁性金属纤维混合物,其电磁参数是已知的。需要对上面两层材料的编号和三层的厚度进行优化。设材料数据库中共有8种材料供选择,编号分别为0,1,2,...,7,采用3位字符串编码。例如101(= $2^3+2^0=5$ )为第5号材料,设厚度要求精度为2位数字。设磁性纤维层最大厚度为1.1 mm,则采用6位编码,例如

$$111010 \quad (2^5+2^4+2^3+2^1) \frac{1.1}{2^6-1} = 0.92 \text{ mm}$$

设上面两层每层最大厚度为0.6 mm,则采用5位编码,例如

$$11111 \quad (2^4+2^3+2^2+2^1+2^0) \frac{0.6}{2^5-1} = 0.6 \text{ mm}$$

将上两层厚度代码,材料代码和底层的厚度代码连成一个22位的字符串,称为染色体(Chromosome)或个体(Individual),每一bit称为基因(Gene),染色体的特性由它的基因完全描绘,基因的编号为1,2,...,22。

遗传算法根据进化理论对群体(Population)进行优化。群体包含若干个体,一般都取得较大。个体数太少时,少数几个个体很容易趋于相似,使过程停滞。本文取个体数为20,是最低限度的。由计算随机产生20个字长为22的字符串,此即源群体(Genesis population),即为第1代。20个染色体编号为1,2,...,20。

## 3 多层材料优化的目标函数

多层材料的目标函数为:

$$\frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} |R_{fn}| = \min \quad (1)$$

即在 $N_f$ 个频率取样点上的反射系数的模的和为最小,但是遗传算法是为求最大值设计的,所以取目标函数为:

$$f = 1 - \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} |R_{fn}| \quad (2)$$

式中  $f$  称为个体的适应度(Fitness),群体的适应度

$$F = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} f_i \quad (3)$$

可见  $f$  和  $F$  的最大值均为1。

多层材料的反射系数由文献[4-5]中的公式计算,它们分别是无金属基底和有金属基底的传输矩阵方程。

新一代产生后,对每个个体解码得到三层的厚度和一,二层的材料编号,从材料数据库中取出这些材料的电磁参数(每一材料在 $N_f$ 个取样点的 $\epsilon$ 和 $\mu$ 值).再加入磁性纤维层的电磁参数,用文献[4-5]中公式计算出每一个体的反射系数和适应度,个体适应度的大小将是决定它在下一代能不能幸存的准则。

## 4 遗传算子

遗传算法模拟自然界物种演化的进程,用3个遗传算子对群体进行优化。

(1) 选择(Selection):按遗传算法选择的规则进行运算<sup>[2-4]</sup>,其结果将使适应度低于平均值的个体死去,并复制高于平均值的个体重组群体。重组的群体将比重组前有更大的群体适应度。

(2) 交叉(Crossover):选择并不产生新的个体,产生新的个体由“交叉”和“变异”来完成。交叉是个体间的杂交,在成对的个体间进行,即交换部分基因的过程。本文取交叉对数为3,即交叉几率为 $(6/20 = 0.3)$ 。在1和20间随机产生6个随机数,定出进行交叉的3对,再在1和22间产生6个随机数,每2个随机数定出交叉的字符串的位置。经过交叉后得到6个新的个体。

(3) 变异(Mutation):变异是个体中个别基因的改变(0变1,1变为0),取变异几率为 $1/10$ ,即2个个体参加变异,由1~20中产生2个随机数定出。再由1~22产生的两个随机数定变异的位置,变异后产生两个新的个体。将经过选择、交叉、变异后产生的新一代解码,计算个体和群体的适应度,进行新一轮运算。在经过若干次迭代(一般为几百到几千次)后,群体适应度可以达到0.8或0.9,可终止迭代,从群体中挑选出1个或几个适应度更高的个体,作为材料设计方案。

