

基于慢波基片集成波导的高增益连续扫描 周期漏波天线

尹佳媛^{1,2}, 吴简¹, 邓敬亚^{1*}, 周世钢³, 曹新月¹

(1. 西安电子科技大学物理学院, 陕西西安 710071; 2. 毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;
3. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072)

摘要: 本文提出了一种可提高增益并在宽边进行连续波束扫描的慢波基片集成波导周期性漏波天线。带有贴片的周期性盲孔组成的慢波结构可降低电磁波在基片集成波导中传播的相速度, 导波波长可因此减少50%。与一般的基片集成波导周期漏波天线相比, 这样的慢波基片集成波导周期漏波天线中相邻辐射单元之间的距离可减少一半, 使得相同长度的慢波基片集成波导周期漏波天线中辐射单元的数量增加一倍。因此, 慢波基片集成波导周期漏波天线的辐射效率和增益可以显著提高。此外, 由于辐射单元下方慢波结构的贴片被延长, 辐射单元的阻抗匹配被改善, 反射波被抑制, 在边射方向不存在开阻带。因此, 辐射波束可以从后向到前向连续扫描。对所提出的天线进行了制作和测试, 在13.4~15.4 GHz工作频率范围内, 扫描角度达到72.7°, 最大增益为8.47 dBi。测试结果与仿真结果十分吻合。

关键词: 周期漏波天线; 基片集成波导; 慢波; 开阻带; 连续扫描

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(No. 2023-JC-YB-499); 毫米波国家重点实验室开放课题(No. K202318); 西安电子科技大学杭州研究院概念验证项目(No. GNYZ2023XJ0204)

中图分类号: TN822+.6; TN827+.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)03-0782-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240447

Slow-Wave SIW Periodic Leaky-Wave Antenna with Increased Gain and Continuous Beam Scanning Through Broadside

YIN Jia-yuan^{1,2}, WU Jian¹, DENG Jing-ya^{1*}, ZHOU Shi-gang³, CAO Xin-yue¹

(1. School of Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: A substrate integrated waveguide (SIW) periodic leaky-wave antenna (PLWA) with increased gain and continuous beam scanning through broadside is proposed by loading slow-wave (SW) structures. Slow wave structure in the form of periodic blind via-holes with loaded patches decelerates the phase velocity of the electromagnetic wave traveling in SIW, reducing the guided wavelength by 50%. Compared with normal SIW PLWA, the distance between the adjacent radiating slots in the proposed SW-SIW PLWA is decreased by half, allowing twice as many radiating slots in SW-SIW PLWA with the same length. Therefore, the radiation efficiency and the gain of SW-SIW PLWA can be significantly increased. Furthermore, the loaded patches of slow wave structure under the radiating slots are extended to improve the impedance match of the radiating slots and suppress the reflected wave, so the open-stopband (OSB), which is a common drawback of the PLWA, is suppressed. In consequence, the radiation beam can scan from backward to forward direction continuously. A prototype of the proposed SW-SIW PLWA is manufactured and measured, the scanning angle of the proposed PLWA reaches 72.7° during the operating frequency range of 13.4~15.4 GHz with maximum gain of 8.47 dBi. The measured results agree well with the simulations.

Key words: periodic leaky-wave antenna; substrate integrated waveguide; slow wave; open-stopband; continuously scanning

Foundation Item(s): Natural Science Basic Fundamental Program of Shaanxi Province (No.2023-JC-YB-499); Open Project of Southeast University State Key Laboratory of Millimeter Waves (No.K202318); Proof of Concept Foundation of Xidian University Hangzhou Institute of Technology (No.GNYZ2023XJ0204)

1 引言

漏波天线(Leaky-Wave Antennas, LWAs)是一种行波天线,因其具有频率扫描、馈电简单、结构紧凑和带宽宽等吸引人的特性而备受关注。漏波天线的设计采用了不同的传输线,如基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)^[1-8]、微带^[9,10]、矩形波导^[11]和人工表面等离激元^[12]等。

漏波天线可分为三类:均匀漏波天线、准均匀漏波天线和周期性漏波天线。均匀和准均匀漏波天线通过基次谐波(快波)辐射,其主波束只能在前向空间扫描。周期性漏波天线通常通过-1次空间谐波辐射,其主波束可在后向和前向空间扫描。更宽的扫描范围使周期性漏波天线更有前景和吸引力。

然而,当前周期漏波天线主要面临两个问题。其一,由于开阻带(Open-StopBand, OSB)的存在,波束增益在边射方向总是会恶化,在开阻带附近,漏波天线的反射系数会恶化,辐射功率会大幅下降。另一个则是周期漏波天线的辐射效率和增益总是很低,更高的增益通常需要更大的尺寸。

