

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802341

## 基于 SIW 的宽频带喇叭天线设计\*

严煜铭 廖 成 徐晓敏

(西南交通大学 电磁场与微波技术研究所 成都 610031)

**摘 要:**设计了一款具有宽频带高前后比的基片集成波导 H 面喇叭天线。该天线通过在基片集成波导喇叭的口径前端加载半圆形介质基片和半圆形金属片结构,实现了天线阻抗带宽的展宽及天线前后比的提高,此时天线整体尺寸为  $1.6\lambda \times 3.2\lambda$  mm。仿真结果表明,天线  $S_{11} < -10$  dB 的频率范围为 22.8~28.2 GHz,相对带宽达到 21%;在 23~26 GHz 的频率范围内,天线前后比始终大于 13 dB,天线最大增益能够达到 12.2 dB,且在较宽频率范围内天线增益保持稳定。相较于其他基片集成波导喇叭天线,该天线结构更加简单,具有更好的带宽、增益及前后比。

**关键词:**喇叭天线;基片集成波导;宽频带;前后比;增益

**中图分类号:** TN82      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Design of wideband horn antenna based on SIW

Yan Yuming Liao Cheng Xu Xiaomin

(Institute of Electromagnetics and Microwave Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A substrate integrated waveguide (SIW) H-plane horn antenna with wide band and high front-to-back ratio (FTBR) was designed. In order to improve the matching condition between horn aperture and free space, an integrated solution is suggested, which is based on a semi-circular dielectric substrate and a metal piece along the horn aperture. The size of the antenna is  $1.6\lambda \times 3.2\lambda$  mm, the impedance bandwidth is broaden and the FTBR is improved. The simulated results show that the proposed antenna operates with 21% impedance bandwidth ranging from 22.8 GHz to 28.2 GHz with  $S_{11}$  below  $-10$  dB. The FTBR is greater than 13 dB at the frequency from 23 GHz to 26 GHz. The maximum gain of this antenna can reach 12.2 dB and the gain which have a considerable character can keep stable in a wide frequency range. Compared with other SIW horn antennas, this antenna has a simpler structure, and it is better in terms of wide bandwidth, higher gains and FTBR.

**Keywords:** horn antenna; substrate integrated waveguide; wide band; front-to-back ratio; gain

## 0 引 言

随着通信技术的迅猛发展,人们对频谱资源的需求也在不断增加,当现有频谱难以满足人类需求时,人们开始把目光转向了更高的频率范围,高频意味着更加广阔的频谱。同时随着现阶段人们汽车保有量的不断提高,人们对汽车电子设备的重视也在不断增强,汽车雷达作为其核心组成部分之一也得到长足的发展<sup>[1-2]</sup>。工信部在 2012 年发布的《工业和信息化部关于发布 24 GHz 频段短距车载雷达设备使用频率的通知》中规定我国 24 GHz 短距车载雷达频段为 24.25~26.65 GHz。目前对于 24 GHz 频段车载雷达的研究主要集中在微带贴片阵列上,此时阵列天线存在整体尺寸偏大、结构较为复杂、加工难度较大等问题<sup>[3]</sup>。因此

设计一款能够覆盖 24 GHz 频率范围具有结构紧凑、易于加工、性能优良的微带天线就显得尤为重要。

喇叭天线作为一种常见的微波天线,因其具有结构简单、频带宽、方向性好、功率容量高等优势而被广泛应用。基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)技术是指在介质基板两侧开规则的金属过孔来模拟常规波导的磁壁,因此基片集成波导在具有常规波导的大部分传输特性的同时还具有结构尺寸小、易于集成等优势。

随着基片集成波导技术的提出与发展,众多天线工作者对基片集成波导喇叭天线的设计进行了系列研究,并在天线的小型化<sup>[4]</sup>、宽频带<sup>[4-10]</sup>、高增益<sup>[8-10]</sup>、强方向性<sup>[10-15]</sup>等领域的设计取得了重要成果。如文献[5]是通过在 SIW 喇叭前端加载有空气过孔的介质来实现宽频带,但其主射方向存在明显

