

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.05.009

高倍频程火山烟雾超宽带平板天线

邱永峰^{1,2,3}, 路辉¹, 陈才荣¹, 郑祎², 李高升³

(1. 贵阳铝镁设计研究院有限公司, 贵阳 550081;

2. 湖南天桥嘉成智能科技有限公司, 株洲 412007;

3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要:在 $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 的尺寸限制下, 基于电阻加载技术设计了一种新颖的高倍频程火山烟雾超宽带平板天线。该天线采用同轴馈电, 通过扫参仿真优化低频匹配电路, 实现了从标准的传输线阻抗 ($50\ \Omega$) 到自由空间波阻抗 ($377\ \Omega$) 的完美渐变, 获得了最佳的低频拓展辐射性能。仿真结果表明天线在 $300\text{ kHz} \sim 300\text{ MHz}$ 的频带范围内驻波比 (VSWR) 小于 2.5 ($S_{11} < -7.2\text{ dB}$), 首次实现了 1000 倍频程超宽带辐射, 远场辐射方向图表明天线在前向实现了近似均匀场辐射。研制了实物天线, 并开展了实验测量, 实验结果表明天线在前向实现了近似均匀场辐射, 天线的波形保真特性良好, 天线背向辐射小于 5%。

关键词: 火山烟雾; 超宽带; 平板天线; 高倍频程

中图分类号: TN822; V423

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2022)05-0068-05

Ultra-wideband flat antenna of volcano smoke with high octave

QIU Yongfeng^{1,2,3}, LU Hui¹, CHEN Cairong¹, ZHENG Yi², LI Gaosheng³

(1. Guiyang Aluminum Magnesium Design & Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

2. Hunan Tianqiao Jiacheng Intelligent Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Under the size limit of $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, a novel ultra-wideband flat antenna of volcano smoke with high octave is presented in this paper based on the loaded resistance technology. The antenna is fed by coaxial line, and the perfect transition from the transmission line ($50\ \Omega$) to the free space ($377\ \Omega$) is realized through the optimization of low frequency matching circuit. The optimum low-frequency extended radiation performance is obtained with sweeping parameter simulation. The simulation results show that the voltage standing wave ratios (VSWR) of the antenna is less than 2.5 ($S_{11} < -7.2\text{ dB}$) in the frequency range from 300 kHz to 300 MHz, and the ultra-wideband of 1000 octave is realized for the first time. The experimental results show that the antenna achieves approximately uniform field radiation in the forward direction with high quality waveform fidelity, and the back radiation of the antenna is less than 5%.

Key words: volcano smoke; ultra-wideband; flat antenna; high octave

0 引言

超宽带 (ultra-wideband, UWB) 短脉冲由于其脉

冲窄、频谱含量丰富, 在冲激雷达、电子干扰、目标探测及目标识别等方面具有广阔的应用前景^[1-2]。

而超宽带天线是超宽带短脉冲应用的关键部件, 一

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-05-16

基金项目: 国家重点研发计划课题 (编号: 2021YFC2203503)

引用格式: 邱永峰, 路辉, 陈才荣, 等. 高倍频程火山烟雾超宽带平板天线[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5): 68-72. QIU Y F, LU H, CHEN C R, et al. Ultra-wideband flat antenna of volcano smoke with high octave[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5): 68-72.