近些年来,也有一些可以进行从后向到前向连续扫描而没有开阻带的周期漏波天线的设计被提出。文献[13]提出一种基于基片集成波导的使用反射相消法抑制辐射阻带的周期漏波天线,采用间距为四分之一导波波长的非对称的两个缝隙作为辐射单元,两个相位相反幅度相同的反射波因此被抵消。在文献[1]中,利用带有横向和纵向槽的辐射单元,分别带来串联阻抗和并联导纳,来匹配各辐射单元的阻抗,从而抑制开阻带。在文献[3]中,基于复合左右手传输线的周期漏波天线可以在平衡条件下通过边射方向扫描。然而,这些结构总是体积庞大或复杂,容差较小。文献[9,14]报道了通过在结构上引入不对称来抑制开阻带的更多研究。不对称单元具有结构简单、辐射效率和增益较高的优点,无需额外的单元。此外,文献[15,16]中展示的通过差分馈电方式消除开阻带的方式,设计简单,插入损耗小。同时因为结构的对称性,展现了高水平的自干扰抑制能力。至于增益提高,最常用的方法是直接增加辐射单元的数量,但是增加辐射单元有时会增加整体尺寸限制其应用。

本文提出了一种基于慢波基片集成波导(Slow-Wave Substrate Integrated Waveguide, SW-SIW)的周期漏波天线,这种周期漏波天线具有更高的增益和连

续波束扫描功能。作为辐射单元的横向槽间距约为一个导波波长,以允许-1次空间谐波辐射。通过加载文献[17]中提出的慢波结构,导波波长减少了一半,使相同长度的慢波基片集成波导周期漏波天线的辐射单元数量增加了一倍。因此,天线的辐射效率和增益都显著提高。此外,通过扩展辐射单元下的加载贴片,实现了单元的阻抗匹配,抑制了辐射缝隙的反射波,从而有效抑制了开阻带。实验结果表明,所提出的天线的波束可以从后向到前向连续扫描,总扫描范围达到 72.7° ,最大增益为8.47 dBi。

2 天线设计

2.1 天线模型

图1给出了天线的三维示意图和横截面图。整个结构设计在两层相对介电常数 $\epsilon_r=3.66$ 和介电损耗角正切 $\tan \delta=0.004$ 的罗杰斯4350B介质基板上。顶部和底部介质基板的厚度分别为 h_1 和 h_2 。顶部和底部结构之间有一个相对介电常数 $\epsilon_r=4.2$ 、介电损耗角正切 $\tan \delta=0.02$ 的粘合层,用来将两层介质基板粘起来,厚度为 h_3 。在三块基板的两侧加载两排周期为 s_1 、直径为 d_1 的金属通孔,形成基片集成波导。在底部基板内装入三排直径为 d_2 、间距为 s_3 的金属化盲孔。长度为 l_p 、宽度为 w_p 的矩形金属贴片被印刷在底部基板的顶面,并与盲孔电连接。金属化盲孔和加载贴片构成慢波结构^[17],沿纵向周期性分布,周期为 s_2 。长度为 l_s 、宽度为 w_s 的横向辐射单元装载在顶部基板的顶面上。慢波基片集成波导的宽度为 w_1 ,辐射单元下的加载贴片的长度为 l_c 。所提出的天线用接地共面波导进行馈电,根据文献[18]中的设计步骤,设计了从接地共面波导到慢波基片集成波导的过渡,如图1(c)所示。天线参数值如表1所示。

2.2 高增益的实现

本文提出的带横向槽的慢波基片集成波导周期漏波天线是在带横向槽的普通基片集成波导周期漏波天线的基础上进行改进,以获得更好的辐射性能。因此,本文从普通基片集成波导周期漏波天线面临的两个问题入手进行分析。如前所述,有限尺寸下低增益和低辐射效率和边射方向存在开阻带是任何一种周期漏波天线都亟待解决的两个问题。

为了提高有限尺寸下的周期漏波天线的增益,增加辐射单元的数量是可行的,其关键是减少单元尺寸

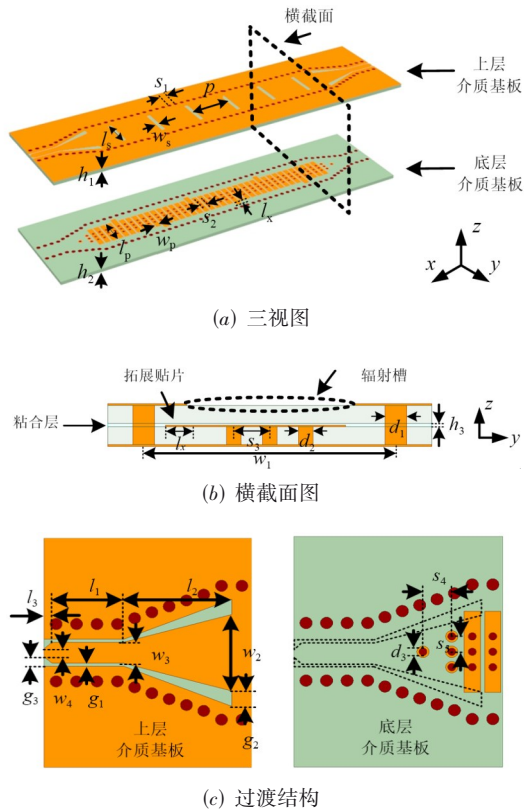


图1 天线结构图

的周期^[17]. 通过求解麦克斯韦方程组,可以得到相移常数和传播速度:

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - k_c^2} \quad (1)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon - \frac{k_c^2}{\omega^2}}} \quad (2)$$

根据上述两式,本设计采用的慢波传输线本质是通过在普通传输线上加载慢波结构,提高传输线的等效相对介电常数和等效相对磁导率,提高相移常数,降低相速,在工作频率不变的前提下,缩短波导波长,进而缩短器件的物理尺寸,实现小型化. 同时,从公式中可以看到,相速度是和频率相关的,频率变化必然会引起相速度的变化. 因此,在工作带宽内,本设计采用的结构具有弱色散特性,该特性在后面色散曲线的分析图中可以看到. 利用文献[17]中提出的慢波结构,在慢波基片集成波导中传播的电磁波的导波波长减少了一半. 因此,相同长度下,设计天线的辐射单元的数量是基片集成波导周期漏波天线的两倍.

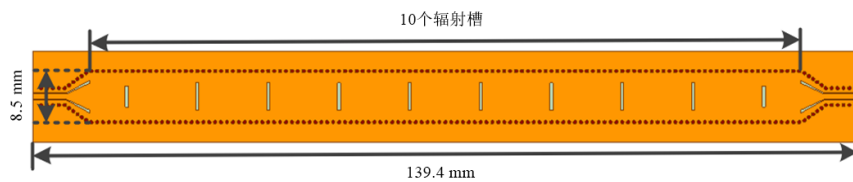
为了验证慢波结构的效果,比较了普通和慢波基片集成波导周期漏波天线的电场特性. 图2给出了普通慢波基片集成波导周期漏波天线的俯视图. 可以看出,与普通基片集成波导周期漏波天线相比,所提出的慢波基片集成波导周期漏波天线的辐射单元数量增加了一倍.

为了清楚地显示慢波结构导致的导波波长缩短效应,图3显示了同一频率的电场幅值分布. 工作频率选为 14.5 GHz. 由于在相同工作频率下,慢波基片集成波导中传播的电磁波的导波波长比普通基片集成波导减

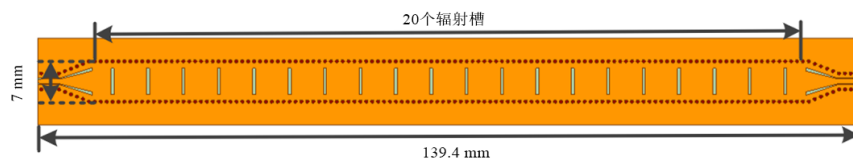
表1 天线具体结构参数

单位:mm

w_1	w_2	w_3	w_4	h_1	h_2	h_3	d_1	d_2	d_3	s_1	s_2	s_3	s_4
7	3.6	0.9	0.4	0.508	0.508	0.12	0.6	0.4	0.4	1	1	0.8	1.4
s_5	l_s	w_s	l_p	w_p	l_x	p	l_1	l_2	l_3	g_1	g_2	g_3	
0.8	4.6	0.5	4.2	0.8	0.68	6	3.3	5.3	0.6	0.15	0.6	0.4	



(a) 普通基片集成波导周期漏波天线



(b) 慢波基片集成波导周期漏波天线

图2 天线俯视图

少了一半,因此可以设计两倍数量的辐射单元. 增加单元数可辐射更多能量,从而提高辐射效率. 因此,增益也得以有效提高.

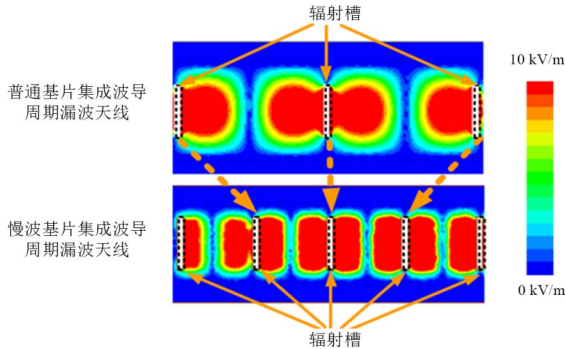
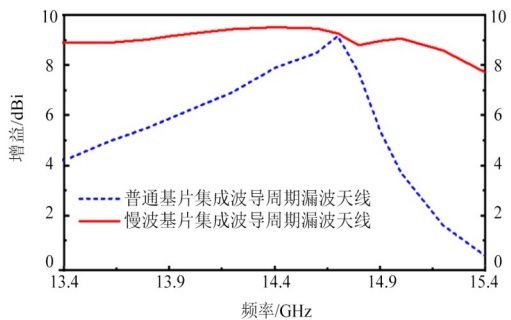


