

基片集成波导正弦渐变槽单脉冲天线

邹雄^{*①} 童创明^{①②} 庞维建^① 李丹^①

^①(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

^②(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 为拓展工作带宽,以传统正反渐变槽天线为基础,利用基片集成波导馈电,该文提出了两种高增益、宽频带的正弦渐变槽天线。利用矩形波导 3 dB 定向耦合器和 90° 移相器工作原理设计了半模基片集成波导单脉冲馈电网络,进而得到了对称型和非对称型正弦渐变槽单脉冲天线,带宽均超过了 3.0 GHz,带内和波束最大增益在 9.0 dBi 左右,差波束零深在 10.0 GHz 处均低于 -20 dB。其中,非对称型正弦渐变槽单脉冲天线具有更宽的工作频带和更平稳的天线增益,可以广泛应用于微波定向探测系统中。

关键词: 正弦渐变槽天线; 基片集成波导; 单脉冲; 耦合器

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2227-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01688

Substrate Integrated Waveguide Monopulse Antipodal Sinusoidally Tapered Slot Antennas

Zou Xiong^① Tong Chuang-ming^{①②} Pang Wei-jian^① Li Dan^①

^①(Air and Missile Defense College of Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

^②(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: For expanding the passband, two Antipodal Sinusoidally Tapered Slot Antennas (ASTSAs) with high gain and wide bandwidth are proposed based on the conventional ALTSA and fed by Substrate Integrated Waveguide (SIW). The Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) monopulse fed network is designed by making use of the principles of rectangular 3 dB directional coupler and 90° phase shifter. Then the symmetrical and unsymmetrical monopulse ASTSAs are realized with passbands both over 3.0 GHz and gains of sum beam about 9.0 dBi. The zero depths of different beam at 10.0 GHz both lower than -20 dB. There into, the unsymmetrical monopulse ASTSA has wider bandwidth and more balanced gain, which is widely used in the millimetre-wave directional-finding system.

Key words: Antipodal Sinusoidally Tapered Slot Antenna (ASTSA); Substrate Integrated Waveguide (SIW); Monopulse; Coupler

1 引言

近年来,基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)以其低损耗、易集成等优点而得到了快速的发展,被广泛应用于各类天线的设计中^[1-7]。尤其是将 SIW 作为基片类端射行波天线的馈电结构,既可以保留天线单元原有的优点,还可以免于设计巴伦等结构,从而简化设计流程。而渐变槽天线(Tapered Slot Antenna, TSA)以其波束窄、增益高、频带宽的优点已经得到了广泛应用^[8-14]。2005年,正反直线型渐变槽天线(Antipodal Linearly

Tapered Slot Antenna, ALTSA)首次利用 SIW 来馈电,其组成的 1×8 天线阵列,相对带宽超过 20%,10.0 GHz 处的增益达到了 18.76 dBi^[10]。其后,以此类天线作为基础,利用 SIW 窄壁耦合的 3 dB 电桥和 90°移相器设计 SIW 的 180°定向耦合器,提出了新的宽带 ALTSA 单脉冲天线,其在 33~40 GHz 的工作频带内,和波束最高增益达到了 16.13 dBi,差波束零深达到了 -38.1 dB^[11]。以 SIW 馈电的 ALTSA 甚至发展到了 100 GHz 的频率上,可以用于高速无线通信系统中^[12]。

从 SIW-ALTSA 出发,设计 SIW 正弦渐变槽天线(Antipodal Sinusoidally Tapered Slot Antenna, ASTSA),为了拓展带宽,提出了 SIW 非对称型正弦渐变槽天线,并设计了半模基片集成波导(Half

2013-10-31 收到,2014-02-14 改回

国家自然科学基金(61372033)和毫米波国家重点实验室基金(K201201)资助课题

*通信作者: 邹雄 zouxiong0522@163.com

Mode Substrate Integrated Waveguide, HMSIW) 宽带单脉冲馈源, 从而得到了宽带单脉冲天线, 实验结果验证了设计的有效性。

