

文章编号: 2095-4980(2022)07-0631-22

# 毫米波及太赫兹准光学技术：理论、应用与发展

刘小明<sup>1</sup>, 俞俊生<sup>2</sup>, 陈晓东<sup>2,3</sup>(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002; 2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876;  
3. 英国伦敦玛丽女王大学 电子工程与计算机学院, 英国 伦敦)

**摘 要:** 针对毫米波及太赫兹技术在遥感、天文探测以及成像等领域的应用, 讨论了准光学技术的基本原理、关键器件、系统构成及其技术优势; 探讨了准光学技术国内外现状及未来的发展趋势。准光学技术是基于高斯波束在自由空间中传播而进行系统设计与分析的一种技术。利用准光学技术实现的毫米波及太赫兹系统具有高功率处理能力, 具备多极化、低传输损耗以及紧凑性等优点。准光学技术在未来的各个领域将会有更加广阔的应用前景。

**关键词:** 毫米波; 太赫兹; 准光学技术; 高斯波束; 波束波导; 射电天文; 遥感; 成像探测

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021299

## Quasi-optical technology in the millimeter and terahertz wave ranges: theory, applications and development

LIU Xiaoming<sup>1</sup>, YU Junsheng<sup>2</sup>, CHEN Xiaodong<sup>2,3</sup>(1.School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu Anhui 241002, China;  
2.School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
3.School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary University of London, London, E1 4NS, UK)

**Abstract:** This paper gives an overview to the fundamental principles, key components, system design and technical advantages of quasi-optical technology, particularly for its applications in the millimeter and terahertz systems in fields of remote sensing, radioastronomy, and imaging. A perspective to the state-of-the-art and future development of quasi-optical technology has been given. Quasi-optical technology is a set of system design and analysis techniques based on Gaussian beam propagation in free space. Systems based on quasi-optical technology bears advantages of high-power handling capability, multi-polarization, low transmission loss, and high compactness. In the future, quasi-optical technology will be seeking more applications in these areas and further development can be highly envisaged.

**Keywords:** millimeter wave; terahertz wave; quasi-optical technology; Gaussian beam; beam waveguide; radio astronomy; remote sensing; imaging and detection

毫米波波段位于 30~300 GHz 之间, 太赫兹波的定义则为 100 GHz~10 THz<sup>[1]</sup>, 也有文献定义为 300 GHz~10 THz<sup>[2]</sup>。毫米波到太赫兹波在电磁波谱上所处的位置如图 1 所示。在毫米波与太赫兹波段, 有着丰富的科学内涵及广阔的应用前景。

在遥感应用等方面, 由于大气中的分子如 H<sub>2</sub>O、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 对毫米波及太赫兹波有着强烈的吸收峰, 因此可以利用这些吸收特性对大气中的水汽层及其温度进行探测, 从而进行天气预报<sup>[3-4]</sup>。例如水分子在 28 GHz, 189 GHz 附近都有吸收峰, 其他分子的吸收峰可以参照图 2。在射电天文方面, 由于宇宙存在着大量的毫米波及太赫兹辐射背景<sup>[5-6]</sup>, 利用这一范围内的电磁波可以研究天体的形成以及宇宙的演进, 也可以测量宇宙的背景辐射。目前, 国内外有多家研究机构已经建立起了利用毫米波及太赫兹天文观测台, 其中包括位于波多黎各岛阿雷西博天文台<sup>[7]</sup>(已于 2020 年 12 月坍塌)、ALAM 天文望远镜<sup>[8]</sup>以及中国的 FAST 天文台<sup>[9]</sup>(毫米波频段目前尚未开通)。在应用方面, 毫米波与太赫兹成像是一个比较有前景的领域。目前, 已经有一些被动式和主动式成像产品出现。比如

收稿日期: 2021-08-01; 修回日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871003); CEMEE 国家重点实验室基金资助项目(CEMEE2022Z2010B)

T3000、T5000、美国机场安检所用的 94 GHz 成像仪以及国内多家单位的产品等<sup>[10-16]</sup>。毫米波与太赫兹成像的一个显著的优点就是其空间分辨力比微波要强。另外,相对于光波,其穿透性更好。再者,相对于 X 光成像,它属于非电离辐射,安全性更好。此外,在军事应用方面,毫米波及太赫兹技术可以用于雷达及制导。毫米波雷达的突出优点在于波束窄、角分辨率高、体积小、质量小、有较好的穿透雾霾的能力,同时具备良好的抗干扰能力。

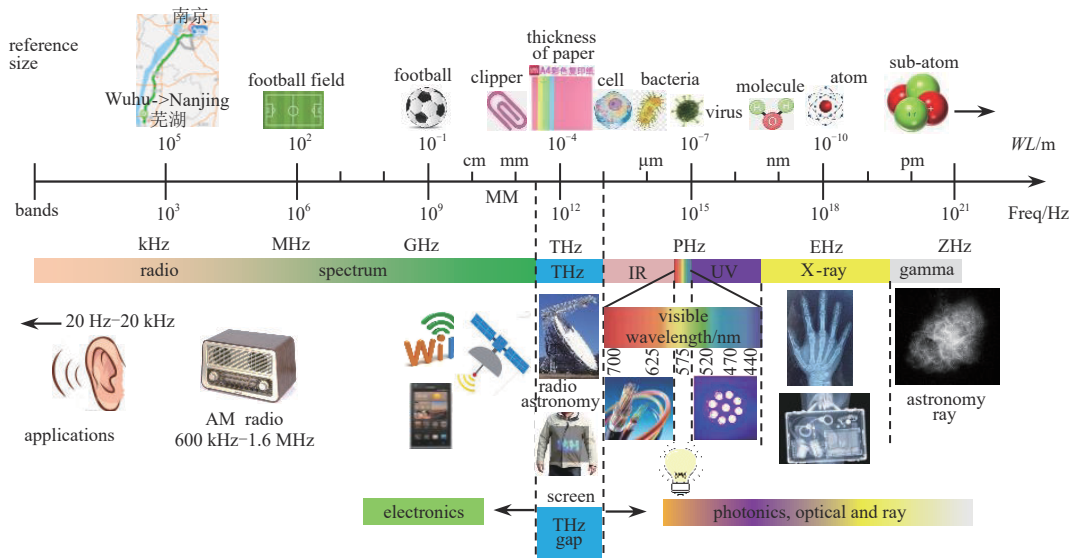


Fig.1 Electromagnetic spectrum and the region of mm/THz ranges

图1 电磁频谱图及毫米波与太赫兹

在上述应用系统中,都涉及到毫米波与太赫兹的接收、传输及处理。传统的传输方法中,采用传输线理论对信号进行分析。但传输线在毫米波与太赫兹频段的一个明显缺陷在于其损耗及尺寸。随着工作频率的升高,传输线单位长度的损耗会相应增大。同时,其对应传输线的物理尺寸会相应减小,这给加工带来更高要求。此外,由于物理尺寸减小,系统的承载功率也会相应地以平方率(与传输线的截面积成正比)的速度下降。再者,传输线的极化处理能力也是有限的,比如矩形波导,其主模  $TE_{10}$  模就只能是线极化。最后,传输线有一定的工作带宽,而毫米波到太赫兹的频带常宽。因此,利用传输线传输毫米波与太赫兹波有不少局限性。

准光学是一种基于高斯波束理论,利用自由空间传输电磁信号的方法<sup>[17-19]</sup>。基于准光学发展起来的对应技术称为准光技术。由于采用自由空间传输,这种技术具有低损耗、高功率、多极化及宽频带等特性。可以弥补传统传输线技术在毫米波及太赫兹频段的劣势。准光技术在 20 世纪 60 年代就已开始应用,在一些文献中,也称为波束波导技术<sup>[20-21]</sup>。由于其涉及的基本原理与激光理论的部分内容相同,加上毫米波与太赫兹波有似光传输的特性,这项技术称为准光技术。一方面,准光技术与微波技术的一个明显差别在于,准光技术可以应用光的理论来处理;另一方面,准光技术与光技术的差别在于,相对光波而言毫米波与太赫兹波的扩散效应更加明显,因此不能完全采用光学理论。似光非光,是为准光。

在接下来的部分,本文将首先讨论准光技术的基本原理,包括高斯波束理论(如高斯波束传播、高斯波束转换等),系统中的器件设计(如馈源、反射镜和频率选择表面等基本器件的设计);其次,本文将回顾一些利用准光技术设计辐射计系统、探测系统、介电参数测量系统、等离子体探测系统的实例和应用;另外,本文还将介绍一些准光系统的电磁仿真方法;最后,结合这些实例,本文将讨论准光技术的发展趋势和应用前景。

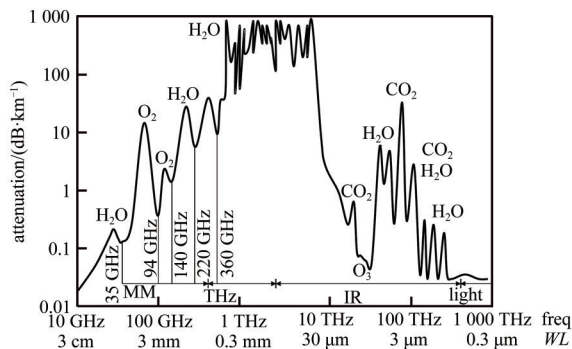


Fig.2 Atmospheric absorption lines and windows

图2 大气窗口及一些气体分子的吸收峰

## 1 准光学基本理论

### 1.1 高斯波束

高斯波束传播是基于近轴近似理论来求解亥姆霍兹波动方程。近轴近似理论认为从馈源发出的电磁波主要集中在靠近传播轴一个角度范围之内，通常是 $30^\circ$ 左右。在近轴近似的条件下，高斯基模在柱坐标下的表达式为：

$$E(r, z) = \sqrt{2/(\pi w^2)} e^{-\frac{r^2}{w^2} - jkz - j\frac{\pi r^2}{2R} - j\varphi_0} \quad (1)$$

其中，高斯波束的波前曲率半径为：

$$R = z + \pi w_0^2 / (z\lambda) \quad (2)$$

高斯波束的波束半径为：

$$w = w_0 \left[ 1 + (\lambda z / \pi w_0^2)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中 $w_0$ 为高斯波束束腰大小，表示波束半径的最小值。而相位偏移量可以表示为：

$$\tan \varphi_0 = \lambda z / (\pi w_0^2) \quad (4)$$

高斯波束在传播过程中，其最大场值在减小，但其横截面的幅度分布仍然是高斯分布，因而称为高斯波束。另外，其波束半径以及其波前曲率半径随传播在增大，如图3所示。因此，只要确定工作频率和束腰大小，就能完整地描述高斯波束。从波束半径的定义可知

$$E(w, z)/E(0, z) = 1/e \quad (5)$$

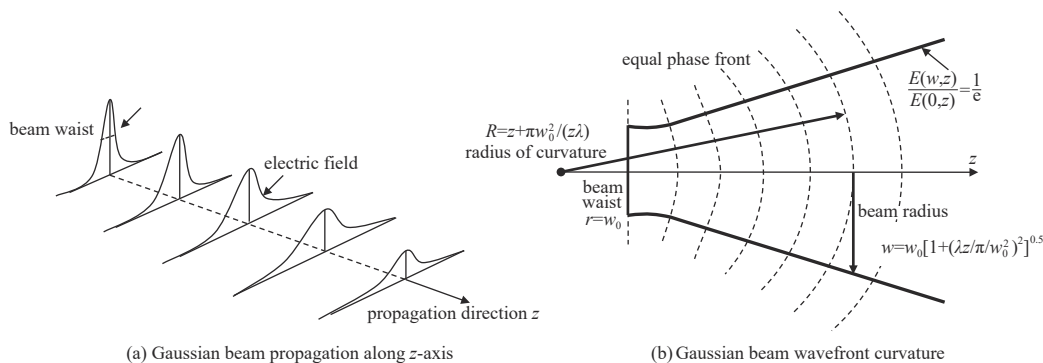


Fig.3 Gaussian beam propagation and its parameters

图3 高斯波束传播及其参数

因此，波束半径的定义是指横截面上某点的电场幅度下降到最大电场值的 $1/e$ (-8.686 dB)时，该点到传播轴的距离如图3所示。另外，在远场区可以得到

$$w/R \approx \lambda / (\pi w_0) = \tan \theta_0 \quad (6)$$

这是一个渐近线方程，该方程表明波束半径在远场与传播轴的夹角是一个固定值 $\theta_0$ ，称为扩散角。并且在小角度情况下有

$$\theta_0 = \lambda / (\pi w_0) \quad (7)$$

最后，高斯波束还可以由复波束参数 $q$ 表示，即

$$e^{-\frac{r^2}{w^2} - j\frac{\pi r^2}{2R}} = e^{-j\frac{kr^2}{2q}} \quad (8)$$

式中：

$$1/q = 1/R - j\lambda / (\pi w^2) \quad (9)$$

从复波数参数表达式可以看出，高斯波束有类球面波的性质，这与几何光学中描述光线的曲率半径的表达式十分相似。并且，利用该性质可以实现高斯波束的转换。

### 1.2 高斯波束转换

高斯波束在传播过程中有一定的扩散,若扩散过于严重,容易造成功率密度下降,不利于后端信号处理。因此,在传输过程中应当对高斯波束进行重新聚焦,使之成为另一高斯波束,如图4所示。一般情况下采用焦距为 $f$ 的聚焦单元,可以把高斯波束按式(10)进行变换:

$$\begin{cases} \frac{d_{\text{out}}}{f} = 1 + \frac{d_{\text{in}}/f - 1}{\left(d_{\text{in}}/f - 1\right)^2 + z_c^2/f^2} \\ w_{0,\text{out}} = \frac{w_{0,\text{in}}}{\left[\left(d_{\text{in}}/f - 1\right)^2 + z_c^2/f^2\right]^{0.5}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $d_{\text{in}}, d_{\text{out}}, w_{0,\text{in}}$ 和 $w_{0,\text{out}}$ 分别是高斯波束输入距离、输出距离、输入波束束腰以及输出波束束腰; $z_c$ 为共焦距离。

$$z_c = \pi w_{0,\text{in}}^2 / \lambda \quad (11)$$

可以看出,当 $d_{\text{in}}=f$ 时,输出距离 $d_{\text{out}}$ 恒为 $f$ ,与频率无关。该结论是设计宽带系统的理论基础。

对于某一特殊情形,当两个镜面的距离为 $2f$ ,即 $f_1=f_2=f$ 以及 $d_1+d_2=2f$ 时,就可以得到 $w_{0,\text{out}}=w_{0,\text{in}}$ 。也就意味着在这种情况下,输出束腰的大小和位置都与频率无关。这种架构称为高斯望远镜。

