2024年1月

文章编号: 2095-4980(2024)01-0068-08

# 小型化八边形基片集成波导背腔缝隙天线

刘阳1,束锋2,宋来鹏3

(1.南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094; 2.海南大学 信息与通信工程学院,海南 海口 570228;3.华信咨询设计研究院有限公司 信息通信设计研究院,浙江 杭州 310052)

摘 要:提出一款新颖的W波段八边形基片集成波导(SIW)背腔缝隙天线。相较传统的缝隙天线,具有体积小、易加工、Q值高、成本低等优点,且易于成阵。通过调节天线背腔缝隙的长度、宽度,以及SIW 腔体的尺寸优化天线的辐射特性,通过电磁仿真软件 HFSS 对模型进行仿真优化,确定了天线的最优结构。仿真实验结果表明,所设计的天线相对带宽约4.5%,方向性优良,中心频率点谐振深度<-31 dB,天线最大增益达到5 dBi,满足设计要求,验证了设计的正确性。所设计的SIW 背腔缝隙天线拓宽了数字通信的可用频谱,是一种新的尝试,可为以后的研究提供新的参考思路。

**关键词:**小型化;基片集成波导;W波段电磁波;宽带;缝隙天线 中图分类号:TN823 **文献标志码:**A **doi:** 10.11805/TKYDA2021394

# A kind of miniaturized octagonal Substrate Integrated Waveguide cavity-backed slot antenna

LIU Yang<sup>1</sup>, SHU Feng<sup>2</sup>, SONG Laipeng<sup>3</sup>

(1.School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;
 2.School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou Hainan 570228, China;
 3.Department of Information and Communication Design, Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310052, China)

Abstract: A Substrate Integrated Waveguide(SIW) is proposed, which bears the advantages of small size, easy processing, high Q value, and low cost, compared with the traditional slot antenna. The radiation characteristics of the proposed antenna can be optimized by adjusting the slot length, slot width, and cavity size. Calculating the model through electromagnetic simulation software HFSS, then the optimal structure of the antenna can be confirmed finally. The simulation results show that the relative bandwidth of this antenna is about 4.5%, the directivity is excellent, the resonance depth at the center frequency point is <-31 dB, and the maximum antenna gain is 5 dBi, which meets the design requirements and verifies the correctness of the design. The proposed SIW waveguide cavity-backed slot antenna broadens the available frequency spectrum of digital communication, which can provide new ideas for future research.

Keywords: miniaturization; Substrate Integrated Waveguide; W-band electromagnetic wave; broadband; slot antenna

随着现代微波技术的飞速发展,高传输速率、小型化和多功能集成的通信设备已成为发展趋势。近年来, 毫米波等高频段成为研究的热点。相对于低频段,高频段波长较长,且拥有更大的开普勒频移。高频段设备拥 有更好的分辨力与抗干扰能力,但毫米波在通信中也具有损耗率较高的缺点。大气中的水分子、各种气体分子 及其他悬浮颗粒在电磁波传播过程中有很强的相互作用,毫米波损耗比较大,但这个频段还存在对电磁波作用 较弱的大气窗口和作用较强的吸收峰。由文献[1]可知,W波段(75~110GHz)内的96 GHz频率附近的频带内,传 播衰减比较小,是此波段内最适合通信的频带,适合点对点通信,是地基雷达和空空导弹等首选工作频段。

由于波导易加工、损耗低、高Q值特性,常用于高频微波器件的设计中,但由于波导结构的微波器件体积较

大,无法与市面现有的微带电路结构完美集成,难以满足现代毫米波系统的研发。因此在20世纪90年代,一种 模拟波导结构的新型小型化结构——基片集成波导(SIW)<sup>[2]</sup>被提出。SIW有很好的优势,可以大幅减小信号衰减。 SIW 具有金属波导高品质因数、高功率容量等特性,且传播特性和传统的波导结构类似,可以在印刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB)或低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)上实现。SIW 将金属通孔进 行适当周期性分布排列模拟金属壁,从而获得传统金属波导的特性,利用金属通孔在介质基片上实现波导的场 传播模式。

