



“十三五”国家重点图书出版规划项目
电子与信息工程系列

Design Methodology for Frequency Selective
Surface at Microwave Bands Applications

新型微波频率选择表面设计方法

● 杨国辉 张 狂 丁旭旻 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

” 国家重点图书出版规划项目
信息工程系列

Design Methodology for Frequency Selective
Surface at Microwave Bands Applications

新型微波频率选择表面设计方法

杨国辉 张 狂 丁旭旻 编著



内容简介

本书是一部关于频率选择表面理论与设计的前沿著作,介绍了频率选择表面的工作原理、分析方法以及各种用途的频率选择表面设计方法,同时介绍了几种极具特色的频率选择表面设计,例如大入射角宽带高透波率的频率表面设计、有源可控频率选择表面通用结构设计等,使读者掌握频率选择表面的基本理论和分析方法的同时,提高分析问题和解决问题的能力。

本书可作为电磁场与微波技术专业的研究生专业课教材,也可供相关领域科研人员参考。

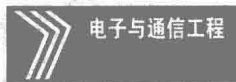
图书在版编目(CIP)数据

新型微波频率选择表面设计方法/杨国辉,张狂,丁旭旻编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5603-7392-8

I. ①新… II. ①杨… ②张… ③丁… III. ①微波技术
IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 110514 号



电子与通信工程

策划编辑 许雅莹 杨 桦 张秀华

责任编辑 李长波 张艳丽

封面设计 刘洪涛

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 380 千字

版 次 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-7392-8

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

频率选择表面是一种空间滤波器,它可作为雷达天线的带通天线罩,也可作为无线通信双频天线的双工器,又可作为特定通带的吸波结构件等。频率选择表面理论与技术发展已有半个多世纪的历史,它的发展也促进了相控阵天线设计技术的发展。

本书是一部关于频率选择表面理论与设计的前沿著作,介绍了频率选择表面的工作原理、分析方法以及各种用途的频率选择表面设计方法,既注重基础理论,也强调与实际应用的联系;同时介绍了几种极具特色的频率选择表面设计,例如大入射角宽带高透波率的频率表面设计、有源可控频率选择表面通用结构设计等,使读者掌握频率选择表面的基本理论和分析方法的同时,提高分析问题和解决问题的能力。本书可以作为相关领域科研人员的参考用书和研究生的专业课教材。

本书共分为8章。第1章为频率选择表面的基本理论,简述了频率选择表面的分类、应用、工作机理、相关电磁仿真软件、仿真流程以及仿真计算的可靠性验证。第2章介绍了频率选择表面的等效电路分析方法,从频率选择表面谐振的物理机制出发,引出了几种常见的频率选择表面的等效电路,并根据传输线理论建立了等效电路模型、提取了等效电路参数,最后通过了仿真验证。第3章为频率选择表面的宽带设计方法,介绍了宽带频率选择表面基础、宽带频率选择表面的设计与仿真、宽带频率选择表面的测试及场分析。第4章为频率选择表面的小型化设计方法,分为单层、多层、带加载元件三种情况,并分别举例说明。第5章为有源可控频率选择表面通用结构的设计,分别介绍了左右可调结构、四象限可调结构、特殊可调结构以及外加电压方向与极化敏感方向同向的可调结构,并对不同有源频率选择表面结构传输特性进行了总结。第6章讲述了基于有源频率选择表面的电扫描天线设计,介绍了电扫描天线的研究进展及反射辐射电控扫描天线的设计,讨论了用于反射辐射电控扫描天线的有源频率选择表面以及反射辐射电控扫描天线辐射器的设计方法,并对反射辐射电控扫描天线系统进行了测试与验证。第7章讨论了几种新型分形结构的双频频率选择表面的设计方法。第8章讨论了X波段角度一致性宽带及高透波频率选择表面的设计。

本书由杨国辉、张狂、丁旭旻撰写。杨鑫、戴瑞伟、管春生、张谅、韩阔、刘志航、李婉露等也参与了本书的撰写工作。其中,第1~3章由杨国辉撰写,第4~6章由张狂撰写,第7~8章由丁旭旻撰写。全书由杨国辉统稿。

由于作者的水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者提出宝贵意见并与作者联系(邮箱:gh.yang@hit.edu.cn)。

作 者

2018年3月

目 录

第 1 章 频率选择表面基本理论	1
1.1 频率选择表面的分类	1
1.2 频率选择表面的应用	3
1.3 频率选择表面的工作机理	3
1.4 频率选择表面相关电磁仿真软件介绍	21
1.5 频率选择表面仿真流程	22
1.6 仿真计算的可靠性验证	25
第 2 章 频率选择表面的等效电路分析方法	26
2.1 频率选择表面谐振的物理机制	26
2.2 金属带栅的等效模型	27
2.3 频率选择表面的等效电路	29
第 3 章 频率选择表面的宽带设计方法	37
3.1 宽带频率选择表面基础	37
3.2 宽带频率选择表面的设计与仿真	47
3.3 宽带频率选择表面的测试及场分析	61
第 4 章 频率选择表面的小型化设计方法	70
4.1 单层频率选择表面单元结构的小型化设计	70
4.2 多层频率选择表面单元结构的小型化设计	87
4.3 带加载元件的多层频率选择表面单元结构的小型化设计	107
第 5 章 有源可控频率选择表面通用结构的设计	115
5.1 左右可调结构	115
5.2 四象限可调结构	120
5.3 特殊可调结构	130
5.4 外加电压方向与极化敏感方向同向可调结构	133
5.5 不同有源频率选择表面结构传输特性总结	138
第 6 章 基于有源频率选择表面的电扫描天线设计	140
6.1 电扫描天线、频率选择表面基础	141
6.2 反射辐射电控扫描天线设计	154
6.3 用于 ESRRA 的有源频率选择表面设计	162
6.4 ESRRA 辐射器的设计	189
6.5 ESRRA 系统的测试与验证	195

