

一种可用于太赫兹扫描成像的天线

王汉奇¹ 刘 鑫² 邓 朝³ 张存林¹

¹首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048

²光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201

³北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 为克服目前太赫兹扫描成像技术所用扫描天线存在的不足,设计了一种能够实现一维频率扫描的矩形波导窄边开斜缝天线。具体采用设计缝隙天线的等效电路法和泰勒线阵法估算得到缝距、缝长、缝宽、缝倾角和缝数等初始参数。然后在ANSOFT-HFSS软件中建模仿真并优化,最终得到适用于0.101~0.111 THz带宽的天线。仿真结果表明,天线能够在波导的延展方向上按照不同角度发射或接收带宽内不同频率的太赫兹波,扫描角度约为 6.1° ,各频率点主瓣增益较高、主副瓣电平相差较大。该天线具有结构紧凑、体积小、重量轻、成本低、扫描速度较快的优点,对于太赫兹扫描成像技术具有一定的应用价值。

关键词 成像系统; 矩形波导窄边开斜缝天线; 模拟仿真; 频率扫描

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0711004

An Antenna can be Used for Terahertz Scanning Imaging

Wang Hanqi¹ Liu Xin² Deng Chao³ Zhang Cunlin¹

¹Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory for THz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

²Key Laboratory of Photoelectric Information Control and Safety Technology, San He, Hebei 065201, China

³School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to overcome the shortcomings of the scanning antenna that is used in the current terahertz scanning imaging technology, a rectangular wave-guide antenna with inclined slits in the narrow side which can achieve one-dimensional frequency scanning is designed. Through applying the equivalent circuit method and the Taylor line array method for designing slit antenna, the initial parameters such as slit spacing, slit width, slit length, slit inclination and slit number are estimated. Then, simulation and optimization are done in the ANSOFT-HFSS software. Finally, the antenna which is suitable for 0.101~0.111 THz bandwidth is achieved. The simulation results show that the antenna transmits or receives different frequencies according to different angles in bandwidth in the extending direction of wave-guide so that it can accomplish frequency scanning. Scanning range is about 6.1° . The gain of main lobe is higher and the difference between the main lobe level and minor lobe level at every frequency point is larger. The antenna has advantages of compact structure, small volume, light weight, low cost, faster scanning, which provides a certain application value for the terahertz scanning imaging technology.

Key words imaging systems; rectangular wave-guide antenna with inclined slits in the narrow side; analog simulation; frequency scanning

OCIS codes 110.6795; 110.2970

收稿日期: 2015-03-05; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 北京市教育委员会科技面上项目(11224010011)、北京市教育委员会市属高校创新能力提升计划项目(TJSHG201310028012)

作者简介: 王汉奇(1987—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹波谱与成像方面的研究。E-mail:whqwanganqi@163.com

导师简介: 张存林(1961—),男,博士,教授,主要从事太赫兹及红外波谱与成像和光电信息功能材料方面的研究。

E-mail: cunlin_zhang@cnu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

利用太赫兹波对纺织品、皮革制品等有较好的穿透性,对金属、陶瓷、有机塑料等制成的危险品、违禁品有较高的识别度,科学家提出了太赫兹扫描成像技术,借助太赫兹波识别藏匿于人身上的危险、违禁物品^[1]。

如今,太赫兹扫描成像技术的相关设备已被研制出来,在安全保障、反恐防爆、查毒缉毒、海关缉私等领域都有较大的应用价值,并已在欧美尤其是美国的一些机场实现应用。但是,这种成像技术目前所使用的单波束机械扫描天线、相控阵天线、合成孔径天线、焦平面成像天线还存在一些缺点,限制了其推广应用^[2]。其中,单波束机械扫描天线只依靠一个收发器的机械运动来扫描目标场,虽然结构简单、价格低廉,但其扫描速度和效率都很低;相控阵天线通过控制阵列天线中辐射单元的馈电相位改变波束指向实现对目标场的扫描,虽然扫描快速灵活,但制造困难、价格昂贵;合成孔径天线通过对不同位置获得的信号进行相干处理来扫描目标场,虽然分辨率高,但结构复杂;焦平面成像天线是将多个接收单元排列在聚焦部件的焦平面上,利用各馈源偏离焦点的程度不同,形成多个不同指向的波束覆盖目标场,虽然扫描速度快,但体积庞大。美国、英国、德国、芬兰等国家以及我国的研究机构利用上述天线开发出了多种二维机械扫描、光机扫描或面阵扫描系统来实现扫描成像的相关功能,如英国 QinetiQ 公司的单通道太赫兹成像系统、美国 Brijot 公司的光机扫描成像系统、英国 Thruvision 公司的 0.25 THz 面阵系统等。但受制于各方面因素,这些系统都没有达到理想状态。

