

文章编号: 2095-4980(2013)04-0595-06

## 毫米波/亚毫米波临边探测仪准光技术

王新彪<sup>a,b</sup>, 李靖<sup>a,b</sup>, 张升伟<sup>a,b</sup>

(中国科学院 a.微波遥感技术重点实验室; b.空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要:**毫米波/亚毫米波临边探测仪中的辐射计通常需要工作在多个频段,如多频段共馈源,则其带宽往往不能达到要求。当多个探测频段共用一个主反射镜,采用准光学技术实现探测频率分离,则可以节省很大的空间。准光极化线栅和准光频率选择器相配合用来分离频率范围在118 GHz~340 GHz的4个频带,准光极化线栅是一个准光功率分配/合成器,将4个频段的信号分为(183 GHz/240 GHz)和(118 GHz/340 GHz)2组信号。准光频率选择器是一个高频频率选择表面,可以将高频段的电磁波透射,低频段的电磁波反射。反射和透射的电磁波分别进入2个频段的接收模块,实现信号的接收。本文利用HFSS仿真软件对周期单元的结构参数进行仿真优化,并通过仿真结果完成了准光极化线栅和准光频率选择器的技术实现。实测结果与毫米波/亚毫米波临边探测仪的设计要求一致。

**关键词:**毫米波亚毫米波; 临边探测仪; 准光技术; 极化线栅; 频率选择表面

**中图分类号:** TN015

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201304.0595

## Quasi-optical technology in millimeter/sub-millimeter limb sounder

WANG Xin-biao<sup>a,b</sup>, LI Jing<sup>a,b</sup>, ZHANG Sheng-wei<sup>a,b</sup>

(a.Microwave Remote Sensing Technology Laboratory; b.Space Science and Applied Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Millimeter/sub-millimeter limb sounder plays an important role in atmospheric science, environmental science and global climate change research. Millimeter/sub-millimeter limb sounding radiometer usually needs to operate in multiple frequency bands, such as multi-band of feed, therefore its bandwidth can not meet the requirements usually. When multiple detection bands share a primary mirror, using quasi-optical technology to achieve the detection of frequency separation can save a lot of space. The combination of quasi-optical polarization wire grid and quasi-optical frequency selector can be used to separate four bands of frequency ranging from 118 GHz to 340 GHz. Quasi-optical polarization wire grid is a quasi-optical power divider/combiner, which separates the four bands signals into 183 GHz/240 GHz and 118 GHz/340 GHz; while quasi-optical frequency selector is a high frequency selective surface, which can transmit high-frequency electromagnetic waves and reflect low frequency electromagnetic waves. Reflected and transmitted electromagnetic waves enter into two receiving modules to achieve signal reception. In this paper, the structural parameters are simulated and optimized in HFSS for the periodic unit. The quasi-optical polarization wire grid and quasi-optical frequency selector technology are implemented according to simulation results. The practically measured results are consistent to the design requirements of millimeter/sub-millimeter limb sounding instrument.

**Key words:** millimeter/sub-millimeter; limb sounder; quasi-optical technology; polarized wire grid; frequency selective surface

实现大气临边观测的一个重要载荷就是微波临边探测仪<sup>[1]</sup>。由于频段定义的重叠性,微波临边探测器主要覆盖的频段是毫米波高频端(如67 GHz,118 GHz,183 GHz,240 GHz)、亚毫米波频段(340 GHz,640 GHz)或太赫兹频段(2.5 THz),因此,微波临边探测仪也可以称为毫米波/亚毫米波临边探测仪。毫米波/亚毫米波临边探测仪主要用