### 1.3 高斯波束耦合

准光系统可以工作在发射和接收模式。发射模式是将馈源或者出射波束耦合到指标所要求的高斯波束;而接收模式是将入射场耦合到接收器件的特征高斯波束。为了有效描述这种耦合的效率,通常采用耦合系数来描述。两高斯波束a和b的场耦合系数定义为对第一个场 $E_a$ 的共轭与第二个场 $E_b$ 乘积的积分。

$$c_{ab} = \iint E_a^*(x, y) E_b(x, y) dS \quad (12)$$

通常写成简便的括号记法:

$$c_{ab} = \langle E_a | E_b \rangle \quad (13)$$

为方便起见,积分通常在垂直于传播轴的平面,也就是参考平面进行。比较受关注的一个平面是束腰平面。可以将结果表达为在任意平面的波束参数或者表达为束腰及束腰位置,这种表达的选择纯粹从计算方便考虑。为了更进一步表示成归一化的形式,式(13)可以改写为:

$$c_{ab} = \frac{\langle E_a | E_b \rangle}{\langle E_a | E_a \rangle} = \frac{\iint E_a^*(x, y) E_b(x, y) dS}{\iint E_a^*(x, y) E_a(x, y) dS} \quad (14)$$

一般这种积分是二维的,但积分采用的坐标需视具体情况而定。在这里采用的是直角坐标系,也可以采用柱坐标系,但最终的计算结果是相同的。式(14)是矢量场耦合系数,为了表示能量的耦合,可以取

$$\varepsilon_{ab} = |c_{ab}|^2 \quad (15)$$

考虑到收发系统中,目标高斯波束与出射高斯波束的束腰位置有一定的偏移,最终式(15)可表示为:

$$K_{ax} = \frac{4}{(x + 1/x)^2 + \chi^2 x^2} \quad (16)$$

式中: $x = w_{0a}/w_{0b}$ ;  $\chi = \Delta z/z_{ca}$ ,是轴向偏移与共焦距离的比值,其中 $z_{ca} = \pi w_{0a}^2 / \lambda$ 。

图5展示了不同波束、不同偏移的功率耦合系数。从图中可以看出,只有偏移为0、波束大小相同时才有可能实现功率耦合系数

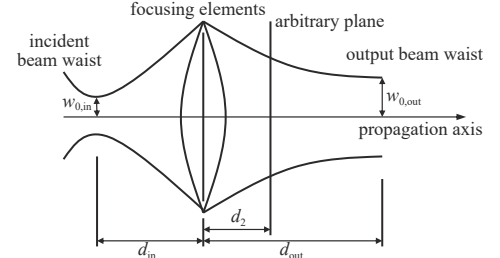


Fig.4 Gaussian beam transformation  
图4 高斯波束转换

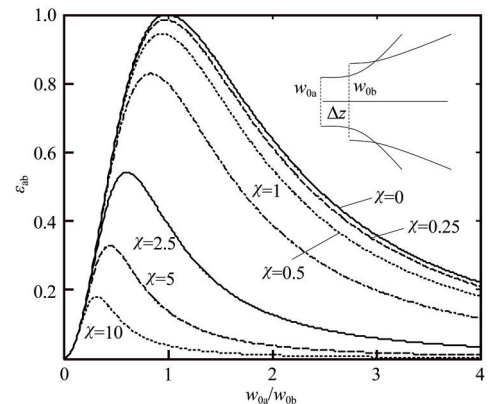


Fig.5 Power coupling between two axially aligned beam  
图5 传播轴平行的高斯波束功率耦合图

为 1。其他情形都会产生耦合损耗。在高斯波束传输过程中，耦合系数很难达到 1，但需要在系统设计过程中尽量接近 1，以减小耦合损耗。

## 2 准光器件

本节将介绍各种常用的准光器件。这些常用的准光器件在其他领域也有广泛应用，但本文所讨论的是基于高斯波束和准光系统层面上的设计方法和应用场景。在准光系统中，主要的器件有馈源、聚焦单元、空间滤波器、极化处理器件等。聚焦单元包括金属反射面和透镜；空间滤波主要采用频率选择表面；极化处理器非常丰富，包括极化器和极化转换器件等。准光系统还有其他的器件，在本综述中不详细讨论。

### 2.1 馈源

馈源是准光系统的收发器件。对于发射系统，系统的设计是从发射馈源开始的，因此发射馈源的高斯特性决定了设计的起始值；对于接收系统，接收喇叭的高斯特性决定了设计的终止值。当然，利用天线系统的收发互易特性，接收设计也可以采用发射设计的方法进行。因此，不管从哪个角度看，馈源是准光系统中十分关键的器件之一。设计能够提供高斯度好的馈源是准光系统设计的重要组成部分。

常用的馈源喇叭有矩形喇叭、角锥喇叭、圆波导喇叭、双模喇叭以及波纹喇叭<sup>[22-24]</sup>。单纯从高斯特性考虑，波纹喇叭是最优的选择。这种喇叭的电场分布是最接近单极化场分布的馈源，具有极化纯度好、交叉极化低、旁瓣电平低以及带宽大的优点<sup>[25]</sup>。波纹喇叭可以达到 -60 dB 的旁瓣和交叉极化，带宽甚至能覆盖一个标准波导带宽<sup>[26]</sup>。

一般情况下，波纹喇叭工作在  $HE_{11}$  模式。波纹喇叭在输入口处主要激励的是  $TE_{11}$  模。在圆波导与模式转换段的接口处开始设置槽形结构(波纹结构)。槽形结构的深度从半波长逐渐过渡到四分之一波长，该部分称为模式转换与阻抗转换区，该部分将激励出  $TM_{11}$  模。 $TM_{11}$  模与  $TE_{11}$  模相加后形成  $HE_{11}$  模。经过模式转换区后，波纹的深度基本稳定在四分之一波长左右。并且，该部分的波纹决定了出射场的对称性和交叉极化特性。输出的口面决定了输出波束的大小，在模式转换的应用中可以用束腰大小来描述，在天线系统中用波束宽度来表示。要说明的是，这两个描述量在准光理论中存在等效变换关系，因此，在本文中，一律用束腰半径来描述。最后，从模式转换部分到输出口面有一个相位转换段，其作用是将  $TE_{11}$  模和  $TM_{11}$  模的相位转换到基本相等，形成稳定的  $HE_{11}$  模。在一般的波纹喇叭中，模式转换段与输出口面之间的部分是符合某种函数的张角部分，主要有线性函数、正弦函数等。目前，有不少研究采用了新的结构<sup>[27-28]</sup>，如正弦-平行结构、tanh 函数结构，如图 6 所示。这些结构有各自的特点，可以适应不同的应用场景。

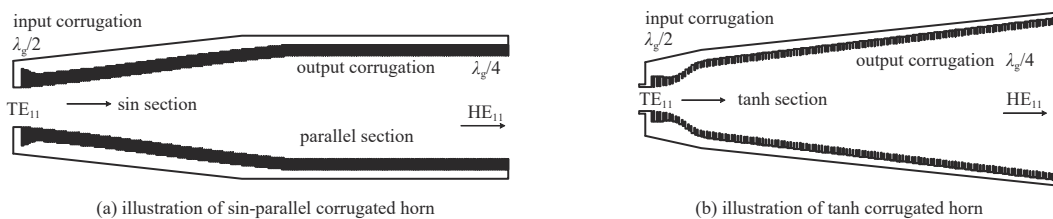


Fig.6 Illustration of the two types of structure

图 6 两种结构的结构示意图

实际上，输出不同的模式，高斯基模的耦合度是不同的。假设模式的场分布为  $E_m(x, y)$ ，输出场为  $f(x, y)$ 。其模式耦合系数为：

$$\varepsilon_{\text{mode}} = c_m = \frac{\langle E_m | f \rangle}{\sqrt{\langle f | f \rangle}} = \frac{\int E_m^*(x, y) f(x, y) dx dy}{\sqrt{\int f^*(x, y) f(x, y) dx dy}} \quad (17)$$

如图 7 所示，当激发  $HE_{11}$  模时，束腰与出射口面半径的最佳比例为 0.646；当激发出模式为  $HE_{11}+HE_{12}$  时，束腰与出射口面半径的最佳比例为 0.5；当激发出模式为  $HE_{11}+HE_{12}+HE_{13}$  时，束腰

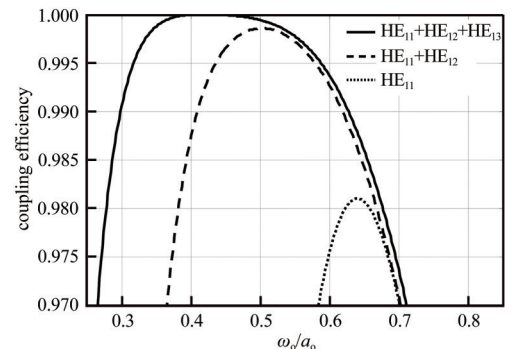


Fig.7 Coupling efficiency of the stimulated modes

图 7 激发模式与高斯基模的耦合系数

与出射口面半径的最佳比例为 0.45。可以看出, 采用  $HE_{11}$  模作为工作模式时, 高斯度已经能够产生 98% 的高斯耦合度, 而且因为是单模工作, 所以带宽比较宽。进一步采用混合模式, 尽管高斯度提高了, 但是保持相应耦合度的工作带宽会降低。其主要原因是需要在带宽内协调多个模式的相位, 而这在大带宽内实现是比较困难的。因此, 需要在实际工作中权衡带宽与其他指标(如交叉极化、旁瓣、高斯度)之间的关系。比如, 假设  $y$  极化为主极化, 于是极化耦合系数可以表示成:

$$\epsilon_{\text{polarization}} = \frac{\iint |E_y|^2 r dr d\phi}{\iint (|E_y|^2 + |E_x|^2) r dr d\phi} \quad (18)$$

得到高斯基模的总的耦合系数为  $\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{mode}} \epsilon_{\text{polarization}}$ 。

另外, 对于高斯波束来说, 有两个参数十分关键, 即束腰半径和束腰位置。束腰半径是电参数, 是描述高斯波束大小的参量, 而束腰位置是机械参数, 在系统组装过程中需要尽量准确的束腰位置信息。对于波纹喇叭, 高斯波束束腰的大小, 以及高斯波束的位置可以表示为:

$$w_0 = \frac{0.644a}{\left[1 + \left(\frac{\pi(0.644a)^2}{\lambda R_h}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (19)$$

$$z = \frac{R_h}{1 + \left[\frac{\lambda R_h}{\pi(0.644a)^2}\right]^2} \quad (20)$$

可以看出, 束腰半径与口径以及馈源斜长直接相关, 并且大约等于口面半径的 0.64 倍。另外, 束腰位置位于口面之后且位于喇叭内部, 如图 8 所示。从束腰位置的表达式可以看出, 当斜长无穷大时(即出射段为平行段时), 束腰刚好在喇叭的出射口面上。这是十分重要的一种特性, 对于位置敏感的系统, 将束腰设计在口面处对系统组装来说具有独特的优势。因此, 将波纹喇叭的出射部分设计成平行段在天文探测、遥感领域十分普遍。英国 Thomas Keating 公司<sup>[26]</sup>的高性能喇叭基本都是采用这种设计。但是这种设计需要较长的平行段来保证相位的平衡, 因此其尺寸(特别是长度)比一般的张角波纹喇叭要长得多。

波纹喇叭发展至今已经有成熟的设计方法, 读者可以参考相关文献<sup>[29]</sup>。文献[27]给出了模式分析方法的具体流程, 文献[29]则总结了不同外形波纹喇叭的设计公式。这些公式是很好的设计起点, 但是, 仍然需要根据实际需求去优化仿真。

