

双层 FSS 结构电性能研究

武哲¹, 武振波²

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中国航天科工集团三院, 北京 10074)

摘要: 提出了一种研究不同栅格及单元外形并有介质加载的双层频率选择表面(FSS)电性能的理论分析方法. 通过确定双层 FSS 之间介质内传输波和反射波分别对相应的 FSS 具有周期性而得到矢量 Floquet 传输模和衰减模表达形式, 应用切向电磁场边界条件推导出一组耦合积分方程, 利用矩量法求解得到结构的电磁特性. 以 Y 形缝隙作为 FSS 谐振单元, 计算结果表明, 双层 FSS 结构通过层间电磁场衰减模的耦合能够修正频率响应曲线, 电性能较单层有很大的改善.

关键词: 频率选择表面; Floquet 模; 耦合积分方程; 雷达隐身

中图分类号: TN957. 8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0517-04

Research on Electrical Performance of Dual-Layer FSS Configuration

WU Zhe¹, WU Zhen-bo²

(1. Aeronautic School of Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. China Aerospace Science Industry corp., Beijing 100074, China)

Abstract: A theoretical approach analyzing electrical performance for dielectric loaded dual-layer Frequency Selective Surface (FSS) configuration with dissimilar lattice and element geometries is proposed. The forward and reverse waves are periodic with corresponding FSS respectively, and an explicit description of vectorial propagation as well as of evanescent modes is provided. A group of coupled integral equations is derived by applying tangential electromagnetic field boundary conditions, and electromagnetic properties can be obtained by moment method. Calculation results show that, dual-layer configuration can shape frequency response curves because of the coupling of evanescent modes between FSSs, and electrical performance has great improvements as compared with single-layer configuration.

Key words: frequency selective surface; Floquet modes; coupled integral equations; radar stealth

1 引言

现在军用飞行器设计的一个重要发展趋势就是隐身化, 隐身性能是衡量飞行器作战效能的一项重要指标, 而其中雷达隐身是隐身技术发展中最重要的一环. 对飞行器头部雷达舱的电磁散射控制, 一般认为使用带有频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)并包围雷达天线及附属部件的雷达罩来实现雷达工作频段之外隐身是可行的措施^[1]. FSS 作为一种周期性结构, 本质特征是对不同频率、入射角和极化状态的电磁波呈现滤波特性^[2]. 许多学者进行了大量的研究, 研究对象从最初的单屏介质加载 FSS 结构到多层 FSS 夹层结构, 发展并形成了各种理论分析方法, 如互阻抗法^[3]、模匹配法^[4,5]、谱域法^[6]等, 总结出了对 FSS 结构分析和设计有意义的规律.

多层 FSS 结构要比单层 FSS 结构在传输系数曲线外形、角稳定性等方面有更优越的特性, 其电磁性能分析方法主要有两种, 一种方法是把每一层 FSS 作为单独的模块, 通过多端口电路技术^[2]或广义散射矩阵公式^[7,8]对各模块进行级联,

最后得到线性代数方程组并用矩量法求解; 另一种方法是应用矢量模技术和电磁场边界条件推导出一组耦合积分方程^[9], 通过矩量法求解. 广义散射矩阵级联方法对层间的距离有一定的要求, 以使 FSS 之间矢量模的耦合影响尽可能小; 而耦合积分方程方法从本质上考虑了层间矢量模的电磁耦合, 更加真实反映结构的频率响应特性, 适合于分析近距离的结构. 但有关耦合积分方程方法的文献基本上局限于分析相同栅格外形的结构, 本文进一步发展了此方法, 使其可以用于研究不同栅格及单元外形的多层结构的频率响应特性.

2 FSS 结构电性能理论分析

FSS 结构电性能的研究取双层缝隙结构作为研究对象, 其理论分析方法可以推广到多层情况. 图 1 为双层 FSS 结构及电磁波传播示意图. 文献[10]在研究相控阵天线时, 用数学上的分离变量法推导出了空间电磁场满足周期性边界条件时的解, 其解由一组矢量 Floquet 传播模和衰减模表达, 称为 Floquet 定理. 同样, FSS 作为一种周期性结构, 其空间内电磁场也可由 Floquet 模表达.