第 7 章 新型分形结构的双频频率选择表面设计	207
7.1 传统双通带频率选择表面设计的难点	207
7.2 改进型分形结构的双通带频率选择表面设计	209
7.3 基于互耦和谐振原理的微型双频频率选择表面设计	214
第 8 章 X 波段角度一致性宽带及高透波频率选择表面设计	218
8.1 频率选择表面基本单元结构的等效电路	218
8.2 宽带频率选择表面设计	221
8.3 MEFSS 设计	229
8.4 X 波段高透波频率选择表面设计	235
8.5 基于雷达罩壁结构的小型化高透波频率选择表面设计	239
参考文献	245
名词索引	247

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)对电磁波具有选择透过性,当电磁波入射到 FSS 上时,表现出不同的特性,呈现带通或带阻滤波器的特点。一个完整的 FSS 结构主要由介质基底与排列于基底上的二维周期性金属阵列组成,基底主要起支撑作用,以增加整个结构的机械强度;金属阵列通过与电磁波的感应而使整个结构对电磁波呈现特定的选择透过性。在 FSS 的研究过程中,周期性阵列中的单个单元是研究的基本单位。

1.1 频率选择表面的分类

在进行设计时,往往最先面临的问题便是选取基本单元类型,某些单元相比其他单元类型,本身就具有宽带或窄带特性,这在设计时是不容忽视的。

1.1.1 按传输性能分类

FSS 按传输性能可以分为四种基本类型:带阻型 FSS、带通型 FSS、高通型 FSS、低通型 FSS。图 1.1 所示为上述四种基本类型的 FSS 结构,这几种结构在设计中可以综合使用,以达到特殊的滤波效果。

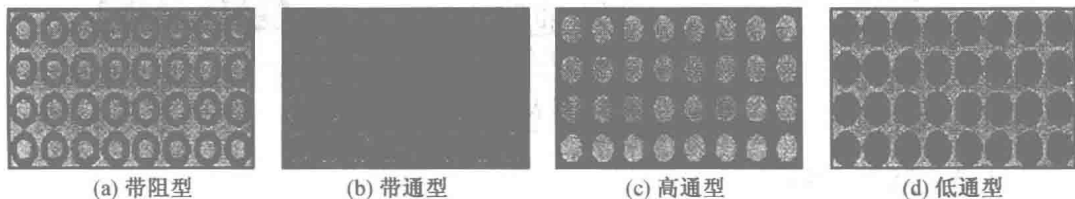


图 1.1 频率选择表面的四种基本类型的结构

1.1.2 按单元特性分类

FSS 按单元特性可分为贴片型与缝隙型。贴片型 FSS 是指固定形状的金属单元贴片在介质基底上以某一固定周期广泛分布形成的 FSS 结构,这种类型的 FSS 必须有介质作为基底起到支撑作用,不可能脱离介质基底而单独存在;缝隙型 FSS 也称为孔径型 FSS,是由在金属平板上的固定形状的缝隙单元按照一定周期排列而成的,这种类型的 FSS 理论上可以脱离介质基底单独存在,但在实际应用中,为增加 FSS 的机械强度,缝隙



型 FSS 也是附着在介质基底表面或内部的。

在设计过程中, FSS 单元的形状极多, 如图 1.2 所示, 总体可分为四类: “中心连接型”单元, 也称为 N 极型, 包括直线单元、Y 形和锚型单元等; “环形”单元, 是目前使用最多的单元结构; “实心型”单元, 由于其对电磁波不同入射角的稳定性较弱, 一般不单独使用, 多数情况下是和与其互补的 FSS 结合使用; “组合型”单元的种类是无穷多的, 任何简单单元的结合都有可能成为一种新的种类。