太赫兹波段紧邻毫米波波段,二者在某些方面的效应相似。由于毫米波波段的研究早于太赫兹波段,相对成熟,所以毫米波的一些技术成果值得借鉴。矩形波导窄边开斜缝天线发射或接收电磁波信号快速灵活,结构简单紧凑,设计时能实现低副瓣乃至超低副瓣。美国的 Trex 公司和一些机构合作,已采用矩形波导窄边开斜缝天线研发出一整套被动毫米波成像设备,并取得了较好的效果^[3-7]。因此,在一定程度上为克服上述四种天线存在的缺点,促进太赫兹扫描成像技术的发展,本文按照实际需求,在全长 76.26 mm 的 WR-10 型标准波导窄边上刻出一定数目、长度、宽度、间距和倾角的倾斜缝隙形成矩形波导窄边开斜缝天线。仿真结果表明,其可瞬时发射或接收一维方向 0.101 ~ 0.111 THz 带宽的太赫兹波;依赖其几何结构进行频率扫描时,在某一方向的方向角是该方向发射或接收到的太赫兹波频率的函数,即随着太赫兹波频率的变化,天线波瓣角度也将随之发生合理的变化。

2 波导窄边开斜缝天线的频率扫描原理

根据天线互易原理,接收天线与发射天线收发电磁波互易,基本参数相同。为方便简洁地研究与处理问题,通过解释说明并设计了一根用作发射的矩形波导窄边开斜缝天线,下面的分析和设计均针对发射型天线。

把一根开有缝隙的波导置于自由空间中,给其馈电,并在波导末端接匹配负载。只有当开缝的延展方向与波导上通电流后的电流线方向不平行时,电磁波才会被发射出去;反之,电磁波不会被发射出去。原因是当所开缝隙与电流线不平行时,会截断波导表面电流线。这时,表面电流的一部分绕过开缝继续流动,而另一部分则以位移电流的形式继续通过开缝传导,并激励开缝向波导外发射电磁波。开缝的位置可以在波导的宽边上,也可以在波导的窄边上,只要截断电流线,开缝就能向外发射电磁波,但在波导不同位置上设置的开缝所具有的特点不同。一般来说,谐振阵在宽边上设置开缝,而非谐振阵在窄边上设置开缝^[8-9]。为了最初的设计目的,即发射或接收 0.101 ~ 0.111 THz 带宽的太赫兹波,采用波导窄边开斜缝天线。

在波导窄边开斜缝形成天线,天线的远场方向可表示为

$$D(\alpha) = D_1(\alpha) \cdot D_2(\alpha), \quad (1)$$

式中 $D_1(\alpha)$ 为单个斜缝的方向函数, $D_2(\alpha)$ 为整个斜缝阵的阵列因子, α 为波束与波导法线方向所成的角。单个斜缝的方向函数 $D_1(\alpha)$ 由斜缝的几何构造确定,而整个斜缝阵的阵列因子 $D_2(\alpha)$ 则由天线阵列中流经所有斜缝馈电电流的分布以及斜缝的数目和间距确定^[8-10]。由 N 个间距为 d 的斜缝所构成的天线的阵列因子为

$$D_2(a) = \sum_{n=1}^N A_n \exp[j(kd \sin \alpha - \phi)], \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, $\phi = 2\pi d/\lambda_g$; λ 为电磁波在自由空间中的波长, λ_g 为波导工作波长, ϕ 为相邻两斜缝间的激励相位差。天线辐射场的极大值由所有斜缝辐射的干涉效应产生, 即此时远场天线波束方向图取得极大值, 则

$$kd \sin \alpha - \phi = 2m\pi, m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (3)$$