2015年,东南大学的WUQi等基于SIW的双频毫米波天线结构<sup>[3]</sup>,在SIW腔体表面,蚀刻了2个环形指数 槽,成功实现37.5 GHz和47.8 GHz双频段圆极化辐射;2017年,TDeckmyn等设计了一款宽带SIW天线拓扑<sup>[4]</sup>, 利用低成本的PCB板材实现天线良好的辐射特性。2017年,MAsaadi、ASebak等设计了一款基于SIW的方形谐 振腔,由同轴单馈激励<sup>[5]</sup>,在缝隙表面蚀刻4×4缝隙,通过加载倾斜的偶极子得到圆极化辐射特性。天线的视轴 方向峰值增益为16 dVic,但带宽较窄。2019年,TDeckmyn等设计了一款基于SIW双频毫米波背腔缝隙天线<sup>[6]</sup>, 利用4个紧密耦合的四分之一模SIW(Quarter Module SIW,QMSIW)腔体结构,引起不同的谐振,谐振分别为28 GHz和38 GHz,拓宽了频段的带宽。

本文结合 SIW,模拟波导传输结构,提出一种易加工、体积小、成本低、高 Q 值的微波电路结构,为新型 W 波导天线的研究提供一些新的想法。

本文基于 SIW 设计的小型化天线,结合了矩形谐振腔与圆形谐振腔优点,采用八边形外形结构,该天线既 有圆形谐振腔的高 Q 值优点,又拥有较为简单的外形尺寸。本天线采用的缝隙形式为矩形缝隙,矩形缝隙作为 一个馈点产生向前端的辐射,模拟的金属腔体抑制后端辐射,可以增大天线的增益,体现了单向辐射的特性, 同时矩形缝隙也易于加工。

由于W波段电子设备精确度要求很高,且大部分W波段电子器件都是利用波导结构实现功能,故高频电子器件的小型化、低成本变得越来越重要。本天线模型尺寸为3 mm×3 mm×0.345 mm,易于成阵。经过仿真与实测结果表明,此天线方向性、辐射特性优良,满足设计要求。

#### 1 SIW 天线理论分析

SIW模拟金属波导的结构进行设计,与金属波导类似,在介质板上嵌入金属化过孔进行模拟金属壁设计。若SIW的传播特性与金属波导类似,则需满足一定的条件才能实现<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} D_{v} \leq 0.2\lambda \\ D_{v} \leq P_{v} \leq 2D_{v} \end{cases}$$
(1)

式中: D<sub>v</sub>为金属化过孔的直径; λ为电磁波自由空间波长; P<sub>v</sub>为金属化过孔间距离。

满足上述条件的平行金属通孔列可使得泄露的能量忽略不计,继而可模拟出金属波导的传输特性。由于金属化通孔间有缝隙,横向磁场(Transverse Magnetic field, TM)使得侧面的表面电流无法正常传导,TM模的电磁场无法储存在内部,故SIW不支持TM模式。

缝隙天线的原理是利用金属缝隙切断金属表面的表面电流,使缝隙 周围产生电流,从而使得缝隙内部产生位移电流。位移电流通过金属缝 隙向外辐射,金属的缝隙辐射现象可等效于类似电流振子天线的磁流振 子天线,辐射缝隙等效于一个天线馈点<sup>[5]</sup>。

一般地,谐振腔内的波导缝隙天线根据不同的位置分为不同的类型,如图1所示。1为宽壁上的纵向缝隙,2为宽壁上的横向缝隙,3为宽壁上的斜向缝隙,4为波导窄壁上的斜向缝隙。



Fig.1 Schematic diagram of the gap form 图1 缝隙形式示意图

无论缝隙的馈电被哪种方式所激励,缝隙中只存在切向的电场强度,并在缝隙的中点呈上下对称的驻波分布。如图2所示。

缝隙对表面电流进行切割,从而向外产生辐射,形成缝隙天线。故可以通过蚀刻不同形状的缝隙增加其谐振模式,达到改善带宽性能的目的。本文采用异形辐射缝隙增加缝隙的有效长度,使谐振点落于W波段内。

设计的天线平面结构如图 3 所示,天线集成于一块 RT/Duroid 5880 的介质板上,其介电常数为 2.2,背面使用 共面波导(CPW)馈电结构。为使金属通孔能够模拟金属壁,过孔的直径 D<sub>v</sub>,过孔间距 P<sub>v</sub>满足式(1)。

辐射缝隙位于天线下金属表面处,对辐射缝隙进行变形,可以在有限的空间内增加缝隙的等效长度,从而 减小天线的体积。天线的不同结构参数对天线的中心频率影响较大,可以调节缝隙的结构尺寸来优化天线<sup>[7-8]</sup>。