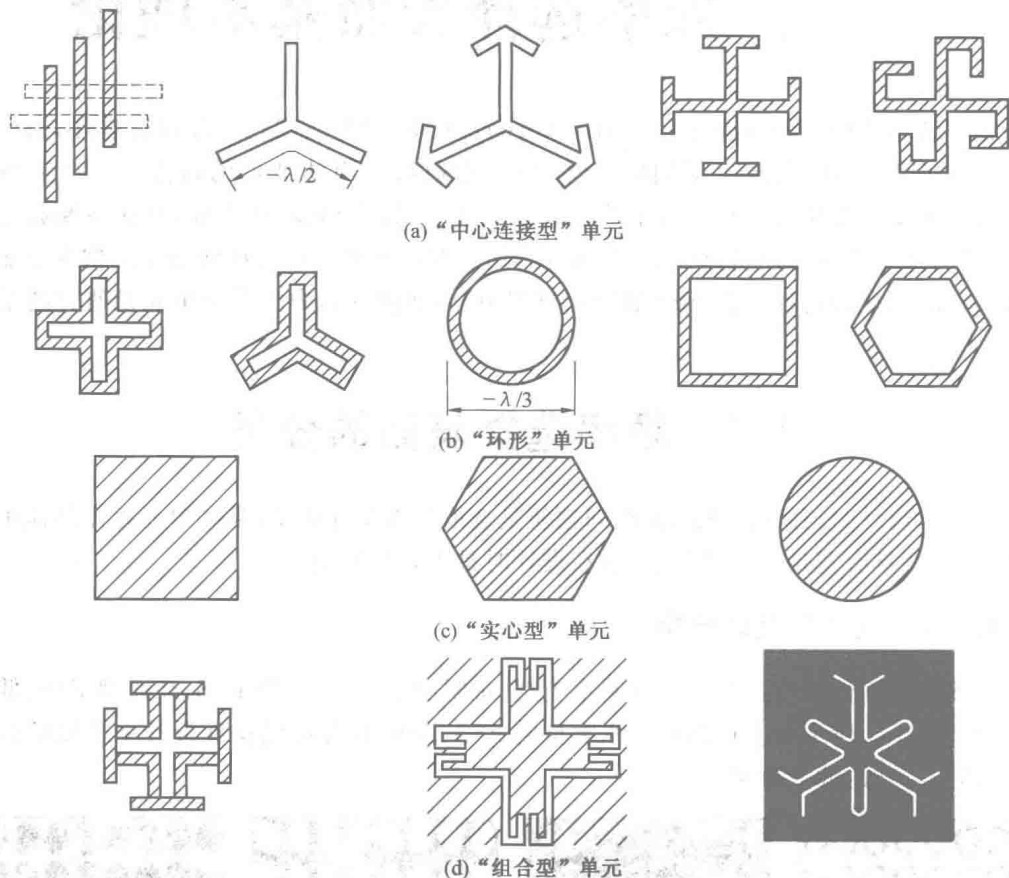


图 1.2 频率选择表面常用单元形状

1.1.3 新型 FSS

新型 FSS 是在传统 FSS 的基础上产生的, 主要指在传统 FSS 的设计制造过程中引入了新的设计方法与新的材料, 旨在改善某方面电磁特性或通过 FSS 改善其他材料的特性。目前新型 FSS 的研究主要有以下几个方面: ①有源 FSS 的研究, 主要通过引入二极管等有源器件使得 FSS 的谐振频率、工作带宽等参数可调, 增加 FSS 使用的灵活性, 拓宽其使用范围; ②分形结构 FSS 的研究, 将分形技术应用到了传统 FSS 的设计流程中; ③FSS 与吸波体的综合研究, 通过在吸波体中引入 FSS 来改善其吸波特性; ④FSS 与超材料的综合研究, 超材料是近年来的重点研究方向, 而 FSS 与超材料的结合更是受到学术界的极大关注, 成为新的研究热点。



1.2 频率选择表面的应用

军事工业推动了 FSS 研究的迅速发展,是由于 FSS 在军事工业上具有很好的应用前景,尤其在隐身技术的研究方面,欧美国家的研究时间早,已经得到了许多实际科研成果。FSS 早已运用到美国军队的隐形机上;欧美国家海军的许多新型战舰上均应用了 FSS,如美国的 LPD-17 San Antonio 级两栖运输舰、瑞典的 Visby 级护卫舰均已开始服役。其中 Visby 级护卫舰上的传感器整合于塔状封罩式桅杆内,而 LPD-17 San Antonio 级两栖运输舰的隐身桅杆由 FSS 制作,属于全封闭式。与欧洲和美国相比,我国起步较晚,但实际应用需求使其很快成为研发热点。

在实际工程应用中,FSS 的应用范围几乎包括全波段:①在红外及远红外波段,FSS 主要用于谱滤波器、波数分光仪、耦合器、太阳能选择表面及光学激光器的泵浦镜等,其中太阳能选择表面能够充分透过通带内的太阳光,并且发散掉其他频带的电磁波,将太阳能“净化”;②在微波段,主要被用来参与制作滤波器、多频天线、极化鉴定器等;③在毫米波及以下波段,它被用于干涉仪、双工器和滤波器等。

1.3 频率选择表面的工作机理

1.3.1 工作机理概述及微观解释

FSS 通常是由平面二维周期结构形成的,其基本的电磁特性表现在它对具有不同工作频率、极化状态和入射角度的电磁波具有频率选择特性。首先对 FSS 的工作机理做一简单介绍。

传统的 FSS 是以金属谐振单元的散射特性为基础的,其组成单元的基本形式也是谐振的金属贴片或完整金属贴片上的谐振缝隙。当平面电磁波照射在 FSS 上时,便会在每一个单元上激励起感应电流,并由此产生散射场,这些散射场与入射场相叠加,便形成具有空间滤波特征的总场。单元上激励起的感应电流的幅度依赖于单元与入射电磁波的耦合能量的大小,它在单元具有谐振尺寸时具有最大值。因此,合理设计 FSS 的结构参数(例如单元的形状和尺寸以及单元间的相对位置等),便可以控制每个单元上的感应电流分布,从而得到所需的频率选择特性。

传统 FSS 可以分为贴片型和缝隙型两种类型,它们在谐振时分别呈现出带阻和带通的特征。在特定的入射电磁波特性下,结构参数确定的贴片型 FSS 结构在谐振频率处等效为一张理想的导电平面,使得入射的电磁波完全反射,而在其他频率上则呈现不同程度的透射。图 1.3 给出了贴片型 FSS 结构及其对平面电磁波的反射系数曲线,图中所示结构为无限大的自由空间 FSS。缝隙型 FSS 是贴片型 FSS 的互补形式,在特定的入射电磁波特性下,结构参数确定的缝隙型 FSS 结构在谐振频率处对入射电磁波呈现完全透射的状态,对于其他频率则呈现出不同程度的反射。图 1.4 给出了缝隙型 FSS 结构及其对平面电磁波的透射系数曲线。

