

前沿领域综述

频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势

鲁戈舞¹⁾²⁾ 张剑²⁾ 杨洁颖²⁾ 张天翔^{2)†} 寇元^{1)‡}

1) (北京大学化学与分子工程学院, 北京 100871)

2) (航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

(2013年4月16日收到; 2013年5月28日收到修改稿)

由于雷达天线系统自身工作的特点, 他必须保证自身雷达波的正常接收和发射, 常用的隐身措施无法简单地在雷达天线隐身中获得应用. 采用频率选择表面(FSS)技术与天线罩技术相结合形成FSS天线罩, 可以使天线罩获得频率选择的功能. 即FSS天线罩对雷达的工作频段提供带通的传输特性, 同时改变雷达工作频段以外的雷达散射截面(RCS)特性, 可以实现带外隐身. 本文分析了FSS天线罩制备的基本思路, 综述了国内外FSS天线罩在结构设计、制造工艺等方面的研究状况, 并从多频FSS天线罩、智能FSS天线罩、厚屏FSS天线罩、微型化FSS天线罩以及各技术的组合等方面对FSS天线罩的发展进行了展望.

关键词: 频率选择表面(FSS), 多频FSS天线罩, 智能FSS天线罩, 厚屏FSS天线罩

PACS: 84.40.-x, 41.20.-q, 07.50.Hp

DOI: 10.7498/aps.62.198401

1 引言

雷达隐身技术是当前隐身技术的研究重点之一, 由雷达天线、天线罩及雷达舱内高频部件组成的雷达天线系统是飞行器头部区域的一个强散射源, 其隐身效果直接影响飞行器的隐身效果^[1]. 目前用来减小飞行器雷达散射截面(RCS)的途径有两种: 一是低RCS外形设计; 二是雷达吸波涂料技术. 为了尽可能缩减RCS, 常常采用两种途径的结合. 但是由于受雷达天线系统自身工作特点的限制, 它必须保证自身雷达波的正常发射和接收, 上述两种隐身措施不可能简单地在天线隐身中获得应用, 因此雷达天线系统的隐身成为飞行器隐身的瓶颈.

天线罩是保护雷达天线系统免受外界环境影响的装置, 集透波、承载、耐热于一体. 隐身天线罩技术是目前解决雷达天线隐身最有前景的技术之一. 隐身天线罩通常采用的技术包括频率选择表面技术(frequency selective surface, FSS)、极化选择表面技术(polarization selective surface, PSS)、阻抗加载技术以及时域隐身技术等, 而目前国内外运用

最广泛的是FSS技术. FSS是指周期性排布在导电金属表面上的缝隙或介质表面上的金属贴片, 其本质是一种空间滤波器. 将FSS加载到天线罩上就形成频带内透过、频带外全反射的带通天线罩(图1). FSS天线罩是隐身天线罩技术的突破, 其优点有^[2-4]: 1) 雷达工作频段内信号可以正常传输, 工作频段外的入射电磁波被天线罩反射而形成极低的RCS, 即利用天线罩的低RCS取代了天线的强RCS特性, 达到了通带外隐身的效果; 2) FSS天线罩的几何外形与飞行器的本体结构贴近, 即不改变天线罩的气动外形, 满足飞行器动力学要求; 3) 不影响原雷达系统的电气特性和天线罩的机械强度, 并且基本上不增加天线罩重量. 从现役飞行器隐身改装和新型隐身飞行器设计的长远观点来看, 研究FSS天线罩具有十分重要的意义.

2 频率选择表面天线罩技术

2.1 FSS天线罩设计目标

一个性能良好的FSS天线罩应当谐振频率准

† 通讯作者. E-mail: ZTX513@263.net

‡ 通讯作者. E-mail: yuankou@pku.edu.cn

确、谐振带宽满足要求、通带内高传输效率、通带外良好的频率选择性,并且对不同入射角、不同极化的入射波不敏感,即满足雷达在宽扫描角范围内对瞄准精度、旁瓣电平系数以及方向图畸变等性能的要求.因此 FSS 天线罩的设计目标是 FSS 的谐振频率落在我方雷达的中心工作频率上,通带为我方雷达的工作频段.通带内具有较高的传输效率,通带外则呈现全反射特性,使天线罩实现频率选择的功能. FSS 天线罩相当于在普通天线罩上加装了 FSS 阵列,普通天线罩的设计工作可等同射频传输线的设计,设计目标是阻抗匹配和减小衰减; FSS 天线罩的设计工作相当于为传输线级联了一个带通滤波器,设计时除阻抗匹配和衰减减小外,还需考虑谐振特性 [5,6].

2.2 FSS 天线罩罩壁结构设计

FSS 天线罩的频率响应特性取决于 FSS 谐振单元的结构类型、单元尺寸及形状、单元周期性分布的形式、介质衬底的特性,电磁波的入射方式和极化方式等,因此 FSS 天线罩罩壁结构的设计主要是对 FSS 结构及其加载介质参数的选择. FSS 天线罩一般选用孔径型 FSS. FSS 在实际应用中都需要有衬底支撑,在 FSS 天线罩中,复合材料罩体即是衬底.首先,应根据天线罩使用环境特性选择介

质材料,确定介质参数.一般选择低介电常数和低介电损耗的介质复合材料满足天线罩高传输效率的需求,并且选择 FSS 两边加载相同的介质材料以获得良好的透波性能和理想带宽.与此同时,设计 FSS 单元结构,确定单元的形状.由于 FSS 天线罩一般为曲面,罩面上不同点处的电场入射角变化较大,应选择对入射角和极化不敏感、稳定性较好的单元,可以选择自对称的圆形、圆环、多边形和方环单元等(图 2).美国的 FSS 专家 Mittra 教授认为“十字”、“耶路撒冷”等单元结构 FSS 的各项特性较好,尤其是通带中心频率不随入射角的变化而改变 [7].而后根据 FSS 的介质加载规律确定 FSS 单元尺寸,使其垂直入射时谐振在高于天线的工作频率上,一般来说,对于中心连接单元,谐振波长约为单元跨距的两倍;对于环形单元,谐振波长约等于单元的周长,此时周期单元产生谐振,完成滤波传输功能 [8].改变谐振单元的尺寸能有效改变 FSS 谐振频率.值得一提,对于 FSS 天线罩,单元结构的缝隙宽度也影响谐振频率,缝隙窄谐振频率低,缝隙宽谐振频率高.再次,选择 FSS 的加载方式. FSS 可以加在介质壁(实心壁或夹层壁)的一侧,也可同时加在两侧,还可以夹在中间.带有单层 FSS 的罩壁设计简单但其带内损耗较大,带外衰减较小.带有双层 FSS 的罩壁可以提高带内的传输效率,同时带外衰减也较大,在减缩 RCS 方面的效果要好,有利

