

介质损耗对频率选择表面传输特性的影响¹

侯新宇 万 伟 佟明安 龚 诚

(西北工业大学电子工程系 西安 710072)

摘 要 应用模匹配技术,研究了 Y 形缝隙平面周期阵列夹嵌于均匀有耗介质层中心的夹心频率选择表面 (FSS) 结构对平面波的传输特性。讨论了介质层对结构中心谐振频率、传输带宽、以及传输损耗的影响规律。相同介电常数的介质材料在有耗和无耗情况下的模拟分析结果清楚表明介质本身的损耗是影响 FSS 结构损耗特性的主要因素。

关键词 介质损耗, 频率选择表面, 传输特性

中图分类号 TN015

1 引言

关于平面周期阵列用作频率选择表面 (FSS) 的理论分析近年来得到了人们极大的关注,其中相当多的研究集中于对不同形状单元及单元栅格排列的影响分析^[1,2]。研究中为了方便,都假设了介质层对 FSS 的影响尽量地小。然而出于两方面的原因,必须对不同介质层参数的影响作出考虑,一是在理论分析时如果不充分考虑到对某些实际介质结构的描述,往往可能使分析结果出现较大偏差。二是只有充分了解介质参数对 FSS 频率特性的作用规律,才有利于通过适当的参数设计来得到最优结构。

关于 FSS 的介质加载效应,公开文献中已经有一定的报道,研究结果^[3-6]表明当加载介质层的厚度从零开始增大时, FSS 的谐振频率先是迅速减小,然后逐渐收敛于一因具体介质结构而异的渐近值。Callaghan 等人^[7]的研究还指出了周期阵列夹嵌于介质层中心的夹心 FSS 结构具有最小的失配损耗。

虽然以上研究对支撑介质层的影响作出了相对比较完整的描述,但是都没有考虑到介质本身损耗的影响。Callaghan 和 Parker^[8]的实验研究结果表明,即使按照文献 [7] 的方法进行介质加载, FSS 在其谐振频率处的总损耗量也并不为零,这主要是由于介质损耗的影响。本文以理论分析为基础,证明这一结论。同时讨论介质层厚度变化对夹心 FSS 结构中中心谐振频率、传输带宽、以及传输损耗的影响规律。

2 理论模型和结果讨论

本文选用 Y 形缝隙单元构成 FSS 的周期阵列,是因为这种 FSS 对不同极化和入射角的平面波具有较好的频率和带宽稳定性,此外,选用 Y 形单元的另一个好处是求解相关积分方程时,只需很少数目(一般少于 9 个)的全域基函数对未知场进行近似,便可得到收敛的计算结果。

假定图 1(a) 中的 Y 形缝隙阵列为无限大、无限薄的周期表面。在图 1(b) 中,平面波沿 +z 方向入射,若定义 z 坐标轴和入射方向所在的平面为入射平面,则入射电场垂直于入射平面的状态称为 TE 入射,入射电场平行于入射平面的状态称为 TM 入射。定义入射方向和 -z 坐标轴的夹角为入射角 θ ,并记入射方向在 x-y 平面上的投影与 x 轴之间的夹角为 φ 。

应用 FSS 分析的模匹配方法,将周期阵列前后两侧介质区域以及自由空间中的电场和磁场分别以 Floquet 谐波模式展开,然后在周期阵列表面上应用横向场的连续性条件,便可得到关于周期单元上未知电场的积分方程。选择适当的基函数将积分方程中的未知量展开,然后应用 Galerkin 方法可将积分方程转化为线性方程。求解线性方程求出未知电场的展开系数后,根据等效传输线理论便不难得到 FSS 的传输系数和反射系数。

¹ 1998-05-12 收到, 1999-09-09 定稿

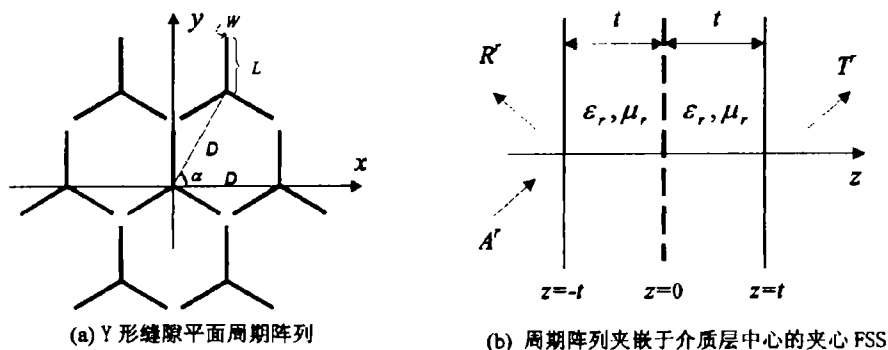


图 1 夹心 FSS 结构示意图

当图 1(a) 中周期阵列的单元参数和栅格参数取为 $L=0.36\text{mm}$, $W=0.4\text{mm}$, $D=0.75\text{mm}$, $\alpha = 60^\circ$ 时, 阵列在不同入射状态下的频率响应如图 2 所示, 无论是 TE 还是 TM 入射, 当入射角变化到 30° 和 60° 时, 阵列谐振频率的变化均不超过 0.5%, 可见其谐振频率对不同入射角相当稳定。