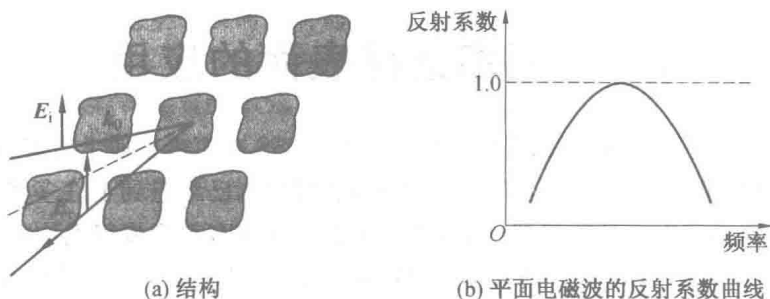


图 1.3 贴片型 FSS 结构及其对平面电磁波的反射系数曲线

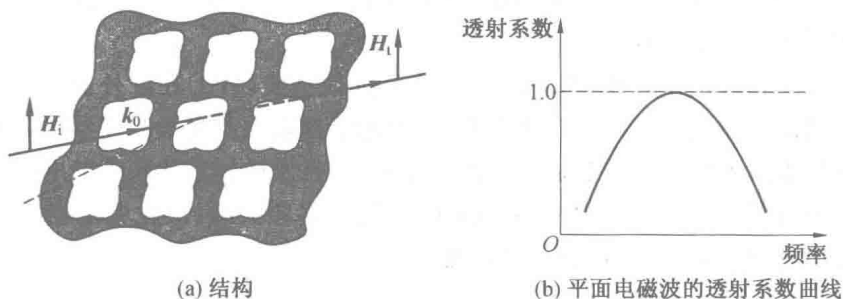


图 1.4 缝隙型 FSS 结构及其对平面电磁波的透射系数曲线

由于贴片型 FSS 具有低频传输、高频反射的特性,因此通常也被称为电容性表面,它具有类似于低通滤波器的特性。而缝隙型 FSS 通常被称为电感性表面,它具有低频反射、高频传输的特性,类似于电路中的高通滤波器。

不同于传统 FSS 的工作原理和设计思路,近年来有学者提出利用综合滤波器的理论来设计 FSS。由于贴片阵列是低频传输、高频反射的电容性表面,而带栅阵列(等同于缝隙阵列)则为电感性表面,因此可以利用它们的组合以设计滤波器的方法来设计 FSS。

FSS 是一种具有空间滤波特性的二维周期结构,其基本工作原理从微观上可以归结为电子受激振荡及二次辐射现象。

首先从单个电子的振荡状况入手进行分析。假设一个电子被束缚于平面内一根无限长细导线上,平面波垂直入射,当电场 E 方向与导线平行时,如图 1.5(a)所示,所产生的电场力将促使电子振荡,入射电磁波的一部分能量被转化成电子振荡的动能,而剩余能量则继续传输。当入射电磁波达到某一特定频率时,全部电磁能量都将转化成电子振荡的动能,根据能量守恒定律,此时能量的传输系数为零。入射电磁波的能量被电子吸收后,如何进行转化呢?如上所述,能量先转化成电子振荡的动能,振荡电子作为一个电偶极子

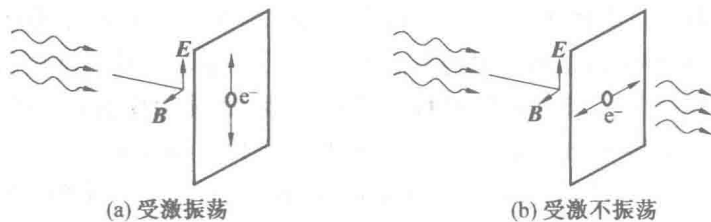


图 1.5 电子振荡机制



进行自发辐射。该辐射与电子振荡方向垂直,在电子所处平面的左半空间形成反射波;在右半空间与入射电磁波干涉,削弱传输系数。当右半空间散射波与入射电磁波干涉相消时,传输系数为零,即出现谐振现象。

保持电场方向不变,将平面内的导线旋转 90° ,如图 1.5(b)所示,电子所受电场力与导线垂直,所以沿导线方向电子将不能获得加速度。此时,电子不吸收电磁能量,入射电磁波全部通过。

对于周期性无限长金属带栅,当时变电场垂直于带栅时,电子受激振荡。随着电场方向的不断变化,带栅上的电子被来回驱动,电荷分布如图 1.6 所示。分别考虑低频入射电磁波(其波长远大于栅格间距)照射和高频入射电磁波(其波长远小于栅格间距)照射这两种极限情况下的电子运动状态。当低频入射电磁波照射到带栅上时,由于低频入射电磁波周期较长,电场方向变化较慢,带栅会在较长的时间内处于同一带电状态,直到电场方向发生改变。电子长时间保持稳定状态,无法构成辐射回路,导致带栅上的电子只能吸收很小一部分能量,几乎没有能量向外辐射。这种情况下,入射电磁波传输能力较强。高频入射电磁波情况恰好相反,由于高频入射电磁波周期较短,电场方向改变较快,导致金属中的电子不停振荡,从而大量吸收电磁能量并向外辐射。这种情况下,入射电磁波能量大部分被吸收,传输能力较弱。综上,电场方向垂直于带栅时,结构具有低通滤波特性,此时带栅表现为电容特性。对其进行等效电路建模,如图 1.7 所示。由滤波器原理可知,该等效电路中,低频信号电流可以直接到达出射端,而高频信号电流穿过电容入地,是一种低通滤波结构。