收稿日期: 2003-10-16; 修回日期: 2004-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (No. 90305026)

2.1 积分方程的建立

双层 FSS 栅格的外形可能不同,因而在图 1 中的双层 FSS 之间介质区域和自由空间区域、内切向电磁场的 Floquet 模表达形式不同.介质区内的前向波和反向波分别关于第一层和第二层是周期的,即向 +z 方向传输的电磁波由第一层 Floquet 模展开,而向 -z 方向反射的电磁波由第二层 Floquet 模展开,这就明确了介质区内合成波的描述形式,而、区内的切向电磁场分别由第一层和第二层 Floquet 模表达.假设各区域内矢量 Floquet 模的数量是相同的,设为 m.

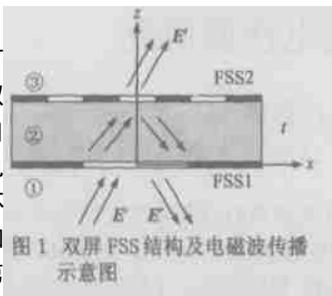


图 1 双层 FSS 结构及电磁波传播示意图

当 z < 0 时,

$$E_r(x, y, z) = \sum_{pqr} A_{00r} e^{-j \cdot 00z} \cdot \frac{1}{00r} + \sum_{pqr} R_{pqr} e^{j \cdot pqz} \cdot \frac{1}{pqr}$$

$$H_r(x, y, z) = \sum_{pqr} A_{00r} \cdot 00r e^{-j \cdot 00z} \times \frac{1}{00r} - \sum_{pqr} R_{pqr} \cdot pqe^{j \cdot pqz} \times \frac{1}{pqr} \quad (1)$$

当 0 < z < t 时,

$$E_r(x, y, z) = \sum_{pqr} T_{pqr}^1 e^{-j \cdot pqz} \cdot \frac{1}{pqr} + \sum_{pqr} R_{pqr}^1 e^{j \cdot pqz} \cdot \frac{2}{pqr}$$

$$H_r(x, y, z) = \sum_{pqr} T_{pqr}^1 \cdot 00r e^{-j \cdot pqz} \times \frac{1}{pqr} - \sum_{pqr} R_{pqr}^1 \cdot 1pqr e^{j \cdot pqz} \times \frac{2}{pqr} \quad (2)$$

当 z > t 时,

$$E_t(x, y, z) = \sum_{pqr} T_{pqr}^2 e^{-j \cdot pq(z-t)} \cdot \frac{2}{pqr}$$

$$H_t(x, y, z) = \sum_{pqr} T_{pqr}^2 \cdot 2pqr e^{-j \cdot pq(z-t)} \times \frac{2}{pqr} \quad (3)$$

其中: p, q 表示 Floquet 模谐因子; r = 1, 2 分别表示 TE 和 TM 模; 和 表示模导纳、传播常数.

在两层 FSS 单元缝隙内,利用切向电场连续边界条件可以获得 区内传输和反射系数关系式.

第一层 FSS 单元缝隙内 (z = 0) 有

$$\sum_{r=1}^2 A_{00r} \cdot \frac{1}{00r} + \sum_{pqr} R_{pqr} \cdot \frac{1}{pqr} = \sum_{pqr} T_{pqr}^1 \cdot \frac{1}{pqr} + \sum_{pqr} R_{pqr}^1 \cdot \frac{2}{pqr} = E_1$$

用共轭矢量模点乘上式并积分得到

$$pqr A_{00r} + R_{pqr} = T_{pqr}^1 + \sum_m R_m^1 \iint_{\beta_1} \frac{1}{pqr} \cdot \frac{2}{m} ds = \iint_{\beta_1} \frac{1}{pqr} \cdot E_1 ds \quad (4)$$

同样在第二层 (z = t) 有

$$\sum_{pqr} T_{pqr}^1 e^{-j \cdot pq t} \cdot \frac{1}{pqr} + \sum_{pqr} R_{pqr}^1 e^{j \cdot pq t} \cdot \frac{2}{pqr} = \sum_{pqr} T_{pqr}^2 \cdot \frac{2}{pqr} = E_2$$

用共轭矢量模点乘上式并积分得到

$$\sum_m T_m^1 e^{-j \cdot 0 m t} \iint_{\beta_2} \frac{1}{m} \cdot \frac{2}{pqr} ds + R_{pqr}^1 e^{j \cdot pq t} = T_{pqr}^2 = \iint_{\beta_2} \frac{2}{pqr} \cdot E_2 ds \quad (5)$$

其中: “*” 表示复数共轭; A₁, A₂ 分别表示两层 FSS 的周期单元面积; B₁, B₂ 分别表示两层 FSS 缝隙单元面积;当 p = q = 0

时, pqr 等于 1,其它情况为 0.

