

基于双锥结构的小型时域脉冲天线设计

汪家兴

贵州航天计量测试技术研究所, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年11月6日; 录用日期: 2023年12月6日; 发布日期: 2023年12月15日

摘要

超宽带时域天线作为实现超宽带无线电系统和高功率微波系统脉冲辐射的终端器件, 直接影响了整个系统性能的好坏。不同于常规的载波信号通信天线, 时域脉冲天线必须具备短脉冲波辐射能力和良好的波形保真性。为此, 本文设计了一种小型化、加载介质套筒的双锥时域脉冲辐射天线, 其工作带宽覆盖1.7~40 GHz。相对于传统的双锥天线, 扩展了工作带宽并增强了结构稳固性。介绍了双锥天线的基本原理, 采用电磁分析软件CST Microwave Studio对天线结构进行了建模分析并加工了实物进行测试。仿真结果和测试结果表明, 天线在频带范围内驻波比小于2.5, H面频域方向图和时域方向图均有良好全向性, 短脉冲信号波形保真度在E面20°~160°范围内大于90%。

关键词

时域天线, 双锥天线, 全向天线, 脉冲辐射, 超宽带

Designing of a Miniature Time Domain Pulse Antenna Based on the Biconical Structure

Jiaxing Wang

Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 6th, 2023; accepted: Dec. 6th, 2023; published: Dec. 15th, 2023

Abstract

Ultra-wideband time domain antennas as the terminal device to realize the ultra-wideband radio system and high-power microwave system pulse radiation, which directly affect the performance of the whole system. Different from the conventional carrier signal communication antennas, the time domain pulse antennas must have short pulse wave radiation capability and good waveform fidelity. Thus, this paper introduces a miniaturized, dielectric sleeve-loaded biconical time-domain pulse radiation antenna with an operating bandwidth covering 1.7~40 GHz. Compared with the tradi-

tional biconical antennas, the operating bandwidth is extended and the structural stability is enhanced. The basic principle of biconical antenna is introduced, and the antenna structure is modeled and analyzed by the electromagnetic analysis software CST Microwave Studio. The antenna is fabricated and measured. The simulation results and measured results show that the VSWR of the antenna is less than 2.5 in the band range, the H-plane frequency domain pattern and the time domain pattern have good omnidirectionality, and the fidelity of the short pulse signal waveform is greater than 90% in the range of $20^{\circ}\sim 160^{\circ}$ in the E-plane.

Keywords

Time Domain Antenna, Biconical Antenna, Omnidirectional Antenna, Impulse Radiation, Ultra Wide-Band

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,无线通信的快速发展促使超宽带技术逐渐受到重视。通常,超宽带技术传输的信号是亚纳秒级的瞬态电磁脉冲波,经傅里叶变换可发现其具有极宽频谱的特点,具有强干扰性、高数据传输速率、大信号容量、功率谱密度低、时域分辨率高等优势,被广泛运用在军事、卫星、探测、成像等领域[1]。用于瞬态电磁脉冲发射和接收的载体即是超宽带的时域天线。不同于常见的频域天线,辐射脉冲波形的保真程度是衡量时域天线优劣的一个重要指标,这就对天线的频宽、多个频点的方向图以及增益稳定性提出更高的要求。常用的时域天线包括 Vivaldi 天线[2] [3]、TEM 喇叭天线[4] [5]、双锥天线[6]等。然而, Vivaldi 天线和 TEM 喇叭天线均不具备全向辐射与全向接收的特点,在实际使用过程中需要进行对准操作,在某些应用场景下带来了不便。双锥天线则是一种全向性良好、频带宽的时域天线,最初是由对称振子天线发展演变而来,在全向且均匀地接收、辐射信号方面极具优势,不需要像定向天线一样进行严格、繁琐的对准操作流程。到目前为止,双锥天线的研究还在持续进行,不仅在结构上对双锥天线进行了改良[7] [8],还出现了一些结合其他类型天线的组合型双锥天线,如文献[9]将双锥天线与对数周期天线结合用作车载通信天线,以及文献[10]在双锥天线的基础上加载磁偶极子以改善天线性能。