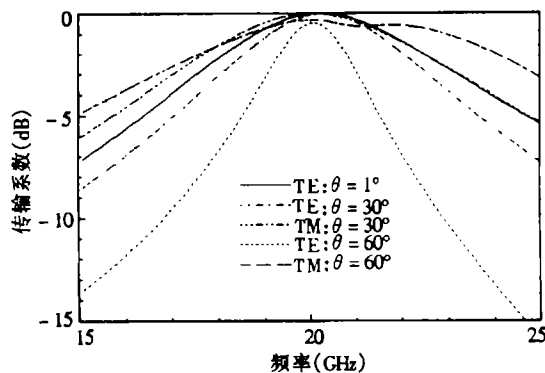


图 2 Y 形缝隙平面周期阵列的频率响应

然后研究图 1(b) 所示的夹心 FSS 结构在介质层厚度变化时, FSS 频率特性的变化规律。选取其中的介质层为微波应用中常用的高强度介质材料, 假设其介质相对介电常数 $\epsilon_r = 4.0$, 损耗正切 $\tan\delta = 0.014$ 。

2.1 对谐振频率的影响 图 3 所示为 FSS 中心谐振频率随介质层厚度变化时的模拟分析结果。可以看到, 介质加载显著造成了阵列谐振频率的下移。与文献 [7] 图 2 比较, 虽然本文采用了不同的 FSS 谐振单元, 但无耗情况下, 介质层对结构谐振频率的调制规律则完全相同。这说明介质加载的调制作用是一种适用于任意单元的普遍效应。这种现象还可从理论角度进一步得到解释, 当空气-介质分界面很接近周期阵列 (即介质厚度较小) 时, 周期阵列所激励的高阶凋落 Floquet 模在到达分界面时仍具有较大的幅值, 因此改变了周期阵列的谐振频率。而随着此分界面逐渐远离周期阵列, 高阶 Floquet 模在到达分界面时, 已经得到充分的衰减, 幅值接近于零, 因此调制效应减弱, 但由于介质层本身的通带和缝隙阵列通带的相互作用, 谐振频率围绕中心频率 10GHz 呈现出振荡, 这实际等效于将周期阵列置于相对介电常数为 4.0 的无限大媒质空间的情况。

值得说明的一点是, 对于斜入射, 当入射场为 TE 极化时, 谐振频率随介质层厚度变化的特性和正投射相类似。而对 TM 极化, 当入射角接近 Brewster 角 (63°) 时, 因为空气-介质边界对入射波将没有反射, 介质层的加载效应极为微弱, 谐振频率将恒趋于常数 10GHz。

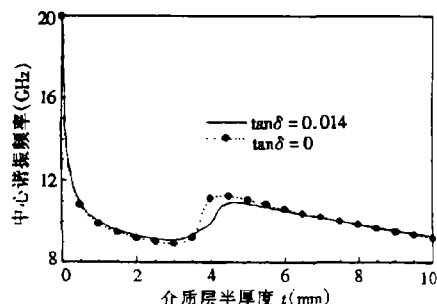


图 3 不同介质层厚度时的 FSS 谐振频率

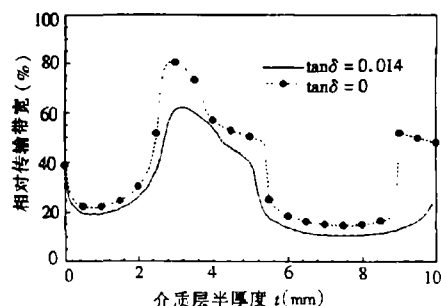


图 4 不同介质层厚度时的 FSS 传输带宽

2.2 对传输带宽的影响 图 4 所示为介质层半厚度 t 在 0~10mm 变化时, 缝隙阵列传输响应的带宽变化情况。传输带宽按 -4dB 带宽计算。结果表明, 介质加载除了在 3mm 半厚度附近的区域使得传输带宽增大以外, 在其它厚度使得传输带宽有了明显减小。其中在 3mm 和 9mm 厚度附近由于介质损耗而造成的带宽变化超过了 20%, 而其它厚度时的两条曲线差别并不大。

