

文章编号: 2095-4980(2015)06-0853-06

太赫兹波段频率选择表面的设计与测试

刘小明¹, 俞俊生¹, 陈晓东^{1,2}

(1.北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2.英国伦敦大学 玛丽女王学院, 伦敦)

摘 要: 讨论了太赫兹波段频率选择表面(FSS)在天文探测、遥感卫星以及航天器辐射计系统中的应用。对太赫兹波段频率选择表面的设计、加工及测试方法进行了研究。介绍了太赫兹波段频率选择表面的设计、分析方法及电磁仿真软件。由仿真及实测结果可知, 太赫兹频段的频率选择表面由于受限于物理尺寸, 造成了设计、加工及测试上的困难, 其性能与其他频段相比更易于受到加工精确度的影响。在实际加工过程中, 应尽量采用微纳加工技术进行加工。而在设计频率选择表面时, 应当充分考虑器件厚度以及单元形状对加工造成的影响。测试过程中应当尽量避免反射回路造成的多次回波。

关键词: 太赫兹; 频率选择表面; 加工; 测试

中图分类号: TN015

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0853

Design and measurement of terahertz Frequency Selective Surface

LIU Xiaoming¹, YU Junsheng¹, CHEN Xiaodong^{1,2}

(1.School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2.School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary, University of London, London, UK)

Abstract: The applications of terahertz Frequency Selective Surface(FSS) in radioastronomy, satellite remote sensing, and air borne radiometers have been reviewed, with the focus placed on the design, fabrication and testing of terahertz FSS. Numerical methods and commercial electromagnetic software are discussed for FSS design and analysis. Due to the physical dimension of terahertz FSS, the performance is subjected to the fabrication precision compared to their counterparts in lower frequency range. In consequence, micro/nano-fabrication techniques are preferred in the fabrication. Fabrication precision should be included in the design phase. Multi-echo waves should be avoided in the testing.

Key words: terahertz; Frequency Selective Surface; fabrication; testing

太赫兹波(Terahertz Wave)一般是指频率在 0.1 THz~10 THz 之间的电磁波(根据 IEEE 的标准, 该频段范围为 0.3 THz~10 THz)。太赫兹技术在过去 20 多年里经历了长期、快速的发展, 并且已经广泛应用于科学研究以及技术应用, 比如天文观测、地球大气遥感、太赫兹雷达、安全检测、反恐成像以及无损检测等^[1-2]。在这些应用中, 太赫兹技术在天文观测以及大气遥感中的应用是比较成功的案例。

一般而言, 太赫兹天文观测及大气遥感应用中, 需要对多个频段进行观测, 以得到不同的天体信息及大气分子信息。利用准光技术可以高效地将不同频段的信号进行分离^[3]。而在准光系统中, 将不同频段信号分离的一个关键器件就是频率选择表面(FSS)。比如, AMSU-B(Advanced Microwave Sounding System-B)系统一共有 89 GHz, 150 GHz 和 183.31 GHz 这 3 个接收频段^[4]。这些频段分别对应于 2 个大气窗口以及 1 个氧气吸收峰。AMSU-B 一共采用了 2 个频率选择表面。第 1 个频率选择表面用于分离 175 GHz~191 GHz(透射通道)和 86 GHz~92 GHz, 148 GHz~152 GHz(反射通道)。第 2 个频率选择表面用于分离 86 GHz~92 GHz(透射通道)和 148 GHz~152 GHz(反射通道)。另外, MARSCHALS(Millimetre-wave Airborne Receiver for Spectroscopic Characterisation of Atmospheric Limb-Sounding)微波辐射计是为了探测对流层的氧气、水汽及一氧化碳在垂直分布上的浓度^[5]。该探测器一共采用了 3 个频率选择表面。第 1 个和第 2 个频率选择表面分别用于分离 316 GHz~326 GHz/350 GHz~359 GHz 以及

收稿日期: 2014-11-23; 修回日期: 2015-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401031); 教育部留学归国人员科研启动基金资助项目(2014 留学 041600143)