即

$$\alpha = \arcsin[(2m\pi + \phi)/(kd)], m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (4)$$

由频率扫描要求, 在远场方向图中只需出现一个主瓣, 所以取 $m=0$, 则主瓣出现的角度为

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{d}\right). \quad (5)$$

此外, 若由同向倾斜的缝隙激励, 如图 1 所示, 相邻斜缝间的激励相位差为

$$\phi = 2\pi d/\lambda_g. \quad (6)$$

由于斜缝间距 d 的作用, 相邻斜缝间的相位差自身已经在 π 值附近; 为使各斜缝同相激励, 需在相邻斜缝间再添加 π 的附加相位差, 可采用缝隙反向倾斜的排列方式获得, 如图 2 所示^[10]。

这时相邻斜缝之间的激励相位差变为

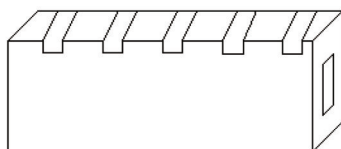


图 1 缝隙同向倾斜

Fig.1 Slits incline to the same direction

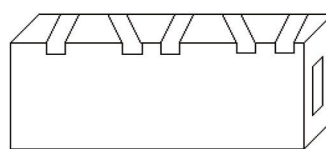


图 2 缝隙反向倾斜

Fig.2 Slits incline to the opposite direction

$$\phi^* = (2\pi d/\lambda_g) - \pi, \quad (7)$$

且自由空间波长为

$$\lambda = c/f, \quad (8)$$

波导工作波长为

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}, \quad (9)$$

式中 a 为波导天线截面宽边边长。由(5)式~(9)式可得主瓣波束偏向角

$$\alpha'_0 = \arcsin[\sqrt{1 - (c/2af)^2} - (c/2df)]. \quad (10)$$

由(10)式可知, 当波导天线的物理尺寸, 即截面宽边边长 a 和缝距 d 由天线的设计要求确定后, α'_0 仅与辐射波的频率 f 有关。改变频率 f 即可改变 α'_0 , 从而改变波瓣指向。对接收天线而言, 也相当于方向角变化时, 其接收电磁波的频率发生改变, 从而实现频率扫描的功能。

3 设计流程

1) 根据发射或接收太赫兹波的带宽要求, 选择合适的标准波导。针对 0.101~0.111 THz 的带宽, 查询标准矩形波导的参数表可知, 应选择 WR-10 型波导。波导类型确定后, 其宽边、窄边尺寸即确定。至于波导天线长度 L , 则根据仿真要求并结合实际需求设置为 76.26 mm。

2) 综合运用设计缝隙天线的等效电路法和泰勒线阵法, 并结合实践经验确定天线的基本结构参数, 即缝距、缝长、缝宽、缝倾角和缝数。运用等效电路法和泰勒线阵法设计斜缝时, 将斜缝等效为并联导纳, 将天线的电磁场辐射特性看成是阻抗特性, 并对相关计算予以近似处理^[8-11]。

3) 将上面得到的参数输入 ANSOFT-HFSS 软件, 建模仿真优化, 得出理论数据。

4) 对各参数进行分析并由实践经验进一步优化, 得到符合要求的设计结果。

4 仿真结果

对于波导开斜缝的数量, 理论上当线阵为无限长时, 可以得到理想的方向图, 但受实际天线尺寸和整个仪器大小的限制, 天线不可能做得太长。因此, 应该在合理的尺寸范围内选择合适的斜缝数。最终, 建立了

