

手征媒质涂层参数对反射系数的影响^{*}

刘述章^{**} 宋俐荣

符果行

(电子科技大学应用所 成都 610054)

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

【摘要】 对手征媒质单涂层的反射系数受其电磁特性参数 ϵ 、 μ 、 ζ 和涂层厚度 d 的影响进行了计算机模拟分析。分析表明,手征媒质的旋波参量并不总是对涂层的吸波特性起着改善的作用;当手征媒质的归一化旋波参量 $\zeta_r=1$ 时,材料吸波特性最好。计算表明,当涂层厚度增加到一定厚度后,其反射系数几乎与厚度无关,此厚度随涂层材料的电磁特性参数不同而改变。手征媒质的介电率、磁导率对涂层反射有显著的影响。

关键词 手征媒质; 阻抗法; 反射系数; 吸波特性; 隐身涂层

中图分类号 TN814

作为一种新型材料的手征媒质,在研制新型微波器件、天线及隐身技术上有着潜在的应用前景。描述手征媒质的本征关系的方程有多种,本文采用 Post 提出的形式^[1]

$$D = \epsilon E + j\zeta H \tag{1}$$

$$B = \mu E - j\mu\zeta E \tag{2}$$

式中 ζ 为手征参量, ϵ 、 μ 分别为手征媒质的介电率、磁导率,通常它们均为复数。

本文只讨论电磁波垂直入射时,手征媒质单涂层的吸波性能。对于单层手征媒质涂层的吸波性能的分析包括两部分:1)电磁波入射时的反射;2)电磁波进入手征媒质后衰减。本文对手征媒质涂层材料的电磁参数及厚度对反射的影响进行较详细的分析,其结果对手征媒质的实际应用会有相当大的帮助。文中除了图3中参数与文献^[2]中参数一致外,其余参数带有一定的随意性,并且没有考虑实际中温度、频率对手征媒质的各电磁特性参数, ϵ 、 μ 、 ζ 的影响。

在手征媒质的介电率、磁导率、手征参量及涂层厚度中任意3个参数一定时,所编制的软件能很快计算出涂层在第四个参数的任意值和任意频率下的微波吸波特性,从而在一定条件下选择最合适的参数,来设计手征吸波材料及涂层设计,实现良好的微波吸波特性。

1 涂层界面的反射公式

设平面电磁波垂直作用在涂覆于金属表面上的手征媒质涂层,如图1所示。假设金属是理想导体,电磁波向 Z 方向传播,在空气与涂层界面处的输入阻抗为

$$Z_{in} = j\eta_c \operatorname{tg}(kd) \tag{3}$$

式中 $\eta_c = \sqrt{\mu/(\epsilon + \mu\zeta^2)}$ 为手征媒质涂层波阻抗, d 为涂层厚度, k 定义为手征媒质涂层的有效波数,并且 $k = (k_+ + k_-)/2 = \omega \sqrt{\mu(\epsilon + \mu\zeta^2)}$, k_{\pm} 代表在手征媒质涂层中传播的右、左旋圆极化波的波数。