波纹喇叭的加工是造成波纹喇叭成本高的主要原因。由于其结构的特殊性, 毫米波及太赫兹频段的波纹喇叭无法直接用机加工一次完成, 一般情况下采用电铸法, 如图 9 所示。电铸法的流程如下: a) 利用精密机械加工技术在铝材料上加工成型铝芯, 铝芯的外形就是波纹喇叭的腔体部分; b) 将铝芯置于含铜溶液进行电镀, 铝芯与负极相连, 带正电的铜离子附着在铝芯表面; c) 等电镀完成后, 利用强碱溶液(通常采用 NaOH 溶液)将铝芯洗去; d) 利用显微镜内窥辅助去毛刺。在以上流程中, 铝是可以与强碱发生化学反应的, 因此在清洗过程中, 为加快清洗速度, 应当使电铸后的结构匀速在清洗池中移动。

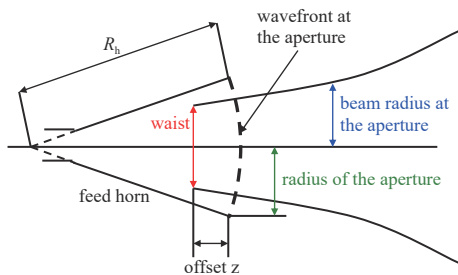


Fig. 8 An illustration of the location of a horn  
图 8 束腰大小和束腰位置示意图

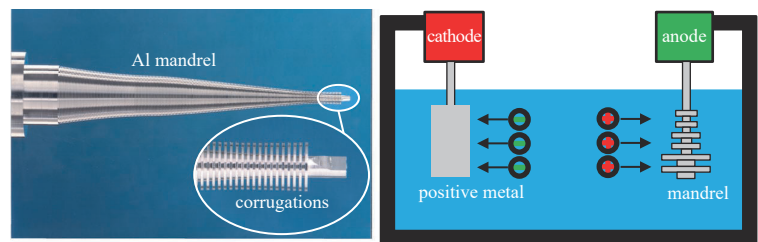


Fig.9 The process of electroforming for corrugated horn fabrication  
图 9 波纹喇叭电铸法加工过程

在实际应用中, 并不是所有场景都需要高极化纯度或者大带宽。为了降低成本, 可以采用其他易加工的喇叭作为馈源。为比较不同馈源的特性, 表 1 列出了部分喇叭的波束半径与馈源口径、模式耦合效率、极化耦合效

率以及总效率。从耦合效率来看，双模喇叭的特性最接近波纹喇叭，但是其带宽只有波纹喇叭的一半左右。混合模式喇叭的结构采用了金属外壁加介质的形式，通过合理控制模式，主模亦可实现  $\text{HE}_{11}$  模传播。其他喇叭的总效率都可在 0.84 以上。

表 1 各种馈源喇叭与高斯基模的最佳耦合系数  
Table1 Optimal parameters between the coupling of various feed horns and the fundamental Gaussian beam

| feed type                                  | $w/a$      | $\varepsilon_{\text{mode}}$ | $\varepsilon_{\text{polarization}}$ | $\varepsilon_{\text{total}}$ |
|--------------------------------------------|------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| corrugated circular                        | 0.64       | 0.98                        | 1.00                                | 0.98                         |
| corrugated square                          | 0.35       | 0.98                        | 1.00                                | 0.98                         |
| smooth-walled circular (symmetrical beam)  | 0.76       | 0.91                        | 0.96                                | 0.87                         |
| smooth-walled circular (asymmetrical beam) | 0.88, 0.64 | 0.93                        | 0.96                                | 0.89                         |
| dual-mode                                  | 0.59       | 0.98                        | 0.99                                | 0.97                         |
| rectangular                                | 0.35, 0.5  | 0.88                        | 1.00                                | 0.88                         |
| diagonal                                   | 0.43       | 0.93                        | 0.91                                | 0.84                         |
| hybrid mode                                | 0.64       | 0.98                        | 1.00                                | 0.98                         |

国外的波纹喇叭的工作频率已经能超过  $2\text{ THz}^{[30-31]}$ 。目前，国内的波纹喇叭天线加工仍是一个需要突破的方向。在国内，具有稳定加工工艺、能实现  $325\text{ GHz}$  以上的波纹喇叭且具有良好高斯性能的厂商还并不多。精密机床固然是一个需要发展的方向，但是更多的需要开发定制工艺。在实际的加工过程中，精密机床只能得到主体结构，精细结构必须采用特殊工业处理。例如，机械加工过程中留下的金属毛刺，可以通过内窥镜去毛刺，或者通过超声工艺去除。

实际上，高性能波纹喇叭的加工，特别是在太赫兹频段的加工仍然是一个问题。就目前的技术而言，3D 打印尚未达到加工精确度的要求。其他工艺加工在加工复杂结构时仍然存在不小的挑战。因此，寻求加工相对简单，性能相差不大的馈源喇叭是目前的一个方向。比较有可能的结构是渐变式光壁喇叭。

2.2 反射面和透镜

由高斯波束表达式可以看出，随着传播距离的增大，波束半径变大。如果不能对波束的大小进行有效控制，波束半径就会持续增大，从而造成功率密度减小。反射镜面和透镜是对波束控制的两类聚焦元件。反射面工作于反射形式，而透镜工作于传输形式。对于不同的应用，需要选择不同的聚焦元件，例如低损耗通常采用反射面，而等离子体探测由于需要密封环境又需要采用透镜，还有一些情形需要两种元件混合使用。

反射镜面从二次曲面(椭球面、抛物面、双曲面和球面等)截取一部分<sup>[32]</sup>。由于球面实际上是椭球的一种特殊形式，因此，在准光学中，主要有椭球面、抛物面和双曲面 3 种反射面，如图 10 所示。

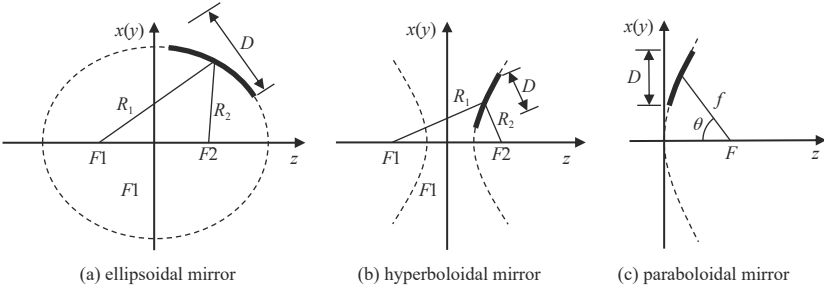


Fig.10 Three main reflectors in a quasioptical system  
图 10 准光系统中三种主要的反射面

对于椭球面和双曲面，其等效焦距(这里是指符合准光学理论的焦距，而不是指几何学上的焦距)为：

$$f=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

(21)

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别是焦点  $F1$  和  $F2$  到镜面中心的距离。而对于抛物面，其等效焦距为：

$$f=\frac{2F}{1+\cos\theta}$$

(22)

一般情况下，抛物面用于主反射镜，双曲面用于卡塞格伦天线的副反射镜。而椭球镜是最普遍的用于准光馈电系统中波束控制的反射镜面。这是因为椭球镜的加工容易做到高精度度，同时有两个焦距可以调节参数。而对于球面镜，由于其旋转对称特性，特别适合用于射电天文望远镜的主反射镜。

反射镜的优点是反射损耗小, 功率容量大以及带宽大。但是, 由于光线必须以一定的角度入射, 因此会产生一定的交叉极化, 一般情况下入射角度越大交叉极化越大。因此, 在空间允许的情况下应当尽量减小入射角。

对于介质透镜, 基本上是正入射。准光系统中采用的透镜与光学透镜本质上没有差别, 但是由于准光系统的工作波长远大于光学系统的工作波长, 因此在加工难度上大大降低。3 种常用的准光透镜有平面-曲面透镜、双曲面透镜和 Fresnel 透镜, 如图 11 所示。透镜的主要优点是可以作为窗口使用, 同时又是正入射, 但是其缺点是介质损耗和反射损耗比反射面的反射损耗大。

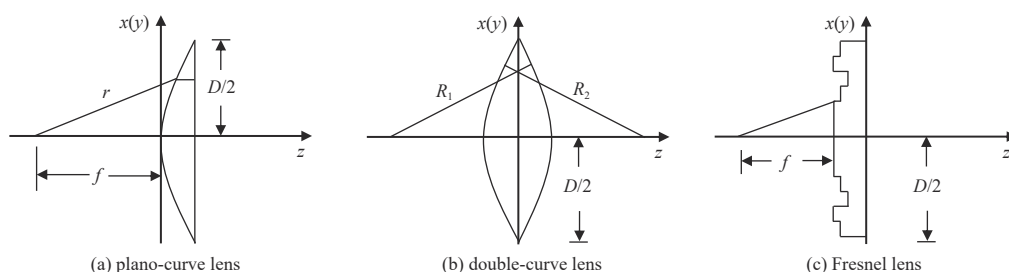


Fig.11 Three normally used lenses  
图 11 准光系统中三种常用的透镜

反射面的加工比较简单, 在毫米波频段采用高精度机床即可加工表面精确度在  $10\ \mu\text{m}$  左右的工件。一些精密加工方法能够达到  $1\ \mu\text{m}$ , 其加工成本也相应比较高。普通应用可以采用铝材, 对于一般的实验室应用是足够的。表面沾污的情况下可以采用医用棉沾石油醚进行处理。对于一些特殊的应用, 则需要采用铸铁加工, 其成本也大大增加。而对于天文应用, 需要适应大的温差变化以及保持很小的重力形变, 则需要采用 SiC 等特殊材料加工, 之后还需要进行低温形变实验。

透镜的材料一般有熔融石英、聚合物以及蓝宝石。熔融石英具有很好的低损特性, 因此在毫米波频段广泛用于准光系统, 其成本也是可接受的。另外, 熔融石英便于表面抗反射处理, 这也是其广泛应用的重要原因。但是熔融石英的介电常数较高, 因此样件比较薄。与熔融石英具有相当介电常数的是氮化硼。这种材料可以用常规的机械加工, 并且可以加工任意的表面形状, 同时还具有表面处理的可能性。但是氮化硼具有一定的各向异性, 因此在使用中需要特别注意。很多聚合物材料也可以用机械加工方法加工, 并且具有一定的机械稳定性。但是如特氟龙等材料, 其介电常数过低, 不利于表面抗反射处理, 只能采用表面沟槽结构模拟自然材料, 这无疑增加了加工难度。蓝宝石主要用于高功率、高机械强度的场景, 在一般实验环境下极少采用。

### 2.3 频率选择表面

准光系统的另外一个主要优势是多路收发。这对于空间应用十分有利, 原因是多个通道可以共用一个大的反射面, 从而大大减少了主反射面的数量。而实现多路收发的其中一个关键器件就是频率选择表面。频率选择表面的功能是在空间上通过对频带的选择性透射或反射来实现频率的分离, 因此也称为空间滤波器<sup>[33-34]</sup>。

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。一方面的原因来自于在太赫兹波段, 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; 另一方面的原因来自于在太赫兹波段, 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(比如应力而使得表面弯曲形变)。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便应用于太赫兹波段。因此, 加工上的困难, 转变成设计上考虑的重要因素。在设计的过程中就应当考虑加工的可实现性。最后, 频率选择表面的准确测量也是比较具有挑战性的工作。由于是在自由空间中进行测量, 其反射系数及传输会受到多次回波的干扰。另外, 其相位测量是比较困难的一项工作。

从工作原理来看, 频率选择表面可以分为两种: 一种是谐振式; 一种是非谐振式。谐振式频率选择性表面如图 12 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。而非谐振式的频率选择表面, 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存在很大的关系。

开槽型单元是非常理想的一种用于宇航级系统的结构。这种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性的通过。最简单的缝隙单元就是偶极子槽, 如图 12(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，单元的宽度及厚度要远小于一个波长。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频率选择表面的频率响应比较平缓，也就是其 $Q$ 因子比较低，如图13所示。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。

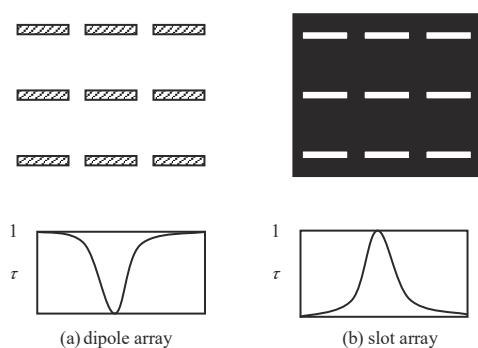


Fig.12 Two types of FSS,  $\tau$  is the transmission coefficient  
图12 频率选择表面的两种类型,  $\tau$ 为透射系数

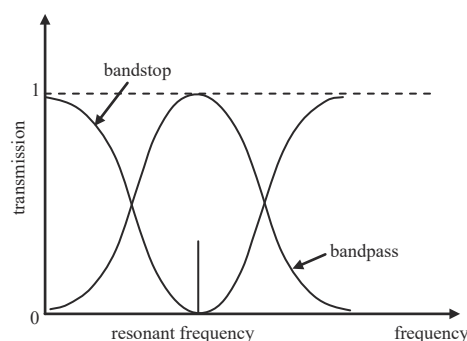


Fig.13 Transmission property of bandstop and band pass FSS  
图13 带通和带阻频率选择表面的传输系数