一根拥有 40 条斜缝的矩形波导窄边开斜缝天线,在软件中建立的仿真模型如图 3 所示。

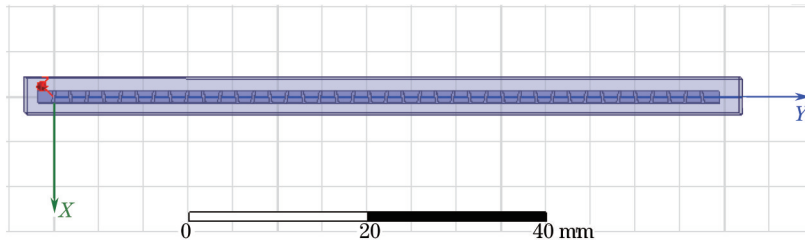


图 3 天线模型

Fig.3 Antenna model

为简化分析,选取带宽内三个有代表性的频率点作为取样点进行研究,分别是初频 0.101 THz、中频 0.106 THz 和终频 0.111 THz。绘制出三个取样频率点的增益方向图,分别如图 4~图 6 所示。此外,为观察天线在 0.101~0.111 THz 带宽内整体的频率扫描特性,平均设置了 10 个频率点进行扫频,并绘制了这 10 个频率点的扫频主瓣增益方向图,如图 7 所示。

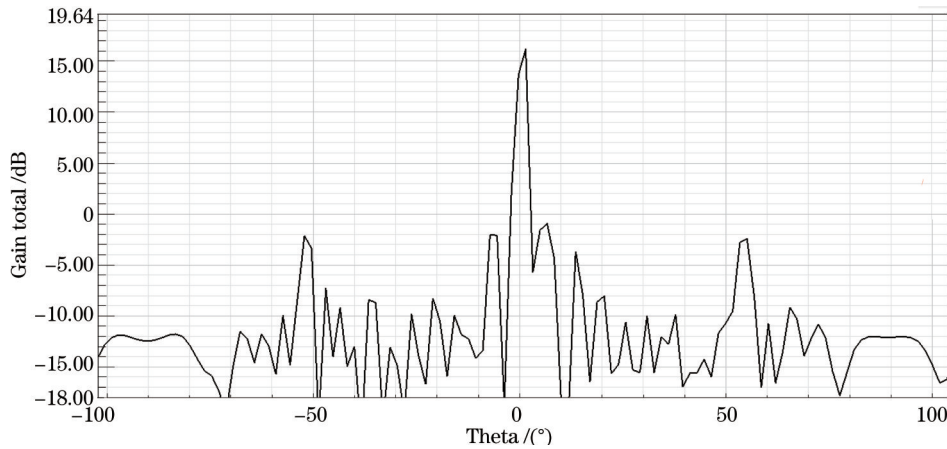


图 4 0.101 THz 时的增益方向图

Fig.4 Gain pattern at 0.101 THz

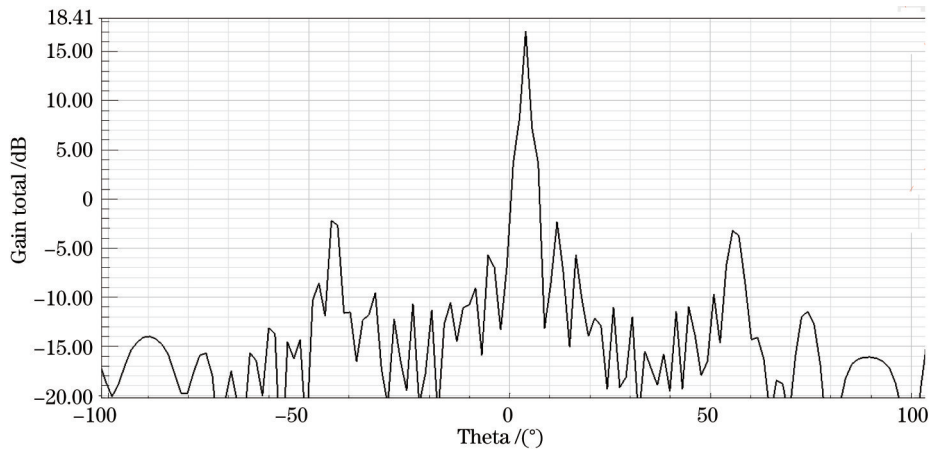


图 5 0.106 THz 时的增益方向图

Fig.5 Gain pattern at 0.106 THz

5 结果分析

1) 主瓣偏移。整体对比上面三个取样频率点的增益方向图,如图 4~图 6 所示。可知,从 0.101 THz 到 0.106 THz,再到 0.111 THz,发现主瓣相对 0° 纵坐标轴有一个明显的偏移,说明频率变化会引起主瓣位置的变化,即天线扫描角度的变化。

