

# 频率选择表面在天线及微波技术中的应用

张 厚, 尹卫阳

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 随着电磁波传播控制技术的快速发展, 频率选择表面(FSS)凭借其独特的空间滤波特性正成为关注和研究的热点。目前, FSS 已经在电磁领域获得了广泛应用。文中首先阐述了 FSS 的发展现状, 然后论述了 FSS 在天线及微波技术领域中的应用, 最后对 FSS 的发展前景进行了展望。

**关键词** 频率选择表面(FSS); 天线; 微波技术

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.05.012

**中图分类号** TN820 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)05-0070-06

## Application of Frequency Selective Surface in Antennas and Microwave Technology

ZHANG Hou, YIN Weiyang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** With the rapid development of control technology of electromagnetic wave propagation, frequency selective surface (FSS) has become the hotspot of attention and research due to its special spatial filter characteristics. Up to now, FSS has found wide applications in the fields of electromagnetics. The progress of FSS is firstly presented, and the applications of FSS in Antennas and Microwave Technology are discussed. Finally, the development of FSS is looked forward to the future.

**Key words:** frequency selective surface (FSS); antennas; microwave technology

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)作为一种周期性结构, 人们对其最早的认识来源于 2 个多世纪以前的一场实验<sup>[1]</sup>。1785 年, 美国人 F. Hopkinson 观察到自然光通过一条丝带手绢后发生奇异的散射现象<sup>[2]</sup>。随后, 1786 年, 美国科学家 D. Rittenhouse 发表了他对这种现象的研究结果。从此周期性结构走进了人们的视野<sup>[3]</sup>。到 1823 年, 当人们利用周期性结构将一束自然光分解为具有不同颜色的单色光时, 周期性结构的概念才正式得到了人们的认可<sup>[4]</sup>。

作为空间滤波器, FSS 的滤波特性主要取决于

其单元形状和尺寸。除此之外, 单元的排列方式, 电磁波入射角和极化方式等也会对其产生影响。在实际应用中, 通常会加入介质基底以起到支撑和增大机械强度的作用, 而介质基底的介电常数、厚度等参数也会对 FSS 滤波特性造成影响<sup>[5]</sup>。因此, 在设计时需要对这些因素加以考虑。

传统 FSS 是一维或者二维周期性结构, 其基本单元可分为贴片型和孔径型<sup>[6-9]</sup>。对于典型的贴片型 FSS 而言, 当电磁波入射时, 其在谐振频率附近类似于一个理想的导电平板, 对电磁波呈全反射特性, 对其余频段电磁波则表现为透射特性。对典型

**收稿日期:** 2019-08-27

**作者简介:** 张 厚(1962—), 男, 河北武安人, 教授, 博士生导师, 主要从事无线与电磁兼容研究。E-mail: warmer88@163.com

**引用格式:** 张厚, 尹卫阳. 频率选择表面在天线及微波技术中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 70-75. ZHANG Hou, YIN Weiyang. Application of Frequency Selective Surface in Antennas and Microwave Technology[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 70-75.

的孔径型 FSS 而言,在谐振频率处呈全透射特性,对其余频段电磁波则表现出反射特性。目前,新型 2.5 维 FSS<sup>[10]</sup> 以及三维 FSS<sup>[11]</sup> 的设计也受到了研究人员的密切关注。

## 1 FSS 的发展现状

自 20 世纪 60 年代起,由于计算机技术和印刷电路技术的兴起,加上电磁隐身等领域对 FSS 的巨大需求,使得 FSS 设计迎来了蓬勃发展的阶段。目前,关于 FSS 的研究方向主要集中于以下几种。

### 1.1 多频段 FSS

在雷达与卫星领域,多频传输及多波段通信已经取得了快速的发展,与此同时,多频工作器件产品数量的增加,使得作为该领域的重要组成部分,FSS 扮演了越来越重要的角色。如何利用 FSS 进一步提高雷达与卫星的通信功能,满足多频工作器件的需求,多频段的实现成为了解决问题的关键<sup>[12-13]</sup>。

### 1.2 小型化 FSS

传统 FSS 滤波特性的实现是基于单元谐振机理,而这一机理使得 FSS 的单元尺寸必定和谐振波长一致。当谐振频率处于低频段时,将导致 FSS 单元尺寸较大。这一缺点使得传统 FSS 无法应用于一些空间受限的场所。此外,大尺寸 FSS 会导致栅瓣提前出现从而影响滤波性能。为了解决这一问题,小型化 FSS<sup>[14-16]</sup> 的研究引起了人们的注意。