342 GHz~380 GHz/294 GHz~306 GHz, 而第 3 个频率选择表面则用于分离 342 GHz~349 GHz/373 GHz~380 GHz。

目前, 在太赫兹频段, 频率选择表面的设计与加工还有较大的困难。一方面是由于在太赫兹波段有一些材料的损耗比较大, 不适合制作以介质为衬底的频率选择表面。另一方面是由于在太赫兹波段, 器件本身的物理尺寸过小, 使得加工比较困难, 难以达到设计指标要求; 同时, 小尺寸器件即使加工成功也会受到环境温度以及本身物理特性的影响(比如应力使得表面弯曲形变)。这些实际的困难, 使得在设计频率选择表面时, 有一些原本在微波波段能够得以实现的结构以及单元图形不适合应用于太赫兹波段。本文讨论了太赫兹波段频率选择表面的一般性设计方法和加工过程中需注意的问题, 并且讨论了太赫兹波段频率选择表面的测量方法。

1 FSS 的理论及其设计

1.1 FSS 的分类

FSS 结构是指在导电金属表面上布满周期性的缝隙或介质表面上布满周期性的金属片, 它能有效地控制电磁波的反射和传输特性, 其实质是一种空间滤波器^[3]。图 1 是 2 种典型的 FSS 结构形式: 带阻型、带通型。而高通型、低通型 FSS 也可以通过设计单元形状得以实现。

从工作原理来看, FSS 可以分为 2 种: 一种是谐振式, 一种是非谐振式。谐振式 FSS 如图 1 所示, 其每个单元的长度一般在半个波长或者半波长的整数倍, 从而产生谐振现象。而非谐振式 FSS, 比如打孔结构(Perforated structure), 其工作原理则与谐振式工作原理有较大的差别。在厚金属板上打周期性孔, 其每个单元相当于一个波导, 因此, 低频的电磁波不能够通过。而高频分量则与单元的形状、金属板的厚度以及排列形状有很大的关系。

1.2 谐振式 FSS

当 FSS 的谐振单元在某一频率上谐振时, 这一频率的电磁波、光波被全反射(单元为贴片)或者全透射(单元为缝隙), 而高于或者低于这一频率的波则会被全透射或者全反射^[6-7]。一般情况下, 贴片单元容易产生带阻特性, 缝隙单元容易产生带通特性。谐振式 FSS 的带宽受限于谐振点的谐波阶数。一般一次谐波的带宽要稍微宽一些, 高次谐波的带宽会急剧下降。但要注意的是, 即使是一次谐波, 其带宽也是有限的。对于一般滤波器来说, 通常会定义半功率(也就是 3 dB)宽度作为其带宽参考值。但对于微波辐射计及天文探测来说, 接收机接收到的信号是很微弱的, FSS 本身的插入损耗应当尽量小, 通常情况下不能大于 2 dB, 最好是不能超过 0.5 dB。

开槽型单元是一种非常理想的用于宇航级系统的结构。该结构的一个重要特点就是通过在金属板上加工出各种形状的缝隙单元来实现对频率进行选择通过。最简单的缝隙单元就是偶极子槽, 如图 1(a)所示。这种结构相当于一个缝隙偶极子天线阵。单元的长度大概在半个波长左右, 单元的宽度及厚度远小于一个波长。这种形式的频率选择表面能够透过与开槽方向垂直的极化, 而反射与开槽方向平行的极化。因而它还能同时用作极化方向选择器, 也就是能实现偏振器的功能。但是这种结构的单层 FSS 的频率响应比较平缓, 也就是其 Q 因子比较低。同时, 由于其工作原理是基于谐振现象, 因此这种结构的带宽受限, 而且其过渡带平缓, 对于辐射计系统来说并不是一个特别理想的选择。所以, 在一般情况下, 会采用多层结构来增大带宽, 同时使过渡带更加陡峭。不过, 多层结构也有其缺点, 一方面, 由于多层结构的引入, 实际加工的 FSS 的插入损耗会增加; 另一方面, 组装精确度也会对 FSS 的性能造成影响。层与层之间的错位会使得整体性能下降, 要解决这一问题, 可以采用斜排列的阵列(Skew array)。这种排列方式能够有效地减小层与层单元之间的错位的影响。