直是天线领域的研究热点。目前,超宽带天线通常是在普通天线形式的基础上进行某种外推改造,并在耐高压方面做出相应的改进。一般而言,超宽带天线需满足工程上对天线阻抗及辐射性能的要求。蝶形天线^[3]、Vivaldi 天线^[4-5]、横电磁波(TEM)喇叭天线^[6-7]和渐变开槽天线^[8-9]等是几种典型的超宽带天线。火山烟雾天线是另一种性能优良的超宽带天线,常用于超宽带短脉冲发射。火山烟雾天线由张开同轴线的导体和火山烟雾形的内导体形成的,这种天线具有很宽的带宽,且在水平面具有全方向性辐射性能^[10-11]。根据天线理论,超宽带天线辐射频带的低频段与天线尺寸有关,尤其当需要实现几百 kHz 的低截止频率时,需要较大的天线尺寸。在空间电磁辐射领域,通常需要在极其有限的尺寸空间下,研制出某些特种测控天线以满足特殊的辐射用途^[12],而在强电磁脉冲辐射领域,当开展有关超宽谱电磁辐射实验时,需要在尺寸严格限制下,设计出高倍频程超宽带天线。基于本课题组超宽谱电磁脉冲辐射实验的实际需要,在外观尺寸要求不大于 $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 的范围内,设计出尽量覆盖 $300\text{ kHz} \sim 300\text{ MHz}$ 频率范围的超宽带天线。通过反复仿真模拟,Vivaldi 天线和横电磁波(TEM)喇叭天线等超宽带天线都不满足上述要求。进一步仿真验证,本课题组发现火山烟雾具备相应的潜力。因此,本论文设计了一种高倍频程火山烟雾超宽带平板天线。该天线采用同轴馈电,通过低频匹配电路设计,实现了从标准的传输线阻抗($50\ \Omega$)到自由空间波阻抗($377\ \Omega$)的完美渐变,仿真结果表明天线在 $300\text{ kHz} \sim 300\text{ MHz}$ 的频带范围内驻波比小于 2.5 ($S_{11} < -7.2\text{ dB}$),实现了 1000 倍频程超宽带,远场辐射方向图表明天线在前向实现了近似均匀场辐射。

1 天线结构与设计

基于超宽谱电磁脉冲辐射实验的实际需要,天线设计之初,需考虑以下因素:1) 天线要能响应脉宽为几十纳秒的高压脉冲信号;2) 频率尽量覆盖 $300\text{ kHz} \sim 300\text{ MHz}$;3) 在天线口面的前向形成近似均匀场;4) 天线的外观尺寸要求不大于 $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$;5) 天线背向辐射不高于 5%。基于此,本文设计了一种高倍频程火山烟雾超宽带平板天线,如图 1 所示,同轴线的导体张开成两个半圆型,而同轴线的内导体延展成火山烟雾形状。为了拓宽天线的带宽,基于电阻加载技术在 antennas 上增加了电

阻加载回路,火山烟雾平板天线外围共加载了 7 个电阻,天线两侧各 3 个,还有顶端 1 个。

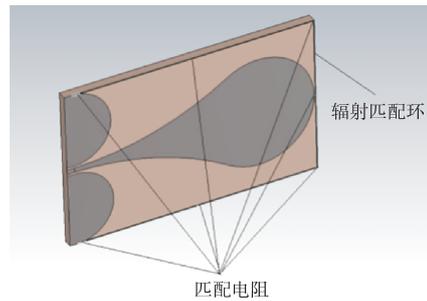


图 1 火山烟雾天线结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of volcanic smoke antenna

2 天线仿真与分析

为了改善火山烟雾平板天线的匹配特性,在共面波导的地板和辐射板之间添加匹配电阻和辐射匹配环,以改善低频辐射特性。通过仿真软件扫参对比分析,当顶端匹配电阻为 $2300\ \Omega$,其他六个匹配电阻为 $108\ \Omega$ 时,天线具有最佳的低频拓展辐射能力。表征火山烟雾天线反射特性的 VSWR 和 S_{11} 曲线分别如图 2 和图 3 所示,仿真结果显示,当介质板厚为 108 mm ,天线尺寸为 $3\text{ m} \times 1.74\text{ m}$ 时,全频段范围 $300\text{ kHz} \sim 300\text{ MHz}$,天线的回波损耗均低于 -7.2 dB ,驻波比低于 2.5。仿真结果表明天线在 $300\text{ kHz} \sim 300\text{ MHz}$ 的频带范围内实现了 1000 倍频程超宽带。