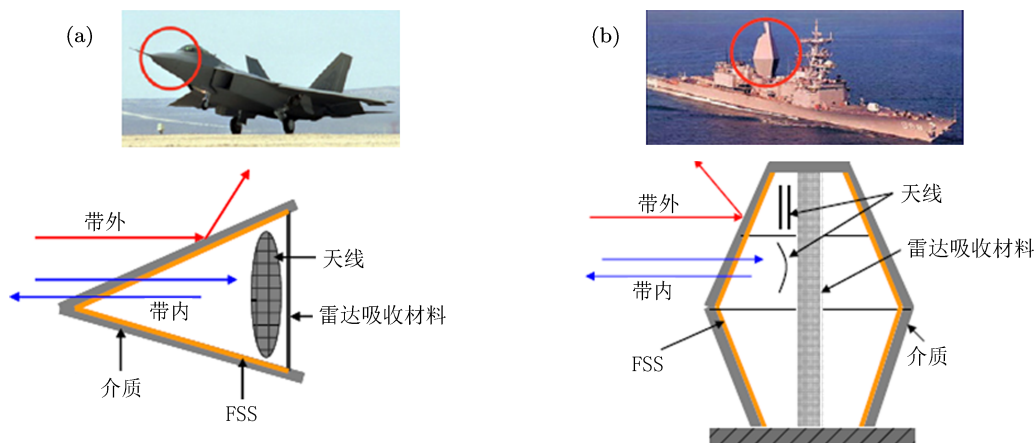


图 1 频率选择表面天线罩工作原理

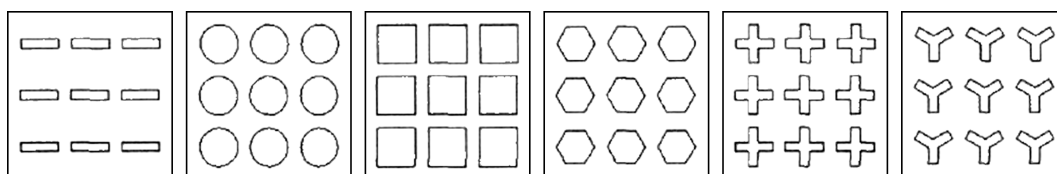


图 2 频率选择表面天线罩常用单元形状

于提高隐身性能,但 FSS 层间的相对平移对其电性能影响较大^[9].最后通过选择 FSS 单元结构形式,调整栅格参数以及介电参数和结构厚度,反复计算优化,设计出所需的频率特性.

3 频率选择表面天线罩国内外研究现状

3.1 国外研究现状

20 世纪 60 年代,美国科学家 Kiebertz 等人简化了矩形槽阵 FSS 的电磁场求解过程,为 FSS 天线罩技术找到了理论依据,同时也为该技术的完善指明了方向^[10].70 年代, Munk 等人先后完成了 T 形、十字形及圆形 FSS 理论工作并在 1974 年制出了第一个锥形金属雷达罩^[11,12],即第一个 FSS 天线罩;并对该罩进行水平极化波和垂直极化波的扫描(图 3).80 年代,由于飞机隐身设计技术得到发展和应用, FSS 天线罩技术取得了预研成果.此后,科学家们先后突破了雷达天线罩隐身设计技术,其功能实现了由“传导”向“隐身与传导”兼备的跨越, FSS 设计仿真分析技术、 RCS 设计仿真分析技术得到发展与应用, FSS 天线罩得到了快速发展.从公开发表的有限的文献来看,美国和英国处在 FSS 天线罩研究的前列.美国 Mittra 教授在 FSS 天线罩方面的工作包括研究相控阵天线系统中 FSS 天线罩对辐射方向图的影响,利用改进的平面波频谱方法分析 FSS 天线罩对微带天线的影响,以及利用类周期方法分析大型阵列和天线罩的组合形式^[7,8,13].英国 Parker 和 Philips 教授,他们在 FSS 天线罩的研究工作主要是利用 Pocklington 方程分析 FSS 天线罩和天线之间的耦合^[14-16].美国的 Behdad 教授,他利用一种合成方法设计多层级联结构的带通型微型化低剖面 FSS^[17-20].韩国先进科技学院的 Lee 等一直致力于夹层结构 FSS 天线罩的研制^[2-4,21].

工艺方面,复合材料表面金属化技术以及激光刻蚀技术的发展促进了 FSS 天线罩的发展,国外 FSS 天线罩的制作已经从准数控机械加工发展到数字仿真与数控加工一体化的阶段; FSS 的单元图形从间接转移发展成直接刻划^[22-24].另外,无论是单屏 FSS 天线罩还是多屏 FSS 天线罩的制作,国外已经达到了工程应用的水平^[24].美国有专门制作 FSS 隐身天线罩的公司.英国 BASE 公司的机

载雷达罩宣传广告上大篇幅地介绍其在 FSS 雷达罩方面的设计软件和能力,并有 FSS 雷达天线罩可供用户选用^[9].瑞典的 Applied Composite 公司也是世界上隐身天线罩的主要研制者,他们的主要技术就是 FSS.

由于涉及军事秘密,国外很少具体报道 FSS 天线罩的发展程度.从有限资料显示,国外对于 FSS 天线罩的研究已经达到很高的水平.研究方法从计算分析到优化设计;从无源 FSS 天线罩扩展到有源 FSS 天线罩;从单屏 FSS 天线罩到多屏 FSS 天线罩;介质材料种类繁多,形式多样. FSS 隐身天线罩在美国已投入了工程应用,先是应用于导弹,后又应用于飞机上.据悉,美国轻型喷气运输机 C-140 使用了 FSS 雷达罩.而以 F-22 和 F-35 为代表的第四代战斗机雷达天线罩,就采用了“脊”形尖削锥体的隐身气动外形和 FSS 技术实现了带外隐身和带内传输的功能.法国的拉斐特隐身战舰的天线罩就采用了频率选择表面,并结合外形设计达到雷达隐身的目的.