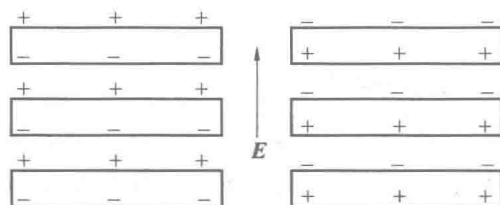


图 1.6 容性带栅在电场作用下电荷分布示意图

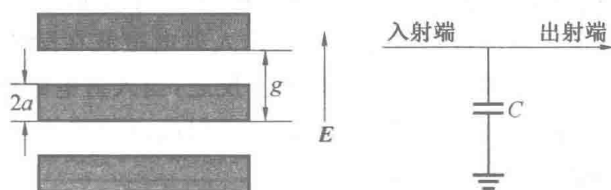


图 1.7 容性带栅及其等效电路示意图

当电场平行于带栅时,电荷分布如图 1.8 所示。入射电磁波到达带栅表面时,带栅上的电子沿着电场的相反方向加速运动,直到电场反向时,电子速度达到最大值。由于电子的移动距离不受尺寸的限制,对于低频入射电磁波,电子在较长时间内向同一方向移动,将获得较大的动能。这种情况下,入射电磁波的频率越低,电子吸收的能量越多,入射电磁波的传输能力越弱。对于高频入射电磁波,电场方向快速变化,电子能达到的速度较小,此时,电子仅吸收很少的能量,因而,入射电磁波具有较高的传输能力。综上,电场方



向平行于带栅时,结构具有高通滤波特性,此时带栅表现为电感特性。对其进行等效电路建模,如图 1.9 所示,低频信号电流穿过电感入地,而高频信号电流直接到达出射端,是一种高通滤波结构。

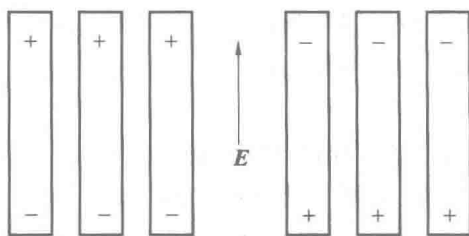


图 1.8 感性带栅在电场作用下电荷分布示意图

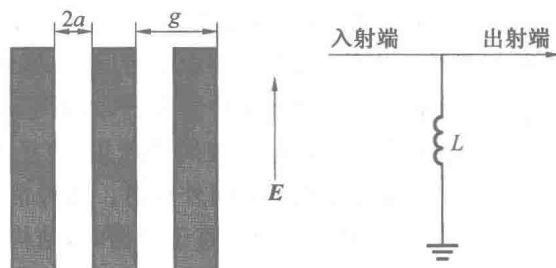


图 1.9 感性带栅及其等效电路示意图

对于一般的贴片型或缝隙型 FSS 结构,其微观滤波机制本质上也与电子受激振荡和二次辐射有关。

1.3.2 贴片型 FSS 工作机理

当贴片型 FSS 接收到电磁波照射时,此时金属贴片内的电子受到的电场方向与金属贴片平行,电子受到电场力的作用在贴片内做来回振荡,宏观上表现为贴片表面的感应电流。此时,入射电磁波的能量分为两部分:电子动能与透射波携带的能量。在某一特定频率下,入射电磁波的能量全部转化为电子振荡的能量,入射电磁波在贴片型 FSS 另一侧的透射波与电子振荡所产生的散射波抵消,此时,入射电磁波在贴片型 FSS 上只形成反射波,透射系数为零,该特定频率就是谐振频率。反之,当入射电磁波的频率不在谐振频率附近时,消耗在电子振荡上的能量只占小部分,入射电磁波的能量绝大部分都能穿过,此时贴片型 FSS 表现出较强的透过性。

1.3.3 缝隙型 FSS 工作机理

当缝隙型 FSS 接收到低频入射电磁波时,由于入射电磁波频率低,电子朝单一方向运动时间长,运动范围大,电子吸收的能量多,此时产生于缝隙边缘的感应电流较小,使得传输系数很小。随着入射电磁波频率升高,电子只是来回小幅振动,而缝隙边缘的感应电流增加,这样使得缝隙型 FSS 的传输系数得到提高。当入射电磁波频率升高到某特定值时,缝隙两侧的感应电流达到最大,此时缝隙两边的电子在电场作用下吸收大部分能量,同时不停地穿过缝隙向 FSS 的另一侧散射能量,此时缝隙型 FSS 的传输系数达到最大



值,该频率为缝隙型 FSS 的谐振频率。但随着入射电磁波频率的进一步增大,电子来回振动的距离更短,缝隙边沿的感应电流呈段状,使得透射场减弱,传输系数下降。

1.3.4 贴片型 FSS 与缝隙型 FSS 的关系

若不考虑介质,两者的特性是互补的,具有相反的频域响应特性。从等效电路的角度看,入射电磁波频率在谐振点以上时,缝隙型 FSS 呈现为容性电路的特性,在谐振点以下时,则呈现为感性电路的特性,因此其等效电路为电容电感并联型。当入射电磁波的频率在谐振点上时,缝隙型 FSS 对该入射电磁波呈全透状态;贴片型 FSS 的性质与之恰恰相反。

1.3.5 频率选择表面的技术参数及影响因素

根据实际应用背景的不同,可以从多个方面来衡量 FSS 的性能,主要包括谐振频率、工作带宽、电磁波入射角度的稳定性、交叉极化电平、反射(或透射)谐振频率上的损耗、反射或透射频带间隔等。影响因素主要有以下几个方面。