另一方面,人们对时域脉冲天线的认知还不够深入和全面,未形成完整、全面的研究理论[11],设计出宽带宽、方向图良好、信号保真度高且具有实用性的时域脉冲天线是亟需解决的问题。此外,近年来电子电路朝着集成化、小型化的方向发展,这也对小型化的时域天线提出了需求。对此,本文设计了一种小型化的双锥时域脉冲天线,并加载介质套筒以增加天线结构的稳定性和可靠性,具有优良的实用性。本文不仅对天线的频域特性进行了分析,还对时域特性也进行了仿真研究,表明该天线对电磁脉冲信号有良好的辐射能力。相对于传统时域天线,所设计的天线有尺寸小、重量轻、频带宽、信号保真度高的优点。

2. 双锥天线理论

双锥天线是一种非频变天线,即天线的阻抗特性和方向性能受频率影响不大。理想化的双锥天线模型是无限长的,输入阻抗仅由锥体张角决定。对于图 1 所示的理想双锥天线模型,设上下锥体的半锥角分别为 θ_a 、 θ_b ,其输入阻抗为:

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi} \ln \left[\left(\cot \frac{\theta_a}{2} \right) \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right) \right] \quad (1)$$

由上式易知对称无限长双锥天线的输入阻抗为:

$$Z_0 = \frac{\eta}{\pi} \ln \left(\cot \frac{\theta_a}{2} \right) \quad (2)$$

双锥天线辐射的电磁波是 TEM 球面波, 位于远场区一点 $P(r, \theta, \varphi)$ 处对应的电磁场分量为

$$E_\phi = \frac{V_0 e^{-jkr}}{r \sin \varphi \cdot \ln \left[\left(\cot \frac{\theta_a}{2} \right) \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right) \right]} \quad (3)$$

$$H_\theta = \frac{V_0 e^{-jkr}}{\eta r \sin \varphi \cdot \ln \left[\left(\cot \frac{\theta_a}{2} \right) \left(\cot \frac{\theta_b}{2} \right) \right]} \quad (4)$$

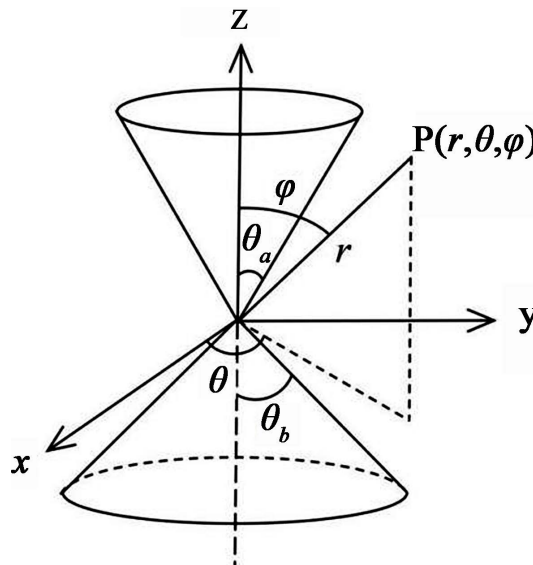


Figure 1. The theoretical model of biconical antenna
图 1. 双锥天线理论模型

以上各式中, η 代表空间波阻抗, $\eta = 120 \pi$ 。然而在实际情况中, 双锥天线不可能是无限长的理想模型, 这就会导致波在锥体终端引起反射。一种改善的办法是在天线体终端加载以改善阻抗带宽[5]。此外, 经过仿真研究也可以发现, 两个锥体之间的间距、锥体底部小圆截面的半径等均会对天线电性能产生较大影响, 这也是在天线设计过程中需要优化的变量。

3. 天线设计

设计的天线结构剖面和建立的三维结构如图 2 所示。该天线的主体辐射结构由上下两个金属锥体构成, 通过同轴结构的 50 欧姆传输线馈电。同轴结构外导体与下锥体连接, 内导体与上锥体连接, 两锥体间相距一小段距离 h 。为了增加结构的稳定性和可靠性, 设计了相应的介质套筒固定天线, 采用的介质材料为聚四氟乙烯。介质套筒分为三个部分, 中间部分为主体部分, 内部设置有安装两金属锥体的凹槽; 上、下部分分别为圆环形的顶盖和低盖, 实际加工过程中可设计相应的螺钉孔位, 利用塑料螺钉即可将