相对而言, 开槽结构的形状是受限的。原因很简单, 要保持整个金属片形成一个整体, FSS 的单元就不能形成孤立的区域。而贴片型 FSS 的研究要比开孔型复杂。由于有介质的支撑, 单元形状不再受金属支撑连接的限制, 贴片型 FSS 的贴片形状种类繁多, 且越来越复杂。早期贴片型 FSS 主要是作为反射型频率选择表面来使用, 但是到了 20 世纪 90 年代末期, 除反射型单几何体振子的贴片型 FSS 以外, 又出现了透射型双几何体振子的贴片型 FSS。对于透射型 FSS, 可以通过调整双几何体中尺寸较小几何体的尺寸, 使得高频的反射峰向低频的反射峰移动, 从而减小透射带宽和反射带宽的比值。

片型 FSS 的图形尽管十分丰富, 但其主要的缺点来自于基底的介质损耗。介电损耗的存在往往使得在太赫

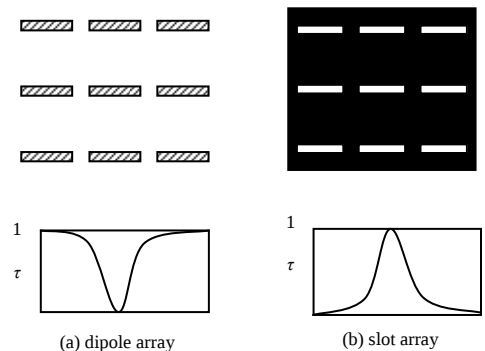


Fig.1 Two types of FSS, τ is the transmission coefficient
图 1 频率选择表面的 2 种类型, τ 为透射系数

兹频段,其插入损耗达到 2 dB 以下。对于辐射计系统来说,这是不可接受的。尽管二氧化硅是比较好的航空材料,其损耗角($\tan \delta$)可以低至 0.002,但与金属相比,其损耗还是可观的。而由加工带来的误差损耗会使得插入损耗进一步增加。

不管是采用哪一种方式进行设计,为了防止出现栅瓣,单元与单元之间的间距应当符合以下要求:

$$\frac{d}{\lambda_{g0}} < \frac{1}{1 + \sin \theta_0} \quad (1)$$

式中: λ_{g0} 为波导波长; θ_0 为设计最大辐射方向。

影响 FSS 的参数有很多,包括单元尺寸、周期大小、介质厚度、入射角度、层间厚度、介电常数,甚至导电率。这些参数对 FSS 的影响是不相同的。通过参数研究可以得到各个参数在设计过程中所对应的性能变化^[8]。

1.3 非谐振式 FSS

最常用的非谐振式 FSS 为打孔结构。在 2000 年以前,打孔结构与开槽结构一样,可能是在航天遥感微波辐射计系统中用得最多的形式,原因在于这种结构有很好的机械强度,能够经受得住发射过程中剧烈的机械振动。到目前为止,这仍然是一类非常重要的结构,经常用于高机械强度要求的 FSS 的设计。

最简单的打孔结构为圆形孔结构。对于具有一定厚度的 FSS,其圆孔单元可以看成是圆波导。在圆波导结构中,主模的截至频率与圆孔的半径 a 有着直接的关系。因此,如果可以求出截至频率与圆孔半径 a 之间的关系表达式,通过逆运算便可求出圆孔半径 a 与截至频率之间的关系表达式,从而通过确定圆孔型 FSS 的截至频率,求得圆孔单元的尺寸。可以使用圆形波导理论进行设计,其截止频率与波导半径 a 的关系为:

$$\begin{cases} f_c = p'_{mn} \frac{c}{2\pi a}, \text{ TE} \\ f_c = p_{mn} \frac{c}{2\pi a}, \text{ TM} \end{cases} \quad (2)$$