最常用的非谐振式频率选择表面为打孔结构<sup>[35]</sup>。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<sup>[36]</sup>。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频率选择表面的设计。除了圆形孔这种结构，还有方形孔、矩形孔以及方形孔的变形，如图14所示。另外，对于阵列的排列形式，采用的最多的是矩形二维阵列和六边形阵列。相对而言，六边形阵列的对称性更优一些。同时，结构也更加紧凑。因此，常常用于实际的设计。但是，目前多频段的应用使得空间用频率选择表面也出现了新的结构<sup>[37-38]</sup>。

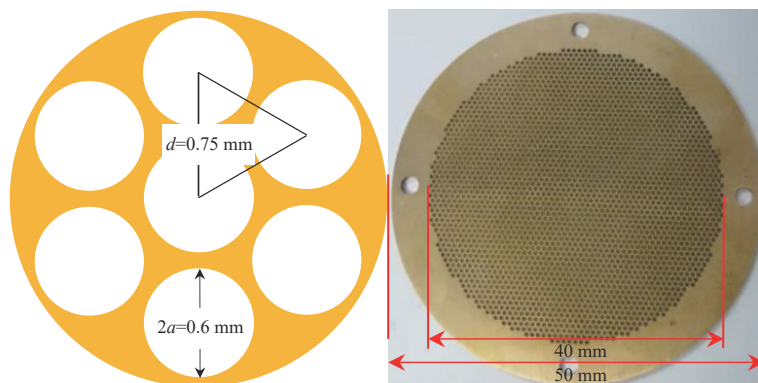


Fig.14 Perforated array for use of FSS  
图14 打孔结构用于频率选择表面

频率选择表面有很多种加工方法，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<sup>[39-40]</sup>。一般情况下而言，腐蚀洗刻的方法以及机械打孔适合于微波段的频率选择表面的加工。精密机械打孔，所存在的问题在于：a) 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；b) 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。这些加工技术也为频率选择表面的加工带来进展。从公开报道的文献来看<sup>[39]</sup>，加工的最小特征尺寸已经能达到 $15\ \mu\text{m}$ ，见文献[39]中的图11。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。

频率选择表面的分析目前主要基于周期性边界，这里不深入讨论分析算法，因为这是计算电磁学的范畴。感兴趣的读者可以阅读相关文献<sup>[41-43]</sup>。

## 2.4 极化器

极化器是准光系统中另外一个关键器件<sup>[44]</sup>。极化器的使用,大大扩展了准光系统的应用。例如,收发隔离需要反射回来的信号与发射信号成正交极化,极化器就是实现这一功能的关键器件之一。再比如,电子自旋共振探测过程中<sup>[45]</sup>,需要产生圆极化波,极化器结合法拉第旋转可以实现线圆转换<sup>[46]</sup>。

最常见的线极化器如图 15 所示。当电磁波入射到线栅后,与线栅平行的分量将被反射,而垂直于线栅的分量可以透射。因此,线栅实现了极化的分离。当入射极化为 $\pm 45^\circ$ 斜入射时,可以分解成垂直和水平两个极化。这种结构的优点是参数简单、超带宽以及低损耗。但是,由于这种结构的线是悬空的,因此需要固定支架,且需要拉丝来均匀排布各条线。目前,航天科工二院 203 所研制出国内高精度大口径极化栅网首套全自动栅网缠绕系统,应用于全极化辐射计定标源中的大口径极化栅网。但在太赫兹频段,加工仍然会存在一定的困难。

为减小加工困难,可采用图 16 的结构。这种结构是将金属丝通过蚀刻工艺加工在基板上。这种方法采用常规的 PCB 工艺就能达到毫米波频段,采用光刻技术就能实现太赫兹频段的极化器<sup>[47]</sup>。但是这种结构的损耗比传统线栅的损耗要大,带宽也要差一些,在一些要求放宽的应用场景完全可以胜任。

除了线极化器,还有圆极化器(极化转换器)。圆极化器有两种,一种是将入射的极化波转换成圆极化波;另一种是将入射波分成透射波和反射波,透射波和反射波都是圆极化波,但是旋向不同,如图 17 所示。由于超表面技术的发展,这类极化器经历了飞速发展。各种设计也存在很大的差异,本文不对各个设计进行讨论,只选取了部分文献供读者参考<sup>[48-55]</sup>。要说明的是,这些文献远远不能覆盖所有的工作。请读者根据需求进行文献查新和文献遴选。但要说明的是这些极化器的带宽与线栅相比仍有一定的局限性,因此主要适用于各个频带的极化转换。

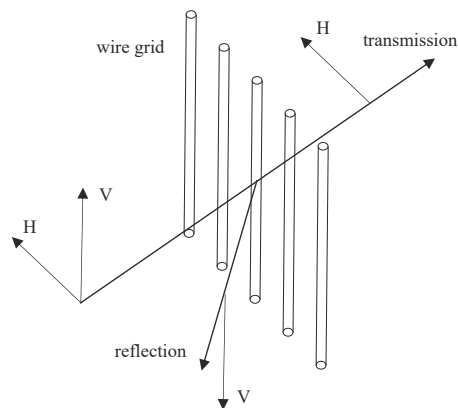


Fig.15 Working principle of mesh grid  
图 15 线栅的工作原理

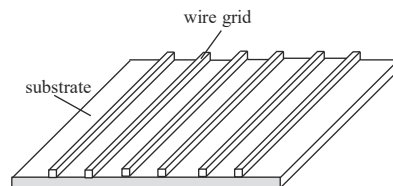


Fig.16 Mesh grid printed on PCB substrate  
图 16 基于 PCB 的线栅

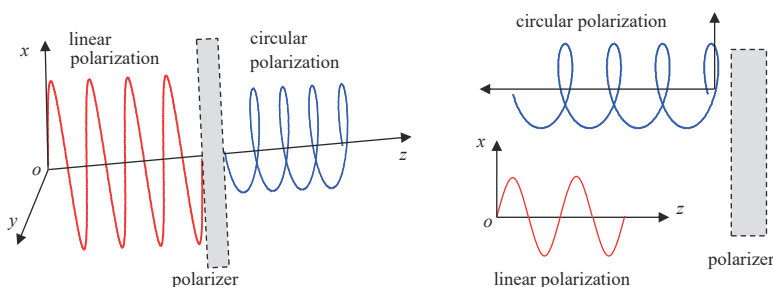


Fig.17 Linear to circular polarization converter  
图 17 线-圆极化器

## 2.5 其他器件

准光系统中,还有大量的其他器件。这些器件虽然不是最常见的,但适用于不同的场景。例如吸收负载<sup>[56]</sup>、衍射光栅<sup>[57]</sup>、干涉仪<sup>[58]</sup>、谐振腔以及一些有源器件,如图 18 所示。

负载在各个系统中具有吸收杂波和减少反射的作用。与一般的泡棉和碳质吸波材料不同的是,运用于准光系统中的负载通常采用硬质塑料作为加工材料。一方面可以实现吸波的功能,另一方面具有较好的机械性能。由英国 Thomas Keating 公司生产的该类负载已经可以达到航天级别的要求。国内也有厂家开始研究这些产品,例如南京航天波平电子科技有限公司。

衍射光栅在毫米波频段的前期应用包括波长测量、分子光谱仪,近年来应用于等离子体聚变辐射分析。另外一些应用还包括多路合成以及分离。如图 18 所示,当入射波束以一定角度照射到衍射光栅表面,衍射波束的强度与角度和波长相关。因此,从不同的角度去观测信号的大小,就可以收集不同频率的信息。

干涉仪利用波束相位的频率相关性,可应用于滤波和双工收发。如图 18 所示的双波束干涉仪,该系统包含

了 4 个端口、2 个分束器以及 2 个反射镜。端口 1 和 2 作为输入口，而端口 3 和 4 作为输出口。通过移动反射镜的位置，可以改变从端口 2 输入波束的相位，因而在端口 3 形成干涉输出。

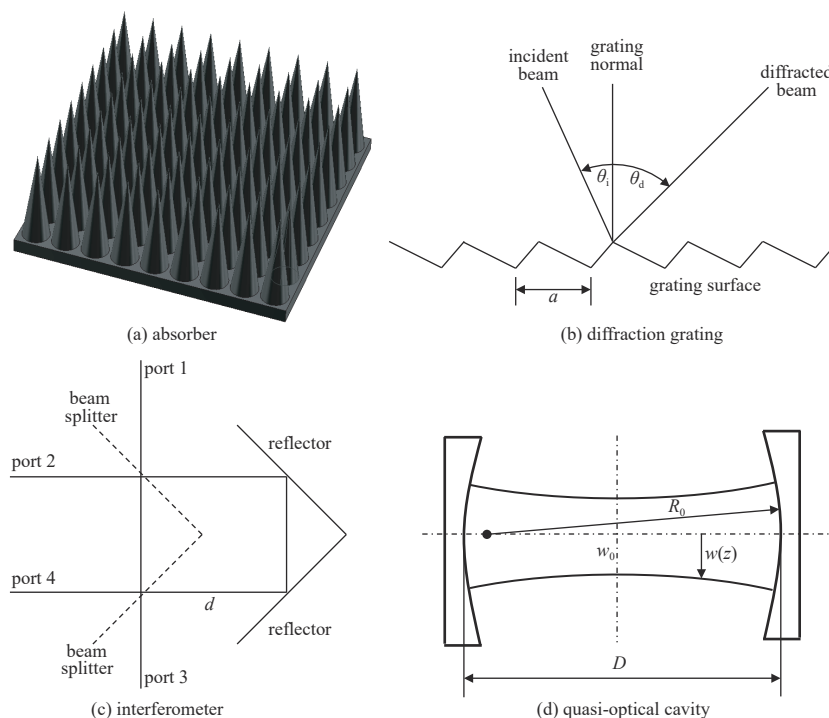


Fig.18 Other quasi-optical components

图 18 部分其他准光器件

谐振腔也称为准光腔，其内部场对应模式的分析方法与高斯波束分析方法完全相同。由于该类系统的尺寸比较大，因此在毫米波频段的加工难度大大降低，这是该类谐振腔在毫米波和太赫兹频段得以应用的重要原因。而且相比于干涉仪，这类系统的衍射损耗更小，测量精确度更高。准光腔发展到现在，已经具备了成熟的理论，感兴趣的读者可以参考综述文献<sup>[59]</sup>。

### 3 准光系统的电磁仿真与测试技术

#### 3.1 仿真技术

准光系统涉及到多种器件，每种器件都有最合适的分析方法。在这里不讨论每种方法的具体实现细节，原因是这些细节在教科书和文献中都有详细的描述。另外，这些分析方法有不少已经开发成了商业软件。

1) 物理光学法。准光系统中的反射镜面大约在 10~20 个波长之间，考虑到馈源到反射面的距离也在这个量级，准光镜面的分析可以认为是电大尺寸系统。在高频段，物理光学法是分析电大尺寸系统的有效方法。物理光学法主要是通过计算反射面上的表面电流，之后逐级推进计算各个反射面的表面电流，最后利用麦克斯方程计算近远场分布。相对于传统的全波分析方法，物理光学法不需要计算馈源到反射面之间的空间的场分布，而仅仅是计算表面电流分布。因此，物理光学法实际上是二维求解，这大大提高了计算速度。目前，一些探测器的天线还采用物理光学法进行仿真验证，例如欧空局 2009 年发射的 Herschel 和 Planck 飞船，都采用物理光学法进行仿真验证。实际上基于几何光学法也可以计算电大尺寸天线，但是几何光学法在计算束腰场分布时，其准确性要小心处理。

目前的仿真软件都包含了反射面仿真的算法，比如常见的 3 大仿真软件 FEKO、CST 和 HFSS。但是就反射面仿真和物理光学法本身而言，由丹麦 TICRA 公司推出的通用反射面天线软件包 (General Reflector Antenna Software Package, GRASP) 是高效的用于反射面天线分析的专业软件，如图 19 所示。GRASP 采用物理法，集几何光学(GO)、几何绕射理论(GTD)、物理光学(PO)、物理绕射理论(PTD)

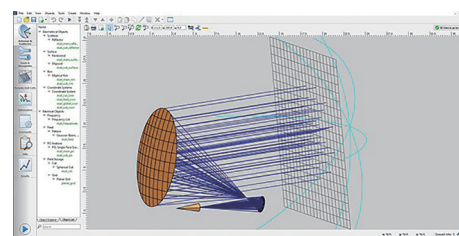


Fig.19 The GUI of GRASP (By courtesy of VIRE Technologies)

图 19 GRASP 软件界面(由未尔科技提供)

于一体,同时加入矩量法(MOM)分析电小尺寸结构。同时,该软件还开发了QUAST准光设计模块,大大提高了准光系统的设计效率。目前该款软件的中国总代理是未尔科技(<http://www.vire.cn/>)。

2) 模式分析法。模式分析方法分为两类,一类是针对反射面天线<sup>[60]</sup>,另一类是针对馈源。针对反射面的仿真方法主要是将入射场分解成高斯模式;而针对馈源的分析方法是将场分解成波导模式。