### 1.3 可重构 FSS

关于可重构 FSS<sup>[17-18]</sup> 最早的报道出现于 1972 年,当时 Lee. S. W 等人在周期性表面上引入集成负阻抗元件成功实现了褶皱表面的设计<sup>[19]</sup>。如今,可重构 FSS 已经应用于很多领域。与传统 FSS 相比,可重构 FSS 具有通带开关或频带可调谐特性,能更好的适应于复杂多变半的电磁环境。目前,常用的电控元件包括 PIN 二极管、MEMS 开关以及变容二极管等。

### 1.4 宽通带 FSS

宽通带 FSS<sup>[20-21]</sup> 指的是具有高阶滤波特性的带通 FSS,与传统 FSS 相比,其拥有更好的带宽展宽性和通带边缘上升性,此外,其还有通带内插损小、带外抑制强及陡降性好等优点。目前,随着通信技术的快速发展,对宽频带微波滤波器的需求也不断增多,例如,卫星系统中所用的频段带宽,都是在 1 GHz 以上。因此,开展对宽频段 FSS 的研究具有很大的意义。

### 1.5 有源 FSS(AFSS)

AFSS 概念最早由 Kent 大学的 E. A. Parker 等人明确提出,他们在偶极子之间以及方环结构之间加载 PIN 二极管,通过改变 PIN 二极管的加载电

压实现 FSS 滤波特性的变化。这种基于 PIN 二极管或者变容二极管的有源 FSS 控制方式多样,加工制造简单,但在插入损耗和隔离度等方面存在的问题。此外,通过利用可变属性的介质基底材料(如液晶材料、半导体材料、石墨烯、钛酸锶钡等)也可以实现 AFSS 的设计,对具有光敏属性的光敏硅也可以进行光控条件下的 AFSS 设计。还可以采用多层基板和可折叠结构进行 AFSS 设计。

## 2 FSS 在天线及微波技术中的应用

### 2.1 天线罩

FSS 最早以及最广泛的应用即作为天线雷达罩<sup>[22-24]</sup> 以缩减雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)。

20 世纪 50 年代,由于探测雷达的出现,战斗机的安全受到了空前威胁,为了降低机头雷达的 RCS,来自美国俄亥俄州立大学的 B. A. MUNK 带领他的团队率先对 FSS 应用于天线雷达罩发起了研究<sup>[25]</sup>。在 1974 年,他的团队便制作出了第 1 款基于 FSS 的天线雷达罩,该天线罩工作于 8.8~9.0 GHz,中心频率为 8.9 GHz。在该频段内,天线罩表现出良好的交叉极化和入射角度稳定性。天线罩内部可以加装一定大小的天线,并且能够在不干扰其正常传输和接收信号下,有效降低机头 RCS。目前,基于 FSS 的天线雷达罩已经被广泛地应用于战斗机,如著名的“猛禽”F-22 战斗机。天线雷达罩的工作原理如图 1 所示,当非谐振频率处的电磁波入射时,借助于天线罩几何形状以及 FSS 的反射特性,电磁波将被反射到不同于原路径的其他方向,而在谐振频率处的电磁波,则不受阻挡地进出天线罩,从而达到了不影响内部天线正常工作的前提下,有效地降低机头 RCS 的目的。天线罩除了降低机头 RCS 的功能外,还能在电子战中起到抗干扰的作用。

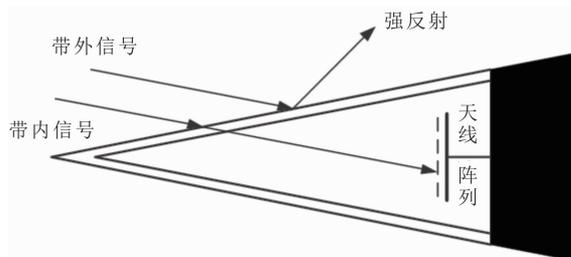


图 1 FSS 天线罩

相比国外,国内对 FSS 用于天线罩的研究开展较晚,进入 21 世纪才有大量文献涌出。2008 年,李小秋<sup>[26]</sup> 等人提出了一款适用于曲线天线雷达罩的新型 Y 孔单元,该单元在具有高透过率的同时,还具备较好的角度稳定性。2010 年,徐念喜<sup>[27]</sup> 等人在传统 FSS 的基础上,运用矢量模式法设计了一款