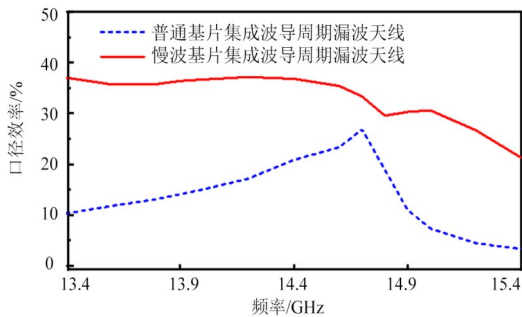
图3 普通与慢波基片集成波导周期漏波天线场分布对比

为了验证上述分析,图4仿真对比了普通和慢波基片集成波导周期漏波天线仿真的增益和口径效率. 可以注意到,由于在慢波基片集成波导周期漏波天线中抑制了开阻带,因此所提出的慢波基片集成波导周期漏波天线的工作频率范围与普通基片集成波导周期漏波天线的工作频率范围并不完全相同. 为了便于对两种周期漏波天线进行比较分析,只对两种周期漏波天线在13.4~15.4 GHz工作频率范围内的仿真天线增益进行了比较.

从图4(a)可以看出,所提出的慢波基片集成波导周



(a) 增益曲线



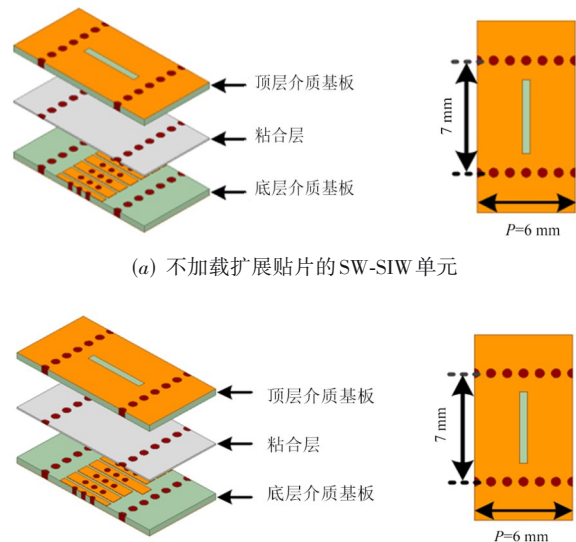
(b) 口径效率

图4 普通与慢波基片集成波导周期漏波天线对比

期漏波天线的增益高于普通基片集成波导周期漏波天线,尤其是在低频段工作时. 由于所提出的慢波基片集成波导周期漏波天线采用了开阻带抑制技术,因此在14.7 GHz之后,即在基片集成波导周期漏波天线中出现开阻带的地方,增益会很高. 由图4(b)可以明显看出,由于额外增加的辐射槽使辐射能量增加,提出的慢波基片集成波导周期漏波天线的口径效率高于普通基片集成波导周期漏波天线. 因此,增加有限孔径周期漏波天线的辐射单元数目可有效提高口径效率,从而增强增益.

2.3 开阻带抑制

为了改善单元的阻抗匹配,减少反射波,从而达到抑制开阻带的目的,对辐射单元下的加载贴片进行了延长. 图5(a)和图5(b)分别给出了无延长贴片和有延长贴片的单元结构图.



(a) 不加载扩展贴片的SW-SIW单元

(b) 加载扩展贴片的SW-SIW单元

图5 不同单元结构示意图

不难注意到单元的色散曲线与具有大量单元数量的周期漏波天线的色散曲线非常接近^[8]. 因此,本文分析了单元的色散曲线,以代替具有大量单元的周期性漏波天线的性能. 辐射单元的等效相位常数 β_{eff} 和等效衰减常数 α_{eff} 可通过辐射单元的S参数计算得出:

$$\begin{cases} \beta_{\text{eff}} = \frac{1}{p} \text{Re} \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \right) \right] \\ \alpha_{\text{eff}} = \frac{1}{p} \text{Im} \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

图6给出的计算结果验证了设计的有效性. 图6(a)给出了原始SW-SIW单元的仿真色散曲线,图6(b)则是本文提出的改进的SW-SIW单元. 从图6(a)中可以观察到较大的开阻带,在开阻带范围内, $\beta_{\text{eff}}p$ 近似为零,

而 $\alpha_{\text{eff}}p$ 则变得相当大. 从图 6(b) 则可以明显看出, 在提出的改进 SW-SIW 单元中开阻带得到了有效抑制.