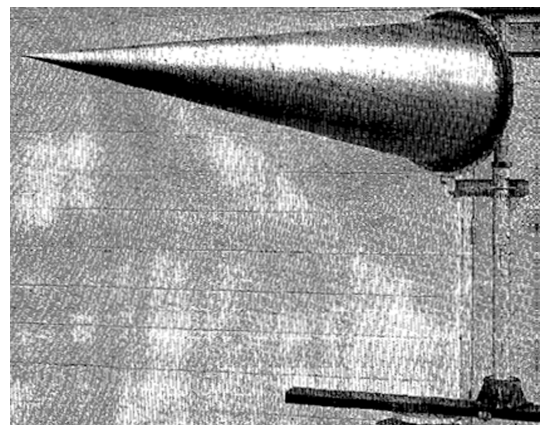


图 3 美国制作的第一个频率选择表面天线罩

3.2 国内研究现状

由于国内对 FSS 的研究开展较晚,20 世纪 90 年代初才有相关论文发表,所以目前对 FSS 天线罩的研究更是相对比较落后,大多集中在性能稳定新单元的研制、 FSS 天线罩结构设计以及 FSS 参数对性能的影响上.在性能稳定新单元的研制上,李小秋等提出了一种改进型 Y 孔新单元,并通过化设计和平板试样验证给出了新单元的 FSS 结构参数(图 4(a)).相比于原 Y 孔单元,新单元 FSS 在电磁波大角度入射时具有高透过率,同时在电磁波大扫描角范围内中心频率的漂移量更小^[25,26],而雷达

天线罩一般为曲面,所以改进型 Y 孔 FSS 更适合用于雷达天线罩. 徐念喜等人利用矢量模式法,对传统的 FSS 单元图形进行改进,为 FSS 天线罩提供了一种具有较好的角度稳定性与极化稳定性的新哑铃形 FSS 单元(图 4b)^[27]. 刘斌等人设计了用于微小卫星 FSS 天线罩的复合双十字形单元(图 4(c)),并验证了新单元的传输特性^[28]. 最近,朱华新等人通过在传统的 Y 单元 FSS 屏上再设置一些圆孔,新 FSS 单元(图 4(d))减小了由于角度引起的透射比下降的问题^[29].

在结构设计方面,研究者普遍认为将 FSS 屏嵌于介质层之间的结构是目前比较可行 FSS 天线罩中 FSS 屏的加载方式^[30]. 侯新宇等人通过分析讨论认为,嵌于介质层之间的 FSS 结构可以获得较为稳定的谐振带宽,并且能够有效地缩减双层 FSS 结构传输系数谐振区域中的凹沟^[31-34]. 蒙志君等人基于互导纳法设计了 A 夹层 FSS 罩壁结构并制作了试验件. 研究发现, A 夹层加载的 FSS 带内传输损耗较小,具有一定的平顶特性,且带宽的入射角和极化稳定性好(图 5)^[35].

