

## 基于双面平行带线的全空间扫描漏波天线

王亨辉<sup>①</sup> 孙胜<sup>\*①</sup> 刘能武<sup>②</sup> 刘元安<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学电子科学与工程学院 成都 611731)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

<sup>③</sup>(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

**摘要:** 为了实现从后向端射到前向端射的连续波束扫描天线, 该文基于双面平行带线结构提出了一种具有全空间扫描能力的漏波天线。天线单元由双面平行带线传输线和一对反向加载的开路枝节组成, 两个开路枝节分别位于传输线的上导带和下导带。加载的反向开路枝节等效为一个偶极子, 使得天线单元具有全向辐射性能, 作为整个全空间扫描漏波天线的基础单元。为了抑制周期漏波天线中的开阻带问题, 又在天线基础单元上加载了一对平衡槽以实现频率平衡条件, 还加载了一对匹配槽以匹配周期结构的阻抗。最后实现了一款天线原型, 经仿真与实验验证, 该天线能够在7.6 GHz 到14.0 GHz的频率范围内, 实现从后向端射, 经侧向辐射, 然后到前向端射的全空间扫描能力。

**关键词:** 漏波天线; 全空间波束扫描; Bloch阻抗; 开阻带抑制; 双面平行带线

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)02-0705-08

DOI: [10.11999/JEIT230067](https://doi.org/10.11999/JEIT230067)

## Double-sided Parallel-strip Line-based Leaky-wave Antenna with Full-space Beam Scanning Property

WANG Henghui<sup>①</sup> SUN Sheng<sup>①</sup> LIU Nengwu<sup>②</sup> LIU Yuanan<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

<sup>②</sup>(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>③</sup>(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Design investigation of a leaky-wave antenna aimed to acquire continuous beam scanning from the backfire direction to the endfire direction is presented on a Double-Sided Parallel-Strip Line (DSPSL) structure. The unit cell comprises a DSPSL structure and a pair of inverted open-ended stubs attached to the top and bottom strips, respectively. The loaded stubs act as a dipole and provide omnidirectional radiation performance, contributing to the full-space beam scanning potential of the leaky-wave antenna. To eliminate the open-stop band effect, two pairs of series slots are etched on the transmission line to meet the frequency balanced condition and match the Bloch impedance. Experiments of the designed prototype were consistent with the simulation, revealing that as the frequency varies from 7.6 GHz to 14.0 GHz, the proposed leaky-wave antenna radiates beams from the backfire direction through the broadside to the endfire direction.

**Key words:** Leaky-wave antenna; Full-space beam scanning; Bloch impedance; Open-stop band suppression; Double-sided parallel-strip line

收稿日期: 2023-02-17; 改回日期: 2023-07-03; 网络出版: 2023-07-14

\*通信作者: 孙胜 [sunsheng@uestc.edu.cn](mailto:sunsheng@uestc.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(61971115, 61721001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971115, 61721001)

## 1 引言

平面漏波天线由于结构简单、频带宽以及波束随频率扫描的特性而被广泛研究,并应用于雷达与无线通信系统中。漏波天线具有增益高和波束扫描角度宽的优点<sup>[1-4]</sup>。为了实现漏波天线从后向端射到前向端射的全空间扫描能力,有两个问题亟需解决,一个是侧向辐射问题,另一个是后向端射与前向端射问题。天线不能实现侧向有效辐射主要是由周期结构中开阻带现象引起的,当天线扫描到侧向时,级联单元的反射系数同相叠加,使得漏波天线在侧射频率附近的反射系数很大,所以导致这时候天线大部分输入能量都被反射回输入端口,天线增益严重恶化。为了解决开阻带问题,学者进行了大量的研究并提出了一些有效的解决方法,比如引入四分之一波长阻抗变换器<sup>[5]</sup>,加载匹配槽<sup>[6]</sup>、枝节<sup>[5,7]</sup>或者销钉<sup>[8]</sup>,以及在单元中采用非对称的辐射槽<sup>[9]</sup>等。通过抑制开阻带效应,文献<sup>[10]</sup>基于慢波共面带状线(CoPlanar Strips, CPS)结构提出了一款具有宽角扫描能力的漏波天线,辐射波束能够从 $-75^\circ$ 扫描到 $83^\circ$ 。天线难以实现有效端向辐射主要是由地板反射引起的,因此为了解决这个问题,研究人员基于基片集成波导<sup>[11,12]</sup>(Substrate Integrated Waveguide, SIW)、类表面等离子体激元<sup>[13]</sup>(Spoof Surface Plasmon Polaritons, SSPP)、CPS<sup>[14-16]</sup>和空气介质平行带线<sup>[17]</sup>等传输线结构对漏波天线进行了研究。