Fig.2 Antenna pattern of *E*-plane and *H*-plane 图2 天线*E*面与*H*面方向图

对于图3所示的八边形基片集成波导背腔缝隙天线,可以将 其辐射缝隙与一小段传输结构作为一个整体,其等效电路等同于 矩形谐振腔的宽壁纵向缝隙<sup>[9-10]</sup>。设Y和G分别表示辐射缝隙等 效电路的特征导纳和纵向辐射缝隙在宽壁上的等效电导,其归一 化等效电导为g=G/Y,当G远远小于Y时,可得

$$g = \frac{G}{Y} = \frac{U^2 G}{U^2 Y} = \frac{P_{\rm r}}{P_{\rm i}}$$
(2)

式中P,和P,分别为该辐射缝隙的辐射功率和输入功率。

假设谐振腔处于基模传输状态,即谐振腔的传输模式为 TE<sub>10</sub> 波,可知电磁波的截止波长为 $\lambda_{e}=2a$ ,波导波长为 $\lambda_{g}$ ,自由空间 阻抗 $\eta=120\pi$ Ω,则本谐振腔的输入功率 $P_{i}$ 与辐射功率 $P_{i}$ 分别为:

$$P_{\rm i} = \frac{ab}{4} \left(\frac{\lambda_{\rm c}}{\lambda}\right)^2 \times \frac{\lambda_{\rm c}}{\lambda} \eta H_0^2 \tag{3}$$

$$P_{\rm r} = \frac{U_{\rm r}^2 G_{\rm r}}{2} \tag{4}$$



Fig.3 Schematic diagram of the antenna plane structure 图 3 天线平面结构示意图

式中:a为矩形波导的宽边;b为矩形波导的窄边; $U_r$ 为辐射缝隙产生的等效感应电动势; $G_r$ 为缝隙的辐射电导; $H_0$ 为磁场强度的振幅。

设天线的轴向电场强度为 $E_z = E_0 e^{-j\beta z}$ ,其在振子中点产生的电流为:

$$I_{\rm ms} = \frac{\int_{-\lambda/4}^{\lambda/4} E_z \cos\beta z \,\mathrm{d}z}{R_{\rm d}} \tag{5}$$

式中R<sub>d</sub>为天线的辐射电阻。

设缝隙辐射的电磁波与缝隙相切的磁场强度矢量在纵向上的分量为 $H_2 = H_0 \sin(\pi x/a) e^{-j\beta z}$ ,则辐射缝隙产生的感应电动势为:

$$U_{\rm r} = \left[ \boldsymbol{H}_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \int_{-\lambda/4}^{\lambda/4} {\rm e}^{-j\beta_{\rm g}z} \cos\beta z dz \right] / G_{\rm r} = \left[ 2\boldsymbol{H}_0 \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{\rm c}}{\lambda}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2\lambda_{\rm g}}\right) / G_{\rm r}$$
(6)

式中 $\beta_{g}$ 为角波数,且 $\beta_{g}=2\pi/\lambda_{g}$ 。

根据上述公式可以推导出辐射缝隙的归一化电导g:

$$g \approx 2.09 \times \frac{a}{b} \times \frac{\lambda_{\rm g}}{\lambda} \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi \lambda}{2\lambda_{\rm g}}\right) = \frac{U^2}{P} \tag{7}$$

式中x为辐射缝隙与波导宽壁中心之间的距离。当知道了缝隙的激励电压U,可以推导出缝隙与宽壁面之间的距离。

通过文献[11]已知等效模型分析的等效电路的经验公式,矩形基片波导的几何尺寸与介质填充矩形金属波导的等效尺寸计算如下:

$$a = W_{\rm SIW} - 1.08 \frac{d}{p} + 0.1 \frac{d^2}{W_{\rm SIW}}$$
(8)

$$L = L_{\rm SIW} - 1.08 \frac{d}{p} + 0.1 \frac{d^2}{L_{\rm SIW}} \tag{9}$$

式中: L为波导的等效长度;  $W_{SIW}$ 与 $L_{SIW}$ 为矩形基片波导的两列金属通孔间距与长度; d为金属通孔的直径; p为相邻2个金属通孔之间的距离。