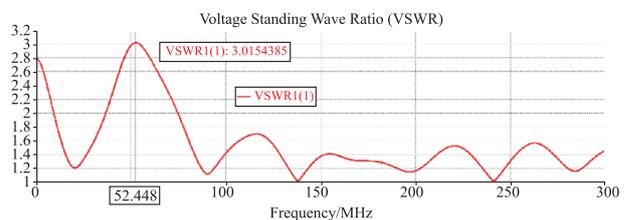


图 2 天线电压驻波比 (VSWR)

Fig. 2 VSWR of antenna

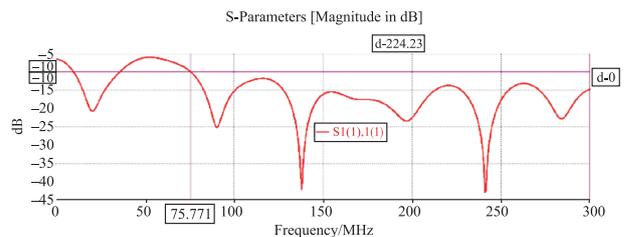


图 3 天线 S_{11} 参数

Fig. 3 S_{11} -parameters of antenna

鉴于天线需要覆盖的频率为超宽带,限于文章篇幅,仿真结果选取了三个频点作为典型代表。火

山烟雾天线在 300 kHz、150 MHz 和 300 MHz 的远场辐射方向图分别如图 4、图 5 和图 6 所示。根据仿真方向图可以看出,火山烟雾天线的最大增益为 9.07 dBi (300 MHz),最小增益为 -42.9 dBi(300 kHz),背向辐射分别为 -16.9 dB, -32.0 dB 和 -20.5 dB,均低于 -13 dB,实现了天线背向辐射不高于 5% 的要求。从天线辐射方向图还可以看出天线在前向实现了近似均匀场辐射。

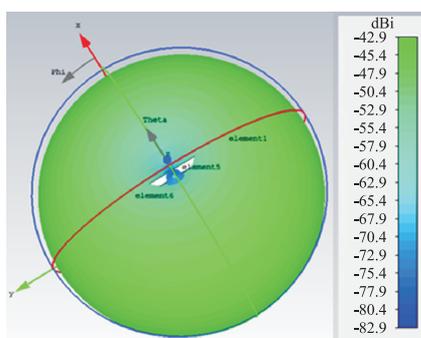


图 4 300 kHz 辐射方向图

Fig. 4 Radiation pattern of antenna at 300 kHz

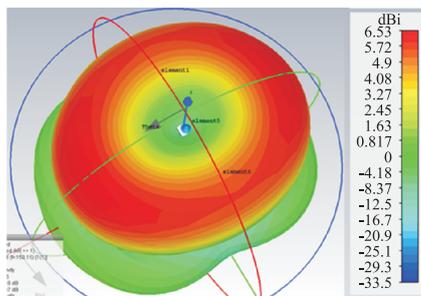


图 5 150 MHz 辐射方向图

Fig. 5 Radiation pattern of antenna at 150 MHz

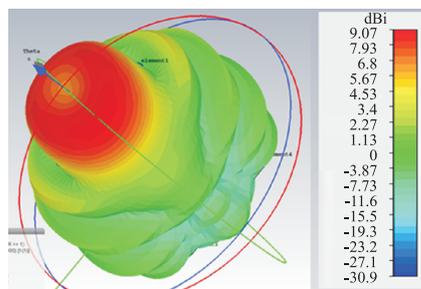


图 6 300 MHz 辐射方向图

Fig. 6 Radiation pattern of antenna at 300 MHz

3 实验研究

根据天线的辐射理论,当天线的可允许尺寸越大时,越容易实现低频段的辐射覆盖。鉴于实验室环境的限制和测量的实际需求,本文中研制的天线

不可能无限大。通过反复仿真分析和优化,最后确定了比较理想的天线尺寸。研制的火山烟雾天线实物如图 7 所示。天线长 3000 mm,宽 1500 mm,厚 130 mm。其中辐射铜片厚 1 mm,天线罩厚度 21 mm,介质基板 108 mm。

