

小型化双极化 TEM 喇叭天线设计

赵子鑫¹ 陈 星¹

ZHAO Zixin CHEN Xing

摘 要

利用低频补偿技术,即通过加载感性结构的方式,降低 TEM 喇叭天线低频容性电抗影响,设计了一款小型化双极化 TEM 喇叭天线。以单极化的指数渐变极板结构的 TEM 喇叭天线为基础,通过 90° 交叉放置两支天线,实现双极化设计。为了实现低频带宽的拓展,在主辐射结构的下方引入了匹配带条结构,在其上方加载了脊结构,同时主辐射结构末端均做了垂直延伸处理。矩形反射板采用了在四周加载挡板的设计,并在挡板上引入了椭圆形凹槽。利用 3D 打印技术,对所设计的 TEM 喇叭天线进行了加工验证。仿真和测试结果表明,天线实现了 12.1 个倍频的工作带宽 ($VSWR < 2$, 0.72 ~ 8.72 GHz)。天线电尺寸仅为 $0.26\lambda \times 0.26\lambda \times 0.16\lambda$ (λ 为天线工作频段低端波长),在尺寸方面小于传统的半波长 TEM 喇叭天线,有着较好的定向辐射性能。

关键词

TEM 喇叭天线;小型化;双极化;低频补偿;匹配带条

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.04.036

0 引言

为了满足在日益复杂的电磁环境下实现高质量通信的需求,对通信系统硬件的电磁性能提出了更高的要求。在实际工程应用中,设计具有宽带及小型化特征的天线已成为天线设计领域的共识。常用的宽带天线的类型有:单极子天线、对数周期天线、Vivaldi 天线等^[1-3]。TEM 喇叭天线由于具有超宽带、定向高增益等优秀性能,常用于各类工程应用当中。当前国内外关于 TEM 喇叭天线的研究方向,主要是实现 TEM 喇叭天线的小型化设计与提高增益^[4-8]。双极化天线技术能够有效提高信道利用率,减弱多径效应。目前针对双极化 TEM 喇叭天线的研究相对较少,实现小型化双极化 TEM 喇叭天线的设计,对于实际工程项目具有十分重要的意义。

TEM 喇叭天线通常是由一对具有一定角度的金属板构成,其原理可以参考平行板双导线^[9],将两侧金属板切分成若干部分,每一部分小段金属板可以视作平行板双导线。在 TEM 喇叭天线工作时,高频电流在金属极板的表面流动,在极板之间传播电磁波,因为在电磁波的传播方向上,不存在电场与磁场的分量,所以在极板之间传播 TEM 模式的电磁波,并且天线结构类似于一个喇叭,因此被称作 TEM 喇叭天线。根据保角变换法,能够推导出 TEM 喇叭天线的特性阻抗为^[10]:

$$Z_c = \begin{cases} 60 \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) & w < h \\ 120\pi / \left[\sqrt{\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right)} \right] & w \geq h \end{cases} \quad (1)$$

式中: w 为天线口径的宽度, h 为天线口径高度。

TEM 喇叭天线能够通过调整两个极板之间的夹角和间距,实现从馈电处的 50Ω 阻抗到口径处自由空间的 120Ω 阻抗的匹配,以减小反射损耗。为了更平缓地实现阻抗匹配过渡,以达到更优的性能,可使用指数渐变^[11]、椭圆函数渐变^[12]等极板结构。

在低频辐射工作时,TEM 喇叭天线与开路状态的矩形平板传输线类似,存在较大的容性电抗,会将大量的能量反射回端口,从而影响辐射性能,这也是导致传统的 TEM 喇叭天线电尺寸较大,通常为半个波长的一个原因。为了降低低频容性电抗影响,可采用加载感性结构的方式,如文献[13]中,对指数 TEM 喇叭天线采用加载矩形板结构的方式,将该结构等效为低频时的磁偶极子,能够抵消天线的容性电抗的影响,从而获得更宽的工作带宽,其等效电路如图 1 所示。