于对地球大气对流层上部和平流层下部进行探测。对于气候变化的辐射驱动、对流层/平流层物质与能量交换、臭氧的变化、对流层化学等大气与环境科学、全球变化研究具有重要意义,是大气科学、环境科学和全球变化研究的重要领域。微波临边探测仪一般采用毫米波/亚毫米波波带,由于波导器件尺寸必须是波长的分比,随频率升高而减小,在这样的高频段,器件精密加工难度增大,成本迅速增加;功率容量受限于器件尺寸,无法进一步提高;接收机系统不能采用低频时的波导技术。准光学技术多采用类似光学系统的元器件如介质透镜、准光极化线栅、准光频率选择器、反射器、准光谐振腔等。准光学器件譬如波束分离器、透镜等不理想引起的变化将在大波束区域中被平均,从而降低本地容限要求,并且准光学器件尺寸大于工作波长,相对来说易于加工<sup>[2]</sup>。

毫米波/亚毫米波临边探测仪中的辐射计通常需要工作在多个频段,如果利用一路馈源接收信号,则其带宽往往不能达到要求。当采用多路通道合成准光网络时,各个子通道能通过信号处理器件共用一个主反射镜,可以节省很大的空间。准光极化线栅<sup>[3]</sup>是一个准光多功能器,将 4 个频段的信号分为(183 GHz,240 GHz)和(118 GHz,340 GHz)2 组信号。准光频率选择器<sup>[4-5]</sup>是一个高频频率选择表面,可以将高频段的电磁波透射,低频段的电磁波反射。反射和透射的电磁波分别进入 2 个频段的接收模块,实现信号的接收。

本文重点介绍应用在毫米波/亚毫米波波带的准光频率选择器(Frequency Selective Surface, FSS)和准光极化线栅。

## 1 准光频率选择器

近些年来,准光频率选择器(FSS)作为分离准光学高斯波束的无源滤波器有着越来越广泛的应用领域。频率选择器的特性主要表现在作用于入射的不同频率高斯波束,它可以将低频的高斯波束反射,反射波束的方向由费尼耳反射定律确定,将高频的波束透射,透射波束与原入射波束方向一致。在准光系统中,频率选择器的损耗必须保持低。频率选择器的结构示意图如图 1 所示,它是由图中的基本结构单元周期排列组合而成,对周期单元的尺寸进行适当的设计,使得频率选择器表现出带内透射和带内反射的特性。

以 Floquet 谐波展开为基础并结合矩量法的分析方法,通常被称为周期矩量法(Periodic Method of Moments, PMM)<sup>[6]</sup>。PMM 法是一种有效的处理频率选择表面上任意形式小单元的方法,该方法基于平面波展开和互阻抗计算法,无论是贴片型还是开槽型或者在一个任意形状的绝缘撑架上将两者混合都能计算。运用周期矩量法,对工作频带内高斯波束的透射系数和反射系数进行数值计算,从而得到频率选择器的频带特性。虽然模型分析是建立在无限大平面 FSS 结构之上,但是在微波毫米波系统中,由于波束的半径很小,一定大小的 FSS 结构可以作为无限大平面 FSS 来分析,这种等效在实践中是合理的。

Ansoft HFSS 软件在版本 11 中引入了功能强大的 Floquet 端口, Floquet 端口基于 Floquet 模式进行场求解,用于二维平面周期性结构的仿真设计,准光频率选择器正是应用 Floquet 端口的恰当例子。与波端口的求解方式类似, Floquet 端口求解的反射和传输系数能够以 S 参数的形式显示。使用 Floquet 端口激励并结合周期性边界,能够像传统的波导端口激励一样轻松地分析周期性结构的电磁特性。此外, Floquet 端口允许用户指定端口入射波的斜入射角和极化方式,然后从求解结果中选择所关心的极化分量。

平面周期性结构可以看作由一个个相同的单元(Unit cell)组成,用 Floquet 端口和主从边界条件分析平面周期性结构,用户只需要提取其中一个单元,然后建模,用 HFSS 11 完成 300 GHz 圆波导式 FSS 仿真的过程示意图见图 2。