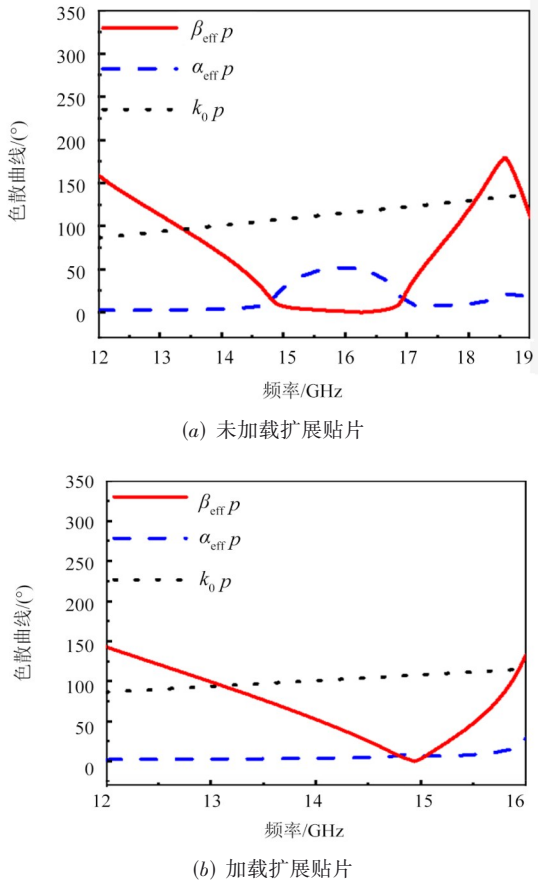


图 6 辐射单元仿真色散曲线

为了研究其工作机制, 采用等效电路来解释单元中辐射槽和扩展贴片的功能. 如图 7(a) 所示, 当辐射单元只包含一个辐射槽时, 辐射单元的 S 参数可用下式表示^[17]:

$$S_{\text{unit}} = \begin{pmatrix} \frac{Z/Z_0}{2 + Z/Z_0} e^{-j\beta_{zn}P} & \frac{2}{2 + Z/Z_0} e^{-j\beta_{zn}P} \\ \frac{2}{2 + Z/Z_0} e^{-j\beta_{zn}P} & \frac{Z/Z_0}{2 + Z/Z_0} e^{-j\beta_{zn}P} \end{pmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可知, S_{11} 不可能等于零, 所以显然不能消除辐射单元的反射能量. 只有一个辐射槽的单元的阻抗是不匹配的. 当所有辐射单元同相时, 所有单元反射波同相叠加, 即会导致开阻带的存在.

如图 7(b) 所示, 延长的贴片在相应的辐射单元等效电路中相当于一个额外的并联电容负载. 当辐射单元同时包含横向槽和扩展贴片时, 等效电路如图 7(c) 所示. 相当于在单元的等效电路中加入了与串联阻抗 Z 和并联导纳 Y , 从而可以实现阻抗匹配. 图 7(c) 所示等效电路的 S 参数可按式计算^[3]:

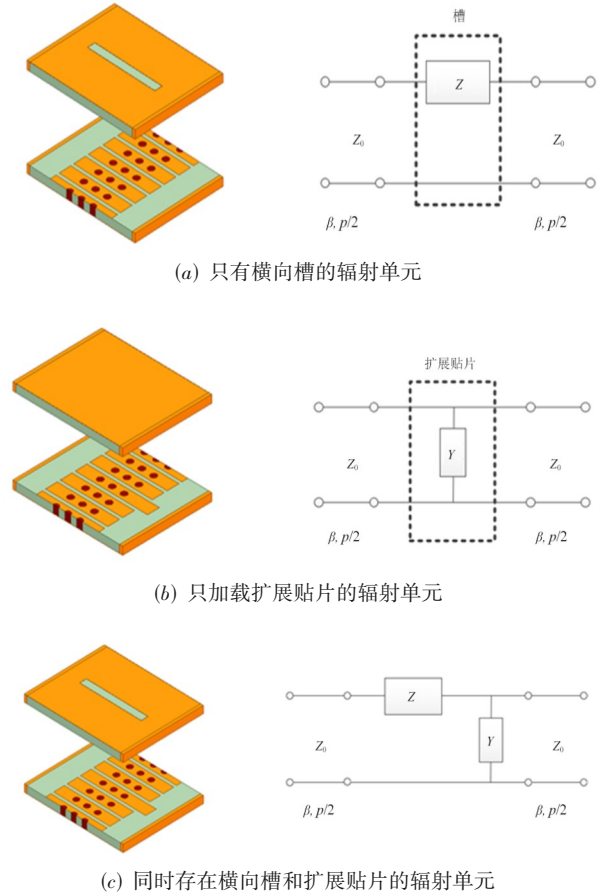


图 7 不同辐射单元的结构示意图和等效电路图

$$S_{\text{unit}} = \begin{pmatrix} \frac{Z/Z_0 - YZ_0 + ZY}{2 + Z/Z_0 - YZ_0 + ZY} e^{-j\beta_{zn}P} & \frac{2}{2 + Z/Z_0 - YZ_0 + ZY} e^{-j\beta_{zn}P} \\ \frac{2}{2 + Z/Z_0 - YZ_0 + ZY} e^{-j\beta_{zn}P} & \frac{Z/Z_0 - YZ_0 + ZY}{2 + Z/Z_0 - YZ_0 + ZY} e^{-j\beta_{zn}P} \end{pmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可知在某些情况下, 辐射单元的 S_{11} 可以为零. 对贴片长度 l_x 的延长就是为了满足 S_{11} 为零的要求而设计的. 当没有反射能量时, 就没有开阻带. 至此, 本文的设计原理得到了证明.