近年来,为了实现具有全空间波束扫描能力的漏波天线,研究人员做了大量工作来同时解决侧向辐射问题与端向辐射问题<sup>[18-21]</sup>。文献<sup>[19]</sup>基于奇模激励的SSPP结构实现了具有 $-90^\circ\sim 0^\circ$ 波束扫描能力的漏波天线。文献<sup>[19, 20]</sup>基于双面平行带线(Double-Sided Parallel-Strip Line, DSPSL),通过在上导带和下导带加载交错截断的贴片,实现了后向端射到前向端射的全空间扫描漏波天线。虽然已经报道的很多文献基本实现了全空间的波束扫描能力,但是仍然存在结构复杂以及难以进行综合设计的问题,而且没有考虑到周期结构的Bloch阻抗,使得开阻带的抑制效果较差,天线在侧射频率附近仍然表现出较大的反射系数。

为了解决上述问题,本文基于DSPSL结构,提出了一种新型的漏波天线以实现全空间的波束扫描能力。天线单元把DSPSL作为主传输线,然后在上导带和下导带加载一对反向的开路枝节作为辐射源。由于在DSPSL结构中,加载的开路枝节只引入了很小的不连续性,因此该天线单元可以针对任意的中心频率进行综合设计。为了更好地解决开

阻带问题,本文通过对基础单元的改进,匹配了频率平衡条件<sup>[22]</sup>和周期Bloch阻抗。最后设计了一款中心频率为10 GHz的天线原型,实测结果表明,天线能够在7.6 GHz到14.0 GHz的频率范围内,实现 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 的全空间扫描能力,且反射系数在整个工作频率范围内小于 $-15$  dB。

## 2 天线单元设计

### 2.1 单波束辐射条件

根据Bloch-Floquet周期性原理,周期漏波天线由无数个空间谐波组成,其中第 $n$ 个空间谐波的归一化相位常数 $\beta_n/k_0$ 可以表示为

$$\frac{\beta_n}{k_0} = \frac{\beta_0}{k_0} + \frac{2\pi n}{k_0 p} = \sqrt{\varepsilon_e} + \frac{\lambda_0 n}{p}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

其中, $\beta_0$ 表示基波的相位常数, $p$ 是周期长度, $\varepsilon_e$ 是主传输线的有效相对介电常数, $k_0$ 和 $\lambda_0$ 分别是自由空间中的波数和波长。

对于漏波天线来说,快波区对应的频段是产生辐射的频段。如图1所示的是周期结构 $n = 0$ 基波, $n = -1$ 次空间谐波以及 $n = -2$ 次空间谐波。从图中可以看到,周期结构的 $n = 0$ 基波始终处于慢波区,因此不会产生辐射,而其 $n = -1$ 与 $n = -2$ 次空间谐波都有位于快波区的部分,因此都可以在对应的频率范围内产生辐射。若 $n = -1$ 与 $n = -2$ 次空间谐波在快波区的频段发生重叠,则天线就会形成双辐射波束。一般而言,周期漏波天线只利用 $n = -1$ 次空间谐波产生辐射。为了保证天线在从后向端射扫描到前向端射的过程中有且仅有一个辐射波束,这就要求当 $n = -1$ 次空间谐波在快波区时,必须保证 $n = 0$ 的基波始终在前向的慢波区域,且 $n = -2$ 次空间谐波始终在后向的慢波区域<sup>[23]</sup>,如图1中红色实线框所示,这就是单波束辐射条件。从图1可以看出, $n = 0$ 的基波始终在慢波区是可以满足的,为了避免 $n = -1$ 与 $n = -2$ 次空间谐波在快波区的频段发生重叠,还需要满足当 $\beta_{-1} = k_0$ 时, $\beta_{-2}$ 要小于 $-k_0$ ,即

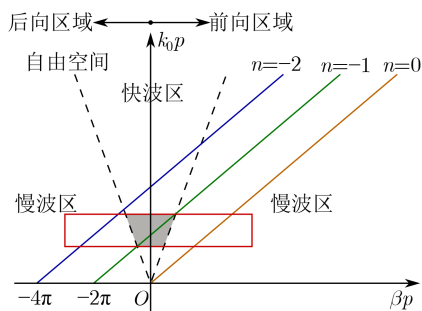


图1 单波束辐射示意图

$$\left. \begin{aligned} \frac{\beta_{-1}}{k_0} &= \sqrt{\varepsilon_e} - \frac{\lambda_0}{p} = 1 \\ \frac{\beta_{-2}}{k_0} &= \sqrt{\varepsilon_e} - \frac{2\lambda_0}{p} < -1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

两式联立消去 $\lambda_0/p$ ，得到：

$$\sqrt{\varepsilon_e} > 3 \quad (3)$$

因此，当单波束辐射条件得到满足时，主传输线结构的相对介电常数 $\varepsilon_e$ 要大于9。

当漏波天线利用 $n = -1$ 次空间谐波产生辐射时，为了保证天线能够实现侧向辐射，当在侧射频率时，需要满足 $\beta_{-1} = 0$ ，即

$$\beta_{-1} = \beta_0 - \frac{2\pi}{p} = 0 \quad (4)$$

根据式(4)得到，漏波单元的周期 $p$ 应该设置为侧射频率时对应的一个导波波长。

### 2.2 漏波单元分析

为了满足单波束辐射条件，主传输线结构的相对介电常数要大于9，因此基于高相对介电常数基板的微带线(MicroStrip Line, MSL)是一个很好的选择。但是，由于微带线的地板太大，漏波单元的辐射方向图并非全向，所以基于微带线结构的漏波天线难以实现端向辐射。为了利用微带线结构高相对介电常数的优点，同时能够实现具有全向辐射特性的单元方向图，本文提出了基于DSPSL结构的漏波单元。如图2所示，DSPSL与微带线具有相似的传输模式，由于地板变窄，所以基于DSPSL结构的漏波单元，能够更容易实现全向辐射特性。

