

文章编号: 2095-4980(2016)01-0068-04

TEM 喇叭天线设计与实验

谢 平^{a,b}, 廖 勇^{a,b}, 徐 刚^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.复杂电磁环境实验室; b.应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 设计了一种带有机玻璃天线罩的地平板结构横电磁波(TEM)喇叭接收天线, 通过对馈入结构和辐射特性的理论分析初步确定关键结构尺寸, 然后利用 CST 建立天线真实模型, 完成相关结构参数的仿真优化, 实现了快脉冲的较小馈入反射, 时频特性良好。最后的天线测试结果表明, 该 TEM 喇叭天线输入阻抗 $56\ \Omega$, 有效高度 $0.024\ \text{m}$, 传递函数在 $3\ \text{GHz}$ 以内保持稳定, 具备较好的时域保真度和馈入反射特性, 适于作为超宽带接收天线。

关键词: 横电磁波(TEM)喇叭; 超宽带天线; 优化设计; 馈入反射

中图分类号: TN786

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0068

Design and experiment of TEM horn

XIE Ping^{a,b}, LIAO Yong^{a,b}, XU Gang^{a,b}

(a.Complicated Electromagnetic Environment Laboratory; b.Research Center of Laser Fusion, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A Transverse Electro Magnetic wave(TEM) horn is designed with floor boarding structure and plexiglass antenna cap. The key physical dimension is preliminarily determined by the analysis on antenna radiation characteristic and feed-in structure. The objective antenna model is established by CST. Relevant structural parameters of TEM horn are optimized by simulation. It is realized that reflection of short pulse is small at antenna feed-in, and the TEM horn has preferable time-domain and frequency-domain characteristics. The test results indicate that, the input impedance of TEM horn is $56\ \Omega$, the effective height is $0.024\ \text{m}$, the transfer function keeps stable within $3\ \text{GHz}$, and the TEM horn is fit for ultra-wideband reception antenna.

Key words: TEM horn; ultra-wideband antenna; optimized design; feed-in reflection

TEM 喇叭天线是 TEM 传输线上下两极板张开形成的一种超宽带天线, 其张角、长度及宽度的适当选择可使天线的特性阻抗为渐变, 从而实现很小的端口反射。由于这种天线的结构形状与喇叭相似, 且满足 TEM 波传输条件, 所以这种形式的天线被称为 TEM 喇叭天线^[1-3]。它能够传输纳秒级瞬态脉冲宽频信号, 被广泛应用于多种领域, 如高功率微波武器、相控阵雷达以及合成孔径雷达等, 具有结构简单、频带较宽、方向性较好和效率较高等优点, 是一种无色散时域保真度好, 较为常用的超宽带辐射和接收天线^[4-7]。Farr E G 和 Baum C E 曾对这种天线有过较为详细的理论分析^[8-11]。常规的 TEM 喇叭以全张角形式为主, 根据镜像理论, 本文设计了一种带有机玻璃天线罩的地平板结构 TEM 喇叭接收天线, 结构更为小巧紧凑, 同时提高了环境适应性, 优化后的天线具有较好的馈入反射以及时频特性, 最后的测试结果表明, 该 TEM 喇叭适于作为超宽带接收天线。

1 TEM 喇叭设计

1.1 理论分析

作为接收天线, 要满足方向性、带宽、较小的尺寸和使用方便等特点。TEM 喇叭天线具有这样的特点, 它在较宽的频带内具有恒定的特性阻抗, 能方便地将平面波转换成同轴结构 TEM 模。在设计 TEM 喇叭接收天线时, 要求在所要求的带宽内有较小的反射, 同时要求接收天线具有稳定的方向性。

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-02-04

基金项目: 中物院复杂电磁环境科学与技术重点实验室探索基金资助项目(2015E-03-2)