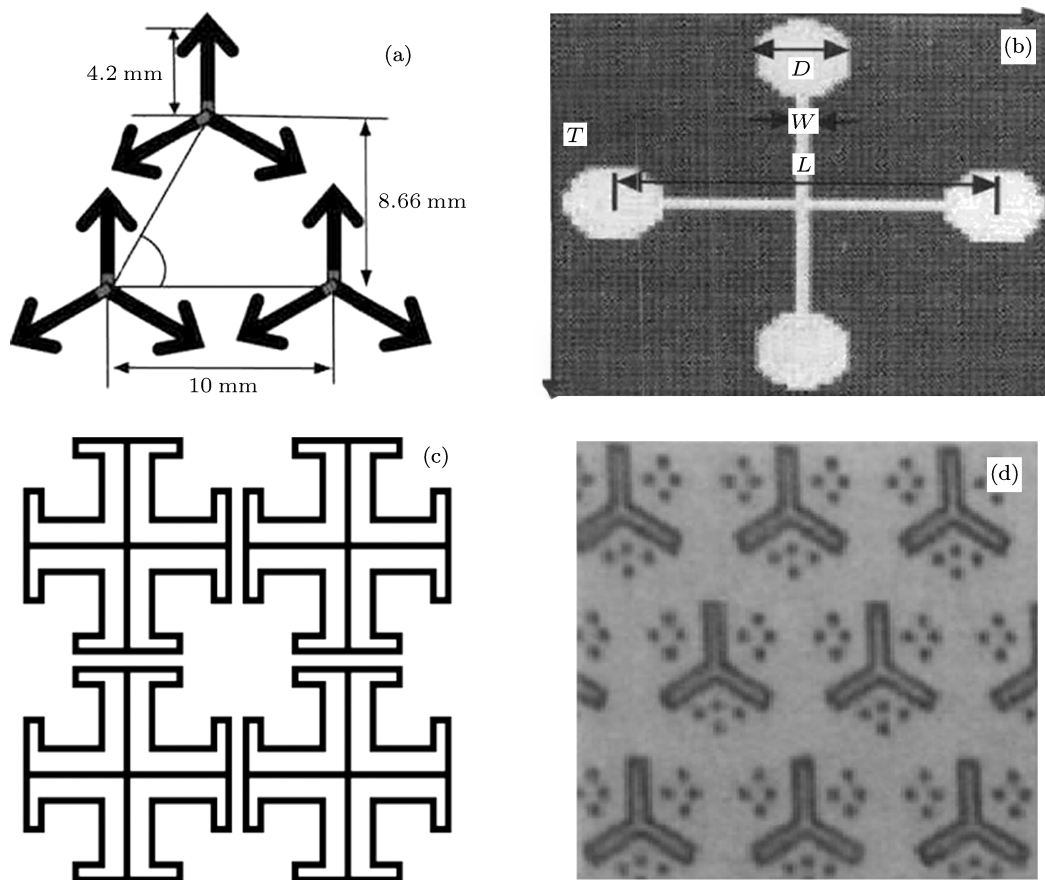


图 4 适用于 FSS 天线罩的新单元 (a) Y 单元; (b) 哑铃形单元; (c) 复合双十字单元; (d) Y 加圆孔单元

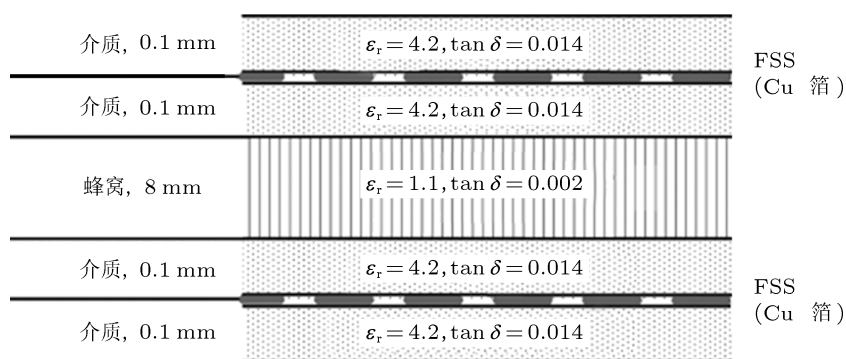


图 5 FSS 天线罩罩壁结构

在 FSS 参数的改变对带通型 FSS 的影响方面, 蒙志君等人利用模匹配法分析了复合 FSS 结构中空气缝隙及介质板的作用^[36]. 王焕青等人从物理本质上分析了 FSS 单元的缝隙宽度对透波性能的影响^[37]. 黄敏杰等人研究了单元形状的微小改变对带通型 FSS 的电性能的影响^[38]. 贾宏燕等人则研究了单元排列方式对带通型 FSS 极化稳定性的影响, 改进后的 FSS 对 TE, TM 极化获得了几乎相同的传输特性^[39]. 陈磊等人利用谱域法结合互阻抗法建立了具有多层介质衬底的低 RCS 双层缝隙 FSS 雷达天线罩的模型, 并具体论证了不同衬底对频率选择特性的影响^[40]. 而侯新宇等人曾在 1999 年就重点讨论过介质层厚度变化对 FSS 传输特性及带宽的影响^[41].

工艺方面, FSS 天线罩制备的关键是如何将 FSS 屏加载到复合材料天线罩上, FSS 屏的加载国内主要采用两种方法, 一种是在薄膜基底上采用镀膜、光刻得到柔性 FSS 膜, 然后转移到天线罩上, 这是国内 FSS 天线罩制备常用的、相对比较简单方法. 制备 FSS 屏时, 一般先将天线罩曲面剖成小曲面, 再把小曲面延展为平面, 进行平面 FSS 加工; 也可以将整个天线罩曲面延展为平面进行加工. 由于加工的平面 FSS 不可能与天线罩曲面完全一致, 不可避免会在一定程度上影响 FSS 天线罩的传输特性. 另一种是数字化机械加工, 吕明云等研究了复杂频率选择表面加工的五自由度刻铣机器人曲面加工法及其在大型曲面加工上的应用, 分析掌握了工艺参数对 FSS 传输性能的影响, 通过建立浮动电主轴技术和曲面分区法大大提高了 FSS 曲面的加工效率(图 6)^[42]. 这种方法的难点在于加工系统的设计以及加工精度的控制, 加工中各种误差的累计会严重影响 FSS 天线罩的传输特性. 上述两种方法还均未真正实现工程化应用.

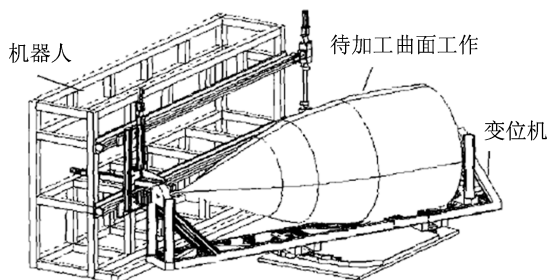


图 6 机器人数字化加工系统示意图

目前, 我国虽然取得了一定的成果, 但是与发达国家存在着很大的差距. 设计分析方面, 国内采

用平面结构的分析结果来指导 FSS 天线罩的理论设计和加工. 而 FSS 天线罩一般是曲面的, 电磁波入射角度变化较大, 并且极化方式不确定, 性能稳定的 FSS 单元是当前亟待解决的难题. 另外目前的设计主要在于解决带宽和透波的问题, 欠缺有关 FSS 单元带宽极限的讨论, 针对 FSS 天线罩瞄准误差、交叉极化瓣、副瓣电平抬高等重要参数的优化还没有建立很好的设计理论模型; 工艺方面, 复合材料表面金属化以及激光刻蚀等技术还未完全突破, 制约了 FSS 的发展. 要实现 FSS 天线罩的工程化应用以及实现理想的滤波特性, 无论在理论设计和工艺方法上都要做进一步的探索和研究.

4 频率选择表面天线罩发展趋势

由于国内 FSS 天线罩与国外 FSS 天线罩的发展程度相差还较大, 所以现阶段的工作重点是在消化国外已公开资料的基础上, 对 FSS 天线罩进行优化设计, 解决 FSS 天线罩的一些基本问题, 如高选择性, 高角度稳定的 FSS; 窄带 FSS 设计; 带内低损耗设计; 曲面 FSS 设计以及 FSS 曲面加工. 另一方面, 美国在 2011 年宣布研发新型隐形轰炸机, 将高度融合并提升第四代战斗机采用的隐身技术, 具有“全向、宽频”的 FSS 天线罩的制备将是其重点需要攻克的技术^[43-45]. 俄罗斯也宣布将在 2017 年前完成新型战略轰炸机的研制工作^[46]. 在第五代战斗机、新型战术导弹、新型舰载机等新型武器装备上, 对雷达天线罩提出了更低的 RCS、多频段隐身、全向隐身等高度隐身的技术要求. 在 FSS 天线罩理论设计分析和加工工艺都比较完善的基础上, 结合国内外发展形势, 提出以下未来发展重点.

4.1 多频 FSS 天线罩

目前为了提高战术导弹的命中精度, 各种先进的末制导系统, 如宽频带复合毫米波, X 波段复合 $K\alpha$ 波段, X 波段复合 $K\mu$ 波段等复合导引头不断被采用, 相应的需要发展多频段隐身天线罩. 多频段 FSS 天线罩研制的关键是 FSS 技术, 主要的实现途径如下:

1) 双屏或多屏 FSS^[26,47-51]. 双屏或多屏 FSS 的频率响应曲线具有宽带宽和陡降截止的特性, 即具有比一般单屏 FSS 更稳定的中心频率和更加陡峭的边缘特性. 双屏或多屏 FSS 可以实现多频工作, 但增加了整个器件的体积和重量, 并且制造比

较复杂. 在国外, 双屏或多屏的理论比较成熟, 并已经在工程上得到了实际的应用, 但是涉及军事技术, 国外文献很少对双屏或多屏 FSS 的研究成果进行具体的讨论, 只对多屏 FSS 的理论分析方法进行了报道. 国内学者基本上只对双屏 FSS 进行了理论分析, 没有进行深入的研究, 多屏 FSS 的研究几乎没有. 双屏或多屏 FSS 的研究除了单屏 FSS 需要研究的参数外, 需要对双屏或多屏 FSS 的排列对准和 FSS 屏中间介质的优选等参数一并进行设计分析. 由于多屏 FSS 的复杂性, 双屏 FSS 是研究重点.