顶盖、底盖与套筒主体连接，从而固定整个天线结构。上述结构中需要优化设计的关键参数有圆锥体高度 H_1 、圆锥体半径 R_1 、锥体间的间距 h 、介质套筒的厚度参数 D 和 d 。通过调节以上参数才能得到满意的驻波、增益和全向性良好的天线结构。

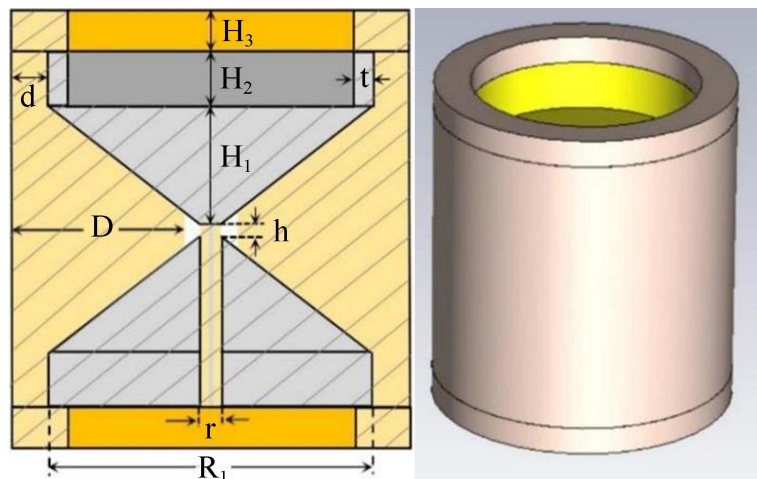


Figure 2. The designed antenna structure
图 2. 设计的天线结构

4. 仿真分析与测试

4.1. 频域仿真及实验分析

采用全波电磁仿真软件 CST microwave studio 对天线进行建模和仿真分析，经扫参优化后得到的各结构参数设计尺寸如表 1 所示。该天线立体尺寸为 $5.84 \text{ cm} \times 5.84 \text{ cm} \times 6.08 \text{ cm}$ ，相对传统双锥天线而言为小尺寸天线，经加工后的实物如图 3 所示。

Table 1. Parameters of antenna structure (unit: mm)

表 1. 天线结构参数(单位: mm)

H_1	H_2	H_3	h	D	d	t	R_1	r
15.8	9.0	5.0	1.2	26.2	5	2	48.4	2.94

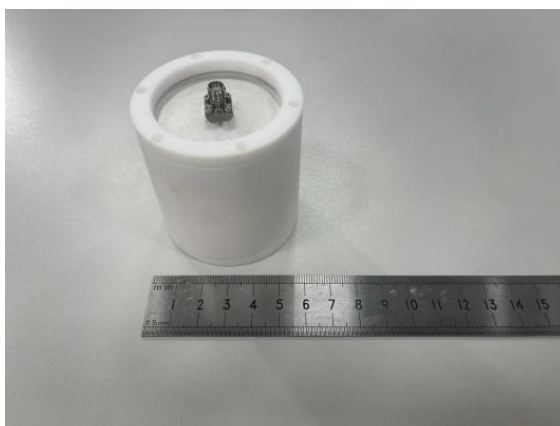


Figure 3. Fabricated antenna prototype
图 3. 天线实物图

图4是天线的驻波比仿真曲线,由于天线工作带宽很宽,所以仿真需分频分段进行。先仿真了1~28 GHz频段的驻波曲线,再仿真28~40 GHz的驻波曲线,最终的仿真结果及矢量网络分析仪测试结果均在图4中给出。可以看到,该天线在低频段内驻波良好,与仿真结果接近,而在高频段时驻波有恶化趋势,驻波实测值高于仿真值,这可能是由于在高频情况下所采用的天线转接头以及天线内部馈电通道介质损耗增加、天线加工误差等因素造成的。但是所设计的天线在1.7~40 GHz范围内驻波实测结果基本在2.5之内,可满足实际工程要求,比带宽达到23.5:1,具有优良超宽带特性。