当电磁波由空气向涂层作垂直入射时,反射系数为

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{4}$$

式中 Z_0 是空气的特性阻抗。如用分贝为单位则涂层的反射率为

$$R = 20 \lg |\Gamma| \tag{5}$$

1999年5月14日收稿

*国家自然科学基金资助项目,基金号:59477003

**男 59岁 大学 教授

2 手征媒质涂层参数对反射的影响

利用式(4),我们就涂层材料的手征参量、介电率、磁导率、涂层厚度对涂层反射系数的影响进行较全面和深入的讨论。

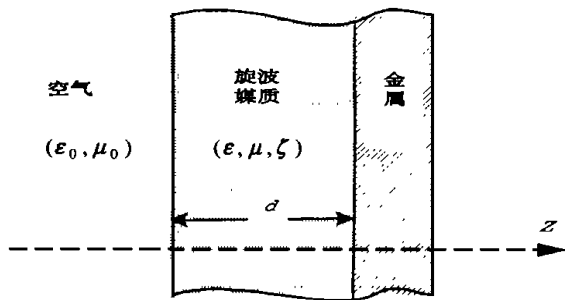


图 1 手征媒质涂层

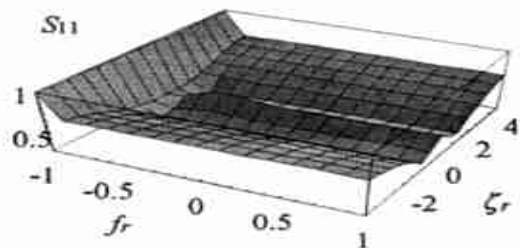


图 2 仅有磁损耗时涂层反射系数随手征参量的变化关系

参数: $\epsilon_r = 1.5, \mu_r = 1.5 + 3i, d = \lambda_0/4$

2.1 手征参量对反射系数的影响

首先考虑涂层手征媒质的 $\epsilon_r = \epsilon'_r + j\epsilon''_r, \mu_r = \mu'_r + j\mu''_r$ 及厚度 $d = \lambda_0/4$ 的情况。图 2 示出金属 ($z=0$) 表面涂覆仅有磁损耗的手征媒质, 反射系数 S_{11} 随归一化手征参量 $\zeta_r = \zeta * z_0$ 和归一化频率 $f_r = (f - f_0)/f_0$ (f_0 为中心频率) 的变化关系。在 $\zeta_r \in [0, 1]$ 范围内结果与文献[4]一致。根据图 2 和更多的计算结果^[3] 可以看到, 手征参量在 $\zeta_r = 1$ 附近反射系数为最小, 然后随着 ζ_r 的绝对值增加而反射系数也变大。根据计算结果^[5] 还可以发现, 在一定范围内, 随着磁损的增大, 反射系数增大。

其次当涂层的手征媒质仅有介质损耗 ($\epsilon_r = \epsilon'_r + j\epsilon''_r, \mu_r = 1, d = \lambda_0/4$) 时, 涂层反射系数的变化如图 3 所示。当 $\zeta_r = 0$ 时, 为普通媒质。图 3 中参数就与文献[2]中一样, 其反射变化曲线与该文的一致。计算表明^[5], 在没有磁损耗的条件下, 涂层的反射随手征参量的变化基本上看不出来, 同时复介电率虚部的影响也较小。当介电损耗增加时, 在频段的高频端和低频端的吸波特性和有所改善, 而在频段的中心频率附近的吸波特性却比原来的差得多。可见, 介电损耗大不一定能改善涂层吸波

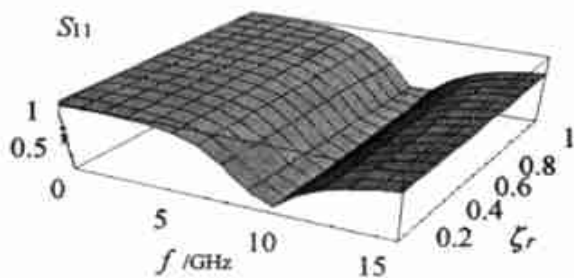


图 3 仅有电损耗时涂层反射系数: 随手征参量的变化关系

参数: $\epsilon_r = 14.4(1 + 0.35j), \mu_r = 1, d = 2\text{mm}$

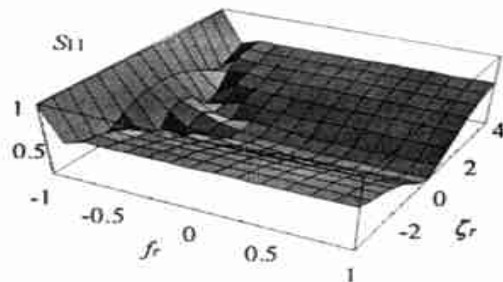


图 4 手征参量对涂层的反射起负作用

参数: $d = \lambda_0/4, \mu_r = 1.5 + 3i, f_r = 0.5, \zeta = 0.001 \text{ Ohm}$

特性。因此, 若仅改变介电率损耗不一定能达到改善吸波特性目的。显然, 如果采用手征媒质作为吸波材料, 要改善其吸波特性, 通过改变磁导率比改变介电率应该更为有效。