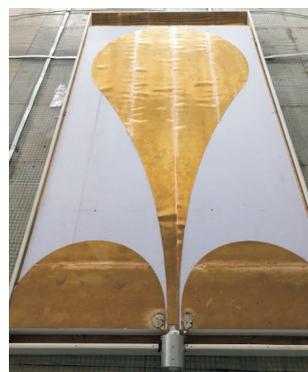


图 7 天线实物图

Fig. 7 Picture of antenna

如图 8 所示,为基于 12 kV 高压指数脉冲发生器的实验室测试布局图。测量系统主要包括脉冲发生器,电场传感器、电光转换通信模块、信号传输光纤、示波器、开关电源等。12 kV 高压指数脉冲发生器可产生上升沿 2 ns、幅值最高 12 kV 的指数脉冲。对于超宽谱电磁脉冲天线的辐射实验,核心的指标是天线的波形保真特性,也就是说,如果天线馈入的是脉冲信号,辐射出来的信号要尽量保持和输入信号一致,比如上升沿和半高宽。

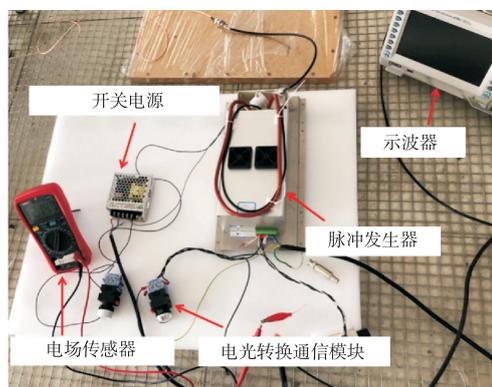


图 8 实验测试布局图

Fig. 8 Experimental test layout

在开展有关脉冲波形保真度实验测量时,为准确稳定获取测试空间的电场波形与参数。如图 9 所示,对火山烟雾天线最大的辐射方向开展了探针放置测试,将探针放置在天线辐射面的上方不同高度。对其法线方向距离表面的不同高度值/距离值位置进行测试。

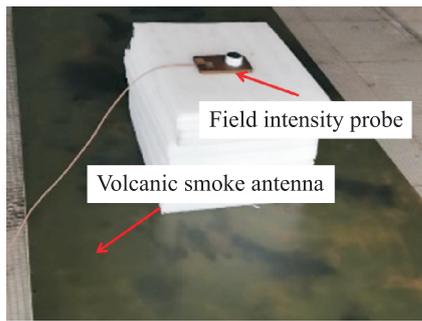


图 9 波形保真测量

Fig. 9 Waveform fidelity measurement

在纵向方向,火山烟雾天线波形保真度测试结果如表 1 至表 5 所列,根据纵向不同高度,分别列出测试结果,其中输入电压上升沿 2.4 ns,半高宽 20 ns。

表 1 天线输出电压波形数据(纵向 3 m)

Tab. 1 Output voltage waveform at a longitudinal distance of 3 m from the antenna

NO.	Coordinate /m	Output voltage/kV	The rise-time/ns	Half height width/ns
1	(-0.75, -1.5, 3)	3.50	1.6	27
2	(-0.75, 0, 3)	3.46	2.2	28
3	(-0.75, 1.5, 3)	3.60	2.2	27
4	(0, -1.5, 3)	3.25	2.1	20
5	(0, 0, 3)	3.16	2.5	25
6	(0, 1.5, 3)	3.57	2.1	26
7	(0.75, 1.5, 3)	3.52	2.2	28
8	(0.75, 0, 3)	3.72	2.2	27
9	(0.75, -1.5, 3)	3.52	2.1	20

表 2 天线输出电压波形数据(纵向 3.5 m)

Tab. 2 Output voltage waveform at a longitudinal distance of 3.5 m from the antenna