2) 单屏 FSS^[52-62]. 单屏 FSS 要实现多频段特性主要是通过 FSS 单元形式. 可以是具有不同频率响应的多种 FSS 单元组合或者是具有多频率响应的单元, 比如, 分形 FSS 单元和不规则 FSS 单元. 单屏 FSS 具有体积小、低损耗等优点.

a) 组合 FSS 单元. 组合 FSS 单元可以实现多频工作, 但是组合 FSS 设计较复杂, 特别是不同单元之间的间距, 间距需要足够大以容纳不同频率响应单元, 同时又要小于第一栅瓣的出现值. 组合 FSS 单元设计时还需要考虑以下三个方面: 高频响应单元不能影响低频响应单元的阻带, 反之亦然; 两个或多个子阵列必须是规则周期; 设计周期时整个 FSS 工作频率范围内不能出现栅瓣.

b) 分形 FSS 单元. 具有多频带、低损耗的特点, 并且传输性能随电磁波入射方向改变不大. 分形单元是通过对一个简单的图形进行线性转换得到的, 转换包括复制、缩放和转化. 分形 FSS 单元具有由于分形单元的相似性而表现出相似的频率特性, 同时由于迭代单元间的不同尺寸参数导致中心频率的不同, 所以可在单屏 FSS 上实现多频带通的特性, 可用于 FSS 天线罩. 分形结构设计的优势在于可以实现多频选择性能的同时能有效的缩减单元间距, 推迟栅瓣的出现. 目前文献研究最多的分形单元包括 Minkowski 单元和 Sierpinski 单元, 其他单元基本上是上述两种单元的衍生. 国外自 20 世纪 90 年代开始对分形 FSS 单元进行研究, 提出了 Sierpinski 偶极子, 十字形, 正方贴片等基础分形单元, 其中分形 Sierpinski 单元已成功运用于多频谐振器件中; 近年美国学者 Dough Las 等人基于遗传算法优化出了几种复杂结构分形 FSS. 国内对分形 FSS 的研究以 Y 形、圆形、十字架形等简单 FSS 基础单元为主, 还未真正在天线罩上得到应用. 制造比较麻烦是制约分形 FSS 发展的一个重要因素.

c) 非规则型 FSS 单元. 比如说 Bitmap FSS. 非

规则的 FSS 单元图形虽然不利于电磁模型的建立, 但这些单元往往能够提供 FSS 更好的性能, 比如随入射角的变化可以得到稳定的频率响应、宽带宽和间隔带小等. 不规则的 FSS 单元在多频段上工作时能克服组合单元和分形 FSS 单元各自的一些限制因素, 但是不规则单元理论计算复杂 (通常采用遗传算法), 制造精度要求高, 否则达不到理想传输特性.

多频 FSS 的成功研制还可以解决非倍频双频天线罩的研制难题.

4.2 智能 FSS 天线罩

众所周知, 机载或弹载雷达通常在相当长的平飞时间内天线处于不工作状态, 只有接近目标时才启动雷达, 而飞行器最容易在平飞的这段时间内受到敌方雷达的截获和跟踪. 利用这个特点, 采用智能天线罩, 可确保雷达在平飞阶段处于隐身状态, 在未制导阶段处于透波状态. 目前智能隐身天线罩技术包括频率选择表面、抛洒金属薄膜、电可控隐身、等离子体技术等. 抛洒金属薄膜隐身效果好, 但是在隐身到切换的过程中, 抛洒物会对发动机造成损害; 电可控技术的思路是采用导电-绝缘状态可控的导电高聚物作为材料基础, 但单独采用导电高聚物薄膜难以实施电切换, 需要加入固体电解质膜, 而固体电解质膜的介电常数较高, 影响了天线罩切换后的透波率. 等离子体技术还处于探索阶段, 尚不能解决等离子体发生器低功率化、尺寸小型化等关键性技术难题. 频率选择表面是首选技术, 但是在敌方雷达和我方雷达工作频率相差不大时, 隐身效果受到限制. 所以需要发展智能 FSS 天线罩, 以进一步完善 FSS 天线罩的功能.

智能 FSS 天线罩建立在主动频率选择表面技术 (active frequency selective surface, AFSS, 也称有源 FSS) 的基础之上. AFSS 天线罩利用对谐振频率的可调, 达到隐身目的, 同时通过微调来弥补谐振频率和实际需求之间的偏差. AFSS 的概念由英国 KENT 大学首次明确提出, 使 FSS 实现频率特性的动态可调成为可能, 国内外对其应用报道较少且大都集中于其在吸波材料上的应用. 因此 AFSS 天线罩有可能成为一个新的研究方向.

在实际使用中, FSS 必须依附在介质基底上, 介质基底一方面增强机械强度, 另一方面能影响 FSS 的性能. 相对于传统电阻片的阻抗而言, 频率选择表面的阻抗调节具有更大的自由度. AFSS 是

指 FSS 结构的谐振频率或带宽特征可以被某种外加激励所控制, 主要的现实途径有以下三种:

a) 在传统 FSS 结构中加入有源器件^[63-66]. 这种方法是国内外研究最为广泛的一种, 大都是通过 FSS 单元上加入 PIN 管或变容二极管通过控制偏执电压或电流来改变 FSS 的谐振特性. 有源可调器件的加载方式有两种, 一种是单元上加载, 一种是单元间加载. 加载有时是针对杂化 FSS 单元中的一部分进行, 直接实现多频段可调.

b) 调节 FSS 单元的形状和排布方式^[67]. 将 FSS 单元的形状和排布方式直接做成可调节的方法比较罕见, 但也有一些探索性研究. 有报道将水银和矿物油装到 T 形管中制备成 FSS 阵列, 利用压力来调节水银的量和排布. 更为实用的方式是利用多层 FSS 层间相对位置的调整 and 变化, 控制不同层间的耦合方式调节 FSS 单元的形状和排布方式, 可以实现对结构谐振频率或带宽特征的调节. 例如, 两个同轴的 FSS 回旋体结构, 可以通过机械运动, 如绕轴旋转实现 FSS 单元形状和排布方式的改变.

c) 使用电磁特性可调的介质材料作为结构基底^[68]. 在 FSS 单元形状和排布方式固定的基础上, 可以利用光电信号调节基底的电磁特性进而调节结构的谐振频率. 国外已经有基于有机半导体材料、液晶分子、及含离子液体的人工介质基底的 AFSS 研究.