图5给出了天线在典型频点2 GHz和18 GHz处的归一化频域方向图的仿真结果和暗室实测结果。观察可知,除了在高频频点的E面 $\varphi = 0^\circ$ 处附近外(即馈电端口处),仿真结果与实测结果基本吻合。在高频频点E面 $\varphi = 0^\circ$ 处附近的这种差异主要是由于接入了馈电转接头和馈电线缆对天线辐射场产生了影响所导致的。当频率较高时,E面方向图分裂出了较多的旁瓣,且波束宽度减小;但是H面方向图基本呈圆形,不圆度保持在3 dB以内,具备全向性。

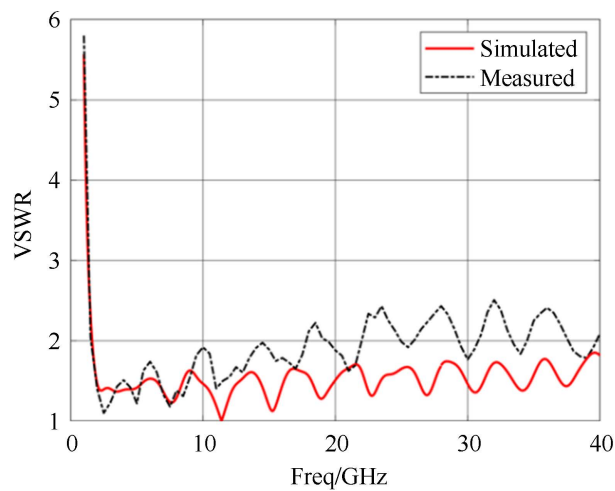
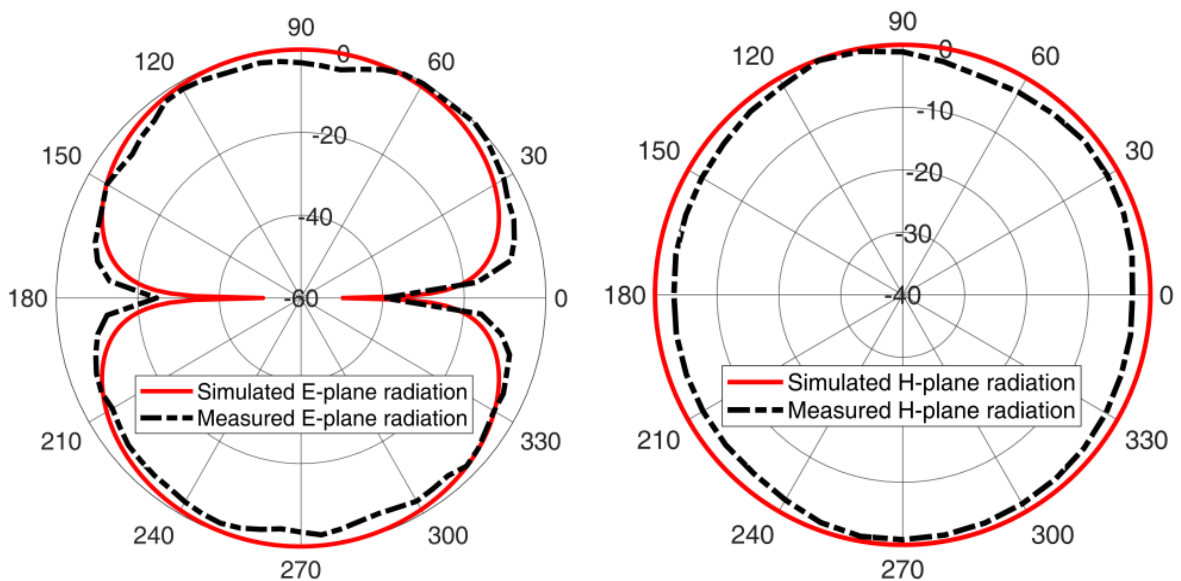


Figure 4. VSWR of antenna

图4. 天线驻波曲线



(a)