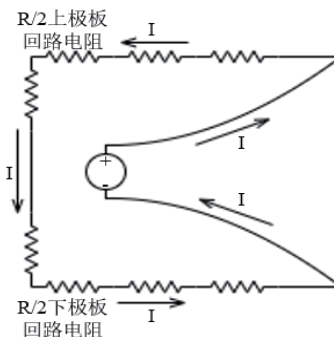


图 1 磁偶极子低频补偿回路

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610064

[基金项目] 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (No.WBC2312008)

1 天线设计与仿真

天线极板采用指数渐变的结构, 其中 $L_1(z)$ 为 TEM 喇叭天线两极板之间的间距, $W_1(z)$ 为极板宽度, 其公式为:

$$L_1(z) = a_1 \cdot e^{b_1 z} \tag{2}$$

$$W_1(z) = c_1 \cdot e^{d_1 z} \tag{3}$$

天线的主要结构参数如图2所示, 其具体数值详见表1。

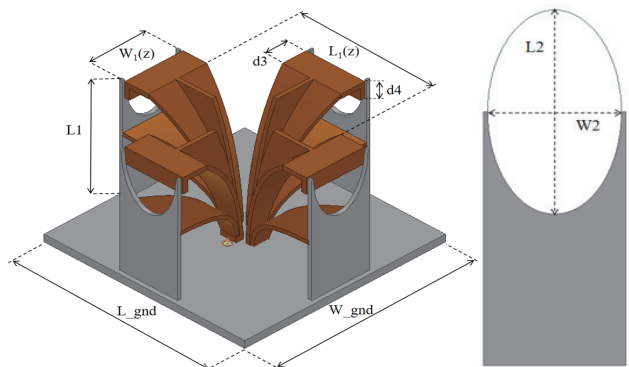


图2 天线结构参数示意图

表1 天线结构参数表

a_1	b_1	c_1	d_1	a_2	b_2
0.004 35	26	0.005 75	37	0.002 15	65
c_2	d_2	L_gnd	W_gnd	d_3	d_4
0.002 35	104	110	110	13.5	8.5
L_1	L_2	W_2			
68	23	14			

为了实现双极化设计, 基于单极化指数渐变极板结构TEM喇叭天线, 通过交叉90°放置两支加载矩形反射板的单极化天线, 构建了如图3所示的天线1。由之前的TEM喇叭天线阻抗公式可以得出, 在修改极板宽度与间距之后, 天线特性阻抗会随之改变, 从而影响天线的阻抗匹配。由图4仿真结果可以看出, 天线驻波比在低频时不是很理想。

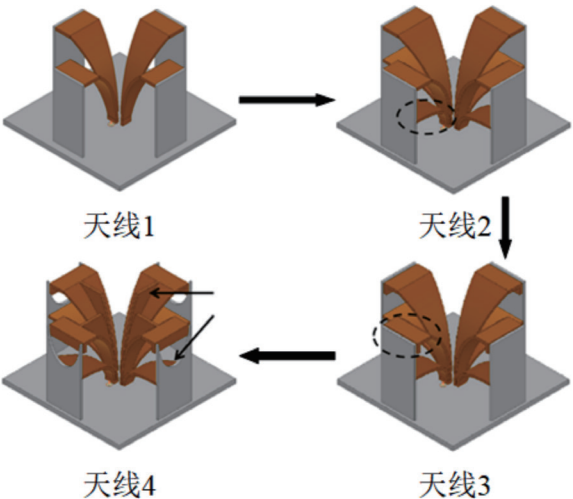


图3 天线结构演变示意图

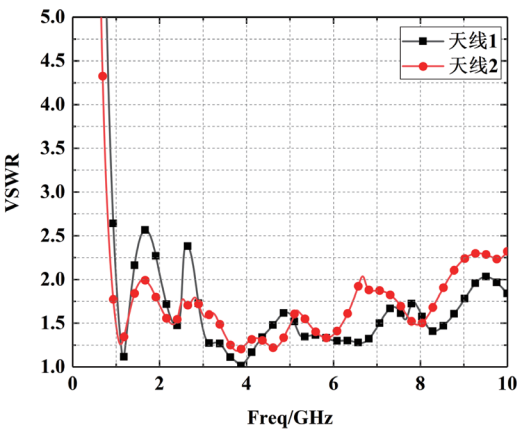


图4 天线1与天线2仿真VSWR结果

针对这一问题, 对天线加载了匹配带条结构, 其结构如图3中天线2。其窄边等宽于极板底部窄边, 宽边等宽于矩形反射板宽度, 以指数函数形式渐变, 参数为:

$$L_2(z) = a_2 \cdot e^{b_2 z} \tag{4}$$

$$W_2(z) = c_2 \cdot e^{d_2 z} \tag{5}$$

式中: $L_2(z)$ 为两侧匹配带条之间的间距, $W_2(z)$ 为匹配带条宽度。

加载匹配带条结构之后, 可以通过改变该结构的尺寸、形状和位置, 起到控制磁能的效果, 从而改善天线特性阻抗改变导致的阻抗匹配问题。从图4仿真VSWR数据可以看出, 低频带宽得到改善, 从2.83 GHz降低至0.9 GHz, 电尺寸得以降低, 完成天线小型化设计的初步目标。

为了在不增加天线尺寸前提下, 进一步拓宽天线低端带宽, 实现TEM喇叭天线的小型化设计, 对TEM喇叭天线极板与矩形反射板之间进行切割, 并将末端平板进行垂直加载, 结构如图3中天线3所示。加载的平板可以视为一个电感, 其与矩形反射板之间的间隙可以等效为电容, 通过调整平板的尺寸以及其与反射板之间的距离, 调节二者之间的耦合, 从而改善带宽。同时, 末端加载的平板还能起到引导低频段聚集于喇叭口径表面的能量, 减少反射以及充分利用天线空间的作用, 在维持天线整体物理尺寸不变的前提下, 极板的电尺寸长度得以增加, 这将有损于天线小型化的设计。在进行切割弯折之后, 在低频0.5 GHz处引入了新的谐振点, 如果能够将该谐振点移动至工作频段, 则能够进一步拓宽低频带宽, 等效实现天线的小型化设计。

为实现该目标, 对矩形反射板进行开槽处理, 通过该改动, 可以实现改变天线电流流动路径, 改善天线的阻抗匹配。与此同时, 在极板上方加载脊结构, 结构如图3天线4所示。TEM喇叭天线可以看作是矩形波导向两侧延展形成的, 加脊TEM喇叭天线也可以视为加脊矩形波导向两侧延展形成的^[14]。在相同尺寸条件下, 将矩形波导与加脊波导进行对比,

加脊波导的截止波长更大, 拥有更小的特性阻抗, 以及更宽的带宽。

从图 5 仿真的 VSWR 结果可以看出, 在进行开槽处理以及在极板上方加载脊结构, 经过参数优化, 最终天线实现 $0.72 \sim 8.86 \text{ GHz}$ ($\text{VSWR} < 2$) 的工作带宽, 电尺寸仅为 $0.26\lambda \times 0.26\lambda \times 0.16\lambda$ (λ 为天线工作频段低端波长)。

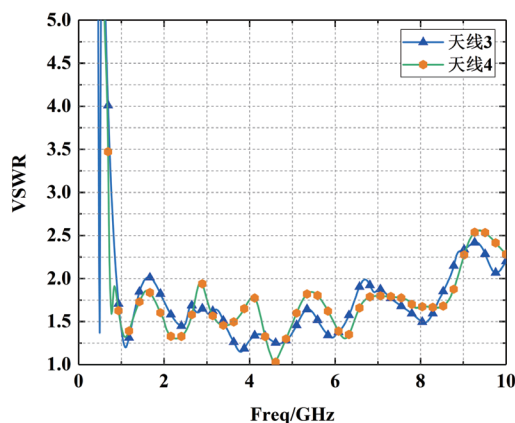


图 5 天线 3 与天线 4 仿真 VSWR 结果

2 加工验证

将前文所设计的双极化 TEM 喇叭天线进行加工和测试, 用以验证之前的理论分析与仿真结果。采用了 3D 打印的加工方式, 所使用的材质为树脂材料, 打印完成后在表面进行喷涂导电漆处理。天线实物加工图如图 6 所示。