联合求解式(4)和(5),可得 区内传输和反射系数矩阵表达式

$$T = - (I - X)^{-1} Y E_2 + (I - X)^{-1} E_1 \quad (6)$$

$$R = (Z + U (I - X)^{-1} Y) E_2 - U (I - X)^{-1} E_1 \quad (7)$$

其中: X, Y, U 为 m × m 阶矩阵; I 为 m × m 阶单位阵; Z 为 m × m 阶对角阵; E₁, E₂ 为 m 阶列向量.

$$x_{gh} = e^{-j \cdot 0 h t} \sum_m (e^{-j \cdot 0 m t} \iint_{\beta_1} \frac{1}{g} \cdot \frac{2}{m} ds \iint_{\beta_2} \frac{1}{m} \cdot \frac{2}{h} ds); y_{gh} = e^{-j \cdot 1 h t} \iint_{\beta_2} \frac{1}{g} \cdot \frac{2}{h} ds; u_{gh} = e^{-j \cdot 1 g t} e^{-j \cdot 1 h t} \iint_{\beta_2} \frac{1}{g} \cdot \frac{2}{h} ds; z_{gg} = e^{-j \cdot 1 g t}; e_{1g} = \iint_{\beta_1} \frac{1}{g} \cdot E_1 ds; e_{2g} = \iint_{\beta_2} \frac{2}{g} \cdot E_2 ds.$$

利用 z = 0 和 z = t 处 FSS 缝隙内切向磁场连续条件获得两个耦合磁场积分方程

$$\sum_{r=1}^2 00 A_{00r} \times \frac{1}{00r} - \sum_m R_m \times \frac{1}{m} = \sum_m 0 T_m^1 \times \frac{1}{m} - \sum_m 1 R_m^1 \times \frac{2}{m} \quad (8)$$

$$\sum_m 0 T_m^1 e^{-j \cdot 0 m t} \times \frac{1}{m} - \sum_m 1 R_m^1 e^{j \cdot 1 m t} \times \frac{2}{m} = \sum_m 2 T_m^2 \times \frac{2}{m} \quad (9)$$

把式(6)和(7)代入式(8)和(9)得到以下矩阵表达式

$$E_2^T (F_1^{-1} - G_1^{-2}) + E_1^T (F_2^{-1} - G_2^{-2}) = A_0 \quad (10)$$

$$E_2^T (P_1^{-1} - Q_1^{-2}) + E_1^T (P_2^{-1} - Q_2^{-2}) = 0 \quad (11)$$

其中 F₁ = (- (I - X)⁻¹ Y)^T T₁; G₁ = (Z + U (I - X)⁻¹ Y)^T T₂; F₂ = 3 + ((I - X)⁻¹)^T T₁; G₂ = (- U (I - X)⁻¹)^T T₂; P₁ = (- (I - X)⁻¹ Y)^T T₁; Q₁ = (Z + U (I - X)⁻¹ Y)^T T₂ + 3; P₂ = ((I - X)⁻¹)^T T₂; Q₂ = (- U (I - X)⁻¹ Y)^T T₂; 1, 2 为 m 阶列向量; 1, 2, 3, 1, 2, 3 为 m × m 阶对角阵; 1g = ∫β₁

$$\frac{1}{g} \cdot E_1 ds; 2g = \iint_{\beta_2} \frac{2}{g} \cdot E_2 ds; 1g = \frac{0}{g}; 2g = \frac{1}{g}; 3g = \frac{2}{g};$$

$$1g = \sum_m e^{-j \cdot 0 m t}; 2g = \sum_m e^{j \cdot 1 m t}; 3g = \sum_m \frac{2}{g}; A_0 = 2 \sum_{r=1}^2 00 A_{00r} \cdot \frac{1}{00r}.$$

2.2 积分方程的求解

采用 Galerkin 矩量法求解式(10)和(11)中的未知电场,把 FSS 单元缝隙内切向电场用一组基函数展开为

$$E_1 = \sum_i C_{1i} h_{1i}; E_2 = \sum_j C_{2j} h_{2j}$$

每一共轭基函数与积分方程做内积并积分,得到以下矩阵方程

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0^1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:各子矩阵表达式

$$E_{0i}^1 = \sum_{r=1}^2 (2 \cdot 00 A_{00r} \iint_{\beta_1} h_{1i}^* \cdot \frac{1}{00r} ds);$$