## 2 准光频率选择器技术实现及测量结果

Ansoft HFSS 的版本 11 中的 Floquet 端口可以用来解决平面周期结构问题。它将频率选择表面分成上下空气区

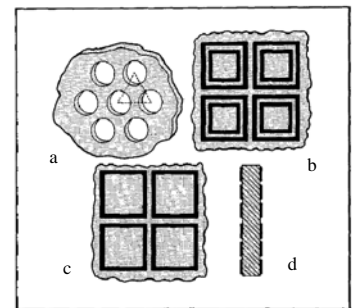


Fig.1 Schematic diagram of frequency selector  
图 1 频率选择器结构示意图

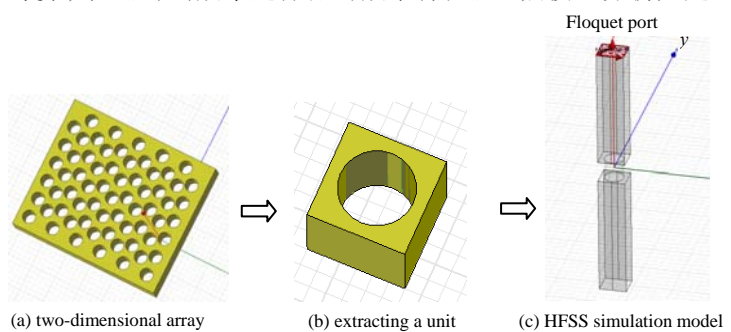


Fig.2 Circular waveguide FSS periodic structure diagram and HFSS simulation model  
图 2 圆波导式 FSS 的周期结构示意图及 HFSS 仿真模型

域和频率选择表面区域，在各个区域中电磁场展开为其对应的Floquet模式组，在区域交界面进行场匹配，就可以得到展开系数，从而获得频率选择表面对于电磁波的反射和透射特性。

圆波导式FSS由于其宽的通带特性和一体式稳固结构特别适合应用在星载微波临边探测仪中。圆波导阵列有如图3所示的错位60°排列和垂直排列2种排列方式。

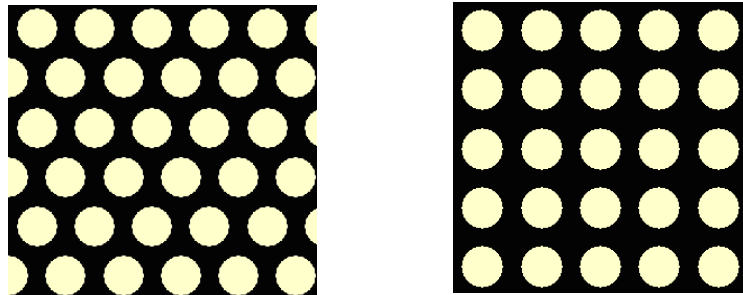


Fig.3 Schematic diagram of dislocation 60° arrangement(left) and vertical arrangement(right) 图3 错位60°排列(左图)和垂直排列(右图)示意图