收稿日期:2018-11-28

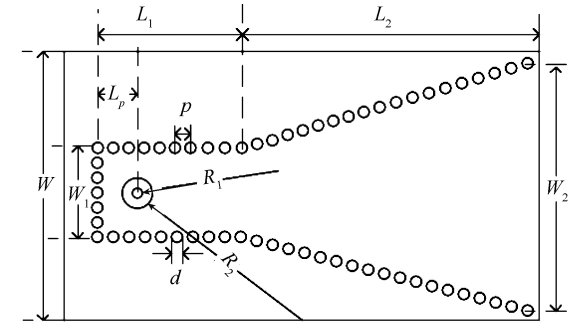
\* 基金项目:国家自然科学基金(61771407)项目资助

的偏移。文献[10]通过在天线表面两侧加载金属振子的方式实现天线频带的展宽和增益的提高,但这种天线尺寸较大且加工难度增大。文献[14]通过在喇叭口径前端加载矩形金属结构来提高天线前后比(front-to-back ratio, FTBR),文献[15]通过在喇叭两侧金属表面加载矩形缝隙来提高天线前后比,但这两种方式均使得天线增益有所下降。

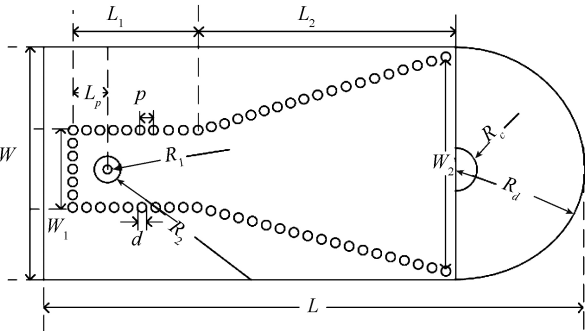
本文研究了一款可覆盖 24 GHz 频段车载雷达系统的基片集成波导喇叭天线。该天线采用同轴线进行馈电,通过在喇叭口径前端加载一些简单结构的方式在展宽天线带宽的同时提高了天线前后比,增强天线的方向性,使天线获得较高的增益。仿真结果对比表明,与普通基片集成波导喇叭天线相比,该天线具有较好的宽频带特性,单元增益与天线前后比均处于较高水平。

1 天线设计

基片集成波导喇叭天线主要可以分成两个部分,即由基片集成波导构成的波导结构和金属过孔与上下金属表面构成的喇叭结构。图 1 所示为两种 SIW 喇叭天线结构示意图,与常规 SIW 喇叭天线相比,改进后的天线在口径前端多出一截半圆形的金属片及介质结构。天线采用相对介电常数  $\epsilon_r$  为 4.5 的 Taconic RF45 材料作为介质基板,厚度为 3.15 mm。改进后天线的整体尺寸为  $W \times L$ ,波导宽度为  $W_1$ ,口径宽度为  $W_2$ ,波导长度与喇叭长度为  $L_1$ 、 $L_2$ 。



(a) 常规 SIW 喇叭



(b) 改进后 SIW 喇叭

图 1 两种 SIW 喇叭天线结构

当金属通孔之间的周期足够小时,基片集成波导结构才可等效为矩形介质填充波导,此时金属化通孔的直径  $d$  与打孔周期  $p$  应满足下面不等式关系<sup>[7]</sup>。

$$d/\lambda_0 < 0.1 \tag{1}$$

$$d < p < 2d \tag{2}$$

式中: $\lambda_0$  为自由空间波长。

波导结构为实现单模传输,其宽度  $W_1$  与等效波导宽度  $W'_1$  应满足如下关系<sup>[7]</sup>:

$$W_1 = \frac{2W'_1}{\pi} \cot^{-1} \left( \frac{\pi p}{4W'_1} \ln \frac{p}{2d} \right) \tag{3}$$

$$\max(W'_1, h_0) < \lambda / \sqrt{\epsilon_r} < 2W'_1 \tag{4}$$

式中: $h_0$  为介质基板厚度。

天线采用 50  $\Omega$  同轴线进行馈电,馈电点位置在喇叭的中轴线上,馈电点到波导底端距离为  $L_p$ ,同轴线内芯的插入深度为  $h$ ,可以通过改变两者的数值来调整同轴线与天线阻抗匹配,使得天线的回波损耗达到最小。