图 5 为介质层总厚度 ($2t$) 分别为 $\lambda/8$, $\lambda/2$ 和 λ (λ 为 FSS 谐振波长), 以及周期阵列置于介电常数 $\epsilon_r = 4.0$ 的无限大均匀媒质中时, FSS 对正投射平面波的频率响应的数值模拟结果。从图中可见, $\lambda/8$ 的介质厚度已足以把周期阵列的谐振频率降低到对应无限大媒质的情形, 但同时 FSS 传输带宽则有所减小。当介质厚度等于 $\lambda/2$ 时, FSS 的传输通带很宽, 边缘截止特性也明显较为陡峭。当介质厚度等于 λ 时, FSS 的传输通带最窄, 此外, 由于介质层本身传输谐振的影响, 传输曲线分别在 6GHz 和 16GHz 出现了明显的肩部。

2.3 对传输损耗的影响 从图 6 的计算结果中可以看到, 当考虑介质本身损耗时, 夹心 FSS 在其谐振频率处并不能实现无耗传输, 而如果不计介质损耗 (即介质损耗正切等于零), 则 FSS 的传输损耗马上降到了零, 这充分说明了夹心 FSS 的传输损耗主要由介质损耗引起。注意到损耗的量值并非随介质层厚度 t 的增大而单调递增, 当 $2t \approx \lambda/2$ 时, FSS 能够获得最优传输 (传输损耗小于 0.4dB), 而当 $2t \approx \lambda$ 时, FSS 的传输损耗超过了 1.5dB。

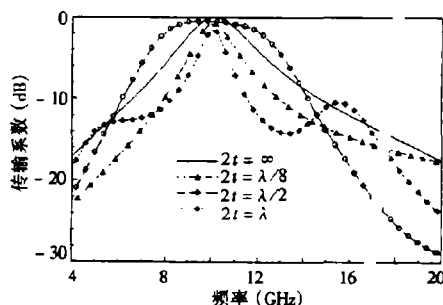


图 5 不同介质层厚度时的 FSS 频率响应

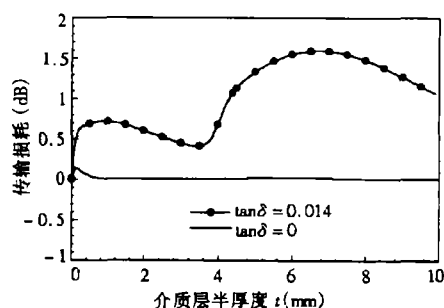


图 6 不同介质层厚度时的 FSS 传输损耗

3 结 论

本文通过对不同介质厚度时介质夹心 FSS 结构的中心谐振频率、传输带宽、传输损耗等特性的数值模拟分析, 研究并讨论了介质加载对夹心 FSS 频率特性的影响。计入介质损耗的分析结果显示介质本身的损耗是造成夹心 FSS 结构损耗增大的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Hamdy S M A, Parker E A. Influence of lattice geometry on transmission of electro-magnetic waves through array of crossed dipoles. IEE Proc.-H, 1982, 129(1): 7-10.
- [2] Mittra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces—A review. Proc. IEEE, 1988, 76(12): 1593-1615.
- [3] Luebbers R J, Munk B A. Some effect of dielectric loading on periodic slot arrays. IEEE Trans. on AP, 1978, AP-26(4): 536-542.
- [4] Orta R, Tascone R, Zich R. Multiple dielectric loaded perforated screens as frequency selective surfaces. IEE Proc.-H, 1988, 135(1): 75-82.
- [5] Cwik T, Mittra R. The cascade connection of planar periodic surfaces and lossy dielectric layers to form an arbitrary periodic screen. IEEE Trans. on AP, 1987, AP-35(12): 1397-1405.
- [6] Parker E A, Vardaxoglou J C. Influence of single and multiple-layer dielectric substrates on the band spacing available from a concentric ring frequency selective surface. Int. J. Electron., 1986, 61(3): 291-297.
- [7] Callaghan P, Parker E A, Langley R J. Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces. IEE Proc.-H, 1991, 138(5): 448-454.
- [8] Callaghan P, Parker E A. Experimental investigation of closely packed spiral element FSS yields narrowband designs. Electron. Lett., 1992, 28(4): 365.

INFLUENCE OF DIELECTRIC LOSS ON THE TRANSMISSION PROPERTIES OF FREQUENCY SELECTIVE SURFACES

Hou Xinyu Wan Wei Tong Mingan Gong Cheng

(Dept. of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The influences of supporting dielectric layers on the transmission properties of FSS with Y slot array embedded in the dielectric are studied in this paper. The frequency properties (resonance frequency, transmission bandwidth and transmission loss are included) of the FSS with different dielectric thickness are discussed. Calculated results show that dielectric losses are main sources of the base of FSS structure.

Key words Dielectric loss, FSS, Transmission properties

侯新宇: 男, 1969 年生, 副教授, 博士后。研究方向为复杂目标电磁散射分析和频率选择表面。

万 伟: 男, 1936 年生, 教授, 长期从事电磁理论、电磁散射与逆散射等方向研究。

佟明安: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师。从事航空火力控制系统研究。

龚 诚: 男, 1958 年生, 教授, 博士。从事航空火力控制系统研究。