如图2所示，DSPSL结构线宽为 $w$ ，介质基板的高度为 $h$ ，相对介电常数为 $\varepsilon_r$ 。图2(a)所示的是DSPSL的横向电场分布图，当在DSPSL结构中间

加入一个虚拟地以后，横向电场分布是不变的[24]，如图2(b)所示。因此，DSPSL结构可以看成是两个完全相同的高度为 $h/2$ 的微带线结构背靠背组成。所以DSPSL结构的特征阻抗和有效相对介电常数可以根据下式计算[25]：

$$Z_{0\text{DSPSL}} = 2Z_{0\text{MSL}} \left( \varepsilon_r, \frac{h}{2} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{e\text{DSPSL}} = \varepsilon_{e\text{MSL}} \left( \varepsilon_r, \frac{h}{2} \right) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{10}{2w/h}}} \quad (6)$$

其中，下标“DSPSL”和“MSL”分别表示双面平行带线与微带线。根据图2与式(6)可以得到，DSPSL与微带线具有相似的传输模式，因此也能够基于高相对介电常数的基板实现漏波天线的单波束辐射条件。

基于DSPSL，本文提出的基础漏波单元如图3所示。通过在上导带与下导带分别加载反向的开路枝节，两个枝节上具有相同的表面电流，如图3中红色箭头所示。因此，加载的两个枝节可以等效为一个偶极子单元，能够在H面( $y$ - $z$ 平面)产生全向辐射的方向图，所以基于该单元的漏波天线，具有全空间波束扫描的潜力。

在微带线结构中，加载的开路枝节会引入一个很明显的并联电容效应，而在DSPSL中，由于上导带与下导带具有相同的宽度，因此开路枝节只引入了很小的不连续性。为了得到漏波单元色散图谱，本文采用全波仿真方法对漏波单元进行分析。首先把周期单元看作一个二端口网络，利用全波方法计算得到周期单元的ABCD矩阵为 $[A, B; C,$



图2 DSPSL结构截面示意图

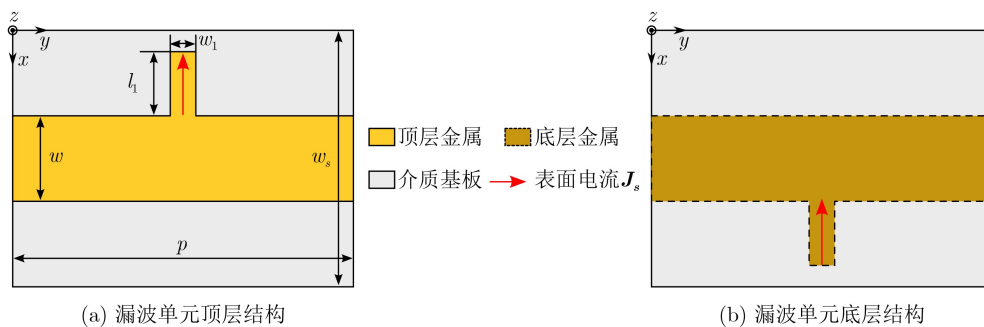


图3 漏波天线基础单元结构

$D]$ 。然后根据周期结构中的Floquet-Bloch定理, 该单元的传播常数 $\gamma$ 表示为

$$\gamma = \alpha + j\beta_0 = \frac{1}{p} \operatorname{arccosh} \left( \frac{A+D}{2} \right) \quad (7)$$

其中,  $\alpha$ 表示周期单元的衰减常数,  $\beta_0$ 表示周期单元的相位常数,  $p$ 表示周期长度。

将式(7)中的结果代入公式(1), 即可计算得到单元结构的色散图谱。如图4所示是基于全波方法提取的不同枝节长度下基础漏波单元的 $k_0$ - $\beta$ 图。

由图可知, 随着开路枝节的长度从4 mm增加到10 mm, 漏波单元的相位常数几乎保持不变, 即开路枝节仅仅在DSPSL结构中引入了很小的不连续性。图4还给出了漏波单元的 $n=0$ ,  $n=-1$ 和 $n=-2$ 次空间谐波, 其中 $n=-1$ 次空间谐波的快波区域用灰色阴影表示。可见 $n=0$ 和 $n=-2$ 次空间谐波都在灰色阴影区域外, 说明该漏波单元满足了单波束辐射条件。

### 2.3 漏波单元设计与开阻带抑制

本文基于Rogers 3010介质基板设计了一款侧射频率为10 GHz的漏波天线原型。介质基板的相对介电常数为10.2, 高度为0.635 mm, 损耗角正切为0.0022。根据式(6), 为了使DSPSL主传输线的有效相对介电常数满足单波束辐射条件, 这里选取DSPSL的线宽为5 mm。加载的开路枝节作为辐射