式中: p'_{mn} 和 p_{mn} 分别是 $J'_n(k_c r)$ 和 $J_n(k_c r)$ 的 m 次根。 p'_{mn} 和 p_{mn} 中的最小值为 $p'_{11} = 1.841$, 因此可以得出:

$$2a = 1.841 \frac{c}{\pi f_c} \quad (3)$$

这种结构由于是采用圆波导理论进行设计的,因此,其传输与反射特性也可以采用圆波导进行分析。要注意的是,这种结构应当有一定的厚度,才能保证将倏逝波的影响降到最小。对于这种结构的频率选择表面的传输和反射系数,已经有相关文献给出了解析表达式。在文献[9]中,给出了其解析表达式,这些式子成立的条件为 $a > 0.28d$ 和 $d < 0.57$ 。

实际上,不仅仅是圆打孔这一种结构,还有方形孔、矩形孔以及方形孔的变形。另外,对于阵列的排列形式,采用最多的是矩形二维阵列和六边形阵列。

1.4 FSS 分析方法

通常有多种方法可以分析该结构,包括等效电路法^[10]、周期矩量法(Periodic Moment Method, PMM)^[11]、时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法、有限元法(Finite Element Method, FEM)、矢量有限元法(Edge-Based Finite Element Method, EB-FEM)、边界元法(Boundary Element Method, BEM)以及混合算法^[12](比如 MoM/BI-RME)。

等效电路法是一种十分直观的分析方法,对于简单结构可以给出与实验比较吻合的计算结果。其将入射波分为 TE 波和 TM 波 2 种形式,频率选择表面如同产生了 2 个变压器和一个导纳矩阵。TE 模相当于产生了一个并联电路,而 TM 相当于一个串联电路。等效电路法就是将各种结构的几何参量和物理参量化简成一系列的电路参量进行分析。但是对于结构复杂的频率选择表面,这种方法则由于建模过于复杂而不适用。另外,随着计算机技术的发展,数值技术能够给出宽频带范围内比较准确的数值解,因而受到越来越多的关注。

矩量法是一种稳定的计算方法,在矩量法的计算过程中,不会出现其他数值方法计算过程中所出现的“伪解”问题。同时,由于考虑了散射体不同部分之间的耦合,矩量法一直是求解各类积分方程问题的有效方法。但其主要缺点在于,采用其得到的线性方程组,系数矩阵为满矩阵,由于无法直接采用稀疏矩阵的压缩存储和求解技术,随着散射或辐射目标电尺寸的增加,其计算量会急剧增大,所以对于电大尺寸的求解有很大的困难。

FDTD 法是时域麦克斯韦方程的直接数值解法。该方法直接将麦克斯韦时域场方程的微分式或其他微分方程用有限差分代替,得到关于场分量的差分格式,用具有相同电参量的空间网格区模拟被研究体,选取合适的场初

始值和计算空间的边界条件,采用时间步进行迭代的方法,可以得到包括时间变量的电磁场量及其位函数的 4 位数值解。通过傅里叶变换可求得三维空间的频域解。该方法的主要优点是建模简单,但对于电大尺寸的求解同样有计算量过大的问题。

其他几种数值算法同样存在着对于电大尺寸物体求解的问题。为了减小计算量,有人提出了混合算法,如文献[12-17]。这些方法部分解决了传统数值计算方法时间过长,计算量过大的问题。而利用周期性边界条件,可以有效地提高计算效率。其中,PMM 算法是一种非常有效的分析方法。PMM 是基于平面波展开法和互阻抗计算法的综合分析方法,能够对具有几乎任意形状的单元的单层或者多层 FSS 进行分析研究。PMM 分析法最早是由美国 Ohio 州立大学的 Munk 教授等人发展起来的^[18],英国伦敦大学玛丽女王学院的电磁与天线研究组在前人的研究基础上对其进行了进一步的改进,用三角形和矩形脊顶方程法进行电流展开替代了线性电流展开,可分析的 FSS 几何单元既包括电流阵列也包括磁流阵列^[19]。这种方法最大的优点在于,一方面各自单元内采用的是矢量法;另一方面各个单元之间采用的是互阻抗法,也就是考虑到了单元之间的耦合效应。这种处理方式不仅保证了计算精确度,同时又提高了计算效率。