3 实验结果与分析

为了验证所提出天线的可行性, 采用多层印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)制造工艺, 在两块罗杰斯 4350B 基板上制作了一个设计的慢波基片集成波导周期漏波天线原型, 如图 8 所示. 值得注意的是, 在实验时, 除了粘合层, 天线还采用了尼龙螺栓机械压合的方式来固定, 这是为了保证天线的稳定性. 但通常来说, 尼龙螺栓机械压合方式的稳定性已足够, 粘合层可以移除, 这样还可消除粘合层对于天线性能的影响.

通过 Agilent PNA E8363C 矢量网络分析仪测量了天

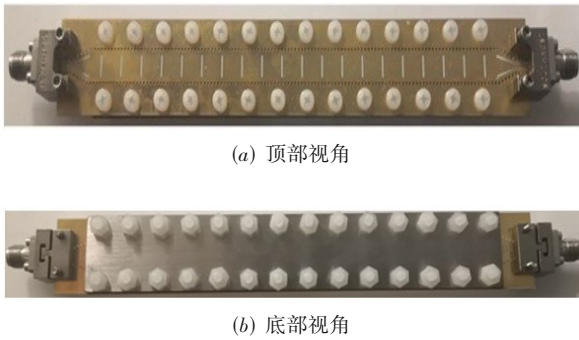


图8 加工天线的结构

线的S参数. 仿真结果与测试结果的比较如图9所示. 可以看出,测试结果与仿真结果一致,只有微小的频率偏移,这是由于加工误差引起的. 在边射方向频率附近(约15 GHz),由于开阻带的微弱影响, S_{11} 的幅度峰值较为明显,但幅度峰值仍然低于-10 dB,这意味着开阻带被成功抑制. 在13.2~15.7 GHz的整个工作频段内, S_{21} 都低于-10 dB,这意味着在天线末端加载的负载吸收的功率不到10%,大部分能量都辐射到了自由空间.

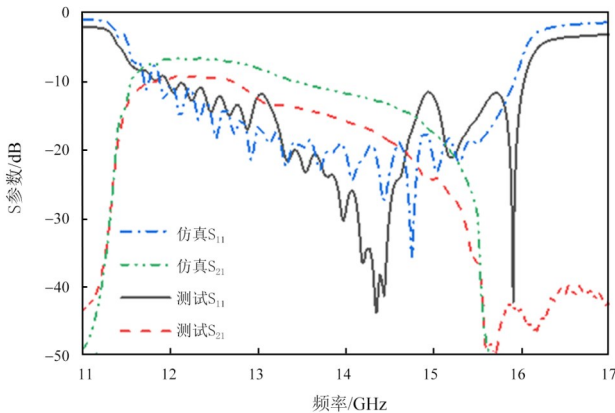
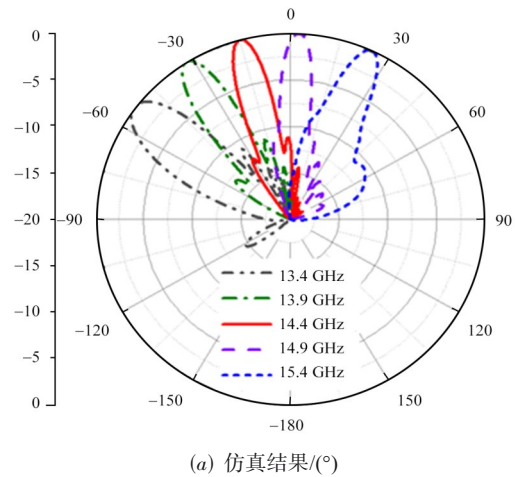