NO.	Coordinate /m	Output voltage/kV	The rise-time/ns	Half height width/ns
1	(-0.75, -1.5, 3.5)	3.30	2.1	29
2	(-0.75, 0, 3.5)	3.16	1.9	2
3	(-0.75, 1.5, 3.5)	3.56	1.9	25
4	(0, -1.5, 3.5)	3.01	2.3	20
5	(0, 0, 3.5)	3.24	1.8	21
6	(0, 1.5, 3.5)	3.36	2.1	25
7	(0.75, 1.5, 3.5)	3.50	1.9	24
8	(0.75, 0, 3.5)	3.55	1.9	26
9	(0.75, -1.5, 3.5)	3.10	2.3	20

表 3 天线输出电压波形数据(纵向 4 m)

Tab. 3 Output voltage waveform at a longitudinal distance of 4 m from the antenna

NO.	Coordinate /m	Output voltage/kV	The rise-time/ns	Half height width/ns
1	(-0.75, -1.5, 4)	3.25	1.6	29
2	(-0.75, 0, 4)	3.14	1.9	28
3	(-0.75, 1.5, 4)	3.35	2.2	20
4	(0, -1.5, 4)	3.28	1.9	23
5	(0, 0, 4)	3.15	1.6	22
6	(0, 1.5, 4)	3.35	2.1	27
7	(0.75, 1.5, 4)	3.04	2.3	26
8	(0.75, 0, 4)	3.15	2.2	20
9	(0.75, -1.5, 4)	2.98	1.9	24

表 4 天线输出电压波形数据(纵向 4.5 m)

Tab. 4 Output voltage waveform at a longitudinal distance of 4.5 m from the antenna

NO.	Coordinate /m	Output voltage/kV	The rise-time/ns	Half height width/ns
1	(-0.75, -1.5, 4.5)	3.16	2.3	20
2	(-0.75, 0, 4.5)	3.13	1.9	21
3	(-0.75, 1.5, 4.5)	3.10	2.4	22
4	(0, -1.5, 4.5)	3.20	2.5	25
5	(0, 0, 4.5)	3.10	2.1	25
6	(0, 1.5, 4.5)	3.15	2.3	30
7	(0.75, 1.5, 4.5)	3.10	2.5	21
8	(0.75, 0, 4.5)	3.20	2.5	28
9	(0.75, -1.5, 4.5)	3.30	2.4	25

表 5 天线输出电压波形数据(纵向 5 m)

Tab. 5 Output voltage waveform at a longitudinal distance of 5 m from the antenna

NO.	Coordinate /m	Output voltage/kV	The rise-time/ns	Half height width/ns
1	(-0.75, -1.5, 5)	2.92	2.5	23
2	(-0.75, 0, 5)	3.03	2.4	24
3	(-0.75, 1.5, 5)	2.95	2.4	26
4	(0, -1.5, 5)	2.88	2.3	29
5	(0, 0, 5)	3.21	2.1	21
6	(0, 1.5, 5)	3.39	2.5	24
7	(0.75, 1.5, 5)	2.84	1.6	23
8	(0.75, 0, 5)	3.05	1.4	22
9	(0.75, -1.5, 5)	2.91	2.3	20

测试结果表明,火山烟雾天线的性能满足天线设计之初确定的相关要求和指标,输出最大幅度值与最小幅度值比值在 3 dB 范围内;波形上升沿不大于 2.5 ns;波形半高宽不小于 20 ns。

同样,在水平方向,对天线的波形保真特性进行了实验测量,测试结果如表 6 所列。其中前向辐射最大幅值为 2.84 kV,后向辐射的最大幅值为 0.16 kV。根据公式计算,天线的背向辐射值 = $0.08/2.84 \times 100\% = 4.22\%$,满足项目要求的天线背向辐射小于 5% 的要求。

表 6 天线输出电压波形数据(水平 1 m)

Tab. 6 Output voltage waveform at a transverse distance of 1 m from the antenna

NO.	Coordinate/m	Output voltage/kV
1	(-0.75, -1.5, -1)	0.11
2	(-0.75, 0, -1)	0.13
3	(-0.75, 1.5, -1)	0.12
4	(0, -1.5, -1)	0.07
5	(0, 0, -1)	0.01
6	(0, 1.5, -1)	0.02
7	(0.75, 1.5, -1)	0.06
8	(0.75, 0, -1)	0.04
9	(0.75, -1.5, -1)	0.08