随着数值计算技术与计算机计算的发展,目前已经有多款商业仿真软件可以用于频率表面的设计与分析。比如 CST Microwave Studio 模块、HFSS 以及 FEKO。这些商业软件将电磁数值计算与 CAD 技术结合在一起,已经形成了成熟的可视化建模与仿真平台。CST Microwave Studio 主要是基于积分方法的频域求解方法,具有较高的计算效率;HFSS 主要是基于有限元法加周期性边界条件;而 FEKO 主要采用的是矢量法加周期性边界条件。

2 FSS 的加工

FSS 的加工有很多种方法,比如印刷电路板技术中的腐蚀洗刻的方法、粘贴工艺、喷印技术、机械加工方法,以及激光束或者电子束蚀刻方法^[20-22]。腐蚀洗刻就是结合丝网印制技术把基板上需要保护的部位遮住,然后用化学或者电化学的方法洗蚀掉不需要的部位,最后退掉保护膜,得到制品的一种加工方式。这种方法适用于贴片型或者较薄的开槽型 FSS 的加工。粘贴工艺是将薄铜片或其他金属贴片使用特殊的粘合剂,经过分层粘合到介质衬底上,适用于单元图形简单的频率选择表面的制作,并可进行多层频率选择表面的制作。高导电性印刷墨水的出现,使得用银墨水的丝网印刷方法得以实现,这种方法可用于多层 FSS 结构的制作。喷印技术,可以将导电材料直接写成设计的图样。对于覆铜板或其他在衬底表面镀有金属的平板,可采用电腐蚀的方法加工 FSS 阵列图形,而且加工成本较低。机械加工技术一般可以用于打孔型 FSS 的加工。由于打孔结构一般比较厚,传统的蚀刻技术的加工精确度受到很大的限制。电线切割精确度目前可以达到 $0.5\ \mu\text{m}$,最大加工厚度可以达到 $1\ \text{m}$ 。

一般情况下,腐蚀洗刻的方法以及机械打孔适合于微波段的 FSS 的加工。原因在于,腐蚀洗刻的方法所产生的边缘粗糙度过大,在微波波段时,这种粗糙度远小于波长。但当系统工作在太赫兹波段时,由边缘粗糙度所产生的误差会急剧加大,从而影响器件的性能。精密机械打孔所存在的问题是:太赫兹波段的频率选择表面的单元孔比较小,造成加工上的困难;频率选择表面的单元数过多,打孔比较费时。因此,在太赫兹波段,激光束或者电子束蚀刻方法可能是最可行的方法之一。

随着半导体技术的发展,微纳加工技术的精确度已经进一步提高。这些加工技术也为 FSS 的加工带来方便。从公开报道的文献来看,如文献[5]中的图 11,加工的最小特征尺寸已经能达到 $15\ \mu\text{m}$,该频率选择表面可以用于 $657.3/456.7\ \text{GHz}$ 的滤波,亦即传输 $657.3\ \text{GHz}$ 的信号,而反射 $456.7\ \text{GHz}$ 的信号。而由英国卡迪夫大学研制的频率选择表面工作在 $1\ \text{THz}$ 以上,其传输率能达到 90%以上。

3 FSS 的测试

FSS 的测试方法主要是采用自由空间测量方法,其优点在于其传输损耗小,能够有效地控制波束的大小。

一般的自由空间测量方法主要测量其透射系数,主要原因是系统结构比较简单,直接用 2 个喇叭进行测量。因此,只能用空气中的传输作为参考测量。但这种直接照射的方法带来的问题是接收喇叭会有比较大的能量损失,这是由于从发射喇叭发射出的电磁波有扩散效应,从而造成与接收喇叭的波束大小不匹配。鉴于这种方法过于简单,目前采用最多的方法是利用准光器件对波束重聚束。重聚束器件一般是透镜或者是椭球反射镜,这些器件能够将出射的高斯波束转换成另外一个高斯波束,样品的测量一般是在高斯波束的束腰位置进行,其优点在于束腰处的相位分布类似于平面波分布,在束腰处测量能达到最佳效果^[23]。