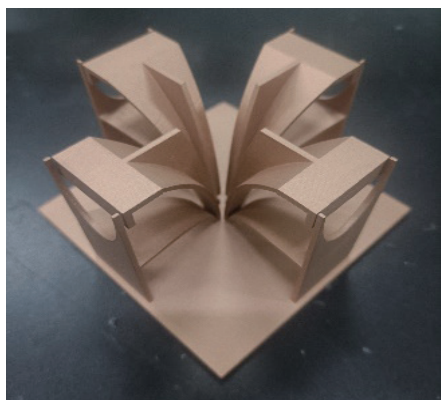


图 6 天线加工实物图

将天线实测数据与仿真结果进行对比, 对比结果如图 7 和图 8 所示。从图 7 和图 8 对比结果可以看出, 天线加工实测数据与此前仿真结果在整体上具有较高的吻合度, 该天线的驻波比在 $0.73 \sim 8.72 \text{ GHz}$ 的工作频带内均低于 2, 测试结果高频带宽与仿真结果相比略低一点, 可能是由于天线材质为树脂, 表面喷涂导电漆, 无法采用焊接的方式固定 SMA 接头, 只能采用导电胶与铜箔粘连, 导致天线在高频带宽略有降低。天线方向图的测试结果与仿真数据具有较好的一致性。

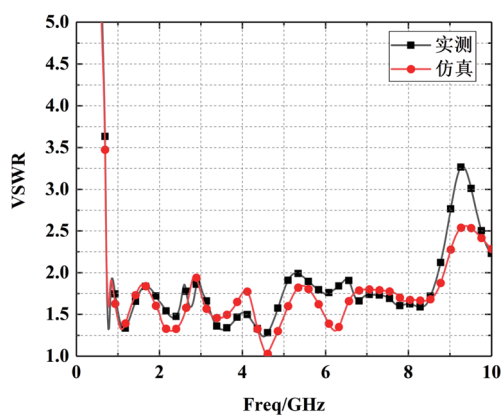
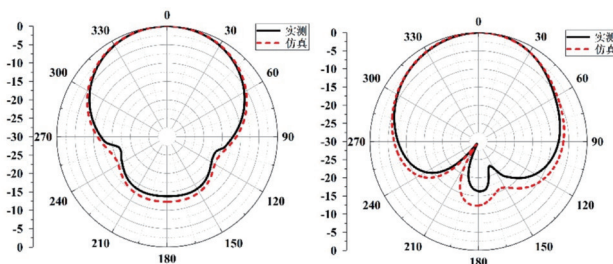
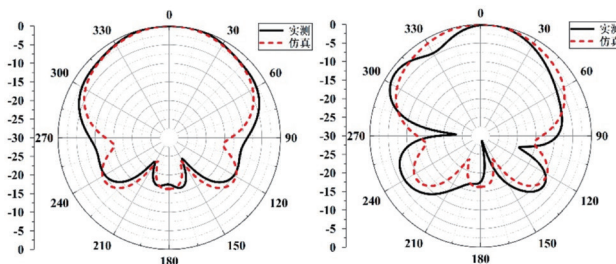