1. 单元参数

单元参数主要包括结构形式和尺寸。单元的结构形式内在地决定了 FSS 的工作带宽、电磁波入射角度的稳定性和交叉极化电平等,直接决定了感应电流的分布,因而合理地选择单元结构形式是 FSS 设计过程中最首要也是最重要的一步;单元的尺寸则直接决定了谐振频率和工作带宽等性能。

传统 FSS 的单元结构形式根据谐振时呈现的频率选择特性(带通或者带阻)的不同可以分为贴片型和缝隙型两种,且这两种类型的 FSS 在尺寸相同、结构互补(二者组合即为完整的无限大、无限薄金属平面)时其传输特性也表现出互补特性,即其中一种结构的传输系数等同于其互补结构的反射系数。在实际应用这一对应关系时,需要满足一定的限制条件:①FSS 金属层的厚度为无限薄(典型值为小于 $1/1000$ 波长),如果金属层的厚度增加,则贴片型 FSS 的工作带宽会变大而缝隙型 FSS 的工作带宽会减小;②FSS 为置于自由空间中无介质层支撑的独立金属屏(介质加载的影响将在后面进行介绍);③FSS 的金属层为理想导体,没有损耗。

总体来说,“环形”单元具有较好的频率稳定性,作为对比,表 1.1 列出几种常见的 FSS 单元的特性。

表 1.1 几种常见的 FSS 单元的特性(基于无介质衬底的单屏频率选择表面)

单元形式	角度稳定性	交叉极化电平 (小)	工作带宽(大)	(反射或透射) 频带间隔(小)
加载偶极子	1*	2	1	1
耶路撒冷十字	2	3	2	2
圆形环	1	2	1	1
Y形振子	3	3	3	2
交叉十字偶极子	3	3	3	3
方形环	1	1	1	1
偶极子	4	1	4	1

* 1—最好;2—次好;3—差;4—最差



传统的 FSS 都是基于谐振的金属单元,单元的尺寸取决于 FSS 谐振时的有效波长(即考虑介质加载效应之后的波长)。由天线基本原理可知,自由空间中偶极子的谐振发生在其长度为半波长的整数倍时,即在法向入射(电场与偶极子平行)的平面电磁波的作用下感应电流并散射。对于贴片型偶极子 FSS,其谐振尺寸相同(实际上,由于相邻单元的能量耦合,其谐振长度略小),在平面电磁波的作用下,FSS 的各个谐振单元会产生一定的相位延迟,并最终将 FSS 单元的散射场叠加到与入射方向呈镜像反射的方向上,从而贴片型偶极子单元所形成的无限大 FSS 在谐振时呈完全反射(不考虑损耗),等效为无限大理想导体平面。需要指出的是,FSS 的高阶谐振往往会带来栅瓣,引起能量损失或干扰,因此通常只考虑其基模谐振(偶极子长度为半个有效波长)。对于 Y 形振子有类似的分析过程,其两条枝节的长度之和为半个有效波长。对于方形环,可以将其视为末端连接(因末端电势相同)的弯折形偶极子,故谐振时环的周长应为一个有效波长,如图 1.10 所示。对于缝隙型 FSS,可以从磁场和等效磁流的角度出发,得到一致的结论,但在谐振时呈现完全透射的状态。

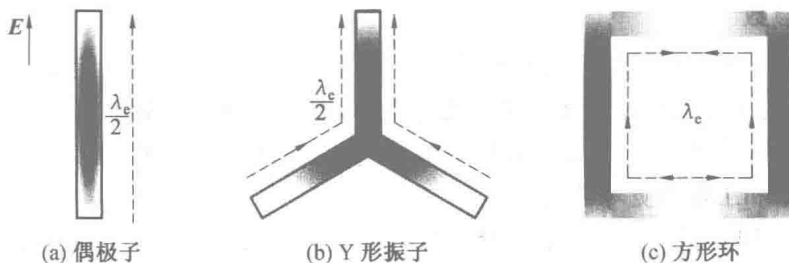


图 1.10 贴片型频率选择表面单元及其电流分布

2. 组阵方式与阵元间距

FSS 的组阵方式和阵元间距决定了栅瓣和表面波的出现频率;另外,单元间距的变化会影响单元之间的能量耦合,从而改变 FSS 的工作带宽和谐振频率。

FSS 的组阵方式分为矩形栅格和等腰三角形栅格,其设计原则主要为避免栅瓣与表面波的出现。这两种栅格类型可以通过阵元延伸方向的夹角联系在一起,并且可对等腰三角形栅格排布的阵列做适当的周期延拓使其成为矩形栅格排布的阵列,从而在谱域法分析 FSS 的过程中,显著降低傅里叶变换的复杂度,并可以通过快速傅里叶变换(FFT)来加速阻抗矩阵的填充,大大缩短计算时间。

阵元间距(与阵列周期相关)也是 FSS 设计中的一个重要参数,对 FSS 的谐振频率和工作带宽以及它们对入射角度的稳定性有很大影响。一方面,减小阵元间距可以增强 FSS 相邻单元的能量耦合,等效为电抗元件加载,从而降低 FSS 的谐振频率,并对其工作带宽有一定的展宽。另一方面,通过对 FSS 单元进行弯折处理或者利用集总电抗元件加载的方式,可以显著减小单元尺寸(即阵列周期减小),从而改善 FSS 的谐振频率和工作带宽对入射角度的稳定性,还可以实现常规单元所不具备的小频带间隔(反射或透射)。此外,值得指出的是,在阵列周期和阵元间距大小确定的情况下,通过对相邻单元的边缘轮廓进行交指弯折处理,可以有效地降低 FSS 的谐振频率,展宽工作带宽,并降低 FSS 传输特性对入射角度的敏感性,这将在本章的后续部分中详述。