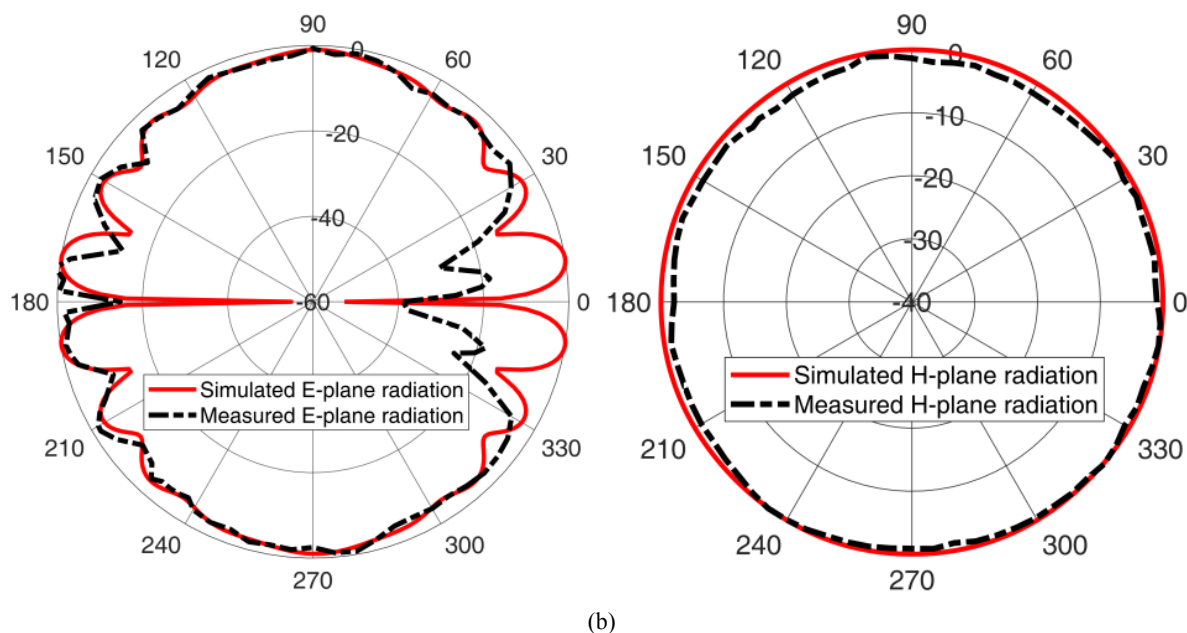


Figure 5. Frequency domain radiation pattern (a) 2.0 GHz; (b) 18 GHz

图 5. 频域辐射方向图 (a) 2.0 GHz; (b) 18 GHz

增益稳定是脉冲天线时域性质良好的必要条件，图 6 是所设计天线的增益实验测试结果。由测试结果可知，该天线在 2~40 GHz 的极宽频率范围内增益保持在 -2 dBi~3.5 dBi 内，具有增益稳定特性。

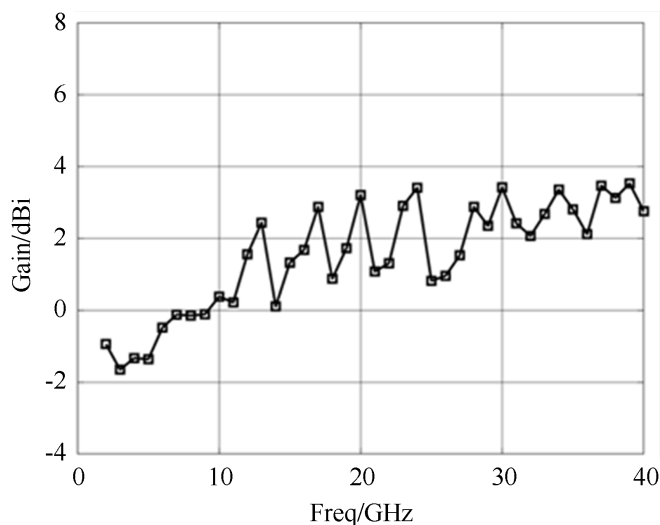


Figure 6. Measured result of the antenna gain

图 6. 天线增益测试结果

4.2. 时域仿真分析

为了判断天线时域性能的好坏，在 CST 软件中离天线 5 m 处的位置建立远场探针用于接收天线辐射的电磁脉冲信号，激励信号采用亚纳秒脉宽的高斯脉冲信号。天线的归一化激励脉冲波形和位于 H 面 0 度处 ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$) 的探针接收到的归一化脉冲波形如图 7 所示。可见探针接收到的脉冲波形与天线的激励脉冲波形基本保持一致，拖尾信号幅度小于主脉冲幅度的十分之一，具有良好的时域性质。

