

Microwave Transmission Properties of Conductive Slabs

Xu-liang Lü, Zhao-yang Zeng, Heng Liu

Camouflage Teaching Group, Engineering Institute of Engineer Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing, 210007, China

Email: zengzy1212@hotmail.com

Abstract: Based on the median model, numerical calculations are carried out to investigate the microwave transmission property of conductive slabs. It is found that, if the conductivity of slab samples can be chosen arbitrarily, the maximum absorption rate of slabs is always 50%, no matter what the thickness is. Further analysis shows that the maximum absorption is resulted from the interference between the microwaves reflected from different surfaces of the sample. The calculated dependence of the sample absorption on microwave frequency and on incident angles supports this conclusion. Because interference effect appears only under rigorous conditions, the calculated maximum absorption means nothing for anti-radar camouflage. A slab sample with a perfect conductor under it is recommended as a proper model for analyzing the microwave transmission properties of conductive slabs..

Keywords: microwave absorbing; conductive slab; interference effect

平板导电材料的微波传输特性分析

吕绪良, 曾朝阳, 刘珩

解放军理工大学工程兵工程学院伪装工程教研室, 南京, 210007

Email: zengzy1212@hotmail.com

摘要:为探讨导电材料的微波吸收潜力, 利用有耗介质模型对平板导电材料的微波传输特性行为进行了计算和分析。计算结果表明, 在垂直入射的情况下, 如果平板的电导率可以随意变化, 那么即使 0.1 微米厚的导电平板也能够实现对入射微波 50%左右的吸收。为分析这种吸收能力是否有应用价值, 进一步考察了样品反射率对电导率、入射角、样品厚度以及微波频率的关系, 发现平板样品的微波反射率随着这些参数的改变而剧烈震荡, 而 50%的吸收率是其最佳值。通过比较样品的实际反射率和其两个表面单次反射的反射率, 我们发现平板样品 50%的吸收只发生在平板样品两表面的反射出现干涉相消的情况。当样品背贴金属板时, 这种干涉效应不再存在, 平板的微波吸收能力就大大降低。这些结论表明, 对平板电导材料微波吸收能力的计算, 应考虑更符合实际应用的情况, 而不能简单地以其在某种情况下的吸收率值作为唯一指标。

关键字: 微波吸收; 电导材料; 干涉相消

1、引言

现代高分辨率雷达对军事目标构成了空前的威

胁, 同时也促进了隐身技术和隐身材料的发展。当前, 研制出的微波吸收材料由数十种之多, 其中部分材料在 8~18GHz 波段的吸收性能已经达到战术应用要求, 正被广泛应用于各种防雷达伪装器材中。不过, 总体而言, 现有的微波吸收材料还普遍存在吸收效率不理

Supported by the Key Lab of Jiangsu Province on inorganic matter and its composite materials, No.Wjjqfhxc1200705

想、密度过高、吸收频带过窄等技术问题，无法大范围推广应用。真正的轻型宽波段高效率微波吸收材料的研制仍然今后一段时期微波吸收材料领域的重大课题。

在各种微波吸收材料中，电导损耗材料有非常独特的地位。这是因为，一方面，电导损耗材料可能是目前军事伪装器材中使用最广泛的对抗雷达的材料；另一方面，在电导率、介电常数和磁导率三个反映微波损耗的材料参数中，只有电导率的变化范围完全满足理想吸波材料的要求。关于这一点，从传播常数的依赖关系中可以得到印证，微波在材料中的传播常数 k 为

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \omega\sqrt{\mu_0\mu_r\varepsilon_0(\varepsilon_r - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0})} \quad (1)$$

等式中， μ_r, ε_r 分别是相对磁导率和相对介电常数。由于传播常数的虚部对应于微波在材料中的衰减系数，因此介电常数的虚部、磁导率的虚部以及电导率都可以引起微波的衰减。所不同的是这三种参数的变化范围，尽管经过了多年的研究，目前各种微波吸收材料的磁导率和介电常数的取值仍然无法显著增加，尤其是这些参数的虚部^[3, 4]。而电导率的变化范围却大得多，在 $10^{-20} \sim 10^8$ S/m 范围。这意味着电导损耗是高效的微波衰减机制。不过，这种分析只对应于微波在材料中的传播过程，而没有考虑由电导材料制成的样品的实际特性。对于实际的样品而言，仅仅考虑其损耗机制是不够的，样品的界面特性也很关键。本文的目的在于，借助于有耗介质模型分析平板电导材料的微波传输特性，说明其不同界面的作用和相互影响，探究电导材料在防雷达伪装中的应用潜力。