为进一步提高 SIW 喇叭天线的方向性,将介质基板沿喇叭口径前端继续向外延伸,提高天线的轴向长度,使辐射的电磁波沿轴向汇聚,减小天线波束宽度,提高天线增益。同时,为实现天线到自由空间的渐变过渡,提高天线与自由空间的匹配情况,在延伸的介质基板处加载一半圆形的金属结构,以展宽天线的阻抗带宽。

2 参数优化设计

与常规 SIW 喇叭天线相比,本文所设计的天线要多出一段半圆形的金属片和介质基板,其所加载的金属片半径为  $R_c$ ,介质片半径为  $R_d$ 。通过 HFSS15.0 电磁仿真软件对天线模型进行仿真优化,并分析不同结构尺寸对天线性能的影响。

在 SIW 喇叭天线的口径前端继续加载介质结构相当于进一步增加天线的轴向长度,有利于提高天线的方向性。图 2 所示为在喇叭前端加载不同半径的介质片时天线前后比值随频率的变化曲线。

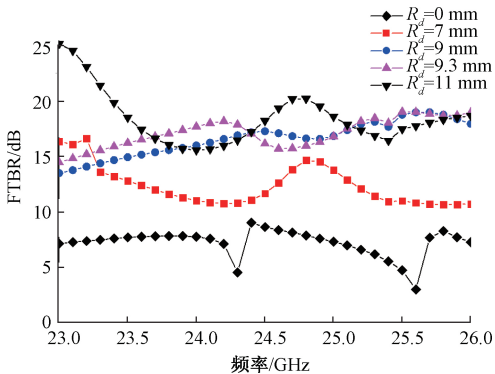


图 2  $R_d$  对天线 FTBR 的影响

从图 2 中结果可以看出常规 SIW 喇叭天线的前后比

处于较低水平,当在天线口径前端加载介质片后其前后比值有明显提升,且在较宽的频率范围内其前后比值均保持较高水平。同时随着加载的介质片半径的增加,天线前后比值也呈现逐渐增大的变化规律。

表 1 所示为加载不同半径的介质片时天线在 25.5 GHz 处的 E 面半功率波束宽度及旁瓣电平变化情况。

| 表 1 不同 $R_d$ 对天线半功率波束宽度的影响 |                        |            |
|----------------------------|------------------------|------------|
| $R_d$ /mm                  | E 面半功率波束宽度/ $^{\circ}$ | E 面旁瓣电平/dB |
| 0                          | 142                    | -2.04      |
| 7                          | 73                     | -12.04     |
| 9                          | 64                     | -10.68     |
| 9.3                        | 62                     | -10.17     |
| 11                         | 59                     | -7.62      |

从表 1 中可以看到在天线口径前端加载介质片的结构能够有效降低天线在 E 面的半功率波束宽度,且随着加载介质片尺寸的增加其波束宽度将进一步减小。同时天线的旁瓣电平则随着介质片半径的增大也在逐渐增大。结合前面天线前后比的相关结果,最终选择加载介质片半径  $R_d$  为 9.3 mm,此时天线前后比在全频段内处于较高水平,且此时天线的 E 面波束宽度较小,旁瓣电平也处于较低水平。

图 3 所示为在 SIW 喇叭前端加载不同半径的金属片时天线  $S_{11}$  参数随频率的变化曲线。图 4 所示为加载不同半径的金属片时天线的前后比值随频率的变化曲线。