源, 为了提供有效的全向辐射同时防止在E面( $x$ - $z$ 平面)产生栅瓣, 枝节的长度定为7 mm。

为了抑制漏波天线的开阻带效应, 本文对基础单元进行了改进, 改进后的漏波单元如图5所示。与基础单元相比, 改进单元在每个开路枝节的对面, 引入了一个平衡槽和一个匹配槽。虽然开路枝节在DSPSL结构中引入了很小的不连续性, 但还是不可忽略的, 因此引入了一对感性的平衡槽来平衡开路枝节引入的容性效应; 引入的匹配槽是用来进行阻抗匹配, 以解决漏波天线在侧射频率附近反射系数大的问题, 从而抑制开阻带效应。

为了更清晰地阐述平衡槽和匹配槽的作用, 图6给出了初始漏波单元与加载槽后的漏波单元结构及其等效电路。如图6(a)所示的是初始漏波单元及其等效电路,  $\beta$ 表示理想传输线的相位常数,  $Z_0$ 表示传输线的特征阻抗, 加载的两个反向开路枝节等效为一个并联支路, 包括一个电容 $C$ 与一个辐射电阻 $R$ 。图6(b)所示的是加载平衡槽后的漏波单元结构及其等效电路, 而图6(c)所示的是加载平衡槽与匹配槽后的漏波单元结构及其等效电路。

为了抑制周期漏波天线中的开阻带效应, 本文采用奇偶模方法来分析提出的漏波单元。假设奇模激励下漏波单元的输入阻抗为 $Z_{se}$ , 偶模激励下漏波单元的输入导纳为 $Y_{sh}$ , 那么根据文献[6, 22]中分析的频率平衡条件, 为了抑制开阻带, 首先需要满足 $Z_{se}$ 与 $Y_{sh}$ 的虚部在侧射频率处同时为0。

由于辐射电阻 $R$ 的值很小, 因此为了简化计算, 在分析频率平衡条件时, 暂时不考虑 $R$ 对电路的影响。此时初始单元在奇模激励与偶模激励下的等效电路如图7(a)所示, 奇模负载为 $Z_L$ , 偶模负载为 $Y_L$ 。那么根据传输线特征阻抗 $Z_0$ 归一化之后的 $\bar{Z}_{se}$ 与 $\bar{Y}_{sh}$ 可以表示为

$$\bar{Z}_{se} = \frac{Z_L / Z_0 + j \tan \left( \frac{\beta p}{2} \right)}{1 + j Z_L / Z_0 \tan \left( \frac{\beta p}{2} \right)} \quad (8)$$

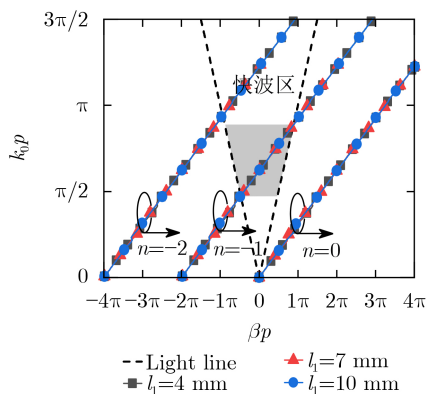
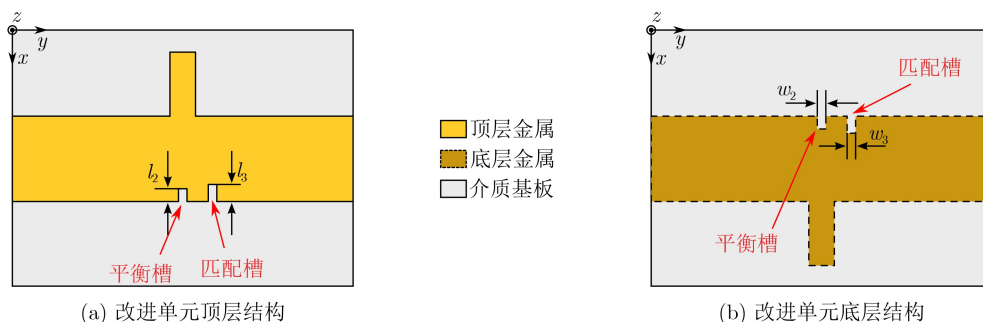