2、平板电导样品微波传输特性的计算

如图 1 所示，考虑电磁波垂直入射到薄型电导材料样品的情况。此时将微波传输的空间分成三部分，入射微波和反射微波存在的区域 0，材料存在的区域 1，以及透射微波存在的区域 2。而在这三个空间区域之间，存在两个界面。可以定义区域 2 与区域 1 之间的界面为界面 1，而区域 0 和区域 1 之间的界面为界面 2。显然，由于入射微波直接照射在界面 2 上，所有界面 2 的微波反射就是样品的反射。

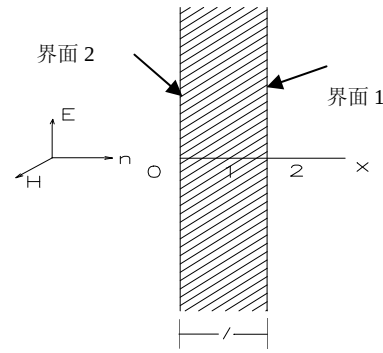


Fig.1 Conductive slab sample with vertical incidence microwave

图 1 垂直入射的平板电导样品

利用介质模型，很容易得到平板样品的微波反射率^[3]：

$$\Gamma_2 = Z_2 + \frac{(1 - Z_2^2)Z_1 \exp(-i2kd)}{1 + Z_2Z_1 \exp(-i2kd)} \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{\eta_0 - \eta}{\eta + \eta_0} \quad (3)$$

其中， Z_1 、 Z_2 分别是界面 1 和界面 2 的一次反射率，

所谓一次反射就是这种界面单独存在时的微波反射率，它只取决于界面两边的材料特征阻抗。 η_0 是空气的特征阻抗， d 是平板样品的厚度，而 k 是平板材料中的传播常数，

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \omega\sqrt{\mu_0\mu_r\varepsilon_0(\varepsilon_r - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0})} \quad (4)$$

式中 σ 是样品的电导率，而 ε_r 、 μ_r 分别是样品的相对介电常数和相对磁导率。而样品的透射率可以表示为

$$T = \frac{(\eta + \eta_0) + (\eta - \eta_0)Z_1}{2\eta_m e^{ikd}} \quad (5)$$

3、平板电导样品的微波传输特性

利用上面的公式计算薄型样品透射率、吸收率和反射率与其电导率之间的关系。设微波频率为 10GHz，

相对磁导率和相对介电常数都为 1，图 2 和图 3 分别是厚度为 0.5 毫米和厚度 1 毫米的样品的计算结果。

图中的曲线反映，吸收峰值大约为 50%，而且似乎与样品的厚度无关。更多的计算发现，无论平板的厚度多小，只要电导率可以取适当的值，吸收峰总是 50%，而类似的计算结果也出现在文献中^[4]。这种结果非常令人吃惊，因为很多野外实验发现，薄的电导涂层的微波吸收效果可以忽略^[5]。该如何理解这种计算结论？

通过仔细分析，可以发现平板样品的吸收峰值出现时，公式 (1) 中右边的两项总是相互符号相反。可以这样理解公式 (1)，样品的反射率由两部分构成，

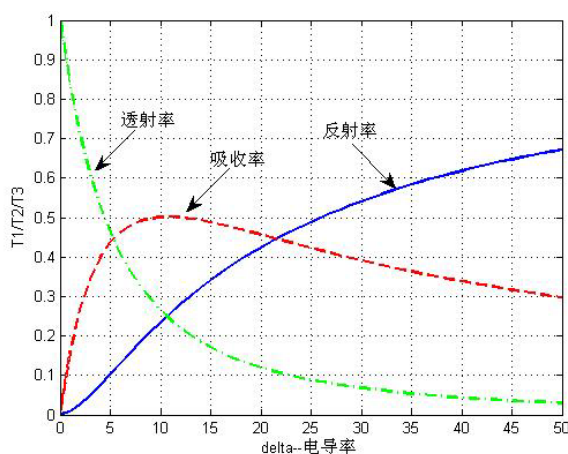


Fig.2 The dependence of slab transmission properties on its conductivity, the slab thickness is 0.5 mm.