标准 TEM 喇叭天线由 2 块三角形平板组成, 如图 1 所示。三角平板之间的张角为 β , 天线的特征阻抗为 Z_c 。考虑到天线高频段辐射对口面相位一致性有一定的要求, 因此 TEM 喇叭的张角一般要求是小角度。对于小张角的 TEM 喇叭天线, 其板上的电流分布主要由沿 x 方向的纵向电流组成, 当喇叭口径高度 $h \ll \lambda / (2\pi)$ 时, 小张角的 TEM 喇叭天线可看成终端开路的传输线^[12]。将其分成无穷多个小段。每一小段传输线均为一个电偶极子和一个磁偶极子的组合, 在激励信号作用下产生电磁辐射, 通过对电、磁偶极子辐射场的积分给出了 TEM 喇叭天线在主轴上的辐射场:

$$E(r, t) = \frac{h_a}{2\pi r c f_g} \left\{ \frac{dV(t)}{dt} - \frac{c}{2l} \left[V(t) - V(t - \frac{2l}{c}) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: c 为光速; r 为主轴上测试距离; $V(t)$ 为天线激励信号; f_g 是结构阻抗因子, 为 TEM 喇叭特性阻抗 Z_c 与自由空间波阻抗 Z_0 (约 377Ω) 之比; $h_a = h/2$ 为天线的有效高度; l 为喇叭沿轴线方向的长度。

小张角的 TEM 喇叭天线的特性阻抗可近似微带线, TEM 喇叭天线的特性阻抗计算公式为^[11]:

$$Z_c = 120\pi / [w/h + 1.393 + 0.67 \ln(w/h + 1.444)] \quad (2)$$

式中: w 为 TEM 喇叭口径宽度; h 为 TEM 喇叭口径高度。

通过对 TEM 喇叭天线远场辐射方程的分析可知, 要增加辐射场频谱带宽可延长 TEM 喇叭天线的长度; 而要增大高频截止频率, 可减小张角, 降低口径高度。

1.2 理论设计

根据前面的理论分析可知, 要设计作为接收天线的 TEM 喇叭天线, TEM 喇叭极板的长度和喇叭口径高度是关键参数。要得到较高带宽、失真度较小的 TEM 喇叭接收天线, 要求极板长度较长, 喇叭口径高度较小, 以降低低频截止频率, 增加高频截止频率, 并缩短天线对脉冲的冲击响应时间。在设计 TEM 喇叭接收天线时还要求天线的特性阻抗与馈入同轴电缆的特性阻抗匹配以减小馈入反射, 这就对 TEM 喇叭极板宽度和馈入结构提出了技术要求。在设计接收天线时, 还要求天线尺寸尽量小, 并且便于安装使用。

为了便于工程实现, 所设计的天线为带地平板的 TEM 喇叭天线, 如图 2 所示。50 Ω 同轴线内导体与喇叭三角极板顶点相连, 同轴线外导体与地平板连接, 同轴连接器选用 N 型连接器。此外, 设计一个有机玻璃天线罩, 安装于地平板之上, 连接处用胶条密封, 可有效起到防水、防尘等作用。

馈入结构是影响天线性能的关键因素之一。馈线绝缘介质为聚四氟乙烯, 同轴结构内芯高出地平板直接与 TEM 喇叭正极板相连接, 内芯高度尽量低以防止高次模产生。喇叭馈点处结构可近似为平板传输线, 平板结构中除传输 TEM 模外, 还可能存在 TE 模和 TM 模, 平板结构的 TE 高次模中最低模为 TE_{10} 模, 其截止波长仅与馈点处平板结构的 w 有关:

$$(\lambda_c)_{TE_{10}} = 2w\sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

考虑到边缘效应, 对宽度 W 引入一个修正量:

$$(\lambda_c)_{TE_{10}} = 2(W + 0.4h)\sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

馈点处平板结构的 TM 高次模的最低模为 TM_{01} 模, 其截止波长仅取决于平板结构的高度 h :

$$(\lambda_c)_{TM_{01}} = 2h\sqrt{\epsilon_r} \quad (5)$$

对于平板结构的表面波形的高次模是无法抑制的, 其截止频率为零。

根据式(3)和式(4), 对于最高频率 5 GHz 的脉冲信号, 馈点处平板结构的宽和高应满足: 高 $h < 30 \text{ mm}$, 宽 $w < 18 \text{ mm}$ 。

1.3 优化仿真

建立天线模型, 如图 3 所示, 通过 CST 进行仿真计算, 优化天线结构参数。由于超宽带天线主要处理的信号形式为瞬态脉冲, 因此需要考虑天线结构对于快脉冲的响应, 设置一个快的上升沿, 优化天线结构反射, 实现快脉冲在天线内部的良好传播, 如图 4 所示, 快脉冲在馈点处引起的时域反射很小, 说明馈入结构设计较为合理。