采用2种排列方式的HFSS建模模型也有所区别，主要是主从边界的设定和Floquet端口的设定有所不同。如图4~图5所示。

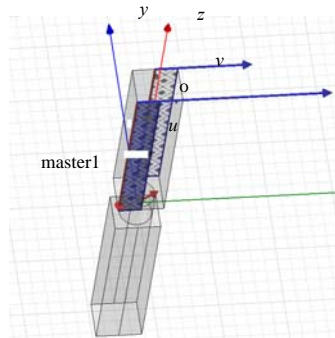


Fig.4 HFSS model—dislocation 60° arrangement 图4 错位 60°排列 HFSS 模型

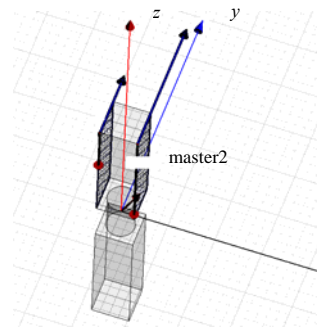


Fig.5 HFSS model—vertical arrangement 图5 垂直排列HFSS模型

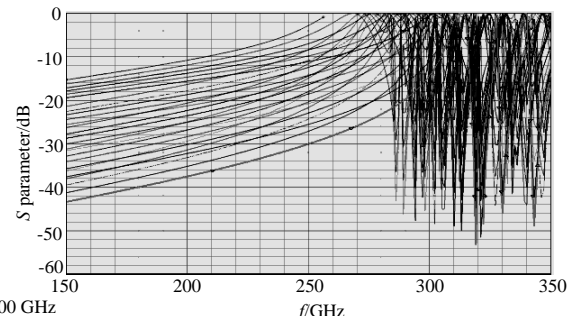
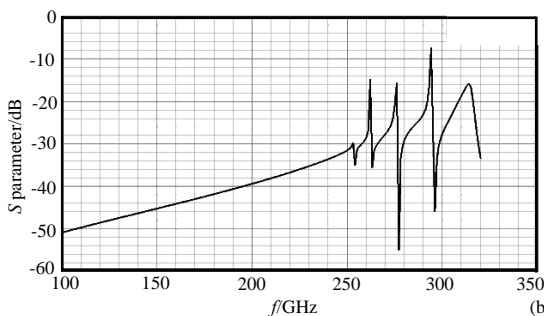
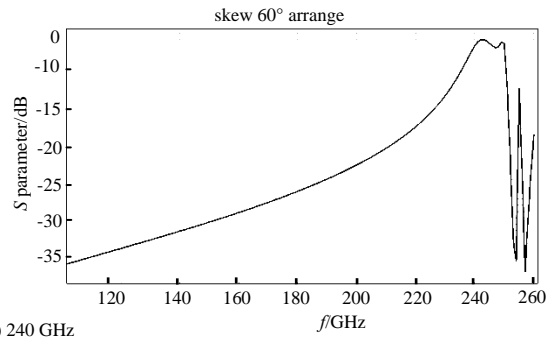
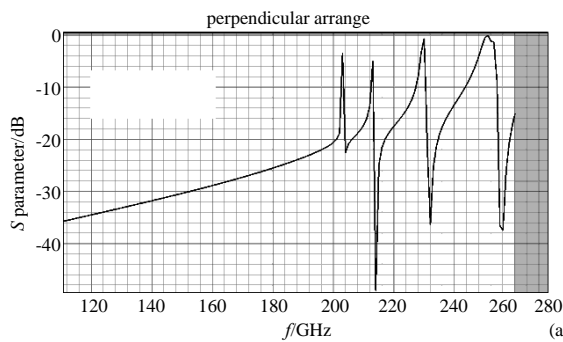


Fig.6 Simulation results of 240 GHz and 300 GHz quasi-optical frequency splitter(Theta=45°, Phi=0°) 图6 Theta=45°, Phi=0°时240 GHz和300 GHz准光频率分离器的通带特性仿真结果

电磁波的入射角直接影响到FSS的通带特性，由于分频的应用性质，在入射平面的夹角(Theta)一般为45°，但

是在FSS所在的平面上,电磁波入射方向和平面周期单元排列方向之间的夹角( $\Phi$ )也直接影响着FSS的通带特性。本文设计了频段分别为240 GHz和300 GHz的圆波导式FSS,分别采用了错位60°排列和垂直排列方式。对不同电磁波入射角情况下的FSS通带特性进行了仿真:在错位60°排列方式时, $\Theta=45^\circ$ , $\Phi=0^\circ$ 和 $30^\circ$ 。在垂直排列方式时, $\Theta=45^\circ$ , $\Phi=0^\circ$ 和 $45^\circ$ 。由于 $\Phi=0^\circ$ 时入射角容易实现,测量比较方便,如是本文先仿真 $\Theta=45^\circ$ , $\Phi=0^\circ$ 时240 GHz和300 GHz准光频率分离器的通带特性,然后通过仿真结果选择240 GHz圆波导半径为0.34 mm,300 GHz圆波导半径为0.25 mm,FSS板厚1 mm进行实际加工,并进行了实际测量,仿真结果和实测结果分别如图6和图7所示。由图6和图7可知,当 $\Theta=45^\circ$ , $\Phi=0^\circ$ 时,错位60°排列方式比垂直排列方式通带特性要好。