我们考虑了介电率和磁导率都有虚部时手征参量对反射系数的影响。图 4 为金属表面涂覆的具有与图 2 不同参数的手征媒质的手征参量对反射的影响。从图中可以看到, 在高频端, 随着手征参量的增加, 反射系数几乎只呈上升趋势。作为吸波材料, 手征媒质涂层起的是反作用。通过对具有相同的介电常数而有不同磁损的情况计算, 高频端反射在 $\zeta_r \in [0, 1]$ 范围内同样有一极小值, 然后随手征参量的增加递增, $\zeta_r = 1$ 时反射最小。很明显, 在 $\zeta_r \in [0, 1]$ 范围内和高端, 图 4 中的反射

比在图 2 中的要小一些, 这说明, 并不是磁损越大吸波特性越好。根据对图 2 等几种典型情况的计算可知^[5], 用有不同的介电率和磁导率的手征媒质涂覆的金属表面, 其手征参量对反射的影响完全不同。即手征参量可使反射系数减小, 也可能使之增大。手征参量的正、负符号(右、左旋)对反射系数并无影响。因此, 吸波材料要有好的吸波特性, 关键要选择合适的介电率、磁导率, 并使相对手征参量 $\zeta_r = 1$ 。另外, 计算结果^[5]还表明在仅有磁损耗的情况下, 吸波带宽也很宽, 磁损的变化会对反射产生明显的影响, 特别是在 $\zeta_r = [-1, 1]$ 范围内的高频段。

2.2 介电率和磁导率对反射的影响

图 5 为有磁损耗下, 当手征参量一定时介电率的虚、实部同时变化反射系数的变化曲线。介电常数较小时(0~3 左右), 反射系数随介电损耗的增加而减小, 达到一最小值后呈上升趋势, 最后变化很缓慢。当介电常数较大时(≥ 6), 反射基本不随介电损耗发生变化。计算表明^[5], 当旋波参量为零或者磁损减小时, 反射变化规律如图 5 所示, 只是反射系数要大得多。图 6 为无磁损时反射系数随介电率变化情况, 显然反射系数随介电率实部呈振荡型变化。图中反射系数在 ϵ_r 处于 2~3 和 7~8 之间及 15 附近都有一极小值, 且极小值之间间隔越来越大, 峰值也越来越高。反射系数在随介电常数变化的峰值附近先随介电损耗的增加逐渐减小(当 $\text{Im}(\epsilon_r) \approx 1 \sim 5$), 后趋于平稳; 而在随介电常数变化的谷值附近则先随介电损耗的增加而增加(当 $\text{Im}(\epsilon_r) \approx 1 \sim 5$), 后趋于平稳。由此可见, 磁损在一定范围内其值较大时反射系数越小, 相应吸波特性也越好。同理, 可作出在有或无介电损耗时, 反射系数随磁导率实部和磁损的变化曲线, 其规律与图 5 和图 6 类似, 只是介电率与磁导率互换, 因此在有介电损耗时, 反射系数比无介电损耗时小得多, 同样, 介电损耗增大, 反射系数也相应减小一些。

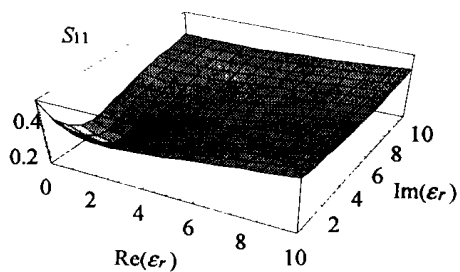


图 5 有磁损时介电率虚、实部共同的影响

参数: $\zeta = 0.0010\text{Ohm}$,
 $\mu_r = 1.5 + 3i$, $d = \lambda_0/4$, $f_r = 0.5$

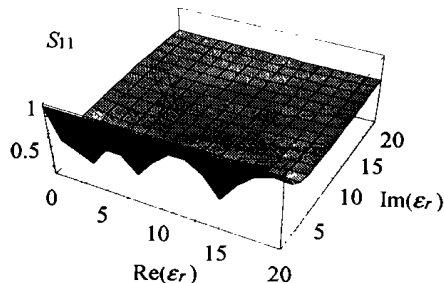


图 6 无磁损其它参数同图 5 时的反射

参数: $\zeta = 0.0010\text{Ohm}$,
 $\mu_r = 1.5 + 3i$, $d = \lambda_0/4$, $f_r = 0.5$