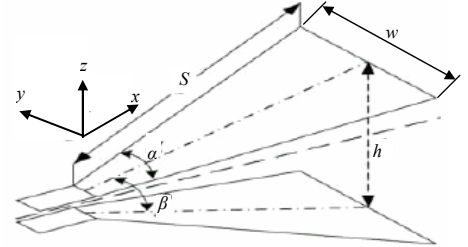


Fig.1 Configuration of TEM horn
图 1 TEM 喇叭天线结构图

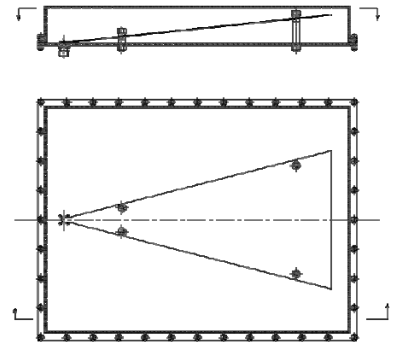


Fig.2 Structural pattern of TEM horn
图 2 TEM 喇叭天线机械结构

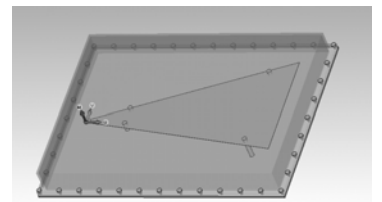


Fig.3 TEM horn calculation model
图 3 TEM 喇叭计算模型

图 5 和图 6 分别是对 TEM 喇叭工程模型进行计算,得到的天线时域、频域响应特性曲线,可以看出:所设计的超宽带接收天线时域特性良好,波形拖尾很短且幅值很小,频域响应在 3 GHz 以内的变化小于 3 dB,总体保持稳定。

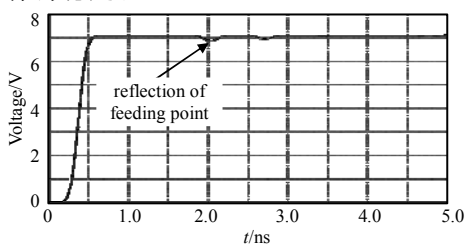


Fig.4 Fast pulse transmission reflection through antenna
图 4 快脉冲沿天线传播反射

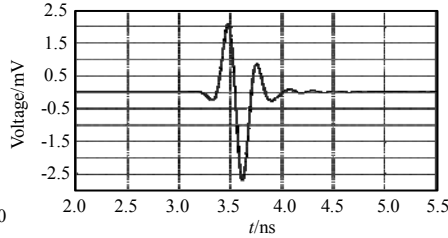


Fig.5 Time domain character of TEM horn
图 5 TEM 喇叭时域特性

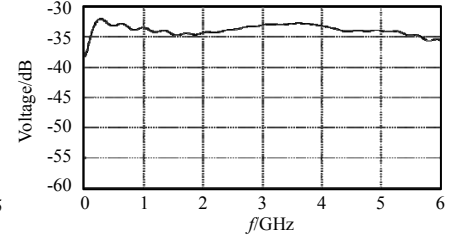


Fig.6 Frequency domain character of TEM horn
图 6 TEM 喇叭频域特性

2 实验研究

设计加工的 TEM 喇叭如图 7 所示,对其开展接收特性测试。首先通过网络分析仪对其驻波系数进行标定,结果如图 8 所示,可见在 600 MHz~5 GHz 频率范围内,天线驻波小于 3,这也说明该天线主要用作高频辐射。

接下来进行辐射场收发测试,选择超宽带信号源的输出脉宽为 0.5 ns,直接通过电缆将信号馈入 TEM 喇叭天线,在距离发射天线口面 3 m 处的轴线上设置同样一个 TEM 喇叭接收天线,实验布局如图 9 所示。

辐射场波形可以近似为馈入脉冲的微分形式,因此通过比较 TEM 喇叭接收脉冲与馈入脉冲微分后的波形一致性,可以考察接收天线的时域特性。结果如图 10 所示,可以看到理论辐射场与实际接收辐射场,幅度以及脉宽都很吻合,曲线形式基本一致,从而验证了理论辐射计算的有效性。