除高斯基模外,还有高次高斯模。各种高斯模形成了完备的基函数集合。因此,任意一个物理可实现场,理论上都能用这个完备的基函数集合表示。利用高斯波束传输和转换公式追踪每个波束的传播,就能求得近远场分布。这种方法在波束变形分析已经采用。最近,有研究人员利用这种方法实现了多反射镜准光系统的分析。但是这种方法的缺点在于,高次高斯模的发散速度更快,且所有波束都必须满足近轴近似。因此,这种方法的精度还需要进一步验证。

而另外一种分析方法是衍射高斯波束分析方法(Diffracted Gaussian Beam Analysis, DGBA)<sup>[61]</sup>。这种方法采用的是高斯基模,但是,高斯基模的传播方向不同,也就是采用了空间和角度采样。根据小波分析理论<sup>[62]</sup>,这种采样也能形成完备的具有冗余的基函数集合。由于采用的是高斯基模,其发散更慢;又由于采用了冗余函数集合,该种分析方法的采样更稳定;最后,因为考虑了波束的衍射效应,因此准确性有所提高。

针对馈源,特别是波纹喇叭,模式法是一种十分有效的分析方法<sup>[24]</sup>。这种方法将波纹每个齿或槽看成一个波导,分析输入输出端口的模式就能计算输入输出端口的场分布。利用传输矩阵可以计算最终的场分布,从而计算发射系数等一系列的参数。对于其他形面的喇叭,可以将喇叭分成多段,每段的长度最好小于 $1/20$ 波长,在此条件下也可采用模式分析方法。目前,已经有基于模式分析方法的专业软件。CHAMP(Corrugated Horn Analysis by Modal Processing)是一款用于精确分析圆形波纹状馈源喇叭或圆形光滑馈源喇叭电磁性能的软件,如图20所示。该软件基于模式匹配法(Modal Matching, MM)和矩量法(Method of Momentum, MOM),能在短时间内完成波纹喇叭天线的仿真,并且保证较高的仿真精确度。同时,该软件能够分析各类横向、纵向开槽的圆波纹喇叭、波特喇叭,能够考虑喇叭外部结构的影响,还可将喇叭和副反射面结合,便于联合仿真。

3) 全波分析方法。全波分析方法可以用于反射面天线、馈源、频率选择表面以及极化器的分析。但是,用在反射面天线的分析时,计算时间是一个主要问题。一般的馈源,包括波纹喇叭都可以采用全波分析方法,目前的3大仿真软件FEKO、CST和HFSS都可以胜任喇叭馈源的仿真。频率选择表面以及极化器也可以采用周期性的仿真方法,设置周期性边界条件后,只需要仿真单个单元就能反映整个结构的特性。对于精确度要求更高的仿真,可以将整个结构做全波仿真,付出的代价是仿真时间的增加。全波分析方法的优点是能提供更多的信息,这是其他仿真方法所不能匹配的。

4) 混合分析方法。在需要兼顾速度和精度的情况下,有时也采用混合分析方法。另外,对于整个系统链路,每个器件采用最有效的分析方法,利用算法接口将各个器件的仿真结合起来,这也是一种混合分析方法。

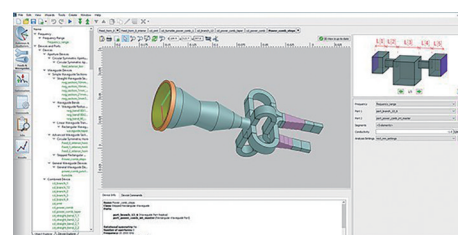


Fig.20 The GUI of CHAMP (By courtesy of VIRE Technologies)

图20 CHAMP软件界面(由未尔科技提供)

### 3.2 测试技术

准光系统和器件本身也需要验证。对于反射面来说,最重要的测试就是形面测试。反射面形面对天线的性能具有可观的影响<sup>[63-64]</sup>。目前通用的测量方法是三坐标仪<sup>[65]</sup>,对反射面进行采样、拟合得到最终的测试曲面。曲面的精确度可以用坐标的RMS值表示。但是,对于太赫兹频段,三坐标仪的测试精确度仍然不能满足部分应用的要求。摄影测量技术就是针对这种情形而发展起来的。摄影测量是利用光学摄像头阵列对同一目标进行测量,可以达到较高的测量精确度,Planck和Herschel就采用了摄影测量技术<sup>[66-67]</sup>。

对于馈源喇叭,采用正常的小远场测量方法就能实现较高精确度的测量。对于频率选择表面和极化选择表面,既可以采用近场扫描测试,也可以采用准光系统测试<sup>[68]</sup>。系统的整体测试可以采用近场扫描或者紧缩场测试方法。如果单纯是准光馈电系统,近场扫描就能完成。但在太赫兹波段,近场扫描仍然会花费相当可观的时间。紧缩场测量是一种最理想的测量方法。在毫米波与太赫兹频段,紧缩场的搭建本身就是一项具有挑战性的技术。北京邮电大学联合国外团队,开发了三反射镜紧缩场天线测量系统<sup>[69]</sup>。北京航空航天大学李志平采用全息技术,实现了较好的静区性能<sup>[70]</sup>。不少公司基于卷边或者单反技术,也实现了毫米波与太赫兹紧缩场天线测量系统。

4 准光系统的应用

准光系统的设计，有一些基本原则，在文献[17]中总结了其主要流程，如图 21 所示。实际上，准光系统的设计仍然需要进行大量的迭代过程，其主要原因是初步选取的参数不一定能够满足所有的技术指标要求。另外一个很重要的原因是，往往实际的系统需要考虑系统的大小、质量，这些工程实际使得系统架构的选择、器件的大小以及器件材料都需要认真分析，权衡选取。但是，关键的一些原则仍然没有改变，例如束腰的大小和位置、截断效应以及波束耦合。这些因素是决定系统大小、器件大小以及系统效率的关键。借助计算机辅助设计，能够更加高效、直观地设计。本节将总结一些典型的准光系统，这些准光系统覆盖了各个应用领域。限于篇幅，本文无法一一列举，在此向其他作者表示歉意。在表 2 中，总结了部分天文探测和遥感探测的应用。

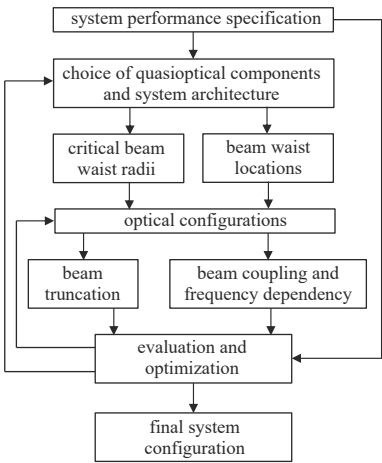


Fig.21 The flowchart for quasioptical design  
图 21 准光系统设计的主要流程

表2 部分毫米波及太赫兹探测平台  
Table2 Part of the millimeter and terahertz detection platforms around the world

| platform                                                                            | usage/modules                                                                                                                                                                     | f/GHz                                                                                              | operation institutions/<br>Period                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Herschel/PACS, SPIRE, HIFI <sup>[71]</sup>                                          | Planet Evolution of the Universe                                                                                                                                                  | 443–5 300                                                                                          | Launched 2009                                            |
| Planck/LFI, HFI <sup>[72]</sup>                                                     | cosmic microwave background                                                                                                                                                       | 30–857                                                                                             | Launched 2009                                            |
| ALMA <sup>[73]</sup>                                                                | interferometric and total-power astronomical information on atomic, molecular, and ionized gas and dust in the solar system, our galaxy, and the nearby to high-redshift universe | 31.5–45, 67–90, 89–116, 125–163, 163–211, 211–275, 275–370, 385–500, 602–720, 787–950, 1 250–1 570 | ESO, NSF, NRC, AS, NINS et al, opened on 13rd March 2013 |
|                                                                                     | COSMIC microwave background                                                                                                                                                       | 30–3 000                                                                                           | 1989                                                     |
| COBE-cosmic background explorer <sup>[74]</sup>                                     | COSMIC microwave background                                                                                                                                                       | 30–3 000                                                                                           | 1989                                                     |
| SWAS sub-millimeter wave astronomy satellite <sup>[75]</sup>                        | interstellar O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, C, CO                                                                                                                             | 487–556                                                                                            | NASA, 1998–2004                                          |
| Odin <sup>[76]</sup>                                                                | astronomy and upper atmosphere                                                                                                                                                    | 118.25–119.25, 486.1–503.9, 541.0–580.4                                                            | Swiss, France, Finland, 2001                             |
| FY-3A, B <sup>[77]</sup>                                                            | radiometer                                                                                                                                                                        | 150, 183.31                                                                                        | China, 2008–2013                                         |
| FY-3C, D <sup>[77]</sup>                                                            | radiometer                                                                                                                                                                        | 89, 118.75, 150, 183.31                                                                            | China, 2008–2013                                         |
| FY-4 <sup>[78]</sup>                                                                | radiometer                                                                                                                                                                        | 54, 89, 118, 166, 183, 425                                                                         | China, 2016                                              |
| AMSU-A <sup>[79]</sup>                                                              | radiometer                                                                                                                                                                        | 23, 31, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 89                                                                 | NASA                                                     |
| AMSU-B <sup>[80]</sup>                                                              | radiometer                                                                                                                                                                        | 89, 150, 183                                                                                       | NASA                                                     |
| UARS/MLS Upper atmosphere research satellite <sup>[81]</sup>                        | radiometer for profile of O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O et al                                                                                                                 | 63, 183, 205                                                                                       | 1991                                                     |
| AURO/EOS earth observing system <sup>[82]</sup>                                     | scatter detector                                                                                                                                                                  | 118, 119, 240, 640, 2 500                                                                          | NASA, 2004–2022                                          |
| MHS <sup>[83]</sup>                                                                 | scan through the atmosphere to measure the apparent upwelling microwave radiation from the Earth                                                                                  | 89, 157, 183, 190                                                                                  | ESA                                                      |
| SMILES/JEM superconducting sub-millimeter wave Lim emission sounder <sup>[84]</sup> | radiometer                                                                                                                                                                        | 625, 650                                                                                           | JAXA                                                     |
| SWCIR (submillimeter—wave cloud ice radiometer) <sup>[85]</sup>                     | ice cloud                                                                                                                                                                         | 643, 448, 325, 183                                                                                 | JPL                                                      |
| CoSSIR(Conical Scanning Sub—millimeter—wave Imaging Radiometer) <sup>[86]</sup>     | radiometer                                                                                                                                                                        | 183, 220, 380, 487, 640                                                                            | NASA                                                     |
| MARSCHALS <sup>[87]</sup>                                                           | radiometer (limber sounder)                                                                                                                                                       | 300, 321, 345                                                                                      | ESA                                                      |
| MIRO/Rosetta <sup>[88]</sup>                                                        | radiometer                                                                                                                                                                        | 190, 562                                                                                           | ESA, 2004–2014                                           |
| ATMS/Suomi NPP <sup>[89]</sup>                                                      | radiometer                                                                                                                                                                        | 23–183                                                                                             | NASA, 2005–2007                                          |
| MHS/NOAA-18 <sup>[90]</sup>                                                         | radiometer                                                                                                                                                                        | 89, 180, 183, 190                                                                                  | NASA, 2005–2007                                          |
| STEAM-R <sup>[91]</sup>                                                             | radiometer                                                                                                                                                                        | 320–360                                                                                            | ESA, 2020–                                               |
| EarthCARE <sup>[92]</sup>                                                           | a ctive radar                                                                                                                                                                     | 94                                                                                                 | ESA/JAXA, 2021–2023                                      |
| MWS/MetOp-SG <sup>[93]</sup>                                                        | radiometer                                                                                                                                                                        | 18, 21, 31, 50, 53, 89, 118, 165, 183, 243, 325, 448, 664                                          | ESA, 2022–2030                                           |
| SWI/JUICE <sup>[94]</sup>                                                           | spectroscopy                                                                                                                                                                      | 530–625, 1 080–1 275                                                                               | ESA, 2022–2033                                           |
| CIWSIR <sup>[95]</sup>                                                              | cloud ice water submillimeter imaging radiometer                                                                                                                                  | 183, 243, 325, 448, 664                                                                            | ESA, 2007                                                |

#### 4.1 天文探测

天文探测系统中越来越多地采用准光技术。由于天文探测系统的高昂的造价,利用准光技术形成多通道观察就大大降低了每个波段的平均成本。图 22 是 ALMA 探测器频段 9 的光路图<sup>[8]</sup>。频段 9 的光路是 ALMA 最具挑战的设计。从焦点入射的波束经过 M3 反射后到达线栅,线栅将极化分离。其中一个极化到达 M4,另一个极化到达 M4'。以到达 M4 的波束为例,经过 M4 反射后到达分束器。分束器将大部分能量耦合到接收喇叭 Horn 0P,而另外一部分能量耦合到本振接收喇叭 LO 0P。另一个极化的接收路径完全类似。