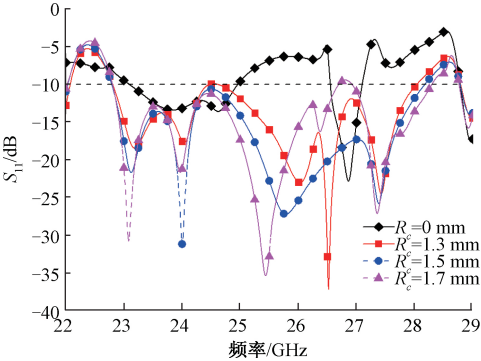


图 3  $R_c$  对天线回波损耗的影响

从图 3 和 4 中结果可以看到与未加载金属片的单元相比,加载后天线的谐振频率明显往低频方向移动,且能有效降低天线相邻两个谐振点之间的回波损耗。同时随着金属片半径的增加,天线在低频处的回波损耗得到较好的抑制,而高频处的回波损耗则会逐渐增加。此外加载金属片结构能够使天线在 24 GHz 频率附近的前后比得到显著提高。这表明该结构对 SIW 喇叭天线的后瓣抑制具有良好的效果,使得天线的方向性进一步提高。结合上述结果,最终选择加载的金属圆片半径  $R_c$  为 1.5 mm。

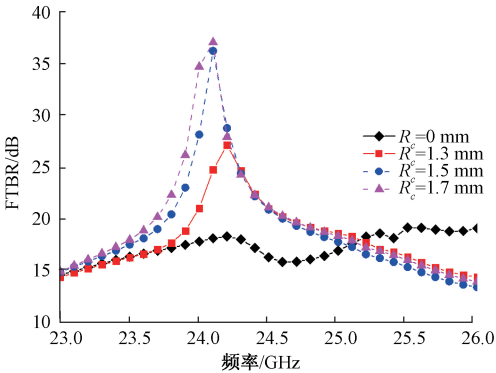


图 4  $R_c$  对天线前后比的影响

优化后该天线的主要参数如表 2 所示。

| 表 2 天线参数尺寸表 |       |        |       |
|-------------|-------|--------|-------|
| 参数          | 尺寸/mm | 参数     | 尺寸/mm |
| $W$         | 18.6  | $R_1$  | 0.15  |
| $L$         | 37.5  | $R_2$  | 0.88  |
| $W_1$       | 6     | $d$    | 0.8   |
| $W_2$       | 17.6  | $\rho$ | 1     |
| $L_1$       | 9     | $l_p$  | 2.5   |
| $L_2$       | 17.2  | $R_c$  | 1.5   |
| $h$         | 2.15  | $R_d$  | 9.3   |

3 天线仿真结果

将优化后所得天线模型在 HFSS15.0 中进行仿真分析。图 5 所示为仿真所得天线  $S$  参数随频率的变化曲线。从图 5 中结果可以看到单元回波损耗值小于 -10 dB 的频率范围为 22.8~28.2 GHz,此时天线的相对带宽为 21%。天线在 24 GHz 时  $S_{11}$  数值小于 -30 dB。图 6 所示为天线仿真所得增益与前后比值随频率的变化曲线。从图 6 中结果可以看到在 23~26 GHz 频率范围内单元增益始终大于 8.7 dB,且天线增益随着工作频率的增加先提高后保持较高水平。天线在该频率范围内的最大增益能达到 12.2 dB,且天线能在较宽的频率范围内保持增益不发生明显波动。此外,从图中结果可以看到天线的前后比大于 13 dB,在 24.1 GHz 附近天线的前后比达到最大值,此时单元的最大前后比达到 36 dB。

图 7 所示给出了天线的远场方向图,从图 7 中可以看到天线在谐振点 23.13、24.0、25.80 GHz 处的 E 面、H 面的方向图都具有较好的方向性,此时天线 E 面的半功率波束宽度依次为 66°、57°、62°,H 面的半功率波束宽度依次为 66°、55°、32°,从天线的半功率波束宽度可以看到随着工作频率的增加天线的方向性也在逐渐增强。