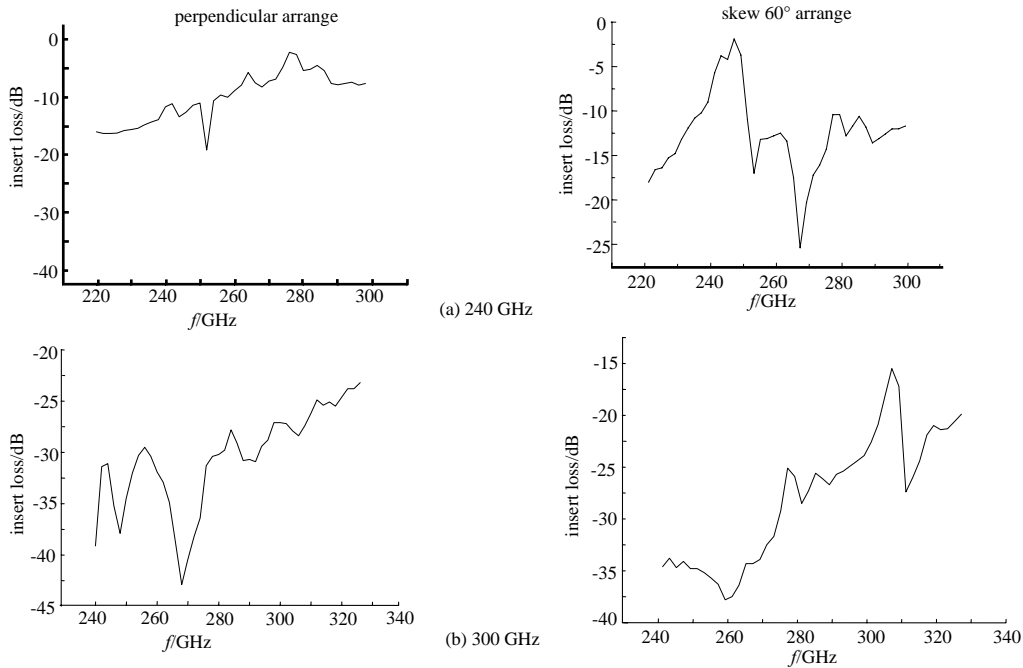


Fig.7 Measured results of 240 GHz and 300 GHz quasi-optical frequency splitter ( $\Theta=45^\circ$ ,  $\Phi=0^\circ$ )

图7  $\Theta=45^\circ$ ,  $\Phi=0^\circ$ 时240 GHz和300 GHz准光频率分离器的通带特性实测结果

由于实测运用远场近似,而仿真运用平面波,所以实测结果和仿真结果在幅度上有一定的偏差,但是在频率轴上,通带出现的频率范围和仿真结果基本一致。为了得到更好的实测结果,下一步测量时拟采用紧缩场来实现更高精确度的测量。