图4 不同开路枝节长度下基础漏波单元的 $k_0$ - $\beta$ 图



(a) 改进单元顶层结构

(b) 改进单元底层结构

图5 漏波天线改进单元结构

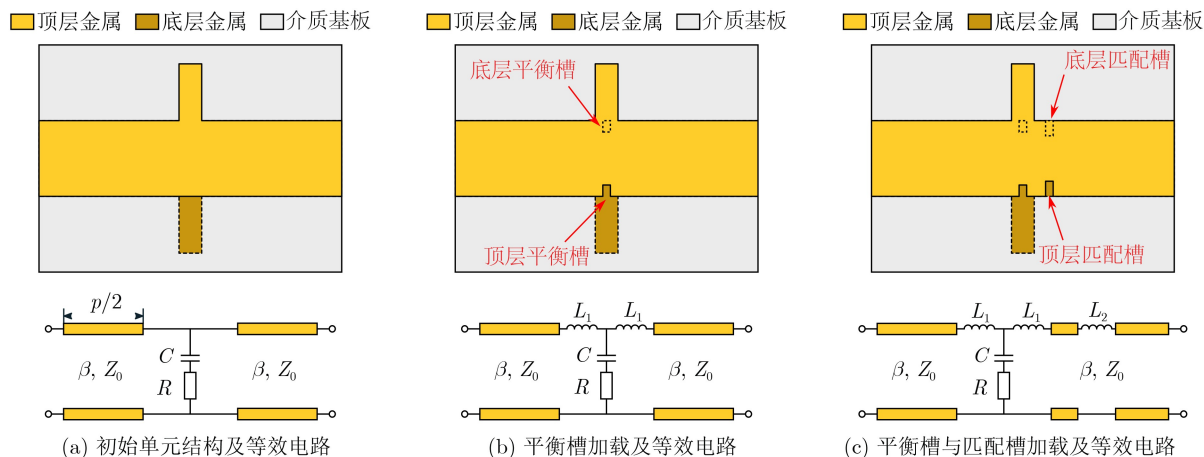


图6 初始及加载槽后的漏波单元结构及其等效电路

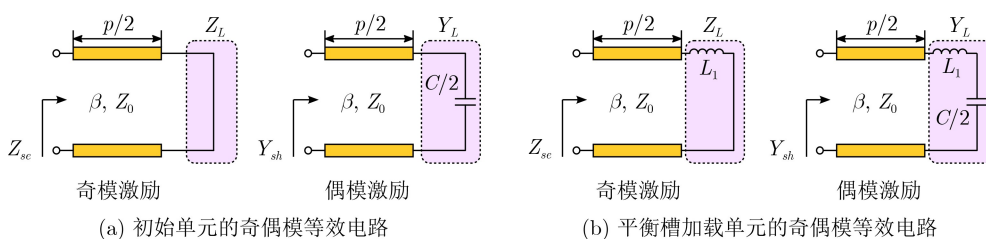


图7 初始及加载平衡槽后漏波单元的奇偶模等效电路

$$\bar{Y}_{sh} = \frac{Y_L/Y_0 + j \tan\left(\frac{\beta p}{2}\right)}{1 + jY_L/Y_0 \tan\left(\frac{\beta p}{2}\right)} \quad (9)$$

通过式(8)与式(9)可以发现 $\bar{Z}_{se}$ 与 $\bar{Y}_{sh}$ 具有相似的表达式。如果要满足 $\bar{Z}_{se}$ 与 $\bar{Y}_{sh}$ 的虚部在侧射频率处同时为0, 那么 $Z_L$ 与 $Y_L$ 之间的关系需要满足:

$$Z_L = Y_L Z_0^2 \quad (10)$$

在图7(a)中, 有

$$Z_L = 0 \quad (11)$$

$$Y_L = j \frac{\omega C}{2} \quad (12)$$

显然式(11)与式(12)若要满足式(10)中条件, 需要 $C = 0$ , 与实际不符。

如图7(b)所示为加载平衡槽后漏波单元的奇偶模等效电路。此时有

$$Z_L = j\omega L_1 \quad (13)$$

$$Y_L = j \left( \frac{\omega C}{2} - \frac{1}{\omega L_1} \right) \quad (14)$$

当式(13)与式(14)满足式(10)中条件时, 可以推得

$$\left( \frac{\omega L_1}{Z_0} \right)^2 - \frac{\omega^2 L_1 C}{2} + 1 = 0 \quad (15)$$

因此, 加载的 $L_1$ 与 $C$ 只要满足式(15)中的条件, 漏波单元就可以满足频率平衡条件。图5中平衡槽的

作用就是引入这个串联电感 $L_1$ 来平衡反向枝节引入的电容 $C$ 。需要注意到, 在以上推导中忽略了辐射电阻 $R$ 的影响, 但在实际中, 辐射电阻 $R$ 的存在会导致周期结构波阻抗在侧射频率处产生突变, 因此需要引入额外的电抗对辐射电阻进行匹配, 即图5中的匹配槽。

为了验证平衡槽与匹配槽对天线开阻带效应的抑制效果, 图8及图9给出了基于全波方法提取的漏波单元归一化传播常数与Bloch阻抗曲线。从图8及图9可以看出, 当漏波单元没有加载任何槽的时候, 在侧射频率10 GHz附近产生了较大的阻带; 当仅加载了平衡槽以后, 阻带变小, 说明开阻带效应得到了一定的改善; 当加载了平衡槽与匹配槽以后, 可以看到阻带完全消失, 说明开阻带效应被完全抑