适用于天线罩的新型哑铃型 FSS 单元,该单元具有较好的极化和角度稳定性。最近,王秀芝<sup>[28]</sup>等人基于耦合机理和谐振机理,分别在实心半波壁结构和 A 夹层雷达罩等效平板基底上设计了 Ku/Ka 波段双通带频率选择表面结构,测试结果验证了 2 款 FSS 雷达罩的实用性。

## 2.2 副反射面

20 世纪末,由于卫星系统对多频段通信的需要,来自美国加利福尼亚大学喷射推进实验室(JPL)的 Wu T K 等人对多频段 FSS 进行了大量的研究和实验,并提出了多频段 FSS 设计的完整思路和方法。运用此方法,Wu T K 等人成功设计出了一款四频段 FSS,并被用作一个拥有 4 个不同频率馈源的天线系统上的副反射面使用。该天线系统后来被应用到了卫星上,这就是著名的 Cassini 土星探测计划<sup>[29]</sup>。

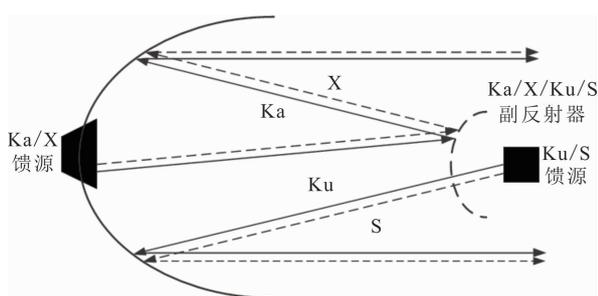


图2 反射面天线工作原理图

目前,由于多波段通信在天线系统中的普及,将 FSS 用作副反射面以实现信号的多频复用已经得到了广泛的应用<sup>[30-31]</sup>。其中一个典型的例子即卡塞格伦天线系统<sup>[32]</sup>,其工作原理如图 2 所示。卡塞格伦天线系统由 2 个反射面组成,一个为主反射面,一个为副反射面,其中副反射面是由 FSS 构成。此外,在副反射面的两侧,分布有 Ka/X 馈源和 Ku/S 馈源。对于 Ka/X 馈源而言,主/副反射面几乎是全反射的,其反射出的电磁波经主/副反射面反射后,传播方向恰好呈现水平。对于 Ku/S 馈源而言,副反射面是全透射的,而主反射面是全反射的,这样一来,其发射出的电磁波经过副/主反射面后传播方向恰好与 Ka/X 馈源传播方向一致,从而实现了多频复用,提升了天线系统的工作效率。

2007 年,李庭<sup>[33]</sup>利用双正方形环结构设计了一款可用于多频段天线的 FSS,该 FSS 在 2~2.5 GHz、13~16 GHz 上表现出传输特性,在 7.5~9 GHz、22~27 GHz 上表现出反射特性。2013 年,Desong Wang<sup>[34]</sup>等人设计一款可应用于副反射面的三频段 FSS,该 FSS 能透射位于 4 GHz 附近的信号,并反射位于 6 GHz 及 9.5 GHz 附近的信号。2015 年,田青<sup>[35]</sup>等人运用 FSS 作为副反射面设计了一款 4.2 m 口径的 S、X、Ku、Ka 五频共用反射面

天线。如今,设计多频段 FSS 满足不同副反射面天线的要求有着重要的实际意义。

## 2.3 电磁屏蔽

近年来,随着通信与信息技术的快速发展,无线电子设备已经成为了人们生活中不可或缺的必需品,与此同时,各式信号发射/接收装置及基站的建设,使得空间中人为的电磁辐射总量呈指数化增长<sup>[36-38]</sup>。截止目前,电磁辐射已经成为了继大气污染、水污染、噪音污染后的第四大污染。对人体而言,轻则导致身体不适,严重则会导致器官的异变乃至死亡。对敏感设备而言,轻微辐射会影响正常运行,严重时则会导致设备损毁乃至造成严重安全事故<sup>[39]</sup>。