2 SIW 正弦渐变槽天线

SIW-ALTSA 如图 1(a)所示, 浅色部分为上表面金属层, 深色部分为下表面金属层, 渐变槽的上下表面关于辐射方向对称。天线设计的工作频段主要在 X 波段, 基片采用环氧玻璃介质板, 总宽度为 $W=32.0$ mm, 厚度为 1.0 mm, 相对介电常数为 4.6 , 损耗角正切为 0.001 。SIW 是由两排直径为 0.6 mm、周期为 1.0 mm 的金属化通孔组成, 宽度为 $a=12.4$ mm, 长度为 $l=14.0$ mm, 则等效为矩形金属波导的宽度为 11.95 mm, 截止频率为 5.85 GHz^[15, 16]。为方便测试, 采用微带-SIW 转接器进行过渡, $50\ \Omega$ 微带线宽为 $w_{50}=1.8$ mm, 过渡线长度为 $l_t=9.0$ mm, 最大宽度为 $w_s=4.4$ mm。在天线的设计过程中, 将渐变槽金属面相对于 SIW 的缩进宽度 b , 槽的长度 L_1 和开口处槽的宽度 w 设为变量, 进行仿真优化, 得到具体尺寸为 $b=3.4$ mm, $L_1=50.0$ mm, $w=17.0$ mm。天线的回波损耗仿真结果如图 2(a)所示, 相对带宽为 48.3% ($9.20\sim 15.05$ GHz)。

为拓展工作频段, 考虑将直线型渐变槽改为曲线型渐变槽, 如图 1(b)所示, 渐变槽的金属边沿改为正弦曲线, 此类天线分为两种, 一种是对称型 ASTSA, 另一种是非对称型 ASTSA, 区别在于渐变槽是否关于辐射方向对称。若以 SIW 末端中点为原点, 以垂直于基片向上方向为 x 轴, 与 SIW 宽边平行方向为 y 轴, 天线辐射方向为 z 轴建立直角坐标系, 则渐变槽上下表面曲线分别表示为

$$z = \frac{L_1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{2y - w_1 + b_3}{b_3 + w_1}\right) + \frac{L_1}{2}, \quad -b_3 \leq y \leq w_1 \quad (1)$$

$$z = \frac{L_2}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{-2y - w_2 + b_3}{b_3 + w_2}\right) + \frac{L_2}{2}, \quad -w_2 \leq y \leq b_3 \quad (2)$$

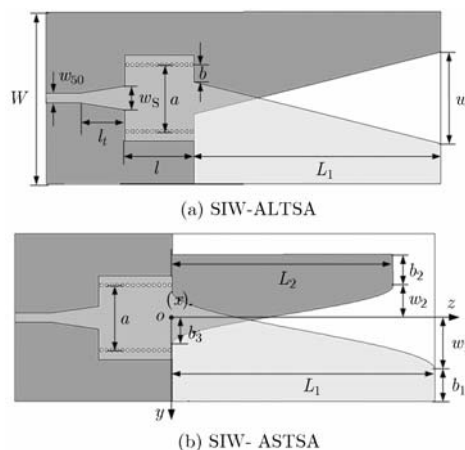
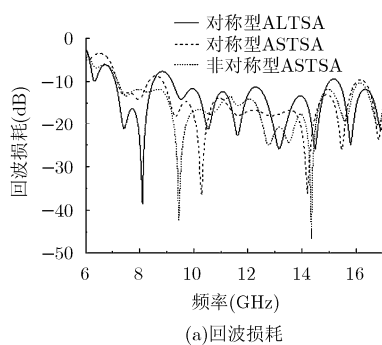


图 1 SIW 正反渐变槽形天线

当渐变槽关于 z 轴对称时, $L_1=L_2$, $w_1=w_2$, $b_1=b_2$ 。经过仿真优化, 确定对称型 ASTSA 的尺寸为: $L_1=50.0$ mm, $w_1=10.0$ mm, $b_1=6.0$ mm, $b_3=6.0$ mm。其他尺寸参数与 ACTSA 相同。在非对称型 ASTSA 中, 渐变槽的下表面金属面积小于上表面金属层, 其尺寸大小为: $L_2=42.0$ mm, $w_2=6.0$ mm, $b_2=6.0$ mm, $b_3=5.0$ mm。

两种 ASTSA 和 ALTSA 的仿真结果示于图 2。对称型 ASTSA 在 $8.85\sim 16.05$ GHz 范围内的回波损耗优于 10 dB, 相对带宽为 57.8% , 通带内最高增益为 9.6 dBi(14.7 GHz 处)。非对称型 ASTSA 的相对带宽达到了 76.7% ($7.20\sim 16.15$ GHz), 通带内最高增益为 9.5 dBi(11.7 GHz 处)。由图 2(b)可以看出, 对称型 ASTSA 和 ALTSA 具有相近的增益大小, 在 10.0 GHz 之前增益逐渐增高, 在 $9.4\sim 15.4$ GHz 内均高于 8.0 dBi。而非对称型 ASTSA 虽然在 3 种天线中的工作带宽最宽, 但是通带内增益并不稳定, 在 $5.0\sim 9.5$ dBi 之间波动。