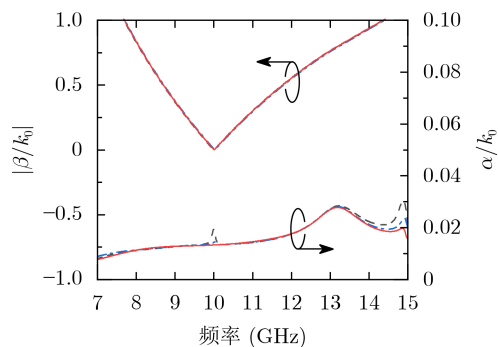


图8 归一化的相位常数与衰减常数

制了。所以，加载的平衡槽与匹配槽对开阻带效应的抑制效果是有效的。最后优化的改进漏波单元的各个参数值如表1所示。

对于任意给定的侧射频率，本文提出的漏波天线综合设计方法如下。(1)首先选取合适的介质基板和导带宽度来满足单波束辐射条件。(2)为了利用周期结构的 $n = -1$ 次空间谐波进行辐射，漏波单元的初始长度选为一个波导波长。(3)加载并优化开路枝节的长度来产生全向辐射并避免栅瓣出现。(4)加载平衡槽和匹配槽来抑制开阻带效应。(5)把多个漏波单元级联在一起，并针对单元之间的耦合效应对参数进行优化。

### 3 天线设计与测量

本文设计的漏波天线由25个漏波单元组成，天线的实物图如图10所示。从图9可以看出周期漏波单元的Bloch阻抗为 $12.5 \Omega$ 左右，因此在级联单元的两端分别接有一段阻抗变换器，把级联单元的输入阻抗转换为 $50 \Omega$ 。因为最后设计的天线单元是一个非对称结构，因此天线只能从左端进行馈电，右端接 $50 \Omega$ 的匹配负载，如果反接将导致更加严重的开阻带效应。

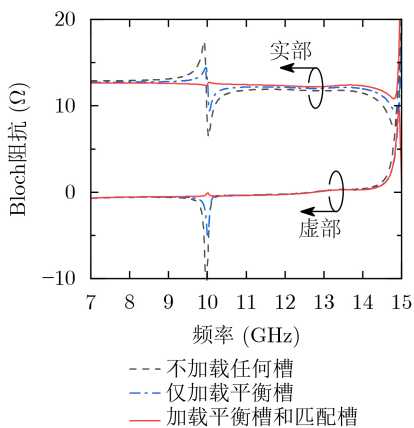


图9 漏波天线单元Bloch阻抗

表1 改进漏波单元尺寸参数值(mm)

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$p$	9.14	$w$	5.0	$w_s$	30.0
$w_1$	1.5	$w_2$	0.4	$w_3$	0.3
$l_1$	7.0	$l_2$	0.7	$l_3$	0.68

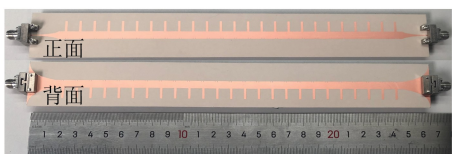


图10 天线实物图

图11所示的是仿真和测量的 $|S_{11}|$ 与 $|S_{21}|$ ，由于介质基板相对介电常数的误差，导致结果有微弱的频偏，除此以外可以看到实测结果与仿真基本相吻合。在侧射频率处，天线的实测反射系数小于 $-20 \text{ dB}$ ，说明开阻带效应得到了很好的抑制。图12给出了天线增益与辐射效率的仿真和测量结果，天线扫描到端射方向时，由于辐射效率下降，所以天线增益也有一定程度的下降。同时图13给出了当天线扫描角度分别为 $-90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时的H面方向图。通过仿真结果可以看到，当天线工作频率从 $7.7 \text{ GHz}$ 增加到 $14.3 \text{ GHz}$ 时，天线从后向端射 $-90^\circ$ 逐渐连续扫描到前向端射 $90^\circ$ ，增益变化为 $7.8 \sim 13.8 \text{ dBi}$ ；由于微弱的频偏，测量的后向端射到前向端射的工