2.3 磁导率和手征参量同时变化对反射的影响

在厚度、频率一定时, 当磁损与手征参量同时变动时引起涂层反射系数的变化如图 7 所示。反射系数先随磁导率虚部的增大而减小, 大约在 $\text{Im}(\mu_r) = 3$ 左右后基本保持稳定, 这与以上分析不相抵触, 即磁损较大时, 涂层吸波特性更好。同时反射系数随手征参量的绝对值的增大而减小, 且在 $\zeta = 1$ 处取最小值。

图 8 为磁导率实部与手征参量同时改变时, 反射系数的变化情况, 从图中可以看出, 反射系数随磁导率实部的变化呈周期性的较小波动, 在 $\mu_r \approx 3$ 左右就有较好的效果。而反射系数随手征参量的变化很大, 在 $\zeta_r = 1$ 处最小, 且几乎随手征参量的绝对值的增加单调减小。

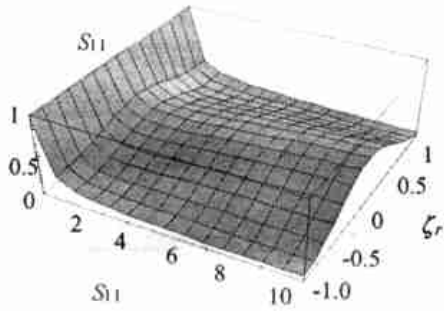


图 7 磁导率虚部同手征参量同时变化对反射的影响

参数: $\epsilon_r = 1.5$
 $\mu_r = 1.5 + \text{Im}(\mu_r)i$, $f_r = 0.5$, $d = \lambda_0/8$

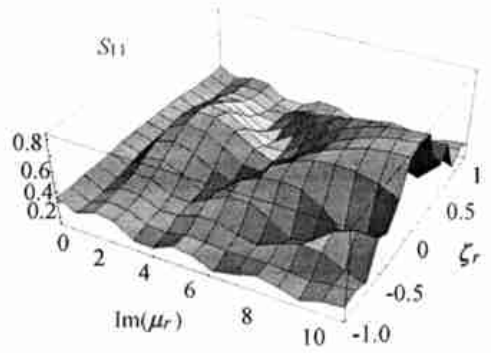


图 8 磁导率实部同手征参量同时变化对反射的影响

参数: $\epsilon_r = 1.5$
 $\mu_r = \text{Re}(\mu_r) + 1i$, $f_r = 0.5$, $d = \lambda_0/8$

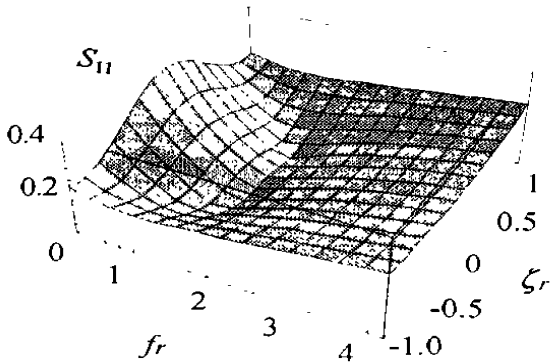


图 9 介电损耗和手征参量同时对反射的影响

参数: $f_r = 0.5$, $d = \lambda_0/8$
 $\epsilon_r = 1.5 + \text{Im}(\epsilon_r)i$, $\mu_r = 1.5 + i$

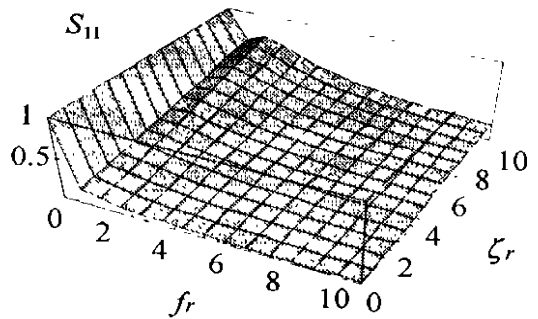


图 10 介电损耗和磁损耗同时对反射的影响.