3 HMSIW 单脉冲馈电网络

根据传统矩形波导 3 dB 耦合器和 90° 移相器的工作原理, 可以方便地设计 SIW 的 180° 定向耦合

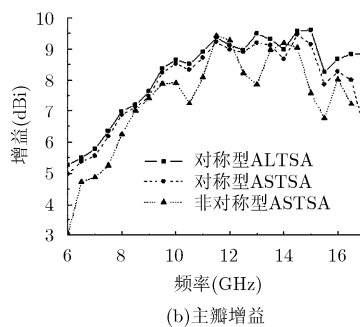


图 2 3 种渐变槽形天线仿真结果

器^[1]。由于 SIW 传播模式为 $TE_{m,n}$ 模，而 HMSIW 传播模式为 $TE_{m-0.5,n}$ 模，当两者其它尺寸参数一样时，将 SIW 上表面金属从中线切割，得到的 HMSIW 具有更宽的单模传输通带，因此利用 HMSIW 设计的微波电路往往具有比 SIW 更宽的工作带宽。

HMSIW 单脉冲馈电网络如图 3 所示，端口 1 和端口 2 为输入端，经过 HMSIW 的 3 dB 电桥和 90°移相器后由端口 3 和端口 4 输出，中心频率设置为 10.0 GHz。当信号由端口 1 输入时，输出端信号等幅同相，当信号由端口 2 输入时，输出端信号等幅反相。为避免耦合器内出现 TE_{30} 模，耦合段的宽度 a' 要小于 a ，为 11 mm。移相器中两条 HMSIW 分支的宽度分别为 $a_1=7.4$ mm, $a_2=5.0$ mm。为使电磁波平稳传输从而减小回波损耗，在移相器的 90°转弯处设置了两个金属化孔，半径分别为 $r_1=0.6$ mm, $r_2=0.5$ mm。输出的 HMSIW 分支距离为 $l_6=34.8$ mm，这样方便天线单元进行布阵。为达到 180°移相的目的，耦合段长度 l_2 和移相器长度 l_4 应分别满足的条件为

$$2\pi l_2 \left(\frac{1}{\lambda_g(TE_{10})} - \frac{1}{\lambda_g(TE_{20})} \right) = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

$$2\pi l_4 \left(\frac{1}{\lambda_g(a_2)} - \frac{1}{\lambda_g(a_1)} \right) = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中， $\lambda_g(TE_{10})$ 和 $\lambda_g(TE_{20})$ 是宽度为 $2a'$ 的 SIW 在 TE_{10} 模和 TE_{20} 模下的波导波长， $\lambda_g(a_1)$ 和 $\lambda_g(a_2)$ 分别是宽度为 a_1 和 a_2 的 HMSIW 在主模下的波导波长。通过式(3)和式(4)可以初步确定 l_2 和 l_4 的大小，然后利用仿真软件进行优化，得到的具体尺寸为 $l_2=17.0$ mm, $l_4=23.0$ mm。该馈电网络的其他尺寸参数为 $w_{HS}=3.4$ mm, $l_1=11.2$ mm, $l_3=11.0$ mm, $l_5=10.8$ mm。

HMSIW 单脉冲馈电网络的仿真结果示于图 4，在 8.5~13.0 GHz 内，两输入端的回波损耗和隔离度均大于 10 dB，电压传输系数最大为 -4.1 dB，即插入损耗最小为 1.1 dB。随着频率的升高插损逐渐增大，在 13.0 GHz 处端口 4 的插损达到了 4.0 dB。其原因一方面是由于 HMSIW 为半开放结构，能量