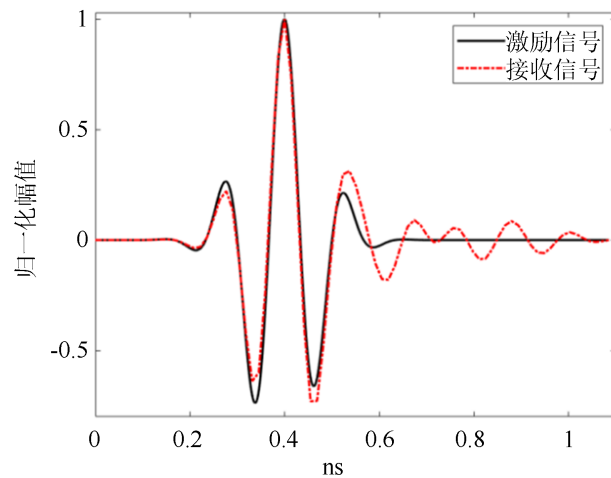


Figure 7. Comparison of the excitation waveform and the received waveform at the H-plane

图 7. 激励波形与 H 面处的接收波形对比

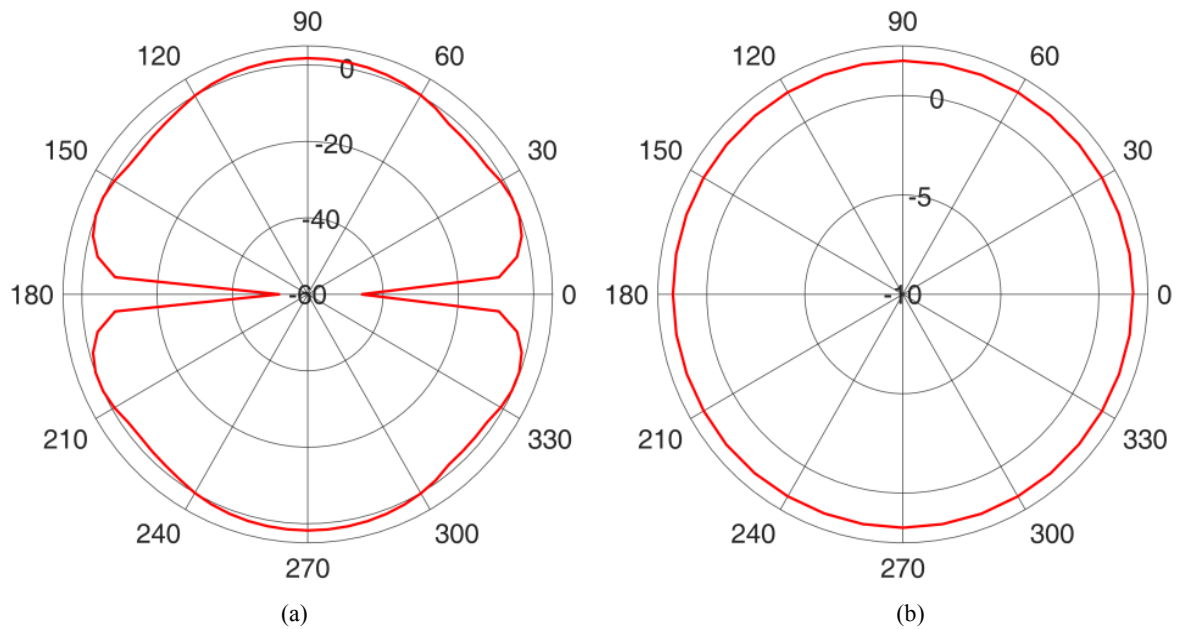


Figure 8. Time domain radiation pattern (a) H-plane; (b) E-plane

图 8. 时域辐射方向图(a) H-plane; (b) E-plane

图 8 给出了天线的 E 面和 H 面时域方向图，其 H 面具有十分良好的全向性。可以发现时域方向图与频点方向图有相似的特点，是频点方向图加权平均的结果。对于时域天线而言，波形保真系数是定量分析时域性能好坏的重要指标。设 $f_1(t)$ 表示天线馈电端口的激励脉冲信号， $f_2(t)$ 表示远场区接收到的脉冲信号，可将这两种波形信号的自相关系数和互相关系数做如下定义[12]：