为了保护人体以及敏感设备免受电磁污染的危害,很多行之有效的方法被人们提出并采用。例如,在一些特定的场所使用纯金属来隔离电磁波,这种方法虽然可行,但是存在着许多问题。纯金属外观上看不美观,并且笨重昂贵,更为重要的是,它对电磁波不具有选择透过性。这些缺陷限制了其应用空间。近年来,FSS 由于其独特的空间滤波特性开始受到了人们在电磁防护领域的重视。使用 FSS 用作电磁防护材料,不仅廉价美观,而且可以指定屏蔽的对象而不影响其余频段电磁波的传输。FSS 的这一特点使得其在电磁防护领域有着巨大的应用潜力。2006 年,Grace Hui-Hsia Sung<sup>[40]</sup>等人使用 FSS 设计了一款可保护室内免受外部特定频段电磁干扰的频率选择墙,实验证明其具有良好的屏蔽有效性。2014 年,HJ Song<sup>[41]</sup>等人成功设计了一款基于 FSS 的频率选择玻璃,该玻璃能在 Ku 波段提供超过 15 dB 的阻带峰值。2015 年,T. R. Suresh Kumar<sup>[42]</sup>等人结合双层 FSS 设计一款电磁屏蔽盒,该屏蔽盒能保护盒内设备免受特定频段电磁波的干扰。

## 2.4 极化转换器

对于接收天线而言,若想要接收到来波信号,其极化特性必须与来波信号的极化特性一致,以实现极化匹配。而来波信号的极化特性与发射天线极化特性相同,当发射天线的极化特性与接收天线的极化特性不一致时,要实现信号的传输与接收,这就涉及到了极化转换的概念。有一种特例,那就是圆极化天线和圆极化波,由于任意极化方向的电磁波,都可以分解为 2 个旋向相反的圆极化波。因此,圆极化天线能接收到任意极化方向的电磁波,圆极化波也能被任意极化方向的天线接收,圆极化波的这一特点,使得其在电子对抗、雷达、天文等领域有着重要的应用价值。而如何实现圆极化波,就成为急需解决的问题。极化转换器也就是在这种需求下诞生的产物,其一般由 FSS 稍加改进所得。其原理如图 3 所示,当入射波照射到极化转换器上时,其水平分

量和垂直分量的幅值和相位都分别会进行加权,从而转换成任意需要的极化形式的电磁波。

近年关于 FSS 用作极化转换器的研究较多,2015 年,郭英<sup>[43]</sup>等人提出了一种由 2 个一端开口的圆环缝隙结构相互垂直嵌套组成的 FSS 极化转换器,可以实现线极化到左、右旋圆极化的转换。2016 年,Seyed Mohamad<sup>[44]</sup>等人利用 2 维的各项异性的周期结构,设计了一款可以实现线极化到圆极化转变的极化转换器。2017 年,袁良昊<sup>[45]</sup>等人基于开口方形环结构,设计了一款具有线-圆极化转换功能的新型 FSS 圆极化器。

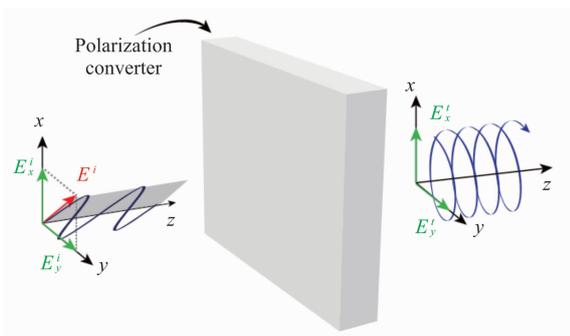


图 3 极化转换器工作原理

### 3 其他应用与展望

近年来,将 FSS 作为微带天线的人工介质材料以提升天线的性能是一个很有前景的发展方向。传统的微带天线增益较低,从而实用性不佳,为了提升增益幅度,可以使用 FSS 作为覆层,加载到微带天线的上方,Fabry-Perot 谐振腔天线就采用了该机制。2015 年,张迪<sup>[46]</sup>等人针对传统微带天线增益低的缺点,设计了一款双层 FSS 并加载到微带天线的上方,从而形成了 Fabry-Perot 谐振腔,与纯微带天线相比,Fabry-Perot 谐振腔天线的增益幅度高达 7.7 dB。此外,2016 年,曹卫平<sup>[47]</sup>等人针对传统 Fabry-Perot 谐振天线增益带宽窄的问题,设计了一款集成到单层介质板上的双层 FSS 结构,将其作为微带天线的覆层后能使得天线增益在更宽的频段内得以提升。此外,还可以利用 FSS 作为微带天线的地板以提升天线增益。2015 年,Farooq A. Tahir<sup>[48]</sup>等人提出了一款基于 FSS 地板的超宽带反射面天线,与未加 FSS 地板时相比,在工作频段 2~20 GHz 内增益提升了 4~5 dBi。2017 年,Kang Ding<sup>[49]</sup>等人设计了一款超宽带圆极化缝隙天线,通过引进 FSS 作为地板,缝隙天线在 5.6 GHz 的峰值增益达到了 10 dBi。