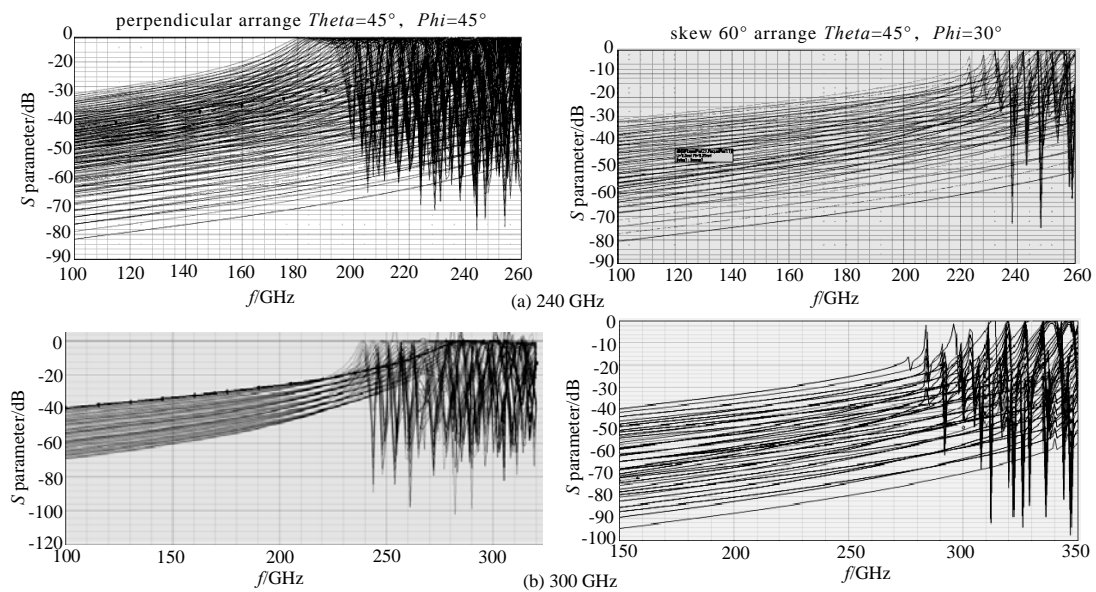


Fig.8 More incident electromagnetic wave simulation results

图8 更多电磁波入射角仿真结果

由于干涉效应,不同电磁波入射角的栅瓣分布不同,直接影响FSS的通带特性。进一步对垂直排列方式进行

仿真，入射角  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=45^\circ$  和错位  $60^\circ$  排列方式时，入射角  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=30^\circ$ 。仿真结果如图 8 所示。

由图 8 的仿真结果可知：采用垂直排列  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=45^\circ$  方式的 FSS 通带特性要明显好于采用错位  $60^\circ$  排列  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=30^\circ$  方式的 FSS，通带带宽要高于图 6 中采用错位  $60^\circ$  排列  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=0^\circ$  方式的 FSS。另外，采用错位  $60^\circ$  排列  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=30^\circ$  方式和图 6 中垂直排列  $\theta=45^\circ$ ， $\phi=0^\circ$  方式的 FSS 干涉栅瓣严重影响了其通带性能。

### 3 准光极化线栅

准光极化线栅(图 9)作为一种低损耗的极化器，广泛使用在微波和亚毫米波段。它由一组等间距的平行金属细丝构成，当入射电磁波的极化方向和线栅排列方向平行时，理想的准光极化线栅能够完全反射入射的电磁波功率；当入射电磁波的极化方向垂直于线栅排列方向时，理想准光极化线栅能够完全传输入射电磁波的功率。根据这种特性可以用其将一路信号分离为极化方向相互垂直的 2 组信号。

设线栅为圆形导线，半径为  $a$ ，导线间距为  $g$ ，且入射微波波长  $\lambda \geq g$ ，线栅与入射波的关系如图 9 所示。

当电磁波极化方向平行于线栅排列方向时，功率反射系数为：

$$r_{\parallel} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2g}{\lambda} \ln \frac{g}{2\pi a}\right)^2} \tag{1}$$

当电磁波极化方向垂直于线栅排列方向时，功率反射系数为：

$$r_{\perp} = \frac{\left(\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda g}\right)^2}{1 + \left(\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda g}\right)^2} \tag{2}$$