$$\begin{cases} \rho_{11}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t-\tau) f_1(\tau) d\tau \\ \rho_{22}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(t-\tau) f_2(\tau) d\tau \\ \rho_{12}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (5)$$

$f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 间的波形保真系数 f 可定义为:

$$f = \max_t \left(\frac{|\rho_{12}(t)|}{\sqrt{\rho_{11}(0)\rho_{22}(0)}} \right) \quad (6)$$

E面不同位置处的天线波形保真系数(在 $\varphi = 90^\circ$ 时)在表2中给出,可见天线保真度在 70° 的偏移范围内均大于0.9。该天线除了在H面具有全向性、高保真度特点外,在E面的很大范围内也具有高保真性。由于实验室条件及设备的限制,本文并未进行天线时域辐射特性及波形保真度的实验测试,但是所进行的仿真分析也提供了良好依据和重要指导作用。

Table 2. E-plane waveform fidelity factor

表 2. E面波形保真系数

θ	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	5°
f	0.972	0.970	0.985	0.985	0.940	0.974	0.967	0.968	0.892	0.866

5. 总结

本文设计了一种基于双锥结构的小型化时域脉冲天线,通过电磁仿真分析和实验测试验证该天线比带宽高达23.5:1,频域方向图与时域方向图均表现出全向辐射特性。通过仿真计算发现该天线在E面 70° 偏移范围内具有良好时域性能,辐射短脉冲信号的波形保真度大于90%。因此,该天线在超宽带通信领域和电磁侦察探测领域具有工程实用性和较好的应用前景。

参考文献

- [1] 张靖,黎海涛,张平.超宽带无线通信技术及其发展[J].电信科学,2001,17(11):3-7.
- [2] Langley, J.D.S., Hallps, A. and Newham, P. (1996) Balanced Antipodal Vivaldi Antenna for Wide Bandwidth Phased Arrays. *IEE Proceedings—Microwaves, Antennas and Propagation*, **143**, 97-102. <https://doi.org/10.1049/ip-map:19960260>
- [3] 刘淑芳,薛源,李坤哲,等.高增益圆极化双槽 Vivaldi 天线[J].电波科学学报,2023,38(3):470-475.
- [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.
- [5] 李长勇,杨士中,张承畅.超宽带脉冲天线研究综述[J].电波科学学报,2008,23(5):1003-1008.
- [6] Subba, R.C., Madhavi, D.L. and Swati, L.B. (2021) Design and Analysis of Collinear Biconical Antenna Array. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, **69**, 147-153. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I3P223>
- [7] Zhekov, S.S., Tatomirescu, A. and Pedersen, G.F. (2016) Modified Biconical Antenna for Ultrawideband Application. 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, 10-15 April 2016, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481364>
- [8] 谢飞,邱景辉,宫守伟,等.非对称双锥天线辐射特性研究[J].电子测量技术,2009,32(6):31-34.
- [9] Kubwimana, J.L., Al-Jewad, B.Z. and Kirsch, N.J. (2017) A Bi-Conical Log-Periodic Antenna for Vehicular Communications. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Sydney, 4-7 June 2017, 1-2. <https://doi.org/10.1109/VTCspring.2017.8108556>
- [10] He, S., Chang, L. and Chen, Z. (2017) Design of a Compact Biconical Antenna Loaded with Magnetic Dipoles. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 840-843. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2608920>
- [11] 李庆,孙文玲,周恩.高功率超宽带时域脉冲天线研究与设计[C]//2021年全国天线年会论文集.宁波:中国电子学会天线分会,2021:521-524.
- [12] 王会华,程崇虎.两种宽缝超宽带天线的脉冲波形保真度比较[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2008,28(6):56-60.