将 FSS 与吸波材料复合在一起使用也是一个新的研究方向。传统吸波材料通常具有较高的损耗,且带宽较窄,而与 FSS 结合使用后不仅可以改

善结构的性能,拓展带宽,还具有“薄、轻、宽、强”的特点,将该复合材料应用于雷达罩,能有效地降低雷达的光学特性、声学特性和目视特性。2014 年,Qiang Chen<sup>[50]</sup>等人设计一款天线罩,该天线罩由带通 FSS 与阻抗材料复合而成,能很好地吸收带外波,且具有较小的带内插损。2017 年,Himangshu Bhusan Baskey<sup>[51]</sup>等人提出了一款基于 FSS 结构的混合纳米复合材料,将该材料用于 RCS 缩减能起到很好的效果。目前,随着电磁防护领域及电磁隐身领域的发展,将 FSS 与吸波材料复合使用已经成为了一大趋势。

### 4 结语

经过几十年的发展,FSS 的理论、设计及应用已经取得了一系列成果,但同时也存在着许多问题,作为周期性材料,FSS 的实际滤波特性与印刷电路技术的精度密切相关,如何进一步提高制作工艺以提升 FSS 的性能是需要改进的一方面,另一方面,如何对 FSS 的基础理论进一步优化以提升设计的效率,也尚在探索之中。总而言之,随着电磁领域研究的深入,FSS 将得到更加广泛的应用。

#### 参考文献(References):

- [1] MUNK B A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design[M]. New York: Wiley, 2000.
- [2] 郑书峰. 频率选择表面的小型化设计与优化技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.  
ZHENG S F. Study on the Miniaturization and Optimization of Frequency Selective Surfaces[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [3] 李姣. 新型多频段频率选择表面的设计与仿真[D]. 南昌: 江西师范大学, 2012.  
LI J. The Design and Simulation of Novel Mufti-Hand Frequency Selective Surfaces[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2012. (in Chinese)
- [4] 杨泽波. 频率选择表面的设计与仿真计算[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
YANG Z B. Design and Simuiation of Frequency Selective Surfaces[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [5] YAN M, QU S, WANG J, et al. A Novel Miniaturized Frequency Selective Surface with Stable Resonance[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13(1): 639-641.
- [6] GHOSH S, SRIVASTAVA K V. An Angularly Stable Dual Band FSS with Closely Spaced Resonances Using Miniaturized Unit Cell[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(3): 218-220.
- [7] YIN W, ZHANG H, ZHONG T, et al, An Out-