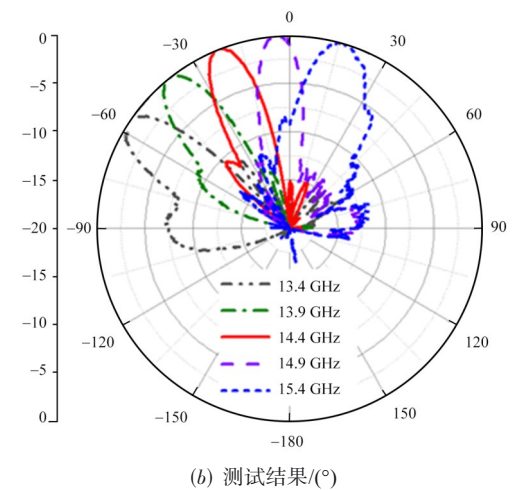
图9 天线S参数仿真和测试结果

图10给出了天线的归一化远场辐射方向图. 当频率从13.4 GHz变为15.4 GHz时,辐射波束从后向到前向连续扫描,总扫描角度达到72.7°. 测试扫描角度与仿真扫描角度之间的偏差主要归因于加工误差和不完美的焊接技术. 实验测得的波束相比仿真波束有波束展宽的现象,说明实验测得的增益相比仿真有所下降. 这一点在图11中可以看出. 图11是所提出天线的仿真增益和测试增益对比. 在整个频段内,测试增益平均约为7.5 dBi,总体低于仿真结果. 测试增益略低于仿真结果,主要原因是介质基板的参数在实测和仿真中存在差异. 首先,介质基板的损耗可能高于板材供应商给出的值,当介质基板损耗较大时,将会有更多的能量损耗在基板中,造成增益减小,图12(a)给出的仿真结果验证了这一点(以部分频点为例). 其次,介质基板的介电

常数也可能与板材供应商给出的值有差异,在所提出设计中,用于辐射的缝隙间距和波导波长相关,而介质基板的介电常数与波导波长息息相关. 也就是说,当介质基板介电常数发生变化时,波导波长也会改变,相应的,辐射缝隙间距也应改变. 而实验过程中的缝隙间距是根据仿真中理想的介质基板介电常数计算得到的,并未考虑实际的介电常数和波导波长. 因此,也可能导致缝隙间耦合变大,从而使得增益降低. 然而,介质介电常数还会对天线的工作频段造成一定的影响. 因此,对比不同介电常数下同一频点处的波束增益意义不大,所以增益随介电常数的变化灵敏度在此并未给出. 增益低则必然对应波束变宽的现象,波束宽度随介质损耗角正切的变化也在图12(b)中给出用于证明这一点. 此外,值得注意的是,本文中的设计只是对利用非对称结构抑制慢波基片集成波导周期漏波天线的开阻带的验证. 要获得更高的增益和辐射效率,还可以通过增加辐射单元数、优化辐射槽形状等方法来实现.



(a) 仿真结果(°)



(b) 测试结果(°)

图10 归一化远场辐射方向图

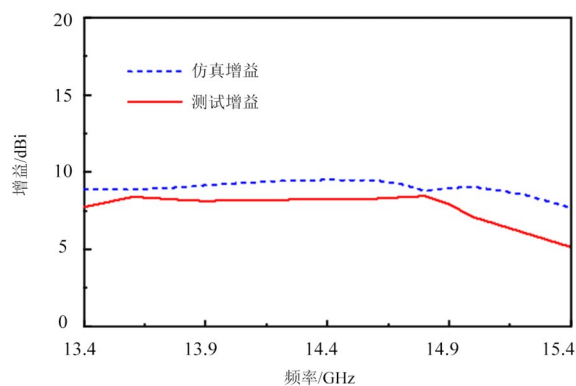
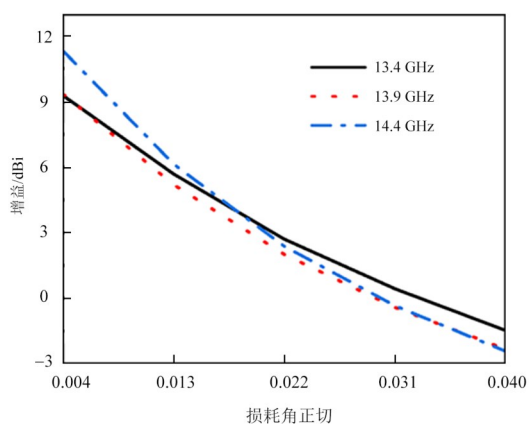
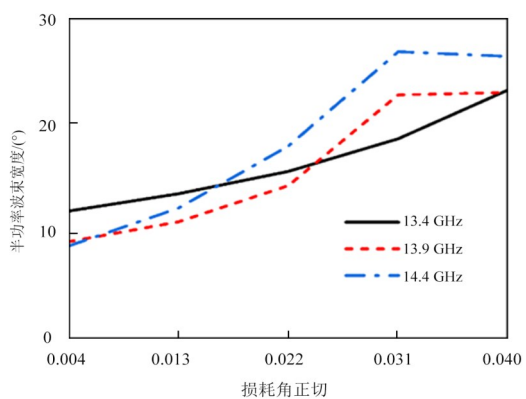


图 11 天线仿真增益与测试增益



(a) 天线增益随介质损耗角正切变化的曲线



(b) 天线波束宽度随介质损耗角正切变化的曲线

图 12 天线的参数曲线

4 结论

本文提出了一种基于慢波基片集成波导的周期漏波天线,可提高增益并实现从后向前的连续波束扫描.与普通基片集成波导的周期漏波天线相比,相同长度的慢波基片集成波导的周期漏波天线可具有两倍的辐射单元,有助于提高辐射效率和增益.此外,通过延长

辐射单元下方的贴片,可以实现单元结构的阻抗匹配,从而有效抑制了开阻带.因此,辐射波束可以从后向到前向进行连续扫描,边射方向的辐射性能也没有下降.在 13.4~15.4 GHz 工作频率范围内,所设计天线的扫描角度可达 72.7° ,最大增益为 8.47 dBi.