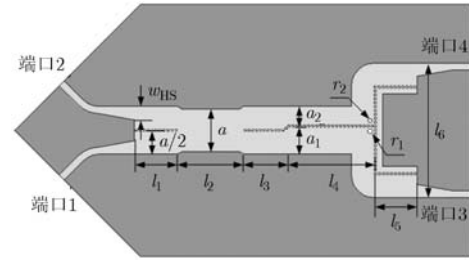


图3 HMSIW单脉冲馈电网络

辐射较为严重，另一方面是由于传输线较长使得介质损耗增大。在 9.0~12.0 GHz 范围内，输出端传输系数较为稳定，约为 -5.1 dB，波动在 ±0.8 dB 之内，当信号从端口 1 输入时，输出端相位差在 -5.0°~7.4°之间，当信号从端口 2 输入时，输出端相位差在 171°~184°之间，在 10.0 GHz 处的相位差分别为 7.2°和 182.2°。文献[11]中利用 SIW 实现的 180°定向耦合器虽然具有较高的电压传输系数(约为 -4.0 dB)，但其仅在 8.8%(34.2~38.0 GHz)的带宽内，输出端相位差分别在 0°±10°和 180°±10°内。而用 HMSIW 实现的 180°定向耦合器虽然插入损耗略高于 SIW 耦合器，从而会影响天线的辐射损耗，但是其相位差的不平衡度大大减小，使得其相对带宽大大扩展，达到了 30%，能够较好地应用于宽带单脉冲天线的馈电系统中。

4 SIW-ASTSA 单脉冲天线

由 HMSIW 的 180°定向耦合器和 SIW-ASTSA 组合的单脉冲天实物如图 5 所示，天线单元与耦合器之间采用一线段微带线相连，这样可以使得在较高频率下($f > 11.8$ GHz)电磁场的能量主要集中在 SIW 中线附近，从而减小 HMSIW 与 SIW 直接过渡时产生高次模的影响。

过渡段微带线的长度为 18.0 mm，最窄处位于中点上，宽度为 2.0 mm，两侧宽度分别同于 w_{HS} 和 w_S 。两天线单元的距离为 32.8 mm，端口 1 与端口 2 分别为和端口与差端口。SIW 对称型和非对称型

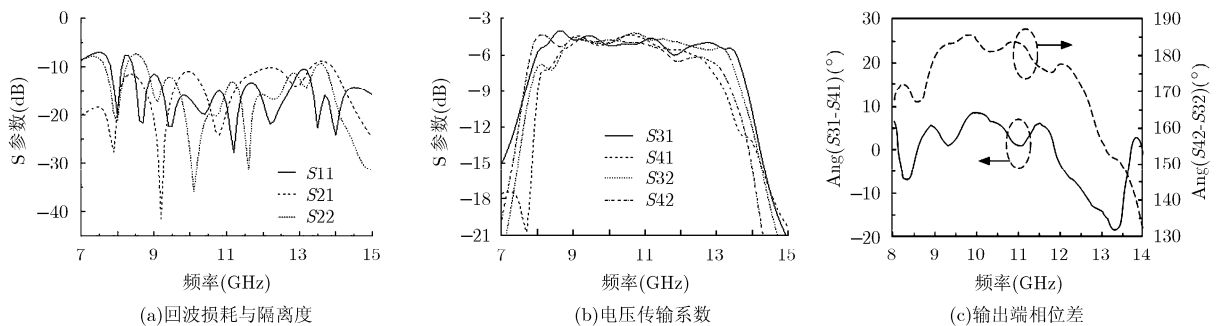


图4 HMSIW单脉冲馈电网络的S参数

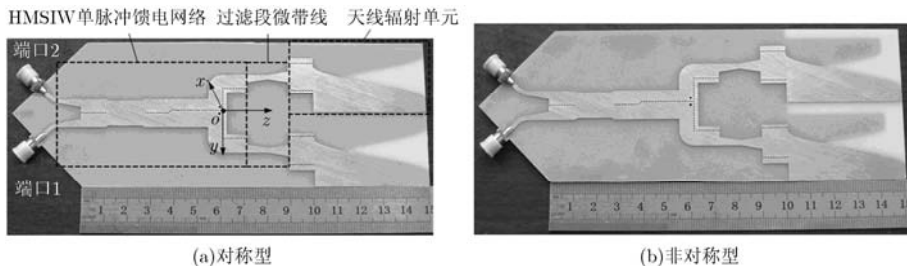


图 5 SIW-ASTSA 单脉冲天线实物图

ASTSA 单脉冲天线的 S 参数测量结果示于图 6。对称型天线输入端的回波损耗和隔离度在 9.5~12.6 GHz 内均大于 10 dB，相对带宽为 28.0%，而非对称型天线的相对带宽为 33.9%(9.3~ 13.1 GHz)，可见两种单脉冲天线仍然继承了各自天线单元的特点，即非对称型天线的工作频带要宽于对称型天线。