表 3 所示为本文设计单元与部分文献中所设计天线的整体尺寸、相对带宽、前后比等指标。

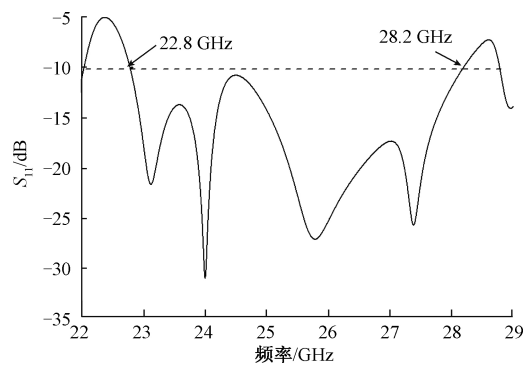


图 5 天线 S 参数随频率的变化曲线

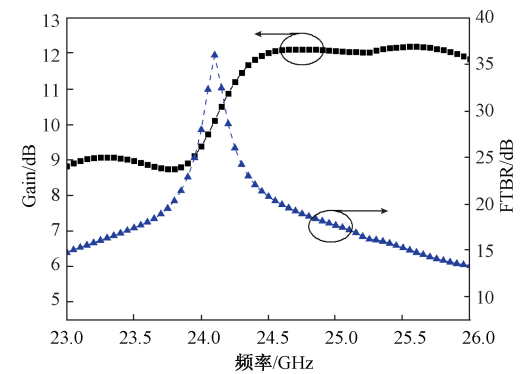
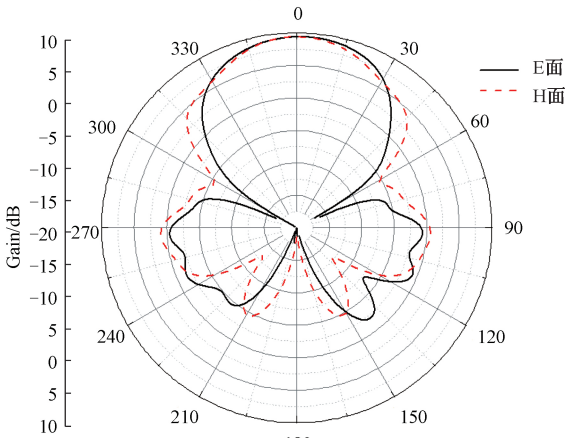


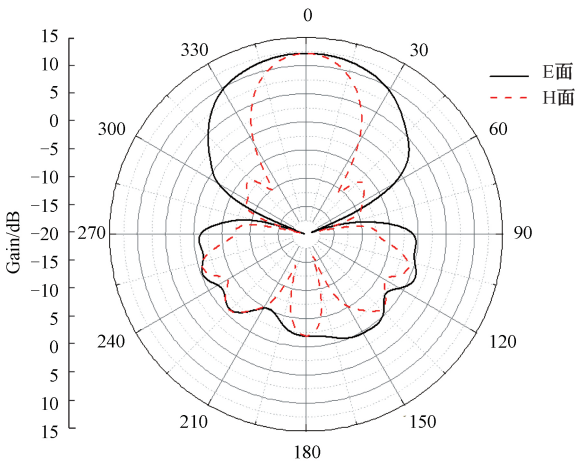
图 6 天线增益与 FTBR 随频率的变化曲线

表 3 天线性能比较

| 文献   | 整体尺寸<br>( $\lambda_0^3$ )      | 相对带宽/<br>% | 前后比/<br>dB |
|------|--------------------------------|------------|------------|
| [6]  | $2 \times 2.9 \times 0.4$      | 8          | 8~12       |
| [10] | $2.6 \times 3.8 \times 0.5$    | 44         | 10~20      |
| [12] | $1.26 \times 3.53 \times 0.18$ | 12         | 15         |
| [15] | $1.53 \times 4.6 \times 0.102$ | 6.15       | 24         |
| 本文   | $1.6 \times 3.2 \times 0.27$   | 21         | 13~20      |