天线的物理尺寸通过初步计算后,初始结构参数如表1 所示。

### 2 仿真结论与分析

使用仿真软件 HFSS 对天线进行建模仿真,建模模型如图 4 所示。

通过调节缝隙总长可以调整天线的中心频率,一般选择缝隙馈线的总长为电磁波空间波长的1/4或1/2。为更 好地利用周期金属柱模拟波导的金属壁,选取孔间距与金属通孔直径的比值 $P_v/D_v=2$ 。对结构主要参数进行扫描 仿真,可以确定缝隙总长度与缝隙宽度。图5为缝隙长度对天线的 $S_{11}$ 影响的仿真图,从仿真结果可以看出,缝 隙长度 $L_s$ 影响天线的中心频率,缝隙长度越长,中心频率越低。确定缝隙为半波长的谐振辐射缝隙,故在初步 设计时选 $L_s=\lambda/2$ 。

0

-5



Fig.4 Schematic diagram of modeling structure 图4 建模结构示意图



图 6 为缝隙宽度 W 对 S<sub>11</sub>的影响仿真结果图,从图中可以看出,缝隙宽度对天线的中心频率影响也比较显著,缝隙宽度越大,中心频率越高。因此选取缝隙长度 L<sub>2</sub>为 2.2 mm,缝隙宽度 W 为 0.2 mm。

本文设计的天线在96 GHz的3D 辐射方向图如图7 所示。从图中看出,天线的主瓣大概在y轴附近,与仿真 图缝隙的垂直方向相近,符合预期结果。

图 8 为本文设计的天线在 96 GHz 的 *E* 面与 *H* 面辐射方向图。从图中可以看出,*E* 面的主瓣约为 165°方向, *H* 面主瓣约位于 180°方向,水平与垂直波瓣宽度分别为 30°与 10°。

从仿真结果可看出,-10 dB以下的阻抗带宽范围为94.2~98.5 GHz,相对带宽达到了4.5%,完全实现了高频 宽带的目标。在中心频率96 GHz处,谐振深度接近-32 dB,表明天线反射少,阻抗匹配效果十分良好,且在 96 GHz附近增益最高值为5 dBi左右,增益也较高。

表1 天线物理尺寸设计参数(mm) Table1 Design parameters of antenna physical size(mm)

parameter	value
the diameter of through-hole $D_{y}$	0.10
the spacing of through-holes $P_{v}$	0.20
the length of feeder $L_{\rm ms}$	1.00
the width of feeder $W_{\rm ms}$	0.20
the total length of gap $L_s$	2.20
the corresponding electrical length	0.52
the width of gap $W$	0.20

 $L_s=2.2 \text{ mm}$  $L_s=2.1 \text{ mm}$ 

 $L_{s}=2.0 \text{ mm}$ 

110









Fig.7 3D radiation direction of antenna 图7 天线 3D 辐射方向



Fig.8 Radiation pattern of *E*-plane and *H*-plane of antenna 图 8 天线*E*面与*H*面辐射方向图



(a) physical image of antenna



(b) size measurement diagram of antenna

Fig.9 The cavity-backed slot antenna 图9 背腔缝隙天线实物图

## 3 实验结果分析

根据上述缝隙与馈电部分的设计,采用标准印刷电路板制作了天线的实物,实物图如图9所示。 图10为天线的回波损耗仿真与测试结果,可以看出,仿真与测试的中心频率几乎一致。由于加工精确度的 差异,对实测结果影响较大,实测的-10 dB工作带宽为94.5~98 GHz,相对带宽为3.7%。实测数据表明,在中心 工作频点96 GHz处,天线最大增益可达到4.6 dBi,与仿真结果基本一致,证明了该设计的有效性。图11 为天线

0

辐射方向图的实测数据与仿真数据对比图,可以看出,实测数据与仿真数据基本一致,由于加工工艺的原因, 主瓣增益略有减少,符合天线设计预期。



### 4 结论

本文设计了一款基于 SIW 的小型化的 W 波段的背腔缝隙天线,实测相对带宽为 3.7%,在中心工作频点 96 GHz 处天线的最大增益为 4.6 dBi,且本文的天线在高频部分宽带效应较优。目前国内外对于高频的 SIW 天线的研究 还处于起步阶段,本文设计的天线解决了传统高频段多边形 SIW 天线尺寸过大、应用受限的问题,对提出的小型化设计结构与馈电方式具有一定的参考意义,也为国内外高频小型化天线的设计研究提供了一些思路。

## 参考文献:

- [1] 阮成礼,董宇亮. 毫米波理论与技术[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2013. (RUAN Chengli, DONG Yuliang. Millimeter-wave theory and technology[M]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2013.)
- [2] HAO Zhangcheng, HONG Wei, CHEN Anding, et al. SIW fed dielectric resonator antennas(SIW-DRA)[C]// 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2006:202-205. doi:10.1109/MWSYM.2006.249448.
- [3] WU Qi, YIN Jiexi, YU Chen, et al. Low-profile millimeter-wave SIW cavity-backed dual-band circularly polarized antenna[J].
  IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(12):7310-7315. doi:10.1109/TAP.2017.2758165.
- [4] DECKMYN T, AGNEESSENS S, RENIERS A C F, et al. A novel 60 GHz wideband coupled half-mode/quarter-mode substrate integrated waveguide antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6915-6926. doi: 10.1109/ TAP.2017.2760360.