实际上,很多地基深空探测望远镜也采用了准光技术,在这些系统中,一开始称为波束波导技术。随着天文探测的工作频率进入太赫兹,准光技术在该领域将会迎来更加广泛的应用。

#### 4.2 遥感

在遥感探测平台,空间受限、发射质量受限等因素让准光系统具有独特的优势。目前遥感频率多在毫米波频段,正在向太赫兹频段扩展,如 118 GHz 是  $O_2$  的谐振峰,556 GHz 是  $H_2O$  的谐振峰,而 OH 自由基是 2.5 THz。现有的毫米波辐射计在一般情况下都会搭载多个频段,因此准光系统的应用也就越来越广泛。图 23 是一个 4 频段准光系统,该系统采用打孔滤波片(Perforated Plate Filter, PPF)实现频段分离<sup>[96]</sup>。PPF 可以透过高频段,反射低频段。这种设计的好处在于,高频段只需要一次透射,可以有效降低高频的损耗。而低频段的透射次数虽然多一些,但是低频段的传输损耗比高频段少。通过这种方式,整个频段的损耗相对比较均匀。利用高斯波束设计多波束遥感天线的实例可以参考文献[97]。

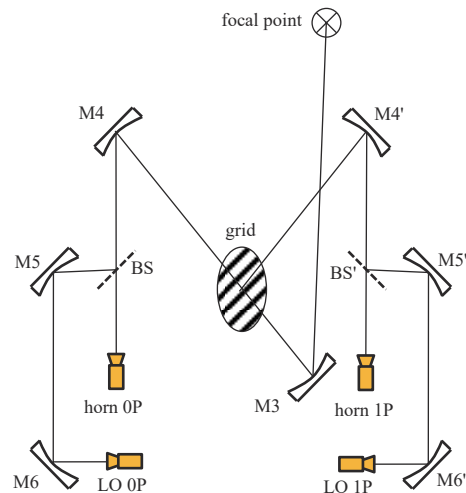


Fig.22 ALMA band 9  
图 22 ALMA 第九频段<sup>[8]</sup>

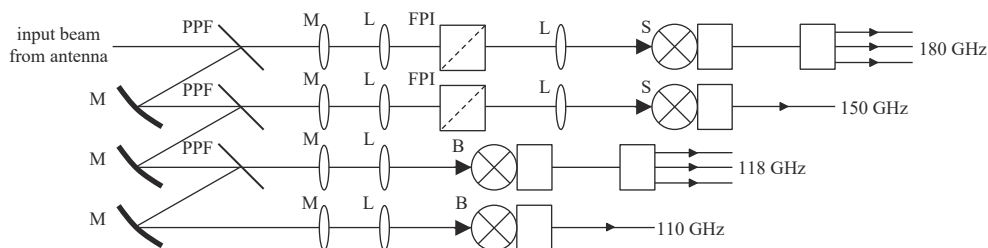


Fig.23 Diagram of a multiband remote sensing system  
图 23 多频段遥感准光系统架构图<sup>[96]</sup>

#### 4.3 等离子体探测及电子自旋

近年来,等离子体的特征频率越来越高。利用毫米波探测等离子体的密度和温度是一种有效的手段。等离子体探测有透射式和反射式。如果能在多个频段同时探测等离子体的辐射特性,那么可以获得等离子体更多的细节。

安徽师范大学毫米波与太赫兹技术研究组与中国科学院等离子体科学研究所、上海铭剑电子科技有限公司联合开发的三通准光网络系统成功地应用于托克马克装置。该系统工作在 33~50 GHz,50~75 GHz,75~110 GHz 三个频段。由于预留给该系统的空间只有 300 mm×300 mm,因此,该系统需要十分紧凑。为满足该系统要求,两个低频段全部采用了两个高斯望远镜的结构以防止波束扩散过于严重致使系统过大。高频段由于波束本身的扩散相对较弱,直接采用了单个反射镜面聚焦的方式。此外,鉴于空间过于狭小,镜面的大小采用了 3 倍高斯波束半径的设计,该设计仍能达到 98% 以上的功率捕获效率。

频率选择表面的设计是本系统最具挑战性的器件。由于 3 个频段是连续的,而频率选择表面一方面必须满足一个波导频段的覆盖(50% 的带宽),另一方面又需要具备很高的矩形系数(尽量接近 1)。这种设计不管从哪个角度来考虑都是困难的,特别是考虑到加工的困难,该器件必须在指标上作出折中处理。因此,在实际设计过程中,牺牲了边缘频段。

馈源喇叭采用了光滑内壁多张角喇叭。这是考虑到成本以及加工工艺的问题。3 个馈源在各个频段的中心部分具备良好的高斯波束特性。在边缘频段,由于频率选择表面已经无法覆盖,因此馈源喇叭的特性就不是特别关键。

三通道等离子体探测系统光路图及通道 1 的高斯波束传输如图 24、图 25 所示。从高斯波束的传输可以看出，该系统的高斯传输特性非常明显。系统安装在托克马克装置后的现场实验可以参考文献[98]，如图 25 所示。

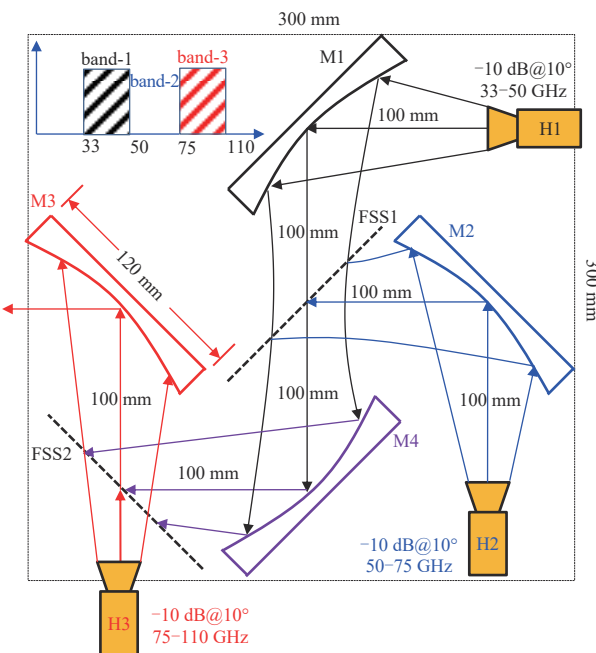


Fig.24 Optical path for triband quasioptical detection system  
图 24 三通道等离子体探测系统光路图<sup>[98]</sup>

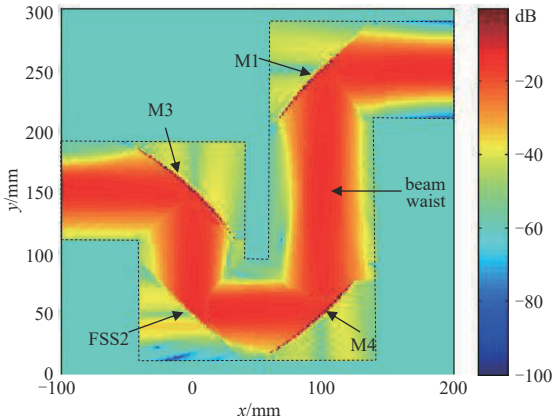
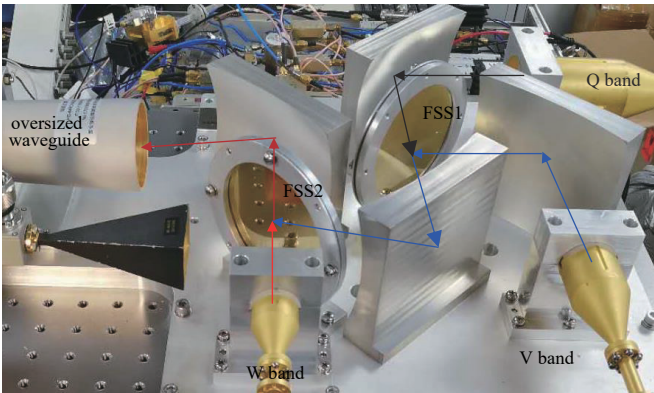


Fig. 25 Photograph of the triband system and the Gaussian beam propagation of channel-1  
图 25 三通道等离子体探测系统实物图及通道 1 的高斯波束传输<sup>[98]</sup>

电子自旋共振通常需要圆极化波激发，但准光入射系统通常是线极化馈电。为了实现该功能，采用了线栅将入射波束反射，通过反射式半波片将线极化转换成圆极化。圆极化波通过波纹波导注入到电子自旋共振腔体，从腔体返回的波再次通过反射式半波片后，转换成与入射波垂直的线极化。因此，出射线极化通过线栅后透射进入探测器。这种方式巧妙地实现了圆极化激发，同时实现了收发隔离。如图 26 所示。

4.4 材料测试

准光系统用于材料测试可以实现宽带特性。图 27 是利用高斯望远镜设计实现的毫米波频段材料测试系统。为了实现测量的高精确度，馈源喇叭采用的是 Thomas Keating 公司的超高斯馈源。为了保证入射波的极化，在入射样品前后安装了极化器；为了减少杂散波，在衰减器及极化器后增加了吸波材料。样品置于系统的

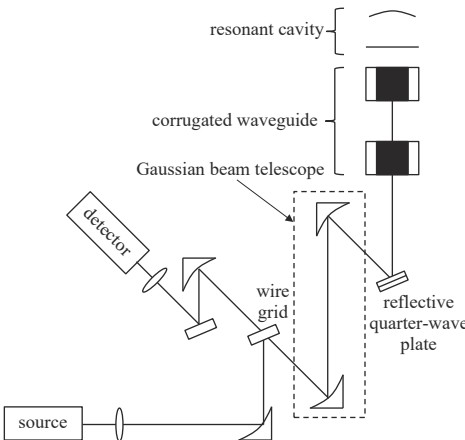


Fig.26 System for ESR measurement  
图 26 电子回旋测试系统<sup>[99]</sup>

中间,也就是波束束腰的位置。该系统已经成功地应用于介电材料、磁材料的测试,通过 ABCD 矩阵法,还实现了液体材料的测量。

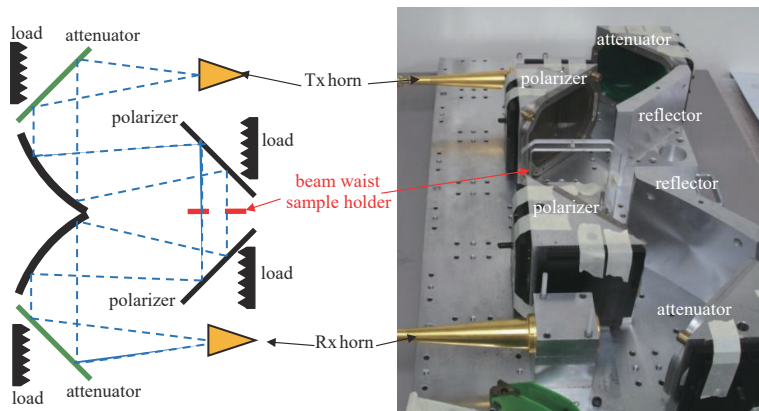


Fig.27 Material measurement system  
图 27 毫米波准光材料测量系统<sup>[100-101]</sup>

实际上,准光系统还有一种变形,就是准光腔材料测量系统。这种系统实际上是将输入输出并为一起,形成了谐振腔。谐振腔的结构如图 18 所示。准光腔适合于测低损耗介电材料,与准光系统配合使用,可以提高材料测试的测量精度和测量的频宽。关于准光学测量介电参数的综述可参考文献[102]。此外,准光系统还用于测量金属的反射面,该项技术正在由英国的 Thomas Keating 公司研制。

#### 4.5 雷达与成像

雷达与成像最好能实现双极化接收。为了利用准光系统实现这一需求,图 28 是一种布局。发射机的输入信号是垂直极化,通过水平极化光栅后入射到  $45^\circ$  法拉第旋转器。经过法拉第旋转器后,电磁波转换成  $45^\circ$  极化的电磁波。该电磁波经过  $45^\circ$  的线栅反射后再入射到  $1/4$  波长波片,发射出去的为圆极化波。回波不管是什么极化,经过  $1/4$  波长波片都可以分解成两个正交的线极化波。一部分通过  $45^\circ$  线栅到达 OP 输出口,另一部分被  $45^\circ$  线栅反射。反射的这一部分经过  $45^\circ$  法拉第旋转器变成水平极化的电磁波。这是因为法拉第旋转从不同的方向入射其旋转角度不变,因此正方向入射和反方向入射的出射波刚好相差  $90^\circ$ 。水平极化波经水平线栅反射后到达 PP 输出口。实现收发隔离的关键器件是法拉第旋转、线栅和  $1/4$  波长波片。

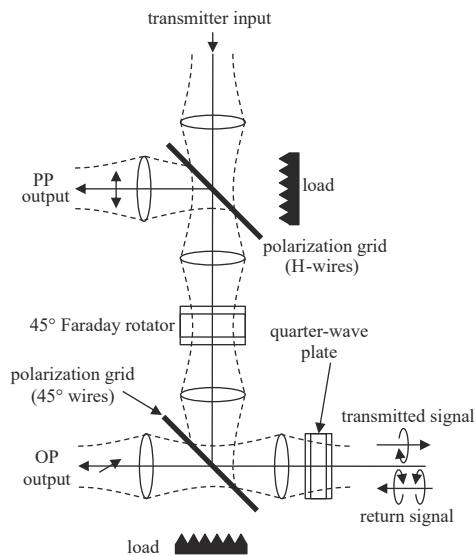


Fig.28 Radar imaging system  
图 28 雷达成像光路图<sup>[17]</sup>

#### 4.6 其他应用

准光技术的应用远远不能在本文中讨论完全。目前,军事上多频段高功率雷达也在采用准光输出,特别是回旋管高功率微波,基本上采用的都是准光输出技术<sup>[18]</sup>。另外,有一些采用准光系统作为主动防御武器,也是基于准光系统的高功率特性。此外,准光系统可以用于高功率合成以及单脉冲天线,其中,东南大学宴文斌教授团队在该方面做了很多创新性工作<sup>[103-104]</sup>。