综合分析上述实验数据,测试结果表明研制的天线在要求的空间范围内可以形成均匀场。总之,火山烟雾天线能较好地实现时域波形保真输出,可用于高功率强电磁脉冲辐射环境模拟相关实验。

4 结论

基于严格的尺寸限制条件,本文利用电阻加载技术设计了一种高倍频程火山烟雾超宽带平板天线,同轴线的导体张开成两个半圆型,而同轴线的内导体延展成火山烟雾形状。仿真结果表明该天线在 300 kHz ~ 300 MHz 的频带范围内驻波比小于 2.5 ($S_{11} < -7.2$ dB),实现了 1000 倍频程超宽

带。仿真和实验测量都表明,天线远场辐射方向图满足背向辐射不高于 5% 的要求,同时天线在前向实现了近似均匀场辐射,时域波形保真特性良好。

参考文献:

- [1] 徐冉,林先其,樊勇. X 波段圆极化大功率整流天线研究[J]. 空间电子技术,2020,17(2):51-56.
- [2] 朱四桃,朱柏承,樊亚军. 超宽带电磁脉冲辐射场测量系统[J]. 强激光与粒子束,2006,18(2):261-264.
- [3] 张秋凝. 一种蝶形平面超宽带(UWB)天线的设计[J]. 电子设计工程,2012,20(9):77-79.
- [4] HERZI R, ZAIRI H, GHARSALLAH A. Reconfigurable Vivaldi antenna with improved gain for UWB applications [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(2):490-494.
- [5] 张更,王威,霍小宁,等. 超宽带低剖面双极化 Vivaldi 天线设计[J]. 空间电子技术,2017,14(1):57-60.
- [6] 易超龙,樊亚军,石磊,等. 切比雪夫渐变线 TEM 喇叭天线数值模拟[J]. 强激光与粒子束,2014,26(3):164-167.
- [7] 尹德,叶盛波,刘晋伟,等. 一种用于高速公路探地雷达的新型时域超宽带 TEM 喇叭天线[J]. 雷达学报,2017,6(6):611-618.
- [8] EBNABBASI K, BUSUIOC D, BIRKEN R, et al. Taper design of Vivaldi and co-planar tapered slot antenna (TSA) by Chebyshev transformer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(5):2252-2259.
- [9] 郝宏刚,李江,张婷,等. 基于基片集成波导馈电的 Ka 波段渐变缝隙天线设计[J]. 电子与信息学报,2020,42(3):582-588.
- [10] 李长勇,李俭兵,葛利嘉,等. 平面火山烟雾形天线的脉冲辐射特性[J]. 微波学报,2011,27(3):17-19+29.
- [11] GARDUÑO-NOLASCO E, SOSA-PEDROZA J, JARDÓN-AGUILAR H. A printed volcano smoke antenna for personal communication systems [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(11):2592-2595.
- [12] 康国栋,张楠,王崇,等. 面向大规模星座的多波束测控天线及应用[J]. 空间电子技术,2021,18(2):72-78.

作者简介:邱永峰(1985—),湖南娄底人,博士后,高级工程师,湖南天桥嘉成智能科技有限公司总工程师。中国电子学会会员,中国机械工程学会委员,湖南省人社厅“五个 100 工程”科技创新人才。主要研究领域为控制系统、无线射频天线和电磁兼容等。在国内外学术期刊及会议发表论文 10 余篇,已授权国家发明专利 8 项、实用新型专利 8 项。

E-mail: qiu19851219@126.com

通讯作者:李高升(1980—),山东昌乐人,博士,教授,博士生导师。IEEE Senior Member,中国电子学会天线分会委员,中国电工学会电磁兼容与天线专委会委员,中国兵工学会电磁/引信专委会委员,获省部级科技奖励 6 项,出版专著教材 5 部,发表论文 200 多篇,授权专利 30 多项。主要研究领域为天线理论与技术、电磁兼容及防护技术。

E-mail: gaosheng7070@vip.163.com