- standing Miniaturized Frequency Selective Surface Based on Convolved Interwoven Element[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letter*, 2017, 69: 133-139.
- [8] YANG H Y, GONG S X, ZHANG P F, et al. A Novel Miniaturized Selective Surface with Excellent Center Frequency Stability[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 51(10): 2513-2516.
- [9] JIANG W, TAO H, GONG S X, et al. Miniaturized Frequency Selective Surface with a Bionical Structure[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, 55(2): 335-337.
- [10] HUSSAIN T, CAO QS, KAYANI J K, et al. Miniaturization of Frequency Selective Surfaces Using 2.5-Dimensional Knitted Structures: Design and Synthesis[J]. *IEEE Transactions on Antenna & Propagation*, 2017, 65(5): 2405-2412.
- [11] AHMED A O, SHEN Z X. Multiband High-Order Band-stop 3-D Frequency-Selective Structures[J]. *IEEE Transactions on Antenna & Propagation*, 2016, 64(6): 2217-2226.
- [12] WERNER D H, LEE D. Design of Dual-Polarised Multiband Frequency Selective Surfaces Using Fractal Elements[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(6): 487-488.
- [13] CHIU C N, WANG W Y. A Dual-Frequency Miniaturized-element FSS with Closely Located Resonances[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(2): 163-165.
- [14] 王秀芝. 小型化频率选择表面研究[D]. 长春: 中国科学院, 2014.  
WANG X Z. Study on Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [15] LI W L, ZHANG T, YANG G H, et al. Novel Frequency Selective Surface with Compact Structure and Stable Responses[C]//International Symposium on Antennas Propagation & EM Theory. Singapore: IEEE, 2010: 932-935.
- [16] SARABANDI K, BEHDAD N. A Frequency Selective Surface with Miniaturized Elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propag*, 2007, 55(5): 1239-1245.
- [17] SAFARI M, SHAFAI C, SHAFAI L. X-band Tunable Frequency Selective Surface Using MEMS Capacitive Loads[J]. *IEEE Transactions on Antenna & Propagation*, 2015, 63(3): 1014-1021.
- [18] EBRAHIMI A, SHEN Z X, WITHAYACHUMNANKUL W, et al. Varactor-Tunable Second-Order Bandpass Frequency-Selective Surface with Embedded Bias Network[J]. *IEEE Trans Antennas and Propag*, 2016, 64(5): 1672-1680.
- [19] LEE S W, FONG T T. Electromagnetic Wave Scattering from an Active Corrugated Structure[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(2): 388-396.
- [20] 李青青, 裴志斌, 屈绍波, 等. 一种具有良好带通性能的二阶频率选择表面设计与验证[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(4): 73-77.  
LI Q Q, PEI Z B, QU S B, et al. The Design and Validation of A Second-Order FSS with Good Band-pass Performances[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2011, 12(4): 73-77. (in Chinese)
- [21] BEHDAD N, AL-JOUMAYLY M, SALEHI M. A Low-Profile Third-Order Bandpass Frequency Selective Surface[J]. *IEEE Transactions on Antenna & Propagation*, 2009, 57(2): 460-466.
- [22] 赵峻, 徐晓文. 一种相控阵天线的 FSS 天线罩设计与分析[J]. *微波学报*, 2012(S1): 50-54.  
ZHAO J, XU X W. Design and Analysis of a Frequency Selective Surface Radome for Phased Array Antenna[J]. *Journal of Microwaves*, 2012(S1): 50-54. (in Chinese)
- [23] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.  
SANG J H. *Stealth Technology of Aircraft*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [24] JOOZDANI M Z, AMIRHOSSEINI M K, ABDOLALI A N. Wideband Radar Cross-Section Reduction of Patch Array Antenna with Miniaturized Hexagonal Loop Frequency Selective Surface[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(9): 767-768.
- [25] 李婧. 新型频率选择表面的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.  
LI J. Research on Novel Frequency Selective Surfaces[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [26] 李小秋, 高劲松, 赵晶丽, 等. 一种适用于雷达罩的频率选择表面新单元研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(6): 3803-3806.  
LI X Q, GAO J S, ZHAO J L, et al. Research on a Novel Frequency Selective Surface Element for Radome[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 25(6): 3803-3806. (in Chinese)
- [27] 徐念喜, 高劲松, 冯晓国, 等. 一种适用于隐身天线罩的频率选择表面新单元研究[C]//第七届中国功能材料及其应用学术会议. 长沙: 中国仪器仪表学会, 2010: 157-159.  
XU N X, GAO J S, FENG X G, et al. Research on a Novel Frequency Selective Surface Element for Stealth Antenna Radome[C]//The 7th Chinese Academic Conference on Functional Materials and Applications. Changsha: China Instrument and Control Society, 2010: 157-159. (in Chinese)
- [28] 王秀芝, 高劲松, 徐念喜. Ku/Ka 波段双通带频率选择表面设计研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(16): 370-375.  
WANG X Z, GAO J X, XU N X. Design and Study on The Dual-Band Radome with FSS Operation at Ku-/Ka-band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(16): 370-375. (in Chinese)