由天线增益图7可以看出，对称型ASTSA单脉冲天线在9.2~12.4 GHz内和波束增益大于8.5 dBi，其中在10.8 GHz时达到最大，为9.7 dBi。非对称型天线在8.4~12.3 GHz内和波束增益大于8.5 dBi，其中在8.6 GHz时达到最大，为10.4 dBi，但在各自通带内的增益均在9.0 dBi左右。图8给出了两种天线在频率为10.0 GHz处的归一化方向图。对称型ASTSA单脉冲天线和波束增益为9.0 dBi，低于仿真结果1.1 dB，E面(yoz面)半功率波束宽度为24°，H面(xoz面)波束宽度为61°，差波束零深为-27.4 dB，在-20°和22°方向达到峰值，分别低于和波束最大增益1.9 dB和1.4 dB。非对称型ASTSA单脉冲天线和波束增益

为8.6 dBi，低于仿真结果约1.2 dB，E面波束宽度为23°，H面波束宽度为71°，差波束零深为-20.7 dB，由于结构的不对称导致差波束方向图的不对称，在-20°和21°方向差波束增益达到峰值，分别低于和波束1.9 dB和1.2 dB。两种单脉冲天线的和波束最大辐射方向均偏离z轴-3°，这是由于馈电网络在端口1输入时，端口3的相位要超前端口4的7.2°。

表1给出了两种ASTSA单脉冲天线和文献[11]中的ALTSA单脉冲天线的性能比较结果，可以看出，两种ASTSA单脉冲天线的相对带宽都超过了25%，而ALTSA单脉冲天线仅为19.2%，虽然其天线增益具有较大优势，但这是以牺牲波束宽度为代价的，中心频率处的E面半功率波束宽度仅为7°，为ASTSA单脉冲天线的1/3左右。总体而言，两种ASTSA单脉冲天线在工作带宽上继承了各自天线单元的特点，即非对称型天线要宽于对称型天线，在带内增益上，两者大小相似，且非对称型天线波动要小于对称型天线。因此，非对称型ASTSA单脉

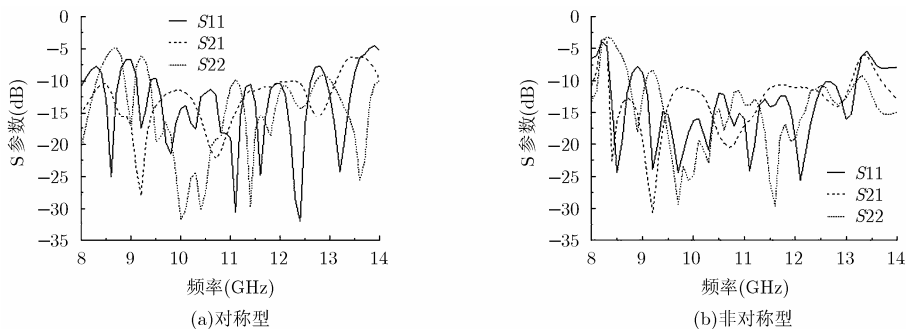


图6 ASTSA单脉冲天线S参数

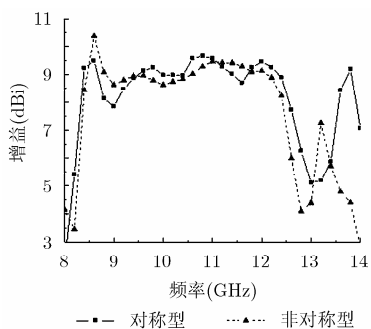


图7 ASTSA单脉冲天线和波束最大增益

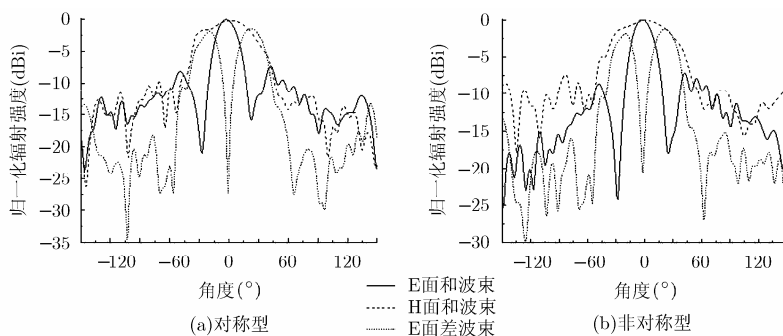


图8 ASTSA单脉冲天线归一化方向图

表1 几种单脉冲天线性能比较

天线类型	中心频率 (GHz)	相对带宽 (%)	最大增益 (dBi)	E 面波束宽度 (°)
对称型 ASTSA	10.0	28.0	9.7	24
非对称型 ASTSA	10.0	33.9	10.4	23
文献[11]	36.5	19.2	16.1	7