### 5 准光技术的发展

准光学与准光技术已经成为毫米波与太赫兹科学与技术领域重要的分支。尽管基本理论体系已经成熟,但是仍有不少实际问题需要进一步研究。特别是在太赫兹频段,由于波长效应和材料损耗带来的问题还需要投入大量的努力。

在理论研究上,针对电大尺寸系统的高效、准确计算方法仍然需要进一步研究和发展。尽管物理光学法的速度比全波分析方法大大提高,计算精度也满足大部分应用的要求,但是,对于太赫兹频段,准光系统的仿真方法仍是一个需要大量理论研究的问题。Herschel 主反射面的验证耗时 3 个月才完成一轮仿真。因此,高效、高

精度的电磁计算方法是目前太赫兹频段的一个重要理论问题。其次,在太赫兹频段,极大带宽(或者极窄带宽)的频率选择表面、具有高矩形系数的频率选择表面在理论研究上还有不少空间。特别是考虑到宇航级器件的机械强度,可选择的用于频率选择表面设计的材料和结构是受限的。一些在实验室可实现的结构不能直接用于星载平台的应用。解决这些问题首先要从理论上进行突破。频率选择表面的整体结构仿真在目前还是一个耗时的工作。目前的仿真技术大部分是基于周期性结构,通过仿真单元结构去近似器件。实际上,使用的频率选择表面并不是无限周期,包含整体机械框架的仿真并非没有必要。另外,太赫兹频段的损耗是一种天然的因素,如何在低信噪比情形下进行准确测量也是可研究的理论问题。基于准光学的有源器件目前仍然滞后于无源器件,该领域的理论研究还需要大量的努力和投入。最后,包含准光系统所有器件的联合仿真是目前没有办法实现的问题。目前既没有统一的有效的分析方法,也没有合理可行的混合仿真方案。不能要求采用全波分析方法去解决电大尺寸的问题,那无疑在目前的计算能力下可行性是极低的,对于一般研究人员是无法承担的昂贵计算资源。目前CST架构下路与场的混合架构理论也许是一个发展方向。

在加工问题上,最大的问题是国产化的问题。国内不少研究人员已经能够设计性能良好的器件,但是加工工艺的限制,使得最终样件难以满足指标要求。国内的加工工艺能够满足110 GHz以下的要求,在110 GHz以上仍有提升空间。比如110 GHz的法拉第旋磁材料,仍无法与日本TDK公司的材料相比较;早在15年前,国外已有2.4 THz的波纹喇叭,而国内到目前仍需要探索;2009年欧洲就能加工满足5 THz口径达到3.5 m的宇航级反射面天线。这些具体问题,无不是国内同行需要努力的方向。在现有加工能力无法一次成型的情况下,拼接式结构是一个值得研究的方向。目前,拼接式结构仍然存在如何保证多个子镜面保持相对位置稳定,且满足精确度要求的问题。太赫兹频段的定位精确度比微波段要严苛得多,这些问题也是巨大的挑战。

在测试技术方面,准光学技术需要从器件级测试和系统级测试全面研究,包括测量新方法、测量新系统。例如极化栅网性能的测量、极低损耗器件的测量、太赫兹频段天线的测量,地面模拟飞行环境下准光系统的测量。例如极化栅网的测量,最大的问题在于用于测量的器件本身的交叉极化特性要优于栅网本身,才能达到测量的精确度。这对于检测设备本身来说就是一个巨大的挑战。解决该问题的方法可以通过提高系统的动态范围,加大发射功率,采用接收设备的主极化分别接收栅网的主极化和交叉极化。这种方案能一定程度上缓解加工制作的问题,但受限于系统的功率并不能完全解决测试中的问题。同样,馈源测量的难点在于交叉极化和旁瓣的测量。另外,从系统的角度看,单个器件的测试难以表征整个系统的特性,并非单个器件性能良好就能保证系统性能良好。其主要原因是系统性能还与工装环节、工作环境等一系列的因素有关。最后,测量精确度的评估是涉及理论和实验的重要一环。例如在紧缩场环境下测量整体载荷,测量设备对电磁信号散射影响的评估就是一个难点;测量过程中因测量仪器带来的相位误差、幅度漂移也是不易评估的参数。多年来发展的无相位测量尽管在微波段取得一定的成效,但在毫米波及太赫兹频段,其效能如何,仍有待进一步研究。毫米波及太赫兹频段的测试技术,仍然任重道远。

在应用方面,随着我国气象遥感、天文探测、深空探测事业的发展,准光技术将会扮演越来越重要的角色。不少研究人员已经着手开展设计工作<sup>[105-108]</sup>。准光系统的布置也会带来一系列的实际工程问题,这些问题必然会慢慢浮现。在民用领域,准光技术应用在材料测量、等离子体探测、成像等领域也越来越普遍。这些应用的发展使得准光技术慢慢从“上天”普及到“落地”。民用的技术指标可能相对要低一些,那么针对这些应用的技术架构也就有了新的定义空间。因此,准光技术可能会分层级、分领域发展。

在人才培养方面,具有工程意识、研究生层次的人才培养尤为重要。准光系统涉及电学、材料、机械、加工、测试以及软件等各个方面,没有一定的时间积累,很难形成系统化的知识体系。在研究生层次培养专业的人才,有利于准光学领域的技术积累和人才积累,从而促进我国准光学和准光技术的本土化和发展。

## 6 结论

系统介绍了准光技术所涉及的基本理论、主要器件和分析测试方法;总结了部分采用准光学技术开发的射电天文、遥感、成像等应用系统;对准光技术的发展提出了展望。准光技术目前已经广泛地应用于各个领域,但仍有不少理论和技术问题需要进一步研究和解决。随着我国有关重大工程的实施,准光技术既会得到更广泛的应用,又会出现不少新的技术问题。国产化的技术积累和人才培养是解决准光技术本土化的主要途径。

### 参考文献:

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006(1):7-12. (LIU Shenggang. New development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006(1):7-12.)

- [2] CHEN J,HAO Z,YU C,et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2016,46(8):1086–1107.
- [3] ROTHMAN L S,BARBE A,CHRIS B D,et al. The HITRAN molecular spectroscopic database:edition of 2000 including updates through 2001[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003,82(1–4):5–44.
- [4] HU W,JI J,LIU R,et al. Terahertz atmosphere remote sensing[J]. Chinese Optics, 2017,10(5):656–665.
- [5] KULESA C. Terahertz spectroscopy for astronomy:from comets to cosmology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1): 232–240.
- [6] DE B P,ADE P A R,BOCK J J,et al. A flat universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation[J]. Nature, 2000,404(6781):955–959.
- [7] BARTUS P,ISIDRO G M,LA R C,et al. Arecibo observatory for all[J]. Astronomy Education Review, 2007,6(1):1–14.
- [8] RUDOLF H,CARTER M,BARYSHEV A. The ALMA front end optics—system aspects and European measurement results[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(11):2966–2973.
- [9] 南仁东. 500 m球反射面射电望远镜 FAST[J]. 中国科学G辑:物理学、力学、天文学, 2005(5):3–20. (NAN Rendong. 500 m spherical reflector telescope FAST[J]. SCIENCE CHINA Physics,Mechanics & Astronomy, 2005(5):3–20.)
- [10] 冯辉,涂昊,高炳西,等. 被动毫米波太赫兹人体成像关键技术进展[J]. 激光与红外, 2020,50(11):1395–1401. (FENG Hui,TU Hao,GAO Bingxi,et al. Progress on key technologies of passive millimeter wave and terahertz imaging for human body screening[J]. Laser & Infrared, 2020,50(11):1395–1401.)
- [11] 缪玮杰,冯辉,高炳西,等. 一种被动式焦平面太赫兹成像系统设计及仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(1):27–30. (MIAO Weijie,FENG Hui,GAO Bingxi,et al. Design and simulation of a passive terahertz imaging system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(1):27–30.)
- [12] LI S,LI C,LIU W,et al. Study of terahertz superresolution imaging scheme with real-time capability based on frequency scanning antenna[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016,6(3):451–463.
- [13] KENT B M,VAN T. Measurements of incident radio frequency power levels from the L3 technologies provision body scanner for the national academy of science[C]// 2017 Antenna Measurement Techniques Association Symposium(AMTA). Atlanta, GA: IEEE, 2017:1–6.
- [14] 苗俊刚,郑成,胡岸勇,等. 被动毫米波实时成像技术[J]. 微波学报, 2013,29(Z1):100–112. (MIAO Jungang,ZHENG Cheng,HU Anyong,et al. Real-time passive millimeter wave imaging technology[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(Z1):100–112.)
- [15] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):843–848. (CHENG Binbin,LI Huiping,AN Jianfei,et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843–848.)
- [16] 尚晓舟,孙鹏,胡岸勇,等. 协同体制被动毫米波成像系统天线阵布局优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2015,41(10):1842–1847. (SHANG Xiaozhou,SUN Peng,HU Anyong,et al. Antenna array layout optimization of collaborative passive millimeter-wave imaging system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,41(10):1842–1847.)
- [17] GOLDSMITH P F. Quasioptical systems:Gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York:IEEE Press, 1998.
- [18] HIRSHFIELD J L,PETELIN M I. Quasi-optical control of intense microwave transmission[M]. Dordrecht:Springer, 2005.
- [19] 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 quasi-optical technology[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2010.)
- [20] DEGENFORD J E,SIRKIS M D,STEIER W H. The reflecting beam waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1964,12(4):445–453.
- [21] DEGENFORD J E. Power-handling capability of a reflecting beam waveguide[J]. Proceedings of the IEEE, 1965,53(5):493–494.
- [22] 刘小明,于海洋,王海,等. 多模式超高斯馈源的设计与分析[J]. 上海航天, 2018,35(2):97–102. (LIU Xiaoming,YU Haiyang,WANG Hai,et al. Design and analysis of multi-mode super Gaussian feed[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(2):97–102.)
- [23] BALANIS C A. Antenna theory:analysis and design[M]. 3rd. New York:Wiley Interscience, 2005.
- [24] CLARRICOTS P J B. Microwave horns and feeds[M]. New York:IEEE Press, 1994.
- [25] MCKAY J E,ROBERTSON D A,CRUICKSHANK P A S,et al. Compact wideband corrugated feedhorns with ultra-low sidelobes for very high performance antennas and quasi-optical systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(4): 1714–1721.
- [26] MCKAY J E,ROBERTSON D A,SPEIRS P J,et al. Compact corrugated feedhorns with high Gaussian coupling efficiency and

- 60 dB sidelobes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016,64(6):2518–2522.
- [27] 刘小明,张帆,甘露,等. 基于波纹喇叭天线的模式转换器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(1):103–107. (LIU Xiaoming,ZHANG Fan,GAN Lu,et al. Mode converter based on corrugated horn antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(1):103–107.)
- [28] 姚远,俞俊生,陈晓东. 太赫兹超高斯波纹喇叭天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):487–490. (YAO Yuan,YU Junsheng,CHEN Xiaodong. Design of terahertz ultra Gaussian corrugated horn antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):487–490.)
- [29] GRANET C,JAMES G L. Design of corrugated horns:a primer[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2005,47(2):76–84.
- [30] ELLISON B N,OLDFIELD M L,MATHESON D N,et al. Corrugated feedhorns at terahertz frequencies—preliminary results[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995,43(4):375254.
- [31] GONZALEZ A,KANEKO K,KOJIMA T,et al. Terahertz corrugated horns 1.25~1.57 THz: design, Gaussian modeling, and measurements[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016:1–11.
- [32] 俞俊生,刘小明,姚远,等. 太赫兹赋形面天线技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):26–31. (YU Junsheng,LIU Xiaoming,YAO Yuan,et al. Terahertz shaped reflector antenna technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):26–31.)
- [33] MUNK B A. Frequency Selective Surface:theory and design[M]. New York:Wiley Interscience, 2000.
- [34] 刘小明,俞俊生,陈晓东. 太赫兹波段频率选择表面的设计与测试[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):853–858. (LIU Xiaoming,YU Junsheng,CHEN Xiaodong. Design and measurement of terahertz Frequency Selective Surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):853–858.)
- [35] YANG X,ZENG Y,LIU X,et al. Low-loss Frequency Selective Surface for multi-band THz transmission measurement[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020,62(5):1860–1865.
- [36] MARTIN R J,MARTIN D H. Quasi-optical antennas for radiometric remote-sensing[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1996,8(1):37–48.
- [37] ANTONOPOULOS C,CAHILL R,PARKER E A,et al. Multilayer frequency-selective surfaces for millimeter and submillimeter wave applications[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 1993,14(9):1769–1788.
- [38] DICKIE R,CAHILL R,FUSCO V,et al. THz Frequency Selective Surface filters for earth observation remote sensing instruments[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(2):450–461.
- [39] 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(4):524–527. (LYU 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.)
- [40] MARHEFKA R J,YOUNG J D,TOWLE J P. Design,fabrication and measurement of an FSS antenna ground plane[C]// 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu,HI:IEEE, 2007:3972–3975.
- [41] 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.
- [42] 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 Antennas and Propagation, 2001,49(7):1054–1064.
- [43] DUBROVKA R,VAZQUEZ J,PARINI C,et al. Equivalent circuit method for analysis and synthesis of frequency selective surfaces[J]. IEEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 2006,153(3):213.
- [44] MIDDENDORF J R,CETNAR J S,OWSLEY J,et al. High fill-factor substrate-based wire-grid polarizers with high extinction ratios[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(3):376–382.
- [45] ZHANG F,HUANG M,WANG H,et al. Study of dual-frequency polarizer for electron cyclotron resonance heating systems of 105 and 140 GHz[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020,48(5):1298–1302.
- [46] HUNTER R I,ROBERSON D A,GOY P,et al. Design of high-performance millimeter wave and sub-millimeter wave quasi-optical isolators and circulators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007,55(5):890–898.
- [47] CHEN C H,YU T H,LEE Y C. Direct metal transfer lithography for fabricating wire-grid polarizer on flexible plastic substrate[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011,20(4):916–921.
- [48] LIU Z,LIU Y,ZHANG W,et al. Low-profile reflective polarization conversion metasurface with frequency selective characteristics[J]. Materials Research Express, 2019,6(8):085807.
- [49] PEREZ-PALOMINO G,PAGE J E,ARREBOLA M,et al. A design technique based on equivalent circuit and coupler theory for broadband linear to circular polarization converters in reflection or transmission mode[J]. IEEE Transactions on Antennas and