关于途径三, 由于天线罩基底材料本身就有有力热等承载方面的种种限制, 如果再将电磁参数可调节加入材料筛选要求, 很难直接找到一种合适的电磁参数可调基底材料. 将导电态 - 绝缘态可切换的导电高分子作为带通型 FSS 的导电层是一种可能实现方式, 但是需要对导电高分子和 FSS 进一步深入研究. 途径二实现的基础是单层 FSS 天线罩技术的成熟和多层复合 FSS 理论的完善, 它的调控需要通过机械运动完成, 对结构设计和加工精度要求较高. 途径一的研究基础较好, 也是国内外研究的重点, 此类 FSS 形式的设计和成型工艺是摸索的重点.

4.3 厚屏 FSS 天线罩

如果把 FSS 按照金属屏厚度的不同来分类, 可分为薄屏 FSS (thin-screen FSS) 和厚屏 FSS (thick-screen FSS). 一般地, 在工程上, 厚屏 FSS 的金属屏厚度都在毫米和厘米级^[69,70]. 厚屏 FSS 单元内填充有介质材料. 据文献报道, 厚屏 FSS 能克服双层

或多层薄屏 FSS 级联引起的结构复杂和中心频率透过率容易降低的影响, 并可以改善 FSS 带宽性能, 使其在隐身天线罩应用方面有潜在价值^[71]. 值得一提的是, FSS 领域的权威 Munk 教授对厚屏 FSS 天线罩持反对态度. 他在著作《Frequency Selective Surface Theory and Design》^[72]中提到, “使平面增厚造成的一个基本影响是第一谐振处呈现出更窄的谐振曲线. 这种情形对于本身是有益的, 但有很多其他更简单的方法来达到这一目的, 比如说双层 FSS”.

目前国内 FSS 研究基本上集中于薄屏, 厚屏 FSS 的研究处于起步阶段. 而国外有专门制作厚屏 FSS 天线罩的公司, 他们制造的厚屏 FSS 天线罩称为 Artificial Puck Plate Radome. 相对于薄屏 FSS, 厚屏 FSS 的设计制造更为复杂, 是更多参数优化问题, 从文献资料归纳如下^[73-75]: 1) 除了单元形状尺寸、周期排列、介质材料、电磁波入射角及极化方式等薄屏 FSS 需要考虑的因素外, 还需要考虑金属屏的厚度 (薄屏 FSS 一般忽略金属屏厚度对天线罩频率响应性能的影响), 填充介质的介电常数 (介电常数的选择范围一般为 4—11)、填充介质的填充厚度、填充介质与金属屏的匹配等等影响传输效率的关键因素. 而且与薄屏 FSS 设计时不同, 厚屏 FSS 的所有单元都是波导单元, 波导单元内的就必须按照波导模式分布, 即电磁波在波导内以主模方式传播. 2) 厚屏一般都要以介质材料填充, 由于介质和金属的热膨胀系数一般不相同, 微小的空气间隙会导致很坏的结果. 3) 厚屏 FSS 只有保持其单元的一致性才能获得最优性能, 厚屏 FSS 的制造难度比较大. 所以用于厚屏 FSS 天线罩的 FSS 单元一般都选取较简单的形状, 如圆形、六边形和 Y 形. 4) 一般情况下, 屏越厚, 制造起来就越困难. 而且如果金属屏厚度过大, 会对传输特性产生很大的负面影响, 比如说带宽减小.

如果将来填充介质材料、FSS 单元技术和曲面 FSS 制造工艺得到突破, 厚屏 FSS 天线罩在隐身领域或许也能占有一席之地.

4.4 其他 FSS 天线罩

微型化 FSS (miniaturized-element FSS, MEFSS) 是 FSS 的一个重要的发展方向, MEFSS 具有微型化、宽通带、显著降低对入射角的敏感性等有点, 对曲面天线罩来说非常有益^[76-78]. 一方面, 天线罩外形大多为不可展开的二次曲面, 会出现局部小区

域或非平面波照射区域, 需要通过微型化 FSS 使其周期单元尺寸不受工作波长的限制, 从而降低对入射波的敏感性; 另一方面, 通常情况下 FSS 的单元数目不能少于 20×20 以保持 FSS 的特性, 当 FSS 天线罩在低频工作时 (比如: 2—4 GHz), FSS 单元太大, 在使用尺寸内很难用有限的单元数来体现 FSS 天线罩的频率选择性, 所以需要 FSS 微型化. 国外 Behdad 教授在 MEFSS 方面做了充分研究, 他通过级联 MEFSS 形成多级带通滤波器实现宽通带、多频的特性. 国内中科院长春光学精密机械与物理研究所的高教授课题组也对 MEFSS 做了许多

工作.

目前一般利用容性表面与感性表面的耦合机理来制备 MEFSS, 由于 MEFSS 通过控制容性表面的电容便可实现 FSS 变频、通带开关等功能, 因此 MEFSS 更容易实现主动频率选择. 而且由于 MEFSS 具有电尺寸小的特点, MEFSS 双屏或多屏频率选择表面的工程应用更为简单^[17-20,79,80]. 所以进一步发展, 多频 FSS 技术与主动 FSS 技术结合, 主动 FSS 技术和微型化 FSS 结合, 厚屏 FSS 与微型化 FSS 结合等等, 将会赐予频率选择表面天线罩更好的性能.