Fig.7 Substance of TEM horn
图 7 TEM 喇叭实物

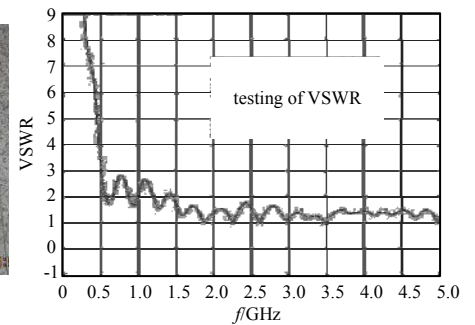


Fig.8 VSWR of TEM horn
图 8 TEM 喇叭驻波

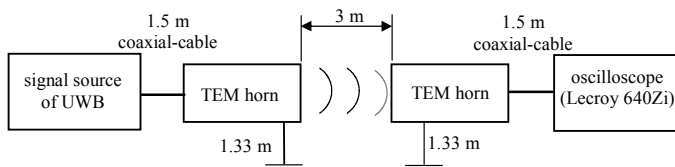


Fig.9 Radiation experiment layout of TEM horn
图 9 TEM 喇叭频域特性

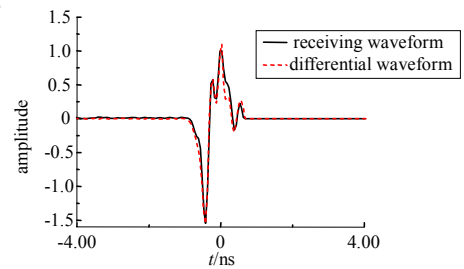


Fig.10 Comparison of radiation field and received pulse
图 10 辐射场与接收脉冲波形对比

超宽谱接收天线的一个重要特征参数为有效高度,需要先标定出天线特性阻抗。由超宽带信号源发出 50 ns 脉宽的脉冲馈入天线,馈入之后,通过计算反射波形和源信号波形幅度的比值,即可得到反射系数 R , $R = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1)$,其中 Z_1 是馈线阻抗, Z_2 是待求的输入阻抗。分别对 TEM 喇叭馈入点和口径极板末端短路得到如图 11 所示的天线馈入反射波形,得到反射系数 $R = (0.716 - 0.677)/0.677 = 0.058$,馈线的输出阻抗为 50 Ω ,由此可看出在馈入点后传输阻抗即天线输入阻抗变为 56 Ω 。

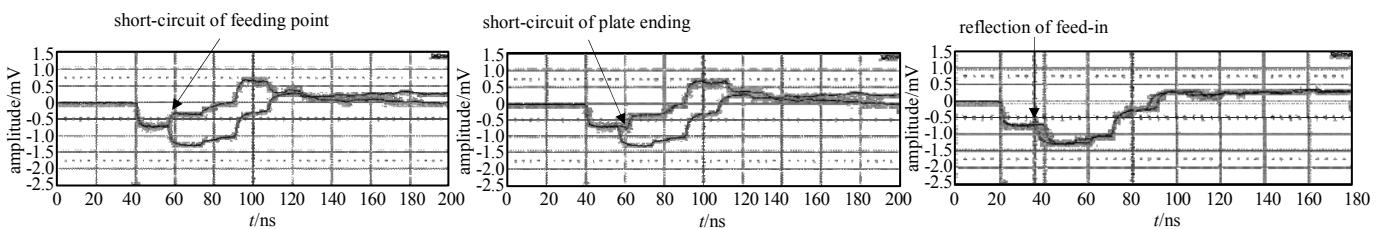


Fig.11 Feed-in reflection of TEM horn
图 11 天线馈入反射

天线特性阻抗得到后,可以得到 TEM 喇叭接收天线传递函数频域曲线,如图 12 所示。可见其频域响应在 3 GHz 以内较为稳定,约为 0.024 m。因此 TEM 喇叭的实测有效高度为 $h_{\text{eff}} = 0.024 \text{ m}$,略大于天线口径高度的一半,与理论结果较为一致。