- [5] ASAADI M,SEBAK A. High-gain low-profile circularly polarized slotted SIW cavity antenna for MMW applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):752-755. doi:10.1109/LAWP.2016.2601900.
- [6] DECKMYN T, CAUWE M, GINSTE D V, et al. Dual-band(28, 38)GHz coupled quarter-mode substrate-integrated waveguide antenna array for next-generation wireless systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,67(4):2405-2412. doi:10.1109/TAP.2019.2894325.
- [7] 刘少辉.一种K频段基片集成波导背腔贴片天线设计[J]. 火控雷达技术, 2018,47(3):66-68,74. (LIU Shaohui. Design of Kband SIW cavity-backed patch antenna[J]. Fire Control Radar Technology, 2018,47(3):66-68,74.) doi:10.3969/j.issn.1008-8652.2018.03.015.
- [8] XU Feng, WU Ke. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(1):66-73. doi:10.1109/TMTT.2004.839303.
- [9] DAHIYA A, ANAND R, SINDHWANI N, et al. Design and construction of a low loss substrate integrated waveguide(SIW) for S band and C band applications[J]. MAPAN, 2021,36(2):355-363. doi:10.1007/s12647-021-00449-x.
- [10] 张旭,刘一麟,黄卡玛,等.具有谐波抑制功能的双极化缝隙天线[J].太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(3):414-417,426.
  (ZHANG Xu, LIU Yilin, HUANG Kama, et al. Dual polarized slot antenna with harmonic suppression[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(3):414-417,426.) doi:10.11805/TKYDA2019314.
- [11] 王鑫.高性能基片集成波导背腔天线研究与设计[D].南昌:华东交通大学, 2020. (WANG Xin. Research and design of high performance substrate integrated waveguide cavity-backed antenna[D]. Nanchang, China: East China Jiaotong University, 2020.) doi:10.27147/d.cnki.ghdju.2020.000404.

### 作者简介:

刘 阳(1995-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为通信系统设计与应用、天线技术与应用.email: 823806834@qq.com.

**束** 锋(1973-),男,博士,教授,博士生导师,主 要研究方向为智能无线通信与移动网络、网络空间与信 息安全、智能大规模测向和定位.

**宋来鹏**(1992-),男,硕士,工程师,主要研究方向 为无线通信.

#### (上接第61页)

- [16] BAILEY K. The army's tactical network empowers advanced goggle platform[EB/OL]. (2019–11–19)[2022–04–21]. https://www.army.mil/article/230047/the\_armys\_tactical\_network\_empowers\_advanced\_goggle\_platform.
- [17] US Army. The army gathers industry to inspire network modernization[EB/OL]. (2019-11-26). https://www.Army.mil/article/ 230394/the\_army\_gathers\_industry\_to\_inspire\_network\_modernization.
- [18] UNDERWOOD K. Leaders outline plan for the army's integrated tactical network[EB/OL]. (2018-02-06). https://www.Army.mil/ article/230394/the\_army\_gathers \_industry\_to\_inspire\_network\_modernization.
- [19] POMERLEAU M. Army lays out timeline for 2021 network update[EB/OL]. (2019-05-02). https://www.c4isrnet.com/it-networks/2019/05/02/army-lays-out-timeline-for-2021-network-update/.

## 作者简介:

**云 超**(1983-),男,博士,工程师,主要研究方向 为通信与信息系统、通信及通信对抗.email:jeffyun chao@163.com.

**谭志强**(1977-),男,硕士,高级工程师,主要研究 方向为通信与信息系统、通信及通信对抗. **鲁** 航(1993-),男,硕士,工程师,主要研究方向 为通信与信息系统.

**蒋攀攀**(1989-),男,硕士,工程师,主要研究方向 为通信与信息系统、通信及通信对抗.

黄立刚(1986-),男,硕士,工程师,主要研究方向 为雷达与雷达对抗.