入射电磁波极化分量与线栅排列方向平行时，当  $\lambda/g = g/a = 10, \theta = 45^\circ$  时，可得反射系数  $\Gamma = 0.996$ ，平行极化分量几乎全部反射。而对极化方向垂直于线栅导线的电场分量，线栅几乎是透明的。

线栅作为极化分离器对入射波进行极化分离，但其自身也不可避免地引入一定的交叉极化。线栅作为极化分离器使用时应当注意以下几个方面：1) 波束传播方向与线栅方向垂直时线栅引入的交叉极化是二阶小量。2) 波束在线栅的边缘电平应当在  $-30$  dB 以下，否则线栅的波束截断效应将恶化后续波束处理所能达到的性能。3) 入射波束宽度不能太宽(如  $-10$  dB 的宽度大于  $80^\circ$ )，否则线栅不但不能起到极化分离作用，而且将严重恶化入射波束交叉极化特性<sup>[7]</sup>。

### 4 准光极化线栅的技术实现及测量结果

由于线栅也可以看作是平面周期性结构，因此采用 HFSS 11 的 Floquet 端口也可以实现准光极化线栅的仿真分析。同时，可以将极化线栅放置在波导中，在波导的一端加上激励，然后通过测量输出端和激励端的 S 参数来仿真电磁波极化方向平行与极化线栅的反射特性和电磁波极化方向垂直与极化线栅的穿透特性。

电磁波电场矢量平行于极化线栅和垂直于极化线栅的 HFSS 仿真模型如图 10 所示。

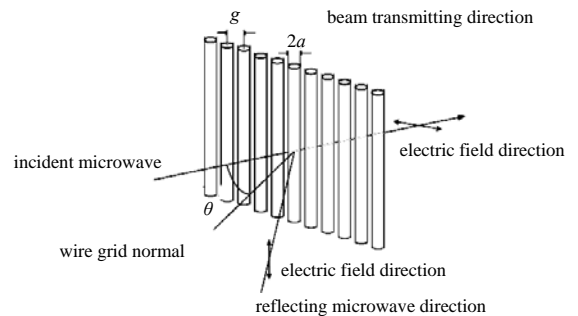


Fig.9 Quasi-optical polarization grid  
图 9 准光极化栅网

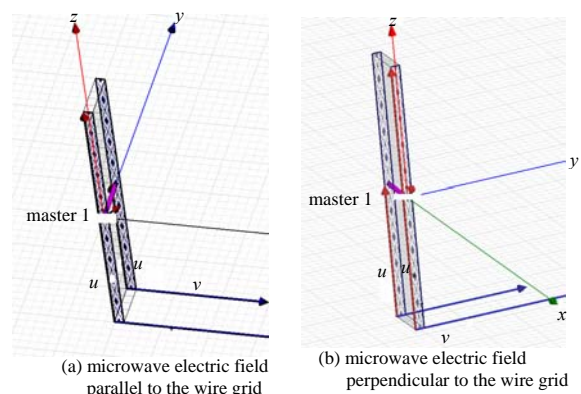


Fig.10 HFSS simulation model diagram of quasi-optical polarization wire grids  
图 10 准光极化线栅的 HFSS 仿真模型图