3 结论

完成一种带地平板的 TEM 喇叭天线的设计,通过优化,实现了快脉冲在馈点及口径面的较小反射,时域特性良好,频域响应总体保持稳定。实验结果表明,TEM 喇叭具备了较好的超宽谱接收特性,时域保真度良好,馈入反射极小。通过标定得到天线输入阻抗为 56Ω ,传递函数在 3 GHz 以内较为稳定,有效高度为 0.024 m,与理论结果较为一致。

参考文献:

- [1] AMINEH R K,RAVAN M,TREHAN A,et al. Near-field microwave imaging based on aperture raster scanning with TEM horn antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011,59(3):928-940.
- [2] LI J,ZHU X Y,WANG M X,et al. A new design of TEM horn antennas for pulse radiation[C]// IEEE 1997 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. Hong Kong:IEEE, 1997:629-631.
- [3] BASSAM S,RASHED-MOHASSEL J. A Chebyshev tapered TEM horn antenna[J]. PIRES Online, 2006,2(6):706-709.
- [4] 朱四桃,易超龙,陈昌华,等. TEM 喇叭天线脉冲辐射特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(7):1755-1758. (ZHU Sitao,YI Chaolong,CHEN Changhua,et al. Radiation characteristics of TEM horn antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(7):1755-1758.)
- [5] 燕有杰,刘小龙,蒋廷勇,等. 加脊 TEM 喇叭初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(9):2130-2134. (YAN Youjie,LIU Xiaolong,JIANG Tingyong,et al. Preliminary research on ridged TEM horn[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9):2130-2134.)
- [6] 朱四桃,易超龙,陈昌华,等. TEM 喇叭天线辐射机理分析和优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(9):2368-2372. (ZHU Sitao,YI Chaolong,CHEN Changhua,et al. Radiation mechanism analysis and optimized design of TEM horn antennas[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(9):2368-2372.)
- [7] 廖勇,谢平,徐刚,等. 高功率超宽谱双反射面天线优化设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(5):1221-1225. (LIAO Yong,XIE Ping,XU Gang,et al. Optimization and experiment of HPM UWB dual-reflector antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(5):1221-1225.)
- [8] PRATNER W D,BAUM C E,AGEE F G,et al. Ultra-wideband sources and antennas:present technology, future challenges[M]// Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 3. New York:Plenum Press, 1997:381-390.
- [9] BIGELOW W S,FARR E G,LAWRY D I. Design and characterization of a lens TEM horn[G]// Sensor and Simulation Notes. IEEE, 2004:490.
- [10] FARR E G,BAUM C E. A simple model of small-angle TEM horns[G]// Sensor and Simulation Notes. IEEE, 1980:340.
- [11] FARR E G. Optimization of the feed impedance of impulse radiation antennas. Part II: TEM horns and lens IRA[G]// Sensor and Simulation Notes. IEEE, 1995:384.
- [12] POZER D M. 微波工程[M]. 张肇仪,周乐柱,吴德明,译. 北京:电子工业出版社, 2008:124. (POZER D M. Microwave Engineering[M]. Translated by ZHANG Zhaoyi,ZHOU Lezhu,WU Deming. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008:124.)

作者简介:



谢 平(1980-),男,四川省绵阳市人,学士,工程师,主要研究方向为超宽带辐射技术.email:269094848@qq.com.

廖 勇(1969-),男,湖南省宁远市人,博士,副研究员,主要研究方向为高功率微波传输、发射技术.

徐 刚(1984-),男,云南省建水市人,博士,副研究员,主要研究方向为高功率微波传输与控制技术.

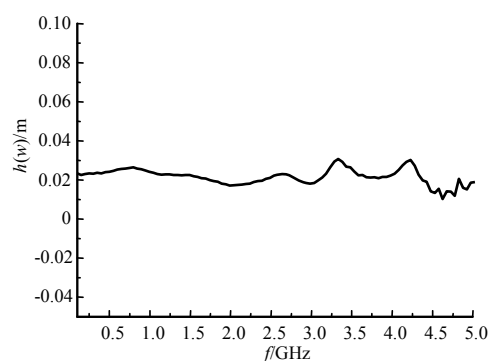


Fig.12 Frequency transfer curve of TEM horn
图 12 TEM 喇叭天线传递函数频域曲线