## 5 计算实例

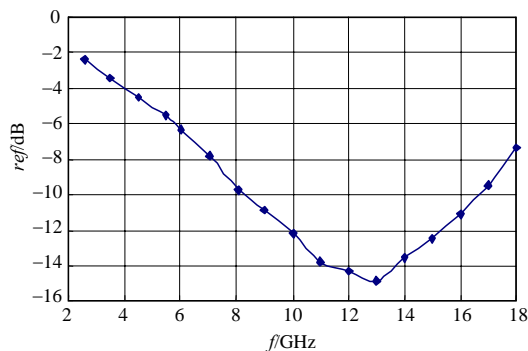


图1 折射率频率关系(无铁纤维混合物)

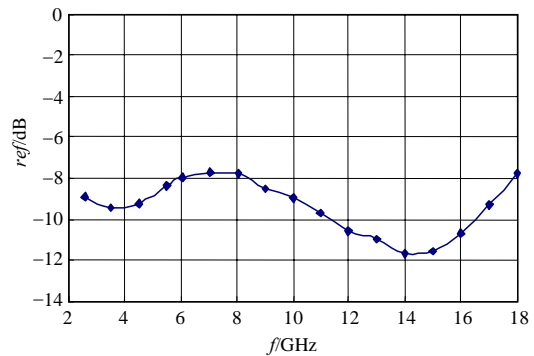


图2 折射率频率关系(铁纤维半径0.8 μm)

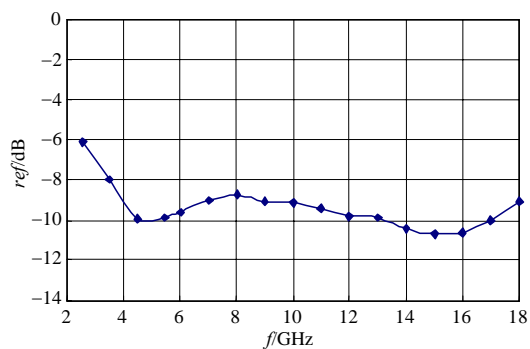


图3 折射率频率关系(铁纤维半径0.5 μm)

雷达吸波材料设为三层,总厚度为2.3 mm,所使用的吸波粉料的电磁参数均为在实验中测得的数据。当不含铁纤维混合物时(即三层均为吸波粉料)得到的优化结果如图1所示。将底层固定为铁纤维混合物,上面2层为吸波粉料,优化得到的结果如图2和图3所示。

## 6 结论

综合以上的计算实例,可以得出以下结论:加入含铁纤维层的设计,可以大幅度改善低频段的性能;铁纤维的半径必须小于 $1 \mu\text{m}$ ;由于目前工艺的原因,0.5 μm可能是铁纤维半径的“极限”尺寸,如果再进一步减小(例如0.3 μm)还可

以得出更好的特性。

铁纤维的半径 $a = 1 \mu\text{m}$ 时,其在低频段(2~4 GHz、6 GHz)具有比普通铁氧体或羰基铁(粉料)大得多的 $\mu'_{\text{eff}}$ 、 $\mu''_{\text{eff}}$ ,这对于改善低端的反射率的特性是非常有利的。

(下转第418页)

表1 对照组肺组织和暴露组肺组织波和吸光度

| 对照组/cm <sup>-1</sup> | 吸光度   | 暴露组A/cm <sup>-1</sup> | 吸光度   | 暴露组B/cm <sup>-1</sup> | 吸光度   |
|----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| 2 961                | 0.863 | 2 961                 | 0.797 | 2 961                 | 0.900 |
| 2 931                | 0.998 | 2 931                 | 1     | 2 931                 | 0.995 |
| 2 855                | 0.684 | 2 855                 | 0.649 | 2 855                 | 0.653 |
| 1 659                | 0.723 | 1 659                 | 0.495 | 1 659                 | 0.534 |
| 1 548                | 0.659 | 1 548                 | 0.527 | 1 548                 | 0.538 |