$$Z_{11ii} = \left[\left[\iint_{\beta_1} h_{1i} \cdot \frac{1}{m} ds \right] \left[\left[F_{2mn} \iint_{\beta_1} h_{1i}^* \cdot \frac{1}{n} ds - G_{2mn} \iint_{\beta_1} h_{1i}^* \cdot \frac{2}{n} ds \right] \right] \right]$$

$$\begin{aligned}
 Z_{12ij} &= \left[\begin{aligned} & \left[\int_{\beta_2} h_{2j} \cdot \frac{2}{m} ds \right] \\ & \left[F_{1mn} \int_{\beta_1} h_{1i} \cdot \frac{1}{n} ds - G_{1mn} \int_{\beta_1} h_{1i} \cdot \frac{2}{n} ds \right] \end{aligned} \right] \\
 Z_{21ij} &= \left[\begin{aligned} & \left[\int_{\beta_1} h_{1i} \cdot \frac{1}{m} ds \right] \\ & \left[P_{2mn} \int_{\beta_1} h_{2j} \cdot \frac{1}{n} ds - Q_{2mn} \int_{\beta_2} h_{2j} \cdot \frac{2}{n} ds \right] \end{aligned} \right] \\
 Z_{22ij} &= \left[\begin{aligned} & \left[\int_{\beta_2} h_{2j} \cdot \frac{2}{m} ds \right] \\ & \left[P_{1mn} \int_{\beta_2} h_{2j} \cdot \frac{1}{n} ds - Q_{1mn} \int_{\beta_2} h_{2j} \cdot \frac{2}{n} ds \right] \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

求得 E_1 和 E_2 后,可以通过式(4)和(5)得到整个结构传输和反射系数。

子矩阵 Z_{11} 和 Z_{22} 与单层结构推导出的结果一样,而 Z_{12} 和 Z_{21} 则表示层间电磁场的耦合,强烈地影响整个结构的电磁特性。它们的表达式中都包含有不同的矢量 Floquet 模,主要是由于分离区内传输和反射系数矩阵表达式所引起的,一定程度上也影响结构的频率响应特性。

3 具体算例分析

双层 FSS 结构最重要的特征就是通过层间电磁场衰减模的近距离耦合来改变结构的频率响应特性,其耦合程度可由介质的几何和物理参数进行调整,一般相对于单层 FSS 结构来说,频率响应曲线具有平顶、下降较快的特征。本文取 Y 形缝隙作为 FSS 谐振单元,阵列为正三角形排布,分析介质及阵列周期的变化对频率响应特性的影响。

3.1 介电常数对谐振频率和带宽的影响

两层 FSS 单元及阵列周期参数相同,具体为:两个方向的周期均为 $d = 1.3\text{cm}$; Y 形缝隙臂长 $l = 0.58\text{cm}$,臂宽 $w = 0.05\text{cm}$;电磁波为 TE 波,正入射。图 2(a)、(b) 分别给出了介质层厚度 $t = 0.5\text{cm}$ 不变,相对介电常数 $\epsilon_r = 1 \sim 5$ 变化时双层和单层 FSS 结构的频率响应曲线。从表 1 中可知:双层 FSS 结构的谐振频率 f_0 和带宽 bw 都随着 ϵ_r 增大而减小;单层 FSS 结构的 f_0 也随 ϵ_r 增大而降低,但 ϵ_r 较大时,功率损耗比较大。综合比较可知,双层 FSS 结构的频率响应曲线较单层 FSS 结构有很大的改善,曲线具有平顶、较快下降的特征。

表 1 介电常数对传输特性的影响

ϵ_r	双层 FSS 结构		单层 FSS 结构	
	f_0/GHz	$-1\text{dB}bw/\text{GHz}$	f_0/GHz	$-1\text{dB}bw/\text{GHz}$
1	13.00	1.4	13.10	1.6
2	10.20	1.1	10.60	1.1
3	8.70	0.9	9.4	—
4	7.70	0.8	8.7	—
5	7.00	0.3	8.1	—

3.2 厚度对谐振频率的影响

图 3 给出了双层 FSS 结构介质 $\epsilon_r = 3, t = 0.1 \sim 4.0\text{cm}$ 变化时 f_0 的变化情况。由图可知, f_0 在初始阶段逐渐降低,而后