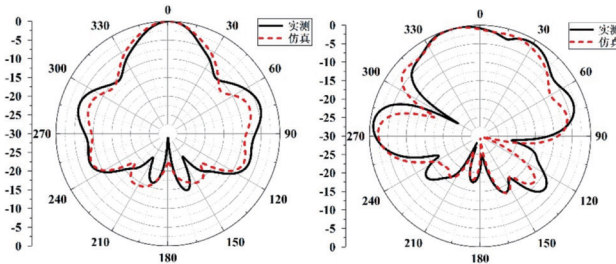
图 7 VSWR 结果对比



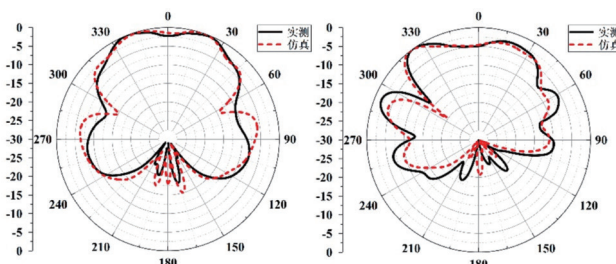
(a) 2 GHz



(b) 4 GHz



(c) 6 GHz



(d) 8 GHz

图 8 不同频点方向图数据对比图

(左为 E 面归一化方向图, 右为 H 面归一化方向图)

3 结论

本文从低频补偿原理开始,设计出加载垂直金属反射板的双极化 TEM 喇叭天线原型。为了改善由于构建双极化天线,改变喇叭极板尺寸和位置所导致的低频驻波恶化的问题,采取了加载匹配带条、极板末端加载、极板上加载脊结构与开槽处理等方式,有效拓宽了天线低频带宽。最终,所设计的双极化 TEM 喇叭天线经加工后实测,可以在 $0.72 \sim 8.72$ GHz 的工作频段内, VSWR 小于 2, 尺寸为 $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}$ (电尺寸为 $0.26\lambda \times 0.26\lambda \times 0.16\lambda$, λ 为天线工作频段低端波长),并且有着较好的定向辐射性能,成功地实现了双极化 TEM 喇叭天线的小型化设计。

参考文献:

- [1] WANG B, WEI Y. Design of a small and compact monopole ultra wideband antenna[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway:IEEE, 2018: 1-3.
- [2] DOUZHANG D, SHANG F, PINGPEI A. A small dual stacked log periodic dipole array antenna as a feed for reflector antennas[C]//2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [3] ZHANG K, TAN R, JIANG Z H, et al. A compact ultrawideband dual-polarized Vivaldi antenna with radar cross section reduction[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2022, 21(7): 1323-1327.
- [4] ROJHANI N, PIERACCINI M, GOLAZARI S S. A compact TEM horn antenna for ground penetrating radar[C]//2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). Piscataway:IEEE, 2018: 1641-1645.
- [5] JIANG J, PAN S, WANG S, et al. Miniaturization design of VHF broadband directional radiation TEM horn antenna[C]//2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT).Piscataway: IEEE, 2020: 1-3.
- [6] YADAV S V, CHITTORA A. A compact high power UWB TEM horn antenna[C]//2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). Piscataway:IEEE, 2020: 1-3.
- [7] DELMOTE P, BIETH F. Additional lens for TEM horn antenna and transient high-power application: Design and characterization in time domain[C]//2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway:IEEE, 2021: 1-5.
- [8] YAN X, ZHANG A. A miniaturized UWB TEM horn antenna design[C]//2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). Piscataway:IEEE, 2023: 1-3.
- [9] 王长华, 王秩雄, 宋爱民, 等. 超宽带 TEM 喇叭天线的研究[J]. 通信技术, 2010, 43(4): 34-36.
- [10] R. 路德维格 (美), 王子宇, 张肇仪, 等. 射频电路设计理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [11] MALHERBE J. Design of ultra-wideband TEM horns[C]//Microwave Conference, 2007. APMC 2007. Asia-Pacific. Piscataway:IEEE, 2007: 1-4.
- [12] MALHERBE J A G, BARNES N. TEM horn antenna with an elliptic profile[J]. Microwave and optical technology letters, 2007, 49(7): 1548-1551.
- [13] ANDREEV Y A, KOSHELEV V I, PLISKOV V V. Combined antennas for radiating ultrawideband short pulses[C]//2008 European Radar Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 208-211.
- [14] 索莹. 喇叭天线超宽带技术的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2007.

【作者简介】

赵子鑫(1999—), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 研究方向: 天线设计。

陈星(1970—), 男, 四川巴中人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 天线设计、电磁场与微波技术、并行计算等。

(收稿日期: 2024-01-15)