图 2 0.5 毫米平板导电样品微波传输特性与其电导率之间的关系

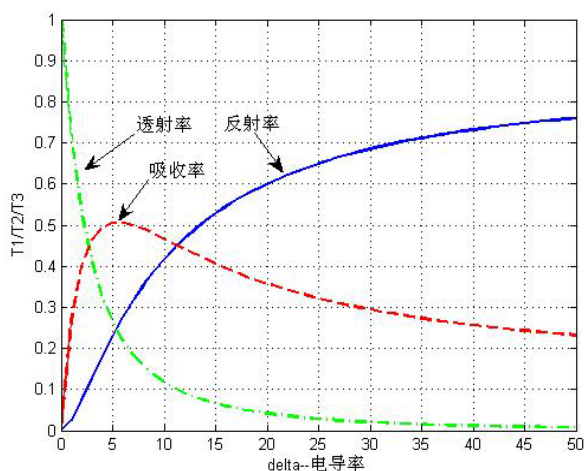


Fig.3 The dependence of slab transmission properties on its conductivity, the slab thickness is 1 mm.

图 3 1 毫米平板导电样品微波传输特性与其电导率之间的关系

一部分（对应右边第一项）是界面 2 的一次反射，而另一部分是由于界面 1 的存在而导致的入射到平板内部的微波在平板内反复反射与透射的综合效果。而这两项相互抵消，说明界面 2 的一次反射与其他的反射微波之间存在 π 的位相差。而这种抵消又是不完全的，无论如何调整电导率参数，总的反射率的最小值都是 50%。

根据上述分析，平板样品的微波反射率很大程度上取决于其两个界面之间的相互影响，而吸收峰值的出现是两个界面之间多次反射的微波相干抵消的结果。众所周知，干涉效应对位相极为敏感，因此只要稍微改变入射波的频率，干涉结果就会发生很大的变化。为此，我们计算了不同频率微波入射到同一平板的情况，结果如图 4 所示。很明显，平板的反射率随微波频率的变化而出现振荡，这种振荡正是干涉效应的有力证据。

当然，还有别的方式能够说明干涉效应对平板样品的微波反射率的影响。图 5 计算的是在平板后一定距离上放理想导体板的情形，在这种情况下，从平板透射的微波经金属板反射后，会再次进入平板样品，与平板自身两个界面反射的微波再次反射干涉。可以预期，当金属板与平板样品的距离发生变化时，这种干涉效应同样会导致样品反射率的振荡。图 5 的曲线证明了这种猜想。

现在，需要说明的是，对平板样品而言，这种干涉效应导致的最低反射有没有应用价值？至少对防雷达伪装而言，我们认为没有应用价值。这是因为，在防雷达伪装中，伪装器材与真实目标的距离总是有很

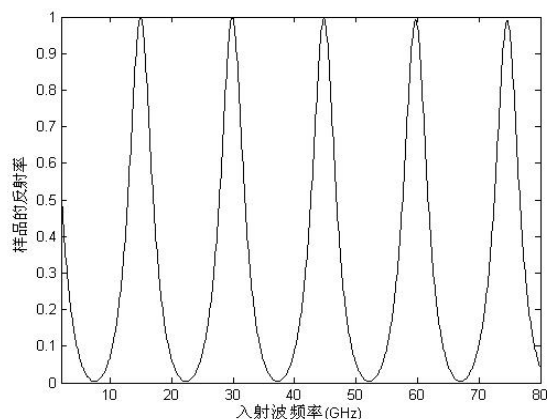


Fig.4 The dependence of reflection rate on microwave frequency.