- Propagation, 2018,66(5):2428–2438.
- [50] FONSECA N J G, MANGENOT C. High-performance electrically thin dual-band polarizing reflective surface for broadband satellite applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016,64(2):640–649.
- [51] TANG W, MERCADER-PELLICER S, GOUSSETIS G, et al. Low-profile compact dual-band unit cell for polarizing surfaces operating in orthogonal polarizations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(3):1472–1477.
- [52] MARTINEZ DE RIOJA E, ENCINAR J A, PINO A, et al. Broadband linear-to-circular polarizing reflector for space applications in Ka-band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(9):6826–6831.
- [53] MERCADER PELLICER S, TANG W, BRESCIANI D, et al. Angularly stable linear-to-circular polarizing reflectors for multiple beam antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001,69(8):4380–4389.
- [54] FARTOOKZADEH M, MOHSENI A S H. Dual-band reflection-type circular polarizers based on anisotropic impedance surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016,64(2):826–830.
- [55] LIU X, ZHANG J, LI W, et al. Three-band polarization converter based on reflective metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):924–927.
- [56] JANZ S, BOYD D A, ELLIS R F. Reflectance characteristics in the submillimeter and millimeter wavelength region of a vacuum compatible absorber[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1987,8(6):627–635.
- [57] LIU H, LIU X, YUAN K, et al. A five-channel grating spectrometer for millimeter waves[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 1993,14(5):1083–1089.
- [58] MONNIER J D. Optical interferometry in astronomy[J]. Reports on Progress in Physics, 2003,66(5):789–857.
- [59] CLARKE R N, ROSENBERG C B. Fabry–Perot and open resonators at microwave and millimetre wave frequencies, 2~300 GHz[J]. Journal of Physics E:Scientific Instruments, 1982,15(1):9–24.
- [60] O'SULLIVAN C, ATAD ETTEDEGUI E, DUNCAN W, et al. Far-infrared optics design & verification[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002,23(7):1029–1045.
- [61] YU J, LIU S, XU L, et al. An integrated quasi-optical analysis method and its experimental verification[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009,31(2):181–195.
- [62] DAUBECHIES I. The wavelet transform, time frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990,36(5):961–1005.
- [63] 李鹏, 郑飞, 李娜. 表面纹理对反射面天线电性能的影响[J]. 电子与信息学报, 2009,31(9):2278–2282. (LI Peng, ZHENG Fei, LI Na. Effects of surface texture on far field patterns of reflector antennas[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,31(9):2278–2282.)
- [64] 宋立伟, 段宝岩, 郑飞. 反射面表面与馈源误差对天线方向图的影响[J]. 系统工程与电子技术, 2009,31(6):1269–1274. (SONG Liwei, DUAN Baoyan, ZHENG Fei. Effects of reflector errors and phase center errors of feed on the far-field pattern of reflector antennas[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(6):1269–1274.)
- [65] 季莉栓, 张立昆. 基于三坐标测量机的副反射面测量技术[J]. 无线电通信技术, 2016,42(6):63–65. (JI Lishuan, ZHANG Likun. Subreflector measurement technique based on CMM[J]. Radio Communication Technology, 2016,42(6):63–65.)
- [66] DOYLE D, PILBRATT G, TAUBER J. The Herschel and Planck space telescopes[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(8):1403–1411.
- [67] ROLO L F, PAQUAY M H, DADDATO R J, et al. Terahertz antenna technology and verification: Herschel and Planck—a review[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010,58(7):2046–2063.
- [68] YU J, LIU S, XU L, et al. Study of a two-layer dichroic for quasioptical network[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010,52(4):900–904.
- [69] 俞俊生, 陈晓东. 毫米波与太赫兹天线测量技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (YU Junsheng, CHEN Xiaodong. Millimeter wave and THz antenna measurement technology[J]. Beijing: Science Press, 2015.)
- [70] LI Z P, ALA-LAURINHO J, DU Z, et al. Realization of wideband hologram compact antenna test range by linearly adjusting the feed location[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(11):5628–5633.
- [71] GOLDSMITH P F, LIS D C. Early science results from the Heterodyne Instrument for the Far Infrared (HIFI) on the Herschel space observatory[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,2(4):383–392.
- [72] LAWRENCE C R. The low frequency instrument on Planck[J]. New Astronomy Reviews, 2003,47(11–12):1025–1032.
- [73] WOOTTEN A, THOMPSON A R. The Atacama large millimeter/submillimeter array[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(8):1463–1471.
- [74] MATHER J C, HAUSER M G, BENNETT C L, et al. Early results from the Cosmic Background Explorer (COBE) [C]// AIP

- Conference Proceedings. Bangalore, India: AIP, 1992:266–278.
- [75] MELNICK G J. Submillimeter wave astronomy satellite science highlights[J]. *Advances in Space Research*, 2004,34(3):511–518.
- [76] FRISK U, HAGSTRÖM M, ALA LAURINAHO J, et al. The odin satellite: I. radiometer design and test[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003,402(3):L27–L34.
- [77] 张瑜, 张升伟, 王振占, 等. FY-3 卫星大气湿度微波探测技术发展[J]. *上海航天*, 2017,34(4):52–61. (ZHANG Yu, ZHANG Shengwei, WANG Zhenzhan, et al. Technology development of atmospheric humidity sounding of FY-3 satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017,34(4):52–61.)
- [78] 张志清, 陆风, 方翔, 等. Application and development of FY-4 meteorological satellite[J]. *上海航天*, 2017,34(4):8–19. (ZHANG Zhiqing, LU Feng, FANG Xiang, et al. Technology development of atmospheric humidity sounding of FY-4 satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017,34(4):8–19.)
- [79] TSAN Mo. AMSU-a antenna pattern corrections[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999,37(1):103–112.
- [80] SAUNDERS R W, HEWISON T J, STRINGER S J, et al. The radiometric characterization of AMSU-B[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995,43(4):760–771.
- [81] BARATH F T, CHAVEZ M C, COFIELD R E, et al. The upper atmosphere research satellite microwave limb sounder instrument[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993,98(D6):10751.
- [82] LIANG S. Comprehensive remote sensing[M]. Oxford: Elsevier, 2018.
- [83] COSTES L, BUSHELL C, BUCKLEY M J, et al. Microwave Humidity Sounder(MHS) antenna[J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 1999:3870.
- [84] OCHIAI S, KIKUCHI K, NISHIBORI T, et al. Gain nonlinearity calibration of submillimeter radiometer for JEM/SMILES[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012,5(3):962–969.
- [85] EVANS K F. Submillimeter-wave cloud ice radiometer: simulations of retrieval algorithm performance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002,107(D3):4028.
- [86] WANG J R, CHANG L A, MONOSMITH B, et al. Water vapor profiling from CoSSIR radiometric measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008,46(1):137–145.
- [87] OLDFIELD M, MOYNA B, ALLOUIS E, et al. MARSCHALS: development of an airborne millimeter wave limb sounder[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001(4540):221–228.
- [88] REZAC L, ZHAO Y, HARTOGH P, et al. Three-dimensional analysis of spatial resolution of MIRO/Rosetta measurements at 67P/Churyumov Gersimenko[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019(630):34.
- [89] HAN Y, WENG F, ZOU X, et al. Characterization of geolocation accuracy of Suomi NPP advanced technology microwave sounder measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016,121(9):4933–4950.
- [90] TSAN Mo. Calibration and validation of the NOAA-18 microwave radiometers[C]// 2006 IEEE MicroRad. San Juan, Puerto Rico: IEEE, 2006:24–28.
- [91] HAMMAR A, WHALE M, FORSBERG P, et al. Optical tolerance analysis of the multi-beam limb viewing instrument STEAMR[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014,4(6):714–721.
- [92] GELSTHORPE R V, HELIERE A, LEFEBVRE A, et al. Aspects of the EarthCARE satellite and its payload[J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2010(258):109–132.
- [93] SCHRODER A, MURK A, WYLDE R, et al. Electromagnetic design of calibration targets for MetOp-SG microwave instruments[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017,7(6):677–685.
- [94] JACOB K, SCHRODER A, KOTIRANTA M, et al. Design of the calibration target for SWI on JUICE[C]// 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2016:1–2.
- [95] BUEHLER S A, JIMÉNEZ C, EVANS K F, et al. A concept for a satellite mission to measure cloud ice water path, ice particle size, and cloud altitude[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007,133(S2):109–128.
- [96] LYONS B N, SHERIDAN I, SHEEHY F, et al. A satellite-based multichannel MM-wave receiver implemented using quasi-optical demultiplexing[J]. *Microwave Journal*, 1990(33):197–202.
- [97] LIU X, YU H, GAN L, et al. A Gaussian beam method for push-broom antenna design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020,68(12):8144–8149.
- [98] LIU X, WANG Y, ZHANG T, et al. A compact multiband quasi-optical system for plasma detection[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020,68(6):4916–4924.
- [99] EARLE K A, TIPIKIN D S, FREED J H. Far-infrared electron-paramagnetic-resonance spectrometer utilizing a quasioptical reflection bridge[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996,67(7):2502–2513.

- [100] LIU X, YU J. Characterization of the dielectric properties of water and methanol in the D-band using a quasi-optical spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2019,9(1):18562.
- [101] LIU X, YU S, GAN L, et al. Broadband quasi-optical dielectric spectroscopy for solid and liquid samples[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2020,41(7):810–824.
- [102] LIU X, GAN L, YANG B. Millimeter-wave free-space dielectric characterization[J]. Measurement, 2021(179):109472.
- [103] 张龙, 窦文斌. 基于准光技术的亚毫米波单脉冲天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):783–787. (ZHANG Long, DOU Wenbin. Sub-millimeter wave monopulse antenna based on quasi-optical technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):783–787.)
- [104] 王龙, 窦文斌, 孟洪福, 等. 短毫米波波束功率合成方法[J]. 红外与毫米波学报, 2019,38(2):133–138. (WANG Long, DOU Wenbin, MENG Hongfu, et al. Approach of beam power combining at short millimeter waves[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2019,38(2):133–138.)
- [105] 王新彪, 李靖, 张升伟. 毫米波/亚毫米波临边探测仪准光技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):595–600. (WANG Xinbiao, LI Jin, ZHANG Shengwei. Quasi-optical technology in millimeter/sub-millimeter limb sounder[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):595–600.)
- [106] 李贝贝, 姚崇斌, 谢振超, 等. 太赫兹准光学馈电网络研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):939–943. (LI Beibei, YAO Chongbin, XIE Zhengchao. Research progress in terahertz quasi-optical feed network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):939–943.)
- [107] 刘佳, 万继响, 施锦文, 等. 准光学馈电系统设计与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):180–183. (LIU Jia, WANG Jixiang, SHI Jinwen, et al. Design and analysis of the quasi-optical feed system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):180–183.)
- [108] 张晓玲. 准光学系统的并行物理光学仿真研究[D]. 上海:上海师范大学, 2016. (ZHANG Xiaoling. Research of parallel physical optical simulation of quasi-optical systems[D]. Shanghai, China:Shanghai Normal University, 2016.)

#### 作者简介:

刘小明(1983–), 男, 博士, 特聘教授, 主要从事太赫兹科学与技术领域的研究, 同时研究微波技术以及生物电磁技术. email:xiaoming.liu@ahnu.edu.cn.

俞俊生(1961–), 男, 博士, 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, 博士, 教授, 主要研究方向为天线与微波器件、太赫兹技术、生物电磁学.