(b) 24.0 GHz



(c) 25.80 GHz

图 7 天线远场方向图

表 3 中  $\lambda_0$  为天线在谐振频率点处所对应的在自由空间处的波长。从对比结果可以看到,本文所设计的天线能够在较小尺寸范围内实现具有较宽的相对带宽,且使天线前后比处于较高水平。

4 结 论

本文设计了一种结构简单的 SIW 喇叭天线,通过在喇叭前端加载半圆形金属片及介质的方式展宽了天线的阻抗带宽,提高了天线的前后比,天线的结构尺寸较小,易于加工。仿真结果表明该天线的工作频率为 22.8~28.2 GHz,阻抗带宽达到 21%,在 23~26 GHz 频率范围内天线前后比始终大于 13 dB,此时天线后瓣电平较小,具有良好的方向性,单元增益始终大于 8.7 dB,其最大增益能达到 12.2 dB,且在较大频率范围内单元增益保持较高水平,波动变化很小,具有较强的稳定性。与其他文献所给单元相比,该天线的相对尺寸更小,结构简单,易于加工,且天线具有更宽的阻抗带宽,更高的单元增益,相对较高的前后比,因此在短距离车载雷达的应用上更有优势。

## 参考文献

- [1] 彭章友,朱晶华,马骁颖,等.汽车防刮蹭雷达中的 MIMO 反射波到达角估计方法[J].电子测量技术, 2017,40(9):99-103.
- [2] 陆兴华,彭意达.基于回波探测的汽车防撞系统智能测距方法[J].电子测量技术,2016,39(6):126-129.
- [3] 郭婧,罗俊忻,王占平.K 波段高增益低副瓣微带天线阵的设计[J].火控雷达技术,2014,43(4):82-85,90.
- [4] ESQUIUS-MOROTE M, Fuchs B, Z(U)RCHER J F, et al. Novel Thin and Compact H-Plane SIW Horn Antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(6):2911-2920.
- [5] CAI Y, QIAN Z, CAO W, et al. Compact wideband SIW horn antenna fed by elevated-CPW structure[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63(10):4551-4557.
- [6] BAYAT-MAKOU N, SORKHERIZI M S, KISHK A A. Substrate integrated horn antenna loaded with open parallel transitions [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 349-351.
- [7] CHE W, DENG K, WANG D, et al. Analytical equivalence between substrate-integrated waveguide and rectangular waveguide[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IET,2008, 2(1):35-41.
- [8] MALLAHZADEH A R, ESFANDIARPOUR S. Wideband H-plane horn antenna based on ridge substrate integrated waveguide (RSIW) [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 85-88.
- [9] WANG L, GARCIA-VIGUERAS M, ALVAREZ-FOLGUEIRAS M. Wideband H-plane dielectric horn antenna [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2017, 11(12): 1695-1701.
- [10] WANG J, LI Y, GE L, et al. Wideband dipole array loaded substrate integrated H-plane horn antenna for millimeter waves[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(10): 5211-5219.
- [11] BAYAT-MAKOU N, KISHK A A. Substrate integrated horn antenna with uniform aperture distribution[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(2): 514-520.
- [12] CHE W, FU B, YAO P, et al. Substrate integrated waveguide horn antenna with dielectric lens [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(1): 168-170.
- [13] WANG H, FANG D, ZHANG B, et al. Dielectric loaded substrate integrated waveguide (SIW) H-plane horn antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(3): 640-647.
- [14] GONG L, YUK-CHAN K, RAMER R. Substrate integrated waveguide H-plane horn antenna with improved front-to-back ratio and reduced sidelobe level[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1835-1838.
- [15] LUO Y, BORNEMANN J. Substrate integrated waveguide horn antenna on thin substrate with back-lobe suppression and its application to arrays[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2622-2625.

## 作者简介

严煜铭,1995 年出生,硕士研究生,主要研究方向为天线理论与设计。

E-mail:yanyumingxyy@163.com