冲天线具有更好的工作性能, 能够更加广泛地应用于雷达探测系统中。

5 结束语

以 SIW-ALTSA 为基础首次提出了两种 SIW-ASTSA, 其中对称型 ASTSA 在增益大小相似的情况下具有比 ALTSA 更宽的工作频带, 而非对称型 ASTSA 虽然带内增益平衡性较差, 但是工作带宽进一步提高, 达到了 76.7%。然后利用 HMSIW 的 3 dB 电桥和等长不等宽的 90°移相器首次设计了一种宽带 HMSIW 单脉冲馈电网络。将馈电网络与两种天线单元利用一段微带线相连, 实现了宽带对称型和非对称型的 ASTSA 单脉冲天线, 相对带宽分别为 28.0%和 33.9%, 中心频率处的和波束最大增益均超过了 8.5 dBi, 差波束零深均低于-20 dB, 表现出了良好的单脉冲性能, 能够满足多种微波定向探测系统的要求。

参考文献

- [1] Cheng Yu-jian, Hong Wei, and Wu Ke. Design of a substrate integrated waveguide modified R-KR lens for millimeter-wave application[J]. *IET Microwaves Antennas Propagation*, 2010, 4(4): 484-491.
- [2] Chassemi Nasser and Wu Ke. High-efficient patch antenna array for E-band gigabyte point-to-point wireless services[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 1261-1264.
- [3] Cheng Yu-jian, Hong Wei, and Wu Ke. 94 GHz substrate integrated monopulse antenna array[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2012, 60(1): 121-129.
- [4] Dong Yuan-dan and Itoh Tatsuo. Substrate integrated composite right-/left-handed leaky-wave structure for polarization-flexible antenna application[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2012, 60(2): 760-771.
- [5] Youzkatli-El-Khatib Bassel, Djerafi Tarek, and Wu Ke. Three-dimensional architecture of substrate integrated waveguide feeder for Fermi tapered slot antenna array applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2012, 60(10): 4610-4618.
- [6] Zhai Guo-lua, Cheng Yong, Yin Qiu-yan, et al. Super high gain substrate integrated clamped-mode printed log-periodic dipole array antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2013, 61(6): 3009-3016.
- [7] Tan Li-rong, Wu Rui-xin, Wang Cong-yi, et al. Magnetically tunable ferrite loaded SIW antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 273-275.
- [8] 赵捷, 王岩飞. 12-20 GHz 的 TSA 天线[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(5): 1253-1255.
Zhao Jie and Wang Yan-fei. A 12-20 GHz tapered slot antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1253-1255.
- [9] 张锋, 刘小军, 纪奕才, 等. 一种用于浅层探冰雷达的改进型宽带小型化 TSA 天线[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1471-1474.
Zhang Feng, Liu Xiao-jun, Ji Yi-cai, et al. A novel wideband compact tapered slot antenna for shallow icecap detection radar applications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1471-1474.
- [10] Hao Zhang-cheng, Hong Wei, Chen Ji-xin, et al. A novel feeding technique for antipodal linearly tapered slot antenna array[C]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2005: 1641-1643.
- [11] Cheng Yu-jian, Hong Wei, and Wu Ke. Millimeter-wave monopulse antenna incorporating substrate integrated waveguide phase shifter[J]. *IET Microwaves Antennas Propagation*, 2008, 2(1): 48-52.
- [12] Ghassemi Nasser and Wu Ke. Planar high-gain dielectric-loaded antipodal linearly tapered slot antenna for E- and W-band gigabyte point-to-point wireless services[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2013, 61(4): 1747-1755.
- [13] Cheng Yu-jian, Hong Wei, and Wu Ke. Design of a monopulse antenna using a dual V-type linearly tapered slot antenna (DVL TSA)[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2008, 56(9): 2093-2099.
- [14] Cheng Yu-jian and Fan Yong. Millimeter-wave miniaturized substrate integrated multibeam antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2011, 59(12): 4840-4844.
- [15] Cassivi Y and Wu Ke. Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2002, 12(9): 333-335.
- [16] Yan Li, Hong Wei, Wu Ke, et al. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines[J]. *IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation*, 2005, 152(1): 35-42.

邹雄: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为基片集成波导电路与天线。

童创明: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为微波毫米波电路与应用、电磁散射与逆散射和计算电磁学等。

庞维建: 男, 1986年生, 硕士生, 研究方向为基片集成波导天线。