目前,对于准光系统测量方法的校准有大量研究,如文献[24-25]。尽管这些方法在一定程度上可以对准光

系统进行相位上的纠正,但其实际效果还不是特别准确。因此,要想准确地测量相位信息,还要求对校准技术进行进一步的研究。但要说明的是,一旦传输通道得到校准,反射通道自动处于校准状态,这是由于反射通道与传输通道是处理光路对称状态所决定的,也就是其光程是一致的,而其波束转换也是相同的。

还有另外一种测量方法即波导测量方法,如图2所示。这种测量方法的优点在于可以使被测器件处于可控传输通道中,甚至可以通过改变波导的长度来进行相位的校准。但这种方法的缺点也比较明显,FSS通常是工作在一定的入射角度的,而这种方法很难对不同角度时的特性进行测量。

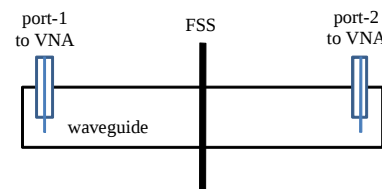


Fig.2 Testing of FSS using a waveguide
图2 用波导技术测量频率选择表面

4 结论

对 FSS 的设计理论及方法进行了讨论,并对相关的数值计算技术进行了比较。目前的表面加工技术中,光刻技术是精确度比较高的加工方法,能保证太赫兹频段的加工精确度。利用激光加工技术加工的打孔型 FSS 表明,其测量结果与仿真结果达到了比较好的一致性。从目前的测量技术来看,准光技术是比较可行的一种方案,但该方案在未来工作中应当解决准确校准相位的问题。

参考文献:

- [1] 谢巍,侯丽伟,潘鸣. 被动太赫兹成像二维扫描技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):176-179. (XIE Wei, HOU Liwei, Pan Ming. 2-D scanning technology in passive terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):176-179.)
- [2] 闵碧波,曾嫦娥,印欣,等. 太赫兹技术在军事和航天领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):351-354. (MIN Bibo, ZENG Change, YIN Xin, et al. Application of terahertz techniques in military and space[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):351-354.)
- [3] 俞俊生,陈晓东. 毫米波与亚毫米波准光技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2010. (YU Junsheng, CHEN Xiaodong. Millimeter and Sub-Millimeter Wave Quasi-Optical Technology[M]. Beijing: Press of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.)
- [4] Martin R J, Martin D H. Quasi-optical antennas for radiometric remote-sensing[J]. Electronics and Communication Engineering Journal, 1996,8(1):37-48.
- [5] Dickie Raymond, Cahill Robert, Fusco Vincent, et al. THz frequency selective surface filters for earth observation remote sensing instruments[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(2):450-460.
- [6] Antonopoulos C, Cahill R. Multilayer frequency-selective surfaces for millimetre and submillimetre wave applications[J]. IEEE Proceedings on Microwaves, Antennas, Propagation, 1997,144(6):415-420.
- [7] CHAO C C. Transmission through a conducting screen perforated periodically with aperture[J]. IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques, 1970,18(9):627-632.
- [8] 苏汉生. 准光系统中 Dichroic 平板的设计及性能改进[D]. 北京:北京邮电大学, 2009. (SU Hansheng. The design and improvement of dichroic plate in quasi-optical system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.)
- [9] Winnewisser C, Lewen F F, Schall M, et al. Characterization and application of dichroic filters in the 0.1-3 THz region[J]. IEEE Transactions on MTT, 2000,48(4):744-749.
- [10] Dubrovka R, Vazquez J, Parini C, et al. Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surface[J]. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 2006,153(3):213-220.
- [11] 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.
- [12] Bozzi M, Perregrini L, Weinzierl J, et al. Efficient analysis of quasi-optical filters by a hybrid MoM/BI-RME method[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2001,49(7):1054-1064.
- [13] Lucas E W, Fontana T P. A 3-D hybrid finite element/boundary element method for the unified radiation and scattering analysis of general infinite periodic arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1995,43(2):145-153.
- [14] Eibert T F, Volakis J L. Adaptive integral method for hybrid FE/BI modeling of 3D doubly periodic structures[J]. IEEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 1999,146(1):17-22.