3. 介质特性

在实际的工程应用中,为了便于加工或减小单元尺寸,通常都会将 FSS 的金属层印刷在介质基板上。此外,为了增强 FSS 的机械强度或对其进行保护,也会在 FSS 上覆盖介质层。介质加载对 FSS 传输特性的影响主要表现在如下几个方面。

(1)降低谐振频率。具有介质基板的单屏 FSS 基本可以分为两类,即金属网格单元印刷在介质基板的一面和金属网格单元嵌入在两层介质基板的中间,如图 1.11 所示。这两类介质加载对 FSS 谐振频率的影响是不同的,可以分别等效相对介电常数为 ϵ_e 的介质在 FSS 单元两侧半空间介质填充和全空间介质填充。由电磁场基本理论可知,假设无介质加载的自由空间 FSS 其谐振频率为 f_0 ,对于相对介电常数为 ϵ_r 的介质半空间填充和全空间填充,对应的 FSS 谐振频率将分别降低至 $f_0/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$ 和 $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 。

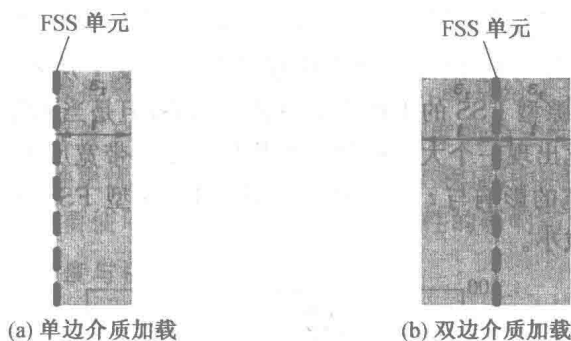


图 1.11 介质加载的基本类型

对于厚度有限的介质层,介质加载对 FSS 的谐振频率的影响等效相对介电常数 ϵ_e 总是小于等于 ϵ_r (只有真空中 $\epsilon_e = \epsilon_r = 1$) 的介质填充,因此,单边介质加载时,FSS 的谐振频率将介于 f_0 和 $f_0/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$ 之间,并随介质厚度的增加而趋近于 $f_0/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$; 双边介质加载时,FSS 的谐振频率将介于 f_0 和 $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 之间并趋近于 $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 。这种渐进过程并非线性的,且相对于贴片型和缝隙型 FSS 分别呈现出不同的方式,如图 1.12 所示。由图可以看出,对于单边与双边介质加载,当介质厚度从零增加至较小值(典型值为 $0.05\lambda_c$)时,贴片型和缝隙型 FSS 的谐振频率都呈现出快速下降的趋势。当介质层的厚度进一步增加时,贴片型 FSS 的谐振频率继续降低,并趋近于 $f_0/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$ (对应单边加载的情形)和 $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ (对应双边加载的情形);而缝隙型 FSS 的谐振频率先上升后下降再上升的来回振荡,并关于 $f_0/\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}$ 和 $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 呈现出振荡的形式,这种振荡来源于介质层的通带谐振(即介质层的厚度 $t \approx n \cdot \lambda_c/4$)。

值得指出的是,对于单边介质加载的情形,除非介质层的厚度为 $t \approx n \cdot \lambda_c/2$,否则缝隙型 FSS 谐振时介质层会带来失配损耗;对于双边介质加载的缝隙型 FSS,当 FSS 两侧的介质层厚度相等时,则介质与空气分界面上的反射波将会相互抵消,因此无论介质层的厚度为多少,都不会产生失配损耗。

(2)影响工作带宽。介质加载对于贴片型和缝隙型 FSS 的影响也有显著的差异,这里以双边介质加载时介质层厚度对贴片型和缝隙型 FSS 的 -1 dB 带宽的影响(法向入

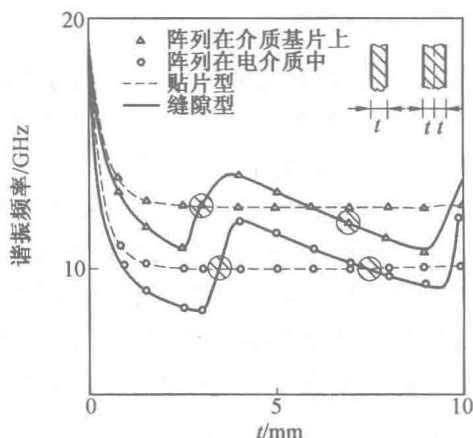


图 1.12 单边与双边介质加载时介质层厚度对贴片型和缝隙型 FSS 的谐振频率的影响(法向入射)为例来进行说明,如图 1.13 所示。当介质层的单边厚度 t 从零增加时,贴片型 FSS 的工作带宽会增加而缝隙型 FSS 的工作带宽呈减小趋势;但是当 t 增至 $t \approx \lambda_c/4$ 附近时,缝隙型 FSS 的工作带宽出现一个大的增加而贴片型的工作带宽反而减小;继续增大介质层的厚度,则对工作带宽的影响与 $t < \lambda_c/4$ 时相同,即贴片型 FSS 的工作带宽增加而缝隙型 FSS 的工作带宽减小。