参考文献

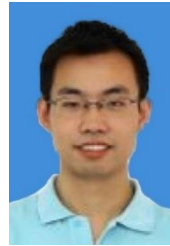
- [1] LIU J H, ZHOU W L, LONG Y L. A simple technique for open-stopband suppression in periodic leaky-wave antennas using two nonidentical elements per unit cell[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6): 2741-2751.
- [2] LYU Y L, LIU X X, WANG P Y, et al. Leaky-wave antennas based on noncutoff substrate integrated waveguide supporting beam scanning from backward to forward[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(6): 2155-2164.
- [3] CAO W Q, CHEN Z N, HONG W, et al. A beam scanning leaky-wave slot antenna with enhanced scanning angle range and flat gain characteristic using composite phase-shifting transmission line[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(11): 5871-5875.
- [4] XU J F, HONG W, CHEN P, et al. Design and implementation of low sidelobe substrate integrated waveguide longitudinal slot array antennas[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, 3(5): 790-797.
- [5] LIU J H, JACKSON D R, LONG Y L. Substrate integrated waveguide (SIW) leaky-wave antenna with transverse slots[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 20-29.
- [6] GUAN D F, ZHANG Q F, YOU P, et al. Scanning rate enhancement of leaky-wave antennas using slow-wave substrate integrated waveguide structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3747-3751.
- [7] ZHENG D Z, WU K. Leaky-wave antenna featuring stable radiation based on multimode resonator (MMR) concept[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2016-2030.
- [8] ZHOU W L, LIU J H, LONG Y L. Investigation of shorting vias for suppressing the open stopband in an SIW periodic leaky-wave structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(6): 2936-2945.
- [9] OTTO S, AL-BASSAM A, RENNINGS A, et al. Radiation efficiency of longitudinally symmetric and asymmetric periodic leaky-wave antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 612-615.

- [10] RAHMANI M H, DESLANDES D. Backward to forward scanning periodic leaky-wave antenna with wide scanning range[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3326-3335.
- [11] HYNEMAN R. Closely-spaced transverse slots in rectangular waveguide[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1959, 7(4): 335-342.
- [12] YIN J Y, REN J, ZHANG Q, et al. Frequency-controlled broad-angle beam scanning of patch array fed by spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(12): 5181-5189.
- [13] JACKSON D R, OLINER A A. Leaky-wave antenna[M]. Modern Antenna Handbook, 2007.
- [14] YIN J Y, WU J, CAO X Y, et al. Compact slow-wave half-mode SIW periodic leaky-wave antenna with continuous beam scanning and high gain[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(9): 2618-2622.
- [15] YE Q C, ZHANG Y M, LI J L, et al. High-isolation dual-polarized leaky-wave antenna with fixed beam for full-duplex millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7202-7212.
- [16] YE Q C, ZHANG Y M, LI J L, et al. High-gain dual-circularly polarized leaky-wave antenna for point-to-point communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 22(4): 694-698.
- [17] ZHANG Y, DENG J Y, SUN D Q, et al. Slow wave substrate-integrated waveguide with miniaturized dimensions and broadened bandwidth [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8): 3675-3683.
- [18] KAZEMI R, FATHY A E, YANG S N, et al. Development of an ultra-wide band GCPW to SIW transition[C]// 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. Piscataway: IEEE, 2012: 171-174.

作者简介



尹佳媛 女, 1991年6月出生于陕西省西安市。2017年毕业于东南大学信息科学与工程学院。现为西安电子科技大学物理学院副教授、硕士生导师。主要研究方向为电磁超材料设计、新型天线理论与设计、微波器件设计。
E-mail: jyyin@xidian.edu.cn



周世钢 男, 毕业于西安电子科技大学。现任西北工业大学电子信息学院教授。主要研究方向为宽带小型化天线及阵列技术、相控阵天线相关技术、特征模算法在天线中的应用及电磁工程问题中的优化。
E-mail: sgzhou@nwpu.edu.cn



吴简 男, 1997年4月出生于吉林省双辽市。毕业于西安电子科技大学物理学院。主要研究方向为天线理论与设计。
E-mail: 18104349138@163.com



曹新月 女, 1999年11月出生于河南省驻马店市。毕业于西安电子科技大学物理学院。主要研究方向为新型天线及射频器件设计。
E-mail: xycao_xd@163.com



邓敬亚 男, 毕业于西安电子科技大学。现为西安电子科技大学物理学院教授。主要研究方向为天线理论与工程、微波毫米波理论与技术、相控阵与数字相控阵、集成天线与天线微系统等。
E-mail: jydeng@xidian.edu.cn