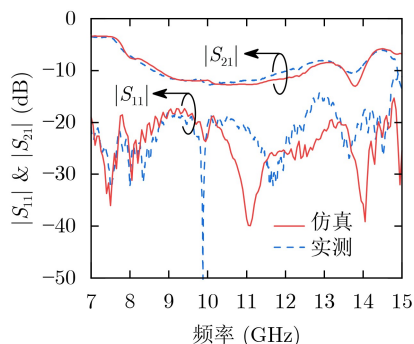


图11 仿真和实测的 $|S_{11}|$ 与 $|S_{21}|$

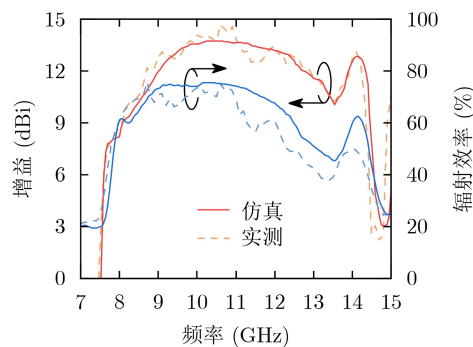


图12 仿真和实测的天线增益与辐射效率

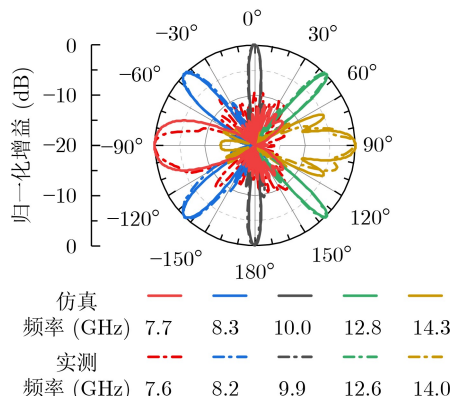


图13 漏波天线H面波束扫描图

作频率为7.6~14.0 GHz，增益变化为7.0~14.6 dBi。仿真和实测结果都表明天线在侧射频率10 GHz附近没有增益衰减，同样说明了本文设计有效抑制了开阻带效应。图14所示的是仿真与实测的漏波天线扫描角度与频率对应关系，除了微弱的频偏，仿真与实测结果基本一致。

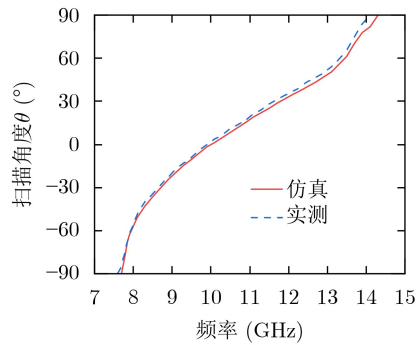


图 14 漏波天线扫描角度与频率对应关系

表2所示的是本文天线与已报道的类似漏波天线的对比。可以看到，与已报道的漏波天线相比，本文提出的漏波天线兼具良好的开阻带抑制效果以及全空间波束扫描能力。同时，本文天线还具有结构简单、易综合的优点。

## 4 结束语

本文基于DSPSL结构提出了一种具有全空间波束扫描能力的漏波天线。通过采用高相对介电常数的基板，满足了单波束辐射条件。在DSPSL结构的上下导带分别加载反向的开路枝节，实现了漏波单元的全向辐射特性，然后给出了漏波单元的开阻带抑制方法与综合方法。加工天线的实测结果表明，随着频率从7.6 GHz到9.9 GHz，最后到14.0 GHz，天线的波束相应地从后向端射-90°扫描到侧射0°，最后到前向端射90°。

表 2 本文工作与已报道工作对比

文献	结构	工作频率(GHz)	侧射频率反射系数(dB)	增益范围(dBi)	天线长度( $\lambda_0$ )	扫描范围( $^\circ$ )
[1]	Goubau线	5.5~20.0	-11	6.5~12.5	9.6	-90~65
[8]	SIW	13.2~15.6	-25	11.1~14.1	11.1	-47~37
[10]	CPS	8.65~11.70	-20	9.0~11.6	6.8	-75~83
[19]	DSPSL	1.1~5.9	-7.5	4.2~9.7	2.9	-90~90
[21]	交错平行带线	4.5~10.2	-10	7.2~11.0	6.9	-90~90
本文	SIW	7.6~14.0	-20.5	7.0~14.6	8.7	-90~90