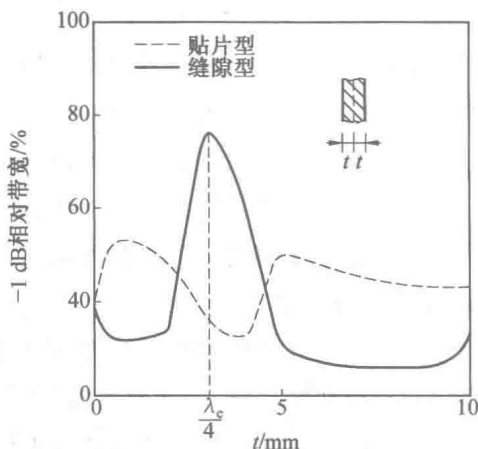


图 1.13 双边介质加载时介质层厚度对贴片型和缝隙型 FSS 的 -1 dB 相对带宽的影响(法向入射)

要解释上述介质层影响 FSS 工作带宽的过程,需要考虑置于自由空间中的介质层对电磁波的反射与透射,以及贴片型 FSS 在谐振时等效为短路而缝隙型 FSS 在谐振时等效为开路等因素的影响。实际上,介质加载的 FSS 的散射问题可以分解为两个独立的问题:求解没有 FSS 金属屏存在时单独由介质层产生的反射场和透射场;根据 FSS 金属屏上未知的表面电流建立积分方程求解反射场和透射场。

介质层波阻抗与自由空间波阻抗的不匹配,会导致电磁波在空气/介质分界面上产生反射,且在介质板厚度为半个有效波长时反射抵消而产生完全透射(即半波夹层)。当介质层厚度 $t < \lambda_c/4$ 时,介质层的反射与谐振的贴片型 FSS 的反射相叠加从而展宽其工作带宽,但是对于谐振的缝隙型 FSS,则由于介质层的反射,减小了透射的工作带宽;当介



质层的厚度增加至 $2 \cdot t \approx \lambda_c/2$ 时,则由于半波夹层的作用,空气/介质分界面上没有反射,从而减小了贴片型 FSS 的反射带宽而增加了缝隙型 FSS 的透射工作带宽。实际工程应用中,四分之一(有效)波长的介质层加载常作为一个展宽缝隙型 FSS 工作带宽的有效手段而应用于金属天线罩的设计中。

(3)改善电磁波入射角度的稳定性。对于自由空间中无介质加载的 FSS 金属屏,随着照射到 FSS 金属屏上的平面电磁波入射角度的增加,不可避免地产生 FSS 谐振频率的偏移和有效工作带宽的减小,而加载介质层则可以起到稳定谐振频率以及在一定程度上稳定工作带宽的作用。由 Snell 定理可知,介质层的折射使得照射到 FSS 金属屏上的平面电磁波的等效入射角度有所减小,从而使得斜入射时 FSS 的传输响应相比于自由空间中无介质加载的 FSS 金属屏时更接近于法向入射。尤其对于缝隙型 FSS 加载四分之一(有效)波长的介质层时,由于介质层本身的谐振,对电磁波入射角度稳定性的改善更加明显。

总而言之,介质加载能够降低 FSS 的谐振频率,或是给定谐振频率的情况下减小 FSS 单元的尺寸,从而改善 FSS 对电磁波不同入射角度的稳定性。双边介质加载由于没有失配损耗,通常是一种更优的方案,但是在实际的工程应用中使用平面印刷电路板时,多层介质覆铜板之间需要使用介质黏合层,其介质特性的影响需要充分考虑。

4. 电磁波的入射角度与极化特性

FSS 的空间滤波特性是 FSS 结构与电磁波相互作用的结果,因此 FSS 的传输特性也依赖于入射电磁波的状态。FSS 作为一种空间滤波器对不同入射角度和不同极化方式的电磁波呈现出不同的响应。FSS 的谐振频率和工作带宽对电磁波的入射角度和极化相当敏感,其稳定性通常与 FSS 的单元形式及阵列周期大小有关,这为 FSS 的设计带来了许多困难。

事实上,随着电磁波入射角度的增加,FSS 的谐振频率会偏移,工作带宽也会发生明显变化,而且在两种极化方式下的变化趋势也不同。对于贴片型 FSS 而言,随着电磁波入射角度的增加,横电波(Transverse Electric, TE)极化的谐振频率逐渐降低,工作带宽逐渐展宽,而横磁波(Transverse Magnetic, TM)极化的谐振频率逐渐升高,工作带宽逐渐变窄;对于缝隙型 FSS 而言,随着电磁波入射角度的增加,TE 极化的谐振频率逐渐升高,工作带宽逐渐变窄,而 TM 极化的谐振频率逐渐降低,工作带宽逐渐展宽。介质层的谐振频率(即介质层发生完全透射所对应的频率)会随着电磁波入射角度的增加而升高。

FSS 的谐振频率和工作带宽对电磁波入射角度的稳定性通常可以从加载介质层和减小 FSS 的阵列周期大小两方面来加以改善,而对极化的需求通常是从 FSS 单元的结构对称性来考虑。

5. 多屏特性

习惯上,一个谐振周期表面及与之直接相关的介质支撑结构被称为一个 FSS 屏,将多个 FSS 屏通过一定的介质层级联起来便构成了多屏 FSS 结构。多屏 FSS 的传输/反射特性相对于单屏 FSS 具有显著的提高,例如具有更宽的谐振工作带宽,更加平坦的带内响应,以及更为陡峭的谐振频带边缘截止特性等。在某些应用场合,要显著提高 FSS