参数: $\zeta = 0.9$, $d = \lambda_0/8$, $f_r = 0.5$
 $\epsilon_r = 1.5 + \text{Im}(\epsilon_r)i$, $\mu_r = 1.5 + \text{Im}(\mu_r)i$

2.4 介电率和手征参量同时变化对反射的影响

图 9 给出了介电损耗与手征参量同时变化时, 涂层表面的反射系数随其变化的关系图。从图中可明显地看出, 只有在介质损耗较小(在图中条件下, $\text{Im}(\epsilon_r) < 2$)时, 反射才随手征参量变化而变化; 在 $\text{Im}(\epsilon_r)$ 某一数值(在图中条件下为 2 左右)有最小值; 在此之后随介质损耗增加而增大。如假定磁导率相同, 改变介电率的实部而不改变虚部, 根据计算结果画出的曲线, 其变化规律同图 9 类似。当介电常数与手征参量同时变化时, 只有当介电常数较小(在图中给定的计算条件下, $\text{Re}(\epsilon_r) < 3$; 此处图已省略)时, 反射系数受手征参量的影响比较大, 且在这以后反射系数随介电常数的增加而增加。

2.5 介质损耗和磁损同时变化对反射的影响

图 10 给出了当涂层厚度、工作频率、手征参量以及磁导率和介电率实部一定时, 介质损耗与磁损同时改变所引起的反射系数的变化图。显然, 反射随磁损的增大递减, 到一最小值后, 保持稳定。而随介质损耗的增加基本上是递增的。

2.6 涂层厚度对反射的影响

根据涂层厚度对涂层反射的影响的计算结果可知^[9], 由图可见, 涂层厚度从零增加到一定厚度, 涂层的反射系数就不再随厚度的增加而减小。计算还表明^[5], 若涂层磁导率不同, 也是如此。磁损耗越大, 涂层的反射系数越小, 但是在低频端的反射随厚度变化要缓慢些^[9]。通过对有无磁损耗情况的计算结果的比较可知, 手征参量在有磁损时作用显著, 因此改变磁损耗来改善手征媒质的吸波特性的效果更好。

4 结 论

根据上述分析可以得到以下结果:对反射系数的影响而言,在手征参量存在时,磁导率较介电率的作用更为明显,而手征参量在 $(-1, 1)$ 范围内有最佳效果。原则上讲,磁导率的实部越大越好,但太大亦无必要,介于 $3 \sim 4$ (只适用于 ζ_r 在 $(-1, 1)$ 间)之间是比较理想的值,根据计算结果磁导率的虚部也是有一较佳的值,在有手征参量存在时,介电常数的实部和虚部应作恰当的选择且不宜太大。因此,在手征吸波材料设计选材过程中,须全面考虑材料的具体参数,以及对应的工作频率、厚度、吸波特性的要求进行全面的设计计算。本文提供结果与软件可供设计者参考和使用。

参 考 文 献

- 1 Post E J. Formal structure of Electromagnetics. Amsterdam, 1962
- 2 王相元 胡国有 陆怀先,等. 涂料型微波吸波材料计算机辅助设计. 南京大学学报, 1988, 24(4): 668~675
- 3 柯 林 RE 著, 吕继尧译. 微波工程基础. 北京: 人民邮电出版社, 1981
- 4 兰 康, 赵愉深. 旋波媒质基本参数的一种测试方法. 电子学报, 1995, 23(6): 117~119
- 5 宋俐荣. Chiral 媒质电磁特性参数测试方法研究. [学位论文] 成都: 电子科技大学, 1997
- 6 兰 康, 赵愉深, 林为干. 介质材料的宽带测试技术研究. 电子科技大学学报, 1995, 24(2): 147~152

Effect of Chiral Medium Parameters on Reflectance

Liu Shuzhang Sing Linrong

Fu Guoxing

(Inst. of Applied Physics UEST of China Chengdu 610054)

(Dept. of Microwave Engineer UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, numerical computation about relative dependence of planar single-layer chiral medium on its electromagnetic characteristic parameter ϵ , μ , ζ and chiral coated-layer's thickness d is presented. According to the computed result shows that chiral parameter ζ may not always improve absorption of chiral coated-layer. The normal chiral parameter $\zeta_r = 1$ if absorption is the best in the situation which chiral parameter improves the absorption of chiral coated-layer. It is concluded that the reflectance may decrease to some constant when the thickness increases to some limited value. Of course, the electromagnetic characteristic parameters change, the limited thickness change too. Permittivity and permeability also affect the reflectance of the chiral coated-layer.

Key words chiral medium; impedance method; reflectance; character of absorption