## 4 结 论

目前,有流行病学研究报道,高压输电线路电场辐射环境下人肺癌等肿瘤发病率较常人高,而高压输电线路的高场强低频电磁场对动物肺组织结构的影响及其作用机理尚不清楚,所以采用红外光谱分析法分析长期暴露在高场强低频电磁场环境中大鼠肺组织以及对照组大鼠肺组织,寻找二者在分子水平上的差异,从而解释组织癌变产生的机理。组织病理切片观察结果显示暴露组大鼠肺组织和对照组大鼠肺组织存在显著差异,结合FTIR谱吸收峰和吸收强度的变化反映出高场强低频电磁场不同程度地引起大鼠肺组织中蛋白质分子构象变化,影响蛋白质分子的生物活性,造成肺组织的损伤,从而可能引起组织癌变,但是其作用机理尚需进一步研究证实。

### 参 考 文 献

- [1] 张邦俊,仇 丰,张 莉,等.居住区内高压输电线路工频电磁污染分布研究[J]. 中国环境科学, 2002, 22(3): 272-276.
- [2] 钱永林,卞 荣. 220 kV输电线路对城区环境影响的分析[J]. 电力建设, 2005, 26(4): 60-6.
- [3] Humza A S H. Evaluation and measurement of magnetic field exposure over human body near EHV transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74: 105-118.
- [4] Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer[J]. American J.Epidemiology, 1979, 109(3): 273-284.
- [5] Armstrong B, Theriault G, Guenel P, et al. Association between exposure to pulsed electromagnetic fields and cancer in electric utility workds in quebec, canada and france[J]. American J. Epidemiology, 1994, 140(9): 805-882.
- [6] Henshaw D L. Electromagnetic held exposure and lung cancer[J]. American J. Epidemiology, 1997, 146(4): 366.
- [7] Wong P T T, Lacelle S, Yazdi H M. Normal and malignant human colonic tissues investigated by pressure-tuning FT-IR spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 1993, 47(11): 1 830-1 836.
- [8] Fung M F K, Senterman M K, Mikhael N Z, et al. Pressure-tunning FTIR spectroscopic study of carcinogenesis in human endometrium[J]. Biospectroscopy, 1996, 2: 155-165.
- [9] Susi H. Infrared spectra of biological macromolecules and related systems[C]// Timesheff SN, Frasman CD. Structure and stability of Biological Macromolecules, New York: Marcel Dekker, 1969, 641-659.
- [10] Wong P T T, Wong R K, Fung M F K. Pressure-tuning FT-IR study of human cervical tissues [J]. Applied Spectroscopy, 1993, 47(7): 1 058-1 063.
- [11] Ramesh J, Salman A, Hammody Z, et al. Application of FTIR microscopy for the characterization of malignancy: H-ras transfected murine fibroblasts as an example[J]. Biochem Biophys Methods, 2001, 50(1): 33-42.
- [12]程存归,施红旗,朱晓军,等.傅里叶变换红外光谱法研究肺组织切片[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(11): 1 342-1 344.

编 辑 孙晓丹

(上接第414页)

### 参 考 文 献

- [1] 吴明忠,赵振声,何家辉.多晶铁纤维吸收剂微波复磁导率和复介电常数的理论计算[J]. 功能材料, 1999, 30 (1) : 91-93.
- [2] 何家辉,吴明忠,赵振声.多晶铁纤维吸收剂微波电磁参数的各向异性研究[J]. 物理学报, 1999, 48(增) : 138-143.
- [3] Lagarkov A N, Sarychev A K. Effective medium theory for microwave dielectric constant and magnetic permeability of conducting stick composites[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 1992, 6 (9) : 1 159-1 176.
- [4] 饶克谨,赵伯琳.无金属基底吸波结构对TE波的反射[J]. 电子科技大学学报 1998, 27 (4) : 397-402.
- [5] 赵伯琳,高正平,饶克谨.电磁波斜入射到分层有耗煤质上的反射和传输系数[J]. 电子科技大学学报, 1993, 22 (5): 483-230.

编 辑 徐安玉