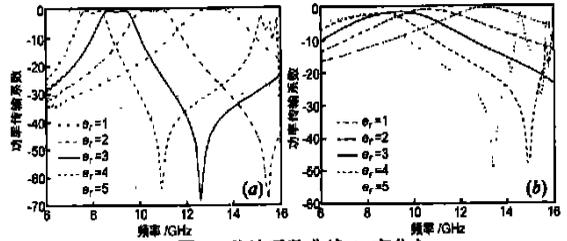


图 2 传输系数曲线 (ϵ_r 变化)

呈现起伏特性。当 t 较小时,某些由第一层(或第二层) FSS 激发的 Floquet 衰减模到达第二层(或第一层) FSS 后能够发生反射进行耦合; t 增大到一定值时,其幅值衰减为零。

3.3 阵列周期对谐振频率和带宽的影响

保持 FSS 单元和介质参数不变,阵列周期变化时的频率响应曲线如图 4。从表 2 中数据统计可知,随着周期 d 的增大, bw 逐渐减小,而 f_0 逐渐增大,但变化比较缓慢,这说明周期对带宽的影响比谐振频率大。

表 2 阵列周期对传输特性的影响

d/cm	f_0/GHz	bw/GHz
1.1	8.50	1.6
1.2	8.60	1.2
1.3	8.70	0.9
1.4	8.80	0.7
1.5	8.90	0.5

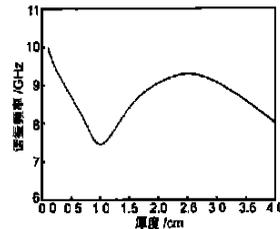


图 3 谐振频率随 t 变化曲线

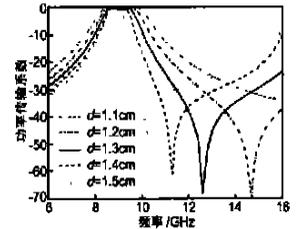


图 4 传输系数曲线 (d 变化)

4 结论

本文提出的具有不同栅格外形和介质加载的双层 FSS 结构电性能理论分析方法可以用来广泛研究各种 FSS 谐振单元、阵列周期以及介质变化时对频率响应特性的影响。通过以 Y 形缝隙为谐振单元的双层 FSS 结构电特性研究表明,双层结构能够利用层间电磁场耦合修正频率响应曲线,相对单层结构有很大的改善,更有利于实现结构的电性能设计,若进一步优化设计可以获得理想的平顶、快速下降的频率响应曲线。

参考文献:

[1] WAHID M, MOMIS S B. Band pass radomes for reduced RCS[J]. IEE Colloquium on Antenna Radar Cross Section, 1991: 4/1 - 4/9.

[2] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76 (12): 1593 - 1615.

[3] MUNK B A, KOUYOUMJIAN R G, J R L P. Reflection properties of periodic surfaces of loaded dipoles [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1971, 19(5): 612 - 617.

- [4] CHEN C C. Diffraction of electromagnetic waves by a conducting screen perforated periodically with circular holes [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques ,1971 ,19(5) :475 - 481.
- [5] CHEN C C. Transmission through a conducting screen perforated periodically with apertures[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques ,1970 ,18(9) :627 - 632.
- [6] WU T K. Frequency Selective Surface and Grid Array[M]. New York : J Wiley ,1995.
- [7] VACCHIONE J D , MITTRA R. A generalized scattering matrix analysis for cascading FSS of different periodicities [J]. IEEE AP-S Digest , 1990 ,1 :92 - 95.
- [8] ORTA R , TASCONE R , ZICH R. Multiple dielectric loaded perforated screen as frequency selective surfaces [J]. Proceedings of IEE , 1988 , 135 :75 - 82.
- [9] VARDAXOGLU J C. Frequency Selective Surfaces : Analysis and Design [M]. Taunton , Somerset , England : Research Studies Press ; New York : J Wiley , 1997.
- [10] AMITAY N , GALINDO V , WU C P. Theory and Analysis of Phased Array Antennas [M]. New York : J Wiley , 1972.

作者简介:



武哲男, 1957年2月出生于山西省太原市, 1988年获工学博士学位, 1991年博士后出站, 北京航空航天大学航空科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要从事飞机总体设计, 隐身技术, 电磁场计算等方面研究。



武振波男, 1976年12月出生于辽宁省朝阳市, 1999年毕业于北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系(现更名为航空科学与工程学院), 同年保送该系攻读硕士学位, 于2001年提前攻读博士学位, 主要研究方向为飞行器总体和隐身设计, 电磁场数值计算以及频率选择雷达罩分析与设计等, 已发表学术论文4篇。E-mail :

wzbaizh@sina.com

www.cnki.net