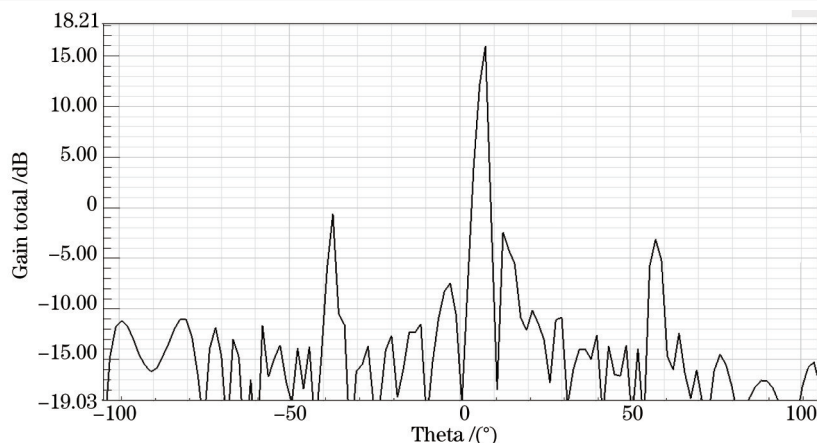


图 6 0.111 THz时的增益方向图

Fig.6 Gain pattern at 0.111 THz

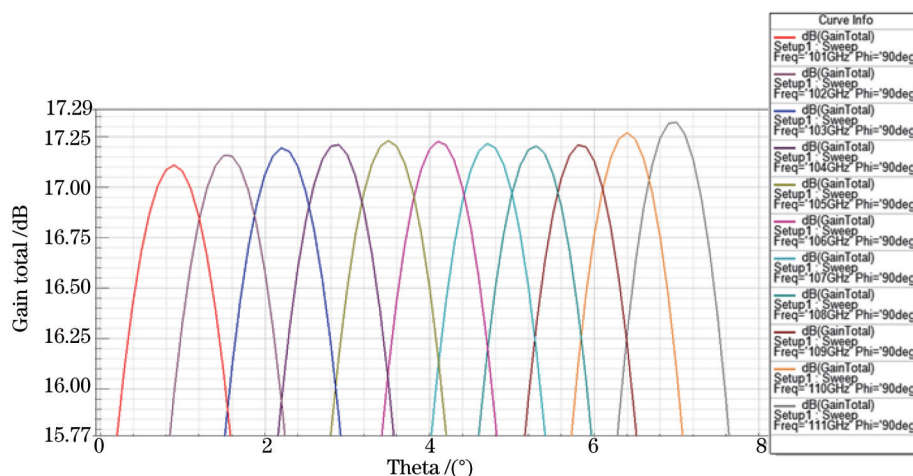


图 7 在 0.101~0.111 THz间设置 10 个频率点扫频的主瓣增益方向图

Fig.7 Main lobe gain pattern of frequency sweeping of 10 frequency points within 0.101~0.111 THz

2) 主瓣指向。观察三个取样频率点的增益方向图,可知,在 0.101 THz 时,主瓣指向 0.9° 附近;在 0.106 THz 时,主瓣指向 4.1° 附近;在 0.111 THz 时,主瓣指向 7° 附近,基本符合主瓣指向角度的设计要求。再结合 0.101~0.111 THz 间设置的 10 个频率点的扫频主瓣增益方向图(图 7),可知,带宽内其他频率点对应的波束指向角随着频率的增加,确实在 $0.9^\circ\sim 7^\circ$ 的范围内顺次逐渐增大,表明所设计的天线具有频率扫描的性能。