- [15] Eibert T F, Volakis J L, Wilton D R, et al. Hybrid FE/BI modeling of 3-D doubly periodic structures utilizing triangular prismatic elements and an MPIE formulation accelerated by the Ewald transformation[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1999, 47(5): 843–850.
- [16] Eibert T F, Volakis J L. Fast spectral domain algorithm for hybrid finite element/boundary integral modeling of infinite periodic arrays[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999, 2: 1206–1209.
- [17] Cwik T, Fernandez S, Ksendzov A, et al. Multi-bandwidth frequency selective surfaces for near infrared filtering: Design and optimization[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999, 2: 1726–1729.
- [18] Munk B A. Frequency Selective Surface: Theory and Design[M]. New York: Wiley Interscience, 2000.
- [19] Rieckmann C, Dubrovka R, Parini C G. Numerical and experimental investigation on the performance of planar millimetre-wave frequency selective surface[C]// The European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006. Nice, France: [s.n.], 2006.
- [20] 吕明云, 祝明, 王焕青, 等. 复杂曲面 FSS 加工系统研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 524–527. (LV Mingyun, ZHU Ming, WANG Huanqing, et al. Digital machining system of complex curved-surface FSS[J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(4): 524–527.)
- [21] Parker E A, Philips B. Some aspects of curved frequency selective surfaces[C]// IEE Colloquium on Advances in Electromagnetic Screens, Radomes and Materials (Digest No.: 1996/270). London: [s.n.], 1996: 5/1–5/6.
- [22] Marhefka R J, Young J D. Design, fabrication and measurement of an FSS antenna ground plane[C]// 2007 IEEE Antennas and Propagation International Symposium. Honolulu, HI: [s.n.], 2007: 3972–3975.
- [23] LIU Xiaoming, CHEN Huijuan, YANG Bing, et al. Dielectric property measurement of gold nanoparticles dispersions in the millimeter wave range[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2013, 34(2): 140–151.
- [24] Rolfes I, Schiek B. Calibration methods for microwave free space measurements[J]. Advances in Radio Science, 2004, 2: 19–25.
- [25] Boureau D, Peden A, Maguer S L. A quasi-optical free-space measurement setup without time-domain gating for material characterization in the W-band[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(6): 2022–2028.

作者简介:



刘小明(1983–), 男, 江西省永丰县人, 博士, 讲师, 主要研究方向为太赫兹科学与技术、微波技术以及生物电磁技术。email: xiaoming_liu@bupt.edu.cn.

俞俊生(1961–), 男, 安徽省无为县人, 教授, 主要研究方向为毫米波与亚毫米波、太赫兹天线技术。

陈晓东(1962–), 男, 伦敦大学玛丽女王学院教授, 北京邮电大学兼职教授, 电子科技大学“千人计划教授”, 主要研究方向为天线与微波器件、太赫兹技术、生物电磁。

第二十九届国际弹道大会征稿启事

由国际弹道学会主办的第 29 届国际弹道大会将于 2016 年 5 月 9~13 日在英国爱丁堡召开。这是世界常规兵器领域举办的一项重要学术交流活动。

目前, 会议投稿系统已经全面开通, 网站支持会议注册、提交论文摘要以及论文和陈述报告等。提交论文摘要的截止日期为 2015 年 7 月。请有意参会的专家学者踊跃投稿, 征文范围可登陆国际弹道学会官网了解。我会 *Defence Technology*(防务技术)期刊作为本届大会的会议特刊, 同时接受论文投递, 特刊截稿日期为 2015 年 9 月 15 日。

有关会议详细信息请登录国际弹道大会官方网站 <http://www.ballistics.org>, 或登录 *Defence Technology*(防务技术)官方网站 <http://www.elsevier.com/journals/defence-technology/2214-9147>。

《防务技术》编辑部联系人: 李莹 010-68964830 15210511025

学术与组织管理部联系人: 葛萌 010-68963055 15201643738