- [1] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun C L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 0505 (in Chinese) [贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 孙连春 2009 物理学报 **58** 0505]
- [2] Kim P C, Lee D G, Lim W, Seo I S 2009 *Compos. Struct.* **90** 242
- [3] Kim P C, Lee D G, Seo I S, Kim G H 2008 *Compos. Struct.* **80** 299
- [4] Kim P C, Lee D G, Seo I S, Kim G H L 2008 *Compos. Sci. Technol.* **68** 2163
- [5] Lu J, Gao J S, Sun C L 2003 *Mater. Sci. Technol.* **9** 1 (in Chinese) [卢俊, 高劲松, 孙连春 2003 材料科学与技术 **9** 1]
- [6] Wang H Q, Zhu M, Wu Z 2004 *Ship Electron. Eng.* **24** 301 (in Chinese) [王焕青, 祝明, 武哲 2004 舰船电子工程 **24** 301]
- [7] Mittra R 2001 *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp. Dig.* **4** 370
- [8] Prakash V V S, Huang N T, Mittra R 2003 *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation* **1** 401
- [9] Liu X C 1989 *Aircraft Design* **1** 13 (in Chinese) [刘晓春 1989 飞机设计 **1** 13]
- [10] Kieturtz 1961 *IRE Trans. Antennas and Propag.* **11** 506
- [11] Pelton E L, Munk B A 1974 *Antenna. Propag.* **32** 799
- [12] Pelton E L, Munk B A 1979 *Antenna. Propag.* **27** 323
- [13] Chakravarty S, Mittra R, Williams N R 2002 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **50** 284
- [14] Philips B, Parker E A 1995 *IEE Proc.- Microw. Antennas Propag.* **142** 193
- [15] Chang T K, Langley R J, Parker E A 1996 *IEE Proc.- Microw. Antennas Propag.* **143** 62
- [16] Parker E A, Philips B, Langley R J 1995 *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* **5** 338
- [17] Behdad N, Al-Joumayly M A 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 2460
- [18] Behdad N, Al-Joumayly M A, Salehi M 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 460
- [19] Behdad N 2008 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **50** 1639
- [20] Li M, Behdad N 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 2109
- [21] Kim P C, Lee D G 2009 *J. Adhesion Sci. Technol.* **23** 215
- [22] Antonopoulos C, Cahill R, Parker E A, Sturland I M 1997 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **144** 415
- [23] Zhuang W, Fan Z H, Ding D Z, Chen R S 2008 *Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components* 224
- [24] Fang C Y 2011 *Ph.D. Dissertation* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [方春易 2011 博士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [25] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Shen C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋, 高劲松, 赵晶丽, 沈春连 2008 物理学报 **57** 3803]
- [26] Li X Q, Feng X G, Gao J S 2009 *J. Microw.* **25** 16 (in Chinese) [李小秋, 冯晓国, 高劲松 2009 微波学报 **25** 16]
- [27] Xu N X, Gao J S, Feng X G, Zhao J L, Liang F C, Wang Y S, Chen X, Wang S S, Zhu H X 2010 *Func. Mater. Analects of 2010* p157 [徐念喜, 高劲松, 冯晓国, 赵晶丽, 梁凤超, 王岩松, 陈新, 王珊珊, 朱华新 2010 功能材料 2010 年论文集第 157 页]
- [28] Liu B, Liu X C, Sun S N, Zhou J J, Zhang X, Liao W H 2011 *Journal of Astronautics* **32** 2009 (in Chinese) [刘斌, 刘晓春, 孙士宁, 周建江, 张翔, 廖文和 2011 宇航学报 **32** 2009]
- [29] Zhu H X, Gao J S, Feng X G, Zhao J L, Liang F C, Wang Y S, Chen X 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0223002 (in Chinese) [朱华新, 高劲松, 冯晓国, 赵晶丽, 梁凤超, 王岩松, 陈新 2011 光学学报 **31** 0223002]
- [30] Feng L, Ruan Y Z 1994 *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* **15** 1122 (in Chinese) [冯林, 阮颖铮 1994 航空学报 **15** 1122]
- [31] Hou X Y, Wan W, Wan G B, Tong M A 1998 *System Eng. Electron.* **9** 14 (in Chinese) [侯新宇, 万伟, 万国宾, 佟明安 1998 系统工程与电子技术 **9** 14]
- [32] Hou X Y, Wan W, Tong M A 1999 *J Electron.* **21** 569 (in Chinese) [侯新宇, 万伟, 佟明安 1999 电子科学学刊 **21** 569]
- [33] Hou X Y, Wan W, Wan G B, Tong M A 1998 *Chin. J. Radio Sci.* **13** 442 (in Chinese) [侯新宇, 万伟, 万国宾, 佟明安 1998 电波科学学报 **13** 442]
- [34] Chen H Y, Hou X Y, Deng L J 2009 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **8** 1231
- [35] Meng Z J, Lv M Y, Wu Z, Zhu M 2010 *Opt. Precision Eng.* **18** 1175 (in Chinese) [蒙志君, 吕明云, 武哲, 祝明 2010 光学精密工程 **18** 1175]
- [36] Meng Z J, Lv M Y, Wu Z, Huang J 2008 *Chin. J. Radio Sci.* **23** 1123 (in Chinese) [蒙志君, 吕明云, 武哲, 黄俊 2008 电波科学学报 **23** 1123]
- [37] Wang H Q, Lv M Y, Meng Z J, Wu Z 2006 *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* **32** 1428 (in Chinese) [王焕青, 吕明云, 蒙志君, 武哲 2006 北京航空航天大学学报 **32** 1428]
- [38] Huang M J, Lv M Y, Huang J, Wu Z 2009 *Systems Eng. Electron.* **31** 1611 (in Chinese) [黄敏杰, 吕明云, 黄俊, 武哲 2009 系统工程与电子技术 **31** 1611]
- [39] Jia H Y, Feng X G, Gao J S 2007 *Opt. Precision Eng.* **15** 978 (in Chinese) [贾宏燕, 冯晓国, 高劲松 2007 光学精密工程 **15** 978]
- [40] Chen L, Dong J M 2006 *Space Electron. Technol.* **4** 57 (in Chinese) [陈磊, 董金明 2006 空间电子战术 **4** 57]