3) 主副瓣比较。观察三个取样频率点的增益方向图可知,按 0.101 THz、0.106 THz 和 0.111 THz 的顺序,它们的主瓣增益分别约为 16.20 dB, 17.08 dB, 15.96 dB;第一副瓣电平分别约为 -0.90 dB, -2.33 dB, -2.41 dB;第一副瓣电平与主瓣电平分别相差约 17.10 dB, 19.41 dB, 18.37 dB。

6 结 论

仿真设计了一种可用于太赫兹扫描成像的矩形波导窄边开斜缝天线。该天线能够在沿着波导的延展方向上,并在 0.101~0.111 THz 带宽范围内实现一维频率扫描的目的。无论是 6.1° 的扫描范围,还是各频率点的主瓣增益,都达到了预期效果。但其副瓣电平的值还不够理想,这将在后期的设计和实际制作中,结合实践经验进一步调整优化。该天线在实际使用时,与其他器件结合以频率扫描加机械扫描的二维扫描方式,或并排组成平面阵列以频率扫描加相位扫描的二维扫描方式,将能有效克服单波束机械扫描天线扫描速度慢、效率低的缺点;其矩形波导窄边开斜缝的几何构造能有效克服相控阵天线制造困难、造价高,以及合成孔径天线结构复杂的缺点;其长度仅为 76.26 mm 就可实现一维 6.1° 扫描范围的特点,能有效克服焦平面成像天线体积庞大的缺点。所以,该天线对太赫兹扫描成像技术具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong, *et al.*. Terahertz Sensing and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 166–189.
张存林, 张 岩, 赵国忠, 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 166–189.
- 2 Zhang Jingshui, Zhu Weiwen, Zhao Yuejin, *et al.*. Passive THz imaging system based on the crank–rocker mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013 33(12): 1211006.
张净水, 朱维文, 赵跃进, 等. 基于曲柄摇杆机构的被动太赫兹波成像系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211006.
- 3 Vladimir Kolinko, Chris Sexton, Grant Bishop, *et al.*. Long range millimeter wave surface imaging radar system: US 8362948 B2[P]. 2013.
- 4 Vladimir G Kolinko, Shioh-Hwa Lin, Alex Shek, *et al.*. A passive millimeter–wave imaging system for concealed weapons and explosives detection[C]. *SPIE*, 2005, 5781: 85–92.
- 5 Christopher A Martin, John A Lovberg, William H Dean, *et al.*. High resolution passive millimeter–wave security screening using few amplifiers[C]. *SPIE*, 2007, 6548: 654806.
- 6 Christopher A Martin, Carlos Enol García González, Vladimir G Kolinko, *et al.*. Rapid passive MMW security screening portal[C]. *SPIE*, 2008, 6948: 69480J.
- 7 John Lovberg, San Diego, Chris Martin, *et al.*. Millimeter wave imaging system with frequency scanning antenna: US 7948428 B2 [P]. 2011.
- 8 Liu Gang. Design of the Traveling Wave Array with Crack in the Narrow Wall of a Wave–guide and Research of Shaped–beam[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009: 6–29.
刘 刚. 波导窄边裂缝行波阵的设计及其波束赋形研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 6–29.
- 9 Song Zhaoning. Research and Design of Wave–guide Slot Array Antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 5–36.
宋兆宁. 波导缝隙阵列天线的设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 5–36.
- 10 Wei Wenyuan, Gong Deming. *Antenna Theory*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985, 61–67, 137–147.
魏文元, 宫德明. *天线原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 61–67, 137–147.
- 11 Sui Lishan, Chai Shunlian, Mao Junjie. Design of the antenna of inclined slots in the narrow wall of a rectangular wave–guide[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(3): 14–20.
隋立山, 柴舜连, 毛钧杰. 矩形波导窄边倾斜缝隙天线阵的设计[J]. *现代电子技术*, 2008, 31(3): 14–20.

栏目编辑: 殷建芳