## 参考文献

- [1] RUDRAMUNI K, KANDASAMY K, ZHANG Qingfeng, et al. Goubau-line leaky-wave antenna for wide-angle beam scanning from backfire to endfire[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1571-1574. doi: 10.1109/LAWP.2018.2855702.
- [2] ZHANG Pengfei, ZHU Lei, and SUN Sheng. Second higher-order-mode microstrip leaky-wave antenna with I-shaped slots for single main beam radiation in cross section[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6278-6285. doi: 10.1109/TAP.2019.2920260.
- [3] DUAN Junbing and ZHU Lei. A transversal single-beam  $\text{EH}_0$ -mode microstrip leaky-wave antenna on coupled microstrip lines under differential operation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(4): 592-596. doi: 10.1109/LAWP.2021.3058277.
- [4] DUAN Junbing and ZHU Lei. An  $\text{EH}_0$ -mode microstrip leaky wave antenna on differentially excited coupled line for transversal single-beam radiation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6941-6946. doi: 10.1109/TAP.2021.3070205.
- [5] WILLIAMS J T, BACCARELLI P, PAULOTTO S, et al. 1-D combline leaky-wave antenna with the open-stopband suppressed: Design considerations and comparisons with measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(9): 4484-4492. doi: 10.1109/TAP.2013.2271234.
- [6] WANG Henghui, SUN Sheng, and XUE Xiaohan. A periodic CPW leaky-wave antenna with enhanced gain and broadside radiation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(4): 676-680. doi: 10.1109/LAWP.2022.3141127.
- [7] WANG Henghui, SUN Sheng, and XUE Xiaohan. A periodic meandering microstrip line leaky-wave antenna with consistent gain and wide-angle beam scanning[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32(7): e23162. doi: 10.1002/mmce.23162.
- [8] ZHOU Wenlong, LIU Juhua, and LONG Yunliang. 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. doi: [10.1109/TMTT.2018.2818140](https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2818140).
- [9] LIU Juhua, ZHOU Wenlong, and LONG Yunliang. 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. doi: [10.1109/TAP.2018.2819701](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2819701).
- [10] WANG Henghui, SUN Sheng, XUE Xiaohan, *et al.* A periodic coplanar strips leaky-wave antenna with horizontal wide-angle beam scanning and stable radiation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(10): 9861–9866. doi: [10.1109/TAP.2022.3177514](https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3177514).
- [11] LIU Juhua, JACKSON D R, LI Yuanxin, *et al.* Investigations of SIW leaky-wave antenna for endfire-radiation with narrow beam and sidelobe suppression[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(9): 4489–4497. doi: [10.1109/TAP.2014.2336659](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2336659).
- [12] 孙盛涛, 曹祥玉, 高军, 等. 基于蝶形振子的可重构圆极化端射天线设计[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(4): 1373–1381. doi: [10.11999/JEIT210134](https://doi.org/10.11999/JEIT210134).
- SUN Shengtao, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Reconfigurable circularly polarized end-fire antenna design based on butterfly dipoles[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(4): 1373–1381. doi: [10.11999/JEIT210134](https://doi.org/10.11999/JEIT210134).
- [13] KANDWAL A, ZHANG Qingfeng, TANG Xiaolan, *et al.* Low-profile spoof surface plasmon polaritons traveling-wave antenna for near-endfire radiation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2): 184–187. doi: [10.1109/LAWP.2017.2779455](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2779455).
- [14] 王友成, 董明宇, 张锋, 等. 渐变槽天线端射特性优化设计[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 124–128. doi: [10.11999/JEIT160203](https://doi.org/10.11999/JEIT160203).
- WANG Youcheng, DONG Mingyu, ZHANG Feng, *et al.* Design of tapered-slot antenna with optimized end-fire characteristics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 124–128. doi: [10.11999/JEIT160203](https://doi.org/10.11999/JEIT160203).
- [15] GE Shangkun, ZHANG Qingfeng, RASHID A K, *et al.* General design technique for high-gain traveling-wave endfire antennas using periodic arbitrary-phase loading technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(6): 3094–3105. doi: [10.1109/TAP.2020.3037646](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3037646).
- [16] DUAN Junbing and ZHU Lei. A compact narrow-width endfire leaky wave antenna on coplanar stripline[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(4): 3011–3016. doi: [10.1109/TAP.2021.3118793](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3118793).
- [17] HOU Yuefeng, LI Yue, ZHANG Zhijun, *et al.* A broadband and high-gain endfire antenna array fed by air-substrate parallel strip line[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(8): 5717–5722. doi: [10.1109/TAP.2019.2920332](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2920332).
- [18] DU Xiaoyu, REN Jian, LI Huidong, *et al.* Design of a leaky-wave antenna featuring beam scanning from backfire utilizing odd-mode spoof surface plasmon polaritons[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6971–6976. doi: [10.1109/TAP.2021.3076166](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3076166).
- [19] YE Daofeng, LI Yuanxin, LIANG Zhixi, *et al.* Periodic triangle-truncated DSPSL-based antenna with backfire to endfire beam-scanning capacity[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 845–849. doi: [10.1109/TAP.2016.2632520](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2632520).
- [20] DU Yiming, XI Bin, LI Yuanxin, *et al.* The periodic MLWA with non-uniform aspect ratios based on trapezoid DSPSL with back-firing to end-firing beam-scanning capacity[J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2020, 1: 20–25. doi: [10.1109/OJAP.2019.2961982](https://doi.org/10.1109/OJAP.2019.2961982).
- [21] GE Shangkun, ZHANG Qingfeng, RASHID A K, *et al.* A compact full-space scanning leaky-wave antenna with stable peak gain[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6924–6929. doi: [10.1109/TAP.2021.3078242](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3078242).
- [22] OTTO S, RENNINGS A, SOLBACH K, *et al.* Transmission line modeling and asymptotic formulas for periodic leaky-wave antennas scanning through broadside[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(10): 3695–3709. doi: [10.1109/TAP.2011.2163781](https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2163781).
- [23] GROSS F B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*[M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 353–356.
- [24] CHEN Jianxin, CHIN C H K, and XUE Quan. Double-sided parallel-strip line with an inserted conductor plane and its applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, 55(9): 1899–1904. doi: [10.1109/TMTT.2007.904055](https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.904055).
- [25] GARG R, BHARTIA P, BAHL I, *et al.* *Microstrip Antenna Design Handbook*[M]. Boston: Artech House, 2001: 782–783.
- 王亨辉: 男, 博士生, 研究方向为周期结构与漏波天线设计。  
 孙 胜: 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场理论与数值方法、微波毫米波理论与技术、天线理论与技术等。  
 刘能武: 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线理论与技术、射频收发系统、导航定位系统等。  
 刘元安: 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信技术、射频与微波器件、综合网络接入技术、移动终端与物联网等。