- [29] WU T K. Four-Band Frequency Selective Surface with Double-Square-Loop Patch Elements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(12): 1659-1663.
- [30] AGRAWAL V, IMBRIALE W. Design of a Dichroic Cassegrain Subreflector [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 27(4): 466-473.
- [31] HICKEY G S, WU T K. A Four-Frequency Selective Surface Spacecraft Subreflector Antenna [J]. Microwave Journal, 1996, 39(5): 240-252.
- [32] 冯红星. 双频、多波束卡塞格伦天线的设计 [J]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
FENG H X. The Design of Dual-Band, Multi-Beam Cassegrain Antenna [J]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [33] 李庭. 四频段频率选择表面副反射面天线的分析与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.  
LI T. Analysis and Design of Four-Band Frequency Selective Surface Subreflector Antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
- [34] WANG D S, CHE W Q, CHANG Y M, et al. A Low-Profile Frequency Selective Surface with Controllable Triband Characteristics [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12(2): 468-471.
- [35] 田青. 多频段馈源及反射面天线研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
TIAN Q. The Study and Design of Multiband Feed-source and Reflector Antenna [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [36] UNAL E, GOKCEN A, KUTLU Y. Effective Electromagnetic Shielding [J]. IEEE Microwave Magazine, 2006, 7(4): 48-54.
- [37] CALCAGNINI G, CENSI F, TRIVENTI M. Electromagnetic Interference to Infusion Pumps from GSM Mobile Phones [C]//International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society. San Francisco, CA; IEEE, 2008: 4503.
- [38] ISKRA S, THOMAS B W, MCKENZIE R, et al. Potential GPRS 900/180 MHz and WCDMA 1900 MHz Interference to Medical Devices [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 54(10): 1858-1866.
- [39] 孙晓杰, 赵由才. 日常生活中的环境保护: 我们的防护小策略 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.  
SUN X J, ZHAO Y C. Environmental Protection in Daily Life: Our Small Protection Strategy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [40] SUNG H H, SOWERBY K W, NEVE M J, et al. A Frequency-Selective Wall for Interference Reduction in Wireless Indoor Environments [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2006, 48(5): 29-37.
- [41] SONG H J, SCHAFFNER J H, SON K A, et al. Optically Transparent Ku-Band Silver Nanowire Frequency Selective Surface on Glass Substrate [C]// Antennas & Propagation Society International Symposium. Memphis, TN, USA: IEEE, 2014.
- [42] SURESHKUMAR T R, VENKATESH C, SALIL P, et al. Transmission Line Approach to Calculate the Shielding Effectiveness of an Enclosure with Double-Layer Frequency Selective Surface [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6): 1736-1739.
- [43] 郭英. 宽角入射频率选择表面极化转换器研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.  
GUO Y. The Research of Wide-Angle Incidence Frequency Selective Surface Polarization Converter [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [44] SMAMH A, BEHDAD N. Wideband Linear-to-Circular Polarization Converters Based on Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016: 64(2): 525-534.
- [45] 袁良昊, 汤炜. 新型开口方环 FSS 圆极化器的研究与设计 [J]. 科技视界, 2017(5): 108-109.  
YUAN L H, TANG W. The Study And Design of Novel Open Square-Loop FSS Circular Polarizer [J]. Science & Technology Vision, 2017(5): 108-109. (in Chinese)
- [46] 张迪, 高军, 张敏, 等. 基于双层 FSS 的高增益微带天线 [C]//全国微波毫米波会议. 上海: 中国电子学会微波分会, 2015.  
ZHANG D, GAO J, ZHANG M, et al. High-Gain Microstrip Antenna Based on Dual-Layer FSS [C]//National Conference on Microwave and Millimeter Wave. Shanghai: Microwave Branch, Chinese Institute of Electronics, 2015. (in Chinese)
- [47] 曹卫平, 李蒙, 王坤, 等. 基于 FSS 的宽带高增益微带天线 [J]. 无线电工程, 2016, 46(11): 59-62.  
CAO W P, LI M, WANG K, et al. Wideband High-Gain Microstrip Antenna Based on FSS [J]. Radio Engineering, 2016, 46(11): 59-62. (in Chinese)
- [48] TAHIR F A. A Novel Single-Layer Frequency Selective Surface for Gain Enhancement of SWB Antennas [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2016, 58(8): 2030-2035.
- [49] KANG D, CHENG G, YU T, et al. Wideband CP Slot Antenna with Backed FSS Reflector [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2017, 11(7): 1045-1050.
- [50] QIANG C, FU Y. A Planer Stealthy Antenna Radome Using Absorptive Frequency Selective Surface [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(8): 1788-1792.
- [51] BASKEY H B, AKHTAR M J. Design of Flexible Hybrid Nanocomposite Structure Based on Frequency Selective Surface for Wideband Radar Cross Section Reduction [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2017, 65(6): 2019-2029.

(编辑:徐楠楠)