- [41] Hou X Y, Wan W, Tong M G, Wan G B 1999 *J. Microw.* **15** 365 (in Chinese) [侯新宇, 万伟, 佟明安, 万国宾 1999 微波学报 **15** 365]
- [42] Lü M Y, Zhu M, Wang H Q, Wu Z 2005 *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* **26** 524 [吕明云, 祝明, 王焕青, 武哲 2005 航空学报 **26** 524]
- [43] Li L 2011 *www. cyol.net* [2011-3-18] (in Chinese) [李莉 2011 (中国青年报) 2011-3-18]
- [44] Chen L 2011 *Aerodynamic Missile Journal* **9** 80 (in Chinese) [陈黎 2011 飞航导弹 **9** 80]
- [45] Dong L 2012 *Defense Science & Technology Industry* **1** 64 (in Chinese) [董磊 2012 国防科技工业 **1** 64]
- [46] Yin Y 2007 *World Outlook* **23** 46 (in Chinese) [鹰扬 2007 国际展望 **23** 46]
- [47] Romeu J, Rahmat-Samii Y 1999 *IEEE Electron. Lett.* **35** 702
- [48] Vardaxoglou J C, Hossainzadeh A, Stylianou A 1993 *IEE Proceedings-H* **140** 59
- [49] Wang J B, Lu J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057304 (in Chinese) [汪剑波, 卢俊 2011 物理学报 **60** 057304]
- [50] Wang L C, Zhang Q, Feng X L 2012 *Modern Radar* **34** 63 (in Chinese) [王立超, 张强, 冯晓磊 2012 现代雷达 **34** 63]
- [51] Wang J B, Lu J, Sun G C, Chen X Y, Chen G B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 047304
- [52] Hill R A, Munk B A 1996 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **44** 369
- [53] Li X Q, Gao J S, Feng X G 2008 *J. Microw.* **24** 7 (in Chinese) [李小秋, 高劲松, 冯晓国 2008 微波学报 **24** 7]
- [54] Yang Z, Xue Z H, Li W M, Lv X 2010 *System Eng. Electron.* **32** 35 (in Chinese) [杨卓, 薛正辉, 李伟明, 吕昕 2010 系统工程与电子技术 **32** 35]
- [55] Werner D H, Lee D 2000 *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.* **3** 16
- [56] Ganianitorio J P, Yahya R 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 3088
- [57] Wang S S, Gao J S, Liang F C, Wang Y S, Chen X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050703 (in Chinese) [王珊珊, 高劲松, 梁凤超, 王岩松, 陈新 2011 物理学报 **60** 050703]
- [58] Li X P, Liu H, Shi X W 2006 *J. Microw.* **22** 100 (in Chinese) [李绪平, 刘昊, 史小卫 2006 微波学报 **22** 100]
- [59] Munk B A, Burrell G A 1979 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **27** 331
- [60] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王珊珊, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
- [61] Zhou H, Qu S B, Peng W D, Wang J F, Ma H, Zhang J Q, Bai P, Xu Z 2012 **21** 030301
- [62] Jia H Y, Feng X G, Sheng C X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054102
- [63] Tennant A, Chambers B 2004 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **14** 46
- [64] Mias C 2005 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **15** 570
- [65] Mias C 2003 *Electron. Lett.* **39** 850
- [66] Chen Q, Jiang J J, Bie S W, Wang P, Liu P, Xu X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074202 (in Chinese) [陈谦, 江建军, 别少伟, 王鹏, 刘鹏, 徐欣欣 2011 物理学报 **60** 074202]
- [67] Lei B J, Zamora A, Chun T F, Ohta A T, Shiroma W A 2011 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **21** 465
- [68] Lima A C de C, Parker E A, Langley R J 1994 *Electro. Lett.* **30** 281
- [69] Wu T K 1995 *Frequency surface and grid arrays* (New York: Wiley) pp147
- [70] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun C L 2010 *Opt. Precision Eng.* **18** 1278 (in Chinese) [方春易, 张树仁, 卢俊, 汪建波, 孙春连 2010 光学精密工程 **18** 1278]
- [71] Tang G M, Miao J G, Dong J M, Hu X Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 118401 (in Chinese) [唐光明, 苗俊刚, 董金明, 胡晓晴 2012 物理学报 **61** 118401]
- [72] Munk B A (translated by Hou X Y) 2009 *Frequency selective surface: Theory and Design* (Beijing: Science Press) pp220-221 [Munk B A 著 (侯新宇译) 2009 频率选择表面理论与设计 (北京: 科学出版社) 第 220—221 页]
- [73] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun C L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5023 (in Chinese) [方春易, 张树仁, 卢俊, 汪建波, 孙春连 2010 物理学报 **59** 5023]
- [74] Tang G M, Miao J G, Dong J M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 068402 (in Chinese) [唐光明, 苗俊刚, 董金明 2012 物理学报 **61** 068402]
- [75] Lin B Q, Li F, Zhang Q R, Zen Y S 2009 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **8** 1065
- [76] Xu N X, Gao J S, Liang F C, Zhao J L, Feng X G 2011 *Opt. Precision Eng.* **19** 2333 (in Chinese) [徐念喜, 高劲松, 梁凤超, 赵晶丽, 冯晓国 2011 光学精密工程 **19** 2333]
- [77] Xu N X, Feng X G, Wang Y S, Chen X, Gao J S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114102 (in Chinese) [徐念喜, 冯晓国, 王岩松, 陈新, 高劲松 2011 物理学报 **60** 114102]
- [78] Sarabandi K, Behdad N 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 1239
- [79] Al-Joumayly M, Behdad N 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 452
- [80] Dong X Q, Liang X D 2012 *Guilin Univ. Electro. Technol.* **32** 97 (in Chinese) [董思乔, 梁兴东 2012 桂林电子科技大学学报 **32** 97]

Comprehensive Survey for the Frontier Disciplines

Status and development of frequency selective surface radome

Lu Ge-Wu¹⁾²⁾ Zhang Jian²⁾ Yang Jie-Ying²⁾ Zhang Tian-Xiang^{2)†} Kou Yuan^{1)‡}

1) (College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

2) (Aerospace Research Institute of Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074, China)

(Received 16 April 2013; revised manuscript received 28 May 2013)

Abstract

Due to the working characteristics of radar system, i.e. it has to ensure the emission and acceptance of its own radar wave, frequency selective surface (FSS) radome is the most effective stealthy way to give radome the function of frequency-selective. Combining the FSS technique and the radome together, FSS radome provides bandpass transmission properties in the operating frequency of radar, and changes the RCS characteristics of the antenna compartment when it is beyond the antenna's operating frequency range, thus it is a realization of out-of-band stealth. This paper introduces the basic design of FSS radome technology and summarizes the research status of FSS radome in the structure design and the technology. The multi-band FSS radome, intelligent FSS radome, thick-screen FSS radome, miniaturized element FSS radome and the technologies to construct radome are predicted to be the perspective of FSS radome.

Keywords: frequency selective surface (FSS), multi-band radome, intelligent FSS radome, thick-screen FSS radome

PACS: 84.40.-x, 41.20.-q, 07.50.Hp

DOI: 10.7498/aps.62.198401

† Corresponding author. E-mail: ZTX513@263.net

‡ Corresponding author. E-mail: yuankou@pku.edu.cn