300 GHz准光极化线栅不同参数的HFSS仿真结果如图11所示。

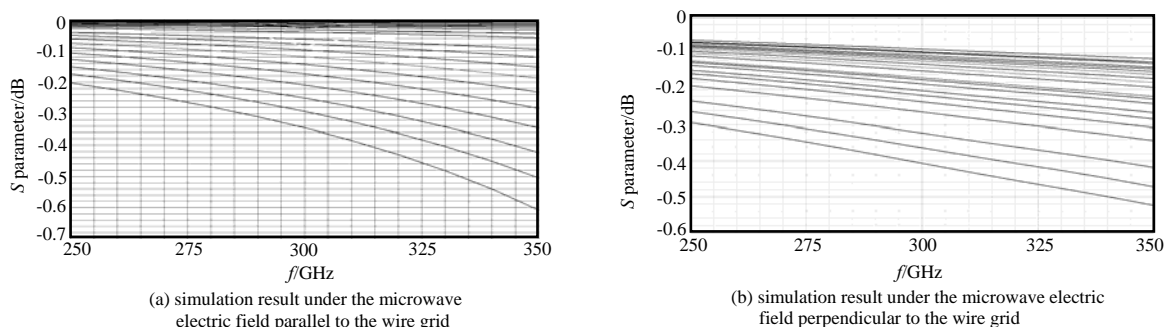


Fig.11 HFSS simulation results of 300 GHz quasi-optical polarization wire grid in different parameters

图 11 300 GHz 准光极化线栅不同参数的 HFSS 仿真结果

由图11的仿真结果可知，300 GHz极化线栅要达到比较好的性能，其金属线的直径一般要小于等于0.1 mm，金属线之间的间隔要小于等于0.3 mm，这对机械加工技术及精确度提出了较高的要求。本文拟采用印制板技术来实现高精度的极化线栅，具体技术实现正在进行中。

## 5 结论

本文给出了应用在毫米波/亚毫米波临边探测仪中的准光频率分离器和准光极化线栅的设计、仿真及技术实现。由于干涉效应，不同电磁波入射角的栅瓣分布不同，直接影响FSS的通带特性，通过仿真分析得知：采用垂直排列 $\theta=45^\circ$ ， $\phi=45^\circ$ 方式的FSS通带特性要明显好于采用错位 $60^\circ$ 排列 $\theta=45^\circ$ ， $\phi=30^\circ$ 方式的FSS，通带带宽要高于采用错位 $60^\circ$ 排列 $\theta=45^\circ$ ， $\phi=0^\circ$ 方式的FSS。另外，采用错位 $60^\circ$ 排列 $\theta=45^\circ$ ， $\phi=30^\circ$ 方式和垂直排列 $\theta=45^\circ$ ， $\phi=0^\circ$ 方式的FSS干涉栅瓣严重影响了其通带性能。通过对300 GHz准光极化线栅的仿真分析得知：300 GHz极化线栅要达到比较好的性能，其金属线的直径一般要小于等于0.1 mm，金属线之间的间隔要小于等于0.3 mm。本文拟采用印制板技术来完成高精度极化线栅的技术实现。

## 参考文献：

- [1] Schoeberl M R, Douglass A R, Hilsenrath E, et al. Overview of the EOS Aura mission[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2006, 44(5):1066-1074.
- [2] 程岳云. 毫米波天馈系统的准光学分析和近场测量研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心, 2010. (CHEN Yueyun. Quasi-optical analysis and research of near-field measurements of antenna system in millimeter band[D]. Beijing:Center for Space Science and Application Research, 2010.)
- [3] LIU Yunfei, SHI Shengcai, YU Shenglin. Transmission Characteristics of a Gaussian Electromagnetic beam by a Cylindrical Wire Grid[J]. Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(12):1727-1742.
- [4] Wu T K. Frequency Selective Surface and Grid Array[M]. [S.l.]:John Wiley&Sona, Inc, 1995.
- [5] Makimoto, Sarabandi K. Single-Layer High-Order Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2008, 20(4):774-781.
- [6] 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 submillimeter wave quasioptical technology[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2010.)
- [7] Chu T S, Gans M J, Legg W E. Quasi-Optical Polarization Diplexing of Microwaves[J]. The Bell System Technical Journal, 1975, 54(10):1665-1680.

## 作者简介：



王新彪(1984-), 男, 湖北省孝感市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为微波辐射测量研究及辐射计的研制. email:wangxinbiao@mirslab.cn.

李靖(1968-), 男, 沈阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微波遥感技术及应用.

张升伟(1964-), 男, 济南市人, 硕士, 博士生导师, 主要研究方向为被动微波遥感及微波辐射计研究.