图 4 反射率随入射波频率变化曲线

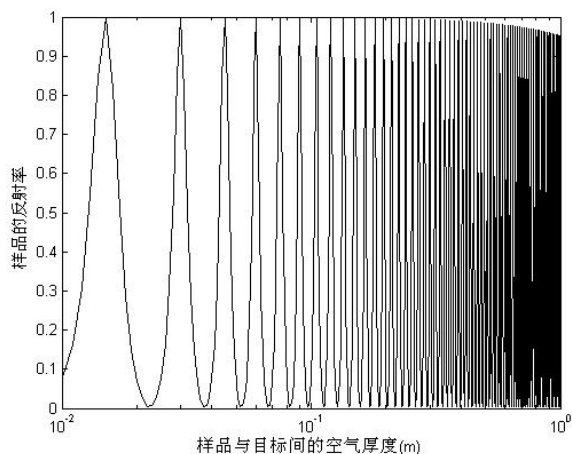


Fig.5 The dependence of reflection rate on the distance between slab sample and a metal slab.

图 5 反射率随金属板与平板之间距离的变化曲线

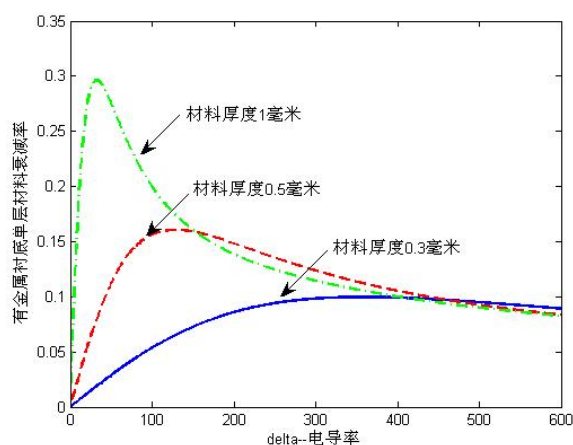


Fig.6 The attenuation rate for single-layer slabs with different thickness.

图 6 不同厚度的单层涂敷吸波材料衰减率

大的随意性，而且没有办法精确预计敌方雷达的准确工作频率，更不能够判断雷达探测的方向。而这些因素对于干涉效应而言都是极为敏感的因素。

最后，考虑一下平板样品背贴金属板的情况。按照前面的分析，在这种情况下，平板的两个界面的一

次反射具有相同的符号，因此不会导致干涉相消，也就是说此时样品的反射会大于前面的最佳值，亦即吸收率会小于 50%。图 6 给出的是对厚度分别为 0.3 毫米、0.5 毫米、1 毫米下的平板样品的微波反射衰减结果。在这张途中，由于电导引起的反射微波衰减(或说吸收率)最高也只有 30%，而且，样品厚度越小，这种衰减也越小。

总之，通过计算，可以发现平板电导样品的微波反射是样品不同界面多次反射的综合结果，当某种干涉效应出现时，平板的微波反射率达到最小值。可是，这种干涉效应需要微波频率、入射角度、样品厚度以及样品电导率之间形成完美的匹配，而这种情形在防雷达伪装的实际中很难满足。作为更为普遍的情况，分析平板样品的微波反射还是应该考虑背贴金属板的情况。否则，就容易对材料或器材的性能作出过高的估计。

Reference(参考文献)

- [1] Lv Xuliang, Zeng Zhaoyang, New RCS model for anti-radar screens, Functional Material(in Chinese) [J] (Supplement), 2007,Page 305~307.
吕绪良, 曾朝阳. 伪装遮障的雷达散射截面新模型[J]. 功能材料. 2007. 增刊: 305-307.
- [2] Zeng Zhaoyang, Li Yan, Lv Xuliang, New diffraction model for absorptive anti-radar screens, Defense Technology (in Chinese)[J], No.1, 2009, Page 20~25.
曾朝阳, 李炎, 吕绪良, 兰永杰. 吸收散射型伪装遮障新模型理论分析[J]. 防护工程. 2009. 01: 20-25.
- [3] Kang Qing, New microwave absorption material(in chinese)[M],The Science Press, 2006,Page 34~38.
- [4] Jiayuan Fang, Zhonghua Wu, "Generalized Perfectly Matched Layer for the Absorption of Propagating and Evanescent Waves in Lossless and Lossy Media", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.44,No.12,pp.2216-2222,Dec. 1996.
- [5] J.Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic", J.Comp.phys.1994, Vol.114, No.2,pp.185 ~ 200.
- [6] Van-Tan Truong etc,Conducting polymer based rader absorbing aterials,SPIE Vol.3241.1997.