

技术专论

## 强电磁环境测试天线研制

姜传飞, 朱宜生

(中船重工第723研究所, 江苏 扬州 225001)

**摘要:** **目的** 研制一种可以测试强电场的天线,用于GJB 1389A中规定的系统级电磁环境测试,拟测的电场强度约在10 kV/m以上,频段在12~18 GHz范围内。**方法** 首先进行HFSS软件建模仿真,进行理论计算,优化设计后得到最优的天线参数,然后进行结构设计,得到最优设计图,最后按照设计图制作出实物来并进行实际测试分析。**结果** 测试得到的天线系数在53~70 dB/m之间。**结论** 所研制的天线基本满足要求。

**关键词:** 强电磁环境; 天线; 测试; HFSS

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.024

**中图分类号:** TJ01 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)03-0127-05

## Development of Test Antenna for Measuring in Strong Electromagnetic Environment

JIANG Chuan-fei, ZHU Yi-sheng

(The 723rd Research Institute of the CSIC, Yangzhou 225001, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To develop an antenna to measure the strong electric field for measuring in the electromagnetic environment with the electric field strength more than 10 kV/m and the frequency in the range of 12~18 GHz according to the GJB 1389. **Methods** Firstly, modeling and simulation was performed by HFSS software to conduct theoretical calculations, and then the structural design was performed to get the optimal design sketch. Finally, the antenna was produced according to the design and was tested and analyzed. **Results** The measured AF was 52~70 dB/m. **Conclusion** The developed antenna basically meets the requirements. **Conclusion** The developed antenna basically meets the requirements.

**KEY WORDS:** strong electromagnetic environment; antenna; test; HFSS

近几十年来,各种电子设备的应用越来越多,电磁环境也越来越复杂,特别是随着强电磁场、高功率电磁波的应用越来越广<sup>[1]</sup>,各种强电磁环境对电子设备的影响也越来越大。这就需要加强对强电磁场的研究,对强电磁环境进行精确测量的需求也越来越迫切<sup>[2]</sup>。目前

对强电磁环境的测量还存在很多问题,由于受到多种因素限制,国内外还没有一个标准的、统一的方法<sup>[1]</sup>。文中的主要内容就是研制一种可用于强电磁环境测试的天线。根据GJB 1389A的要求,频率范围初定为12~18 GHz,为进行强电磁场的现场测试提供技术手

收稿日期: 2015-03-09; 修订日期: 2015-04-05

Received: 2015-03-09; Revised: 2015-04-05

作者简介: 姜传飞(1988—),男,安徽人,硕士,工程师,主要研究方向为电磁兼容。

Biography: JIANG Chuan-fei(1988—), Male, from Anhui, Master, Engineer, Research focus: EMC.

段,最后以实测结果来确定工作范围。具体步骤为:首先根据测试频率范围确定天线的设计方案,然后采用 HFSS 电磁仿真软件对天线进行仿真设计,优化各部分结构尺寸,在此基础上进行详细的结构设计和加工制作。最后进行实测,并与仿真结果进行对比分析。

## 1 天线的原理以及结构

### 1.1 设计原理

作为测量强电磁环境的天线,其主要思想是尽可能减小接收天线的接收信号强度。在空间距离一定的情况下,减小接收天线的有效面积(如减小天线的口径<sup>[3]</sup>)就可减小其接收功率,使接收到的信号强度尽量衰减。根据公式: $AF=E/V^4$ 可知,天线的天线系数越大,在强电磁场环境下得到的信号越小。12~18 GHz 的短偶极子天线原理如图 1 所示,为了减小接收天线的有效面积,天线的振子长度减小到 0,此时天线口径最小,可最大限度衰减环境的场强。天线采用和同轴线类似的结构,前端为了和电缆连接,采用 N 型接头形式,后面为同轴结构,内部采用聚四氟乙烯作为绝缘支撑及定位部件。在天线顶端开缝,采用对称激励的方式,是采用了裂缝激励对称振子天线的原理。如果没有裂缝和短路器,在同轴线内流动的电流就不会流到外表面去,因此振子也不会受到激励。

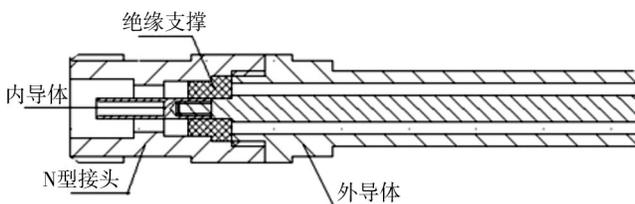


图1 短偶极子原理

Fig.1 Schematic diagram of the short dipole

天线顶端的缝使天线的激励方式对称,在同轴线外导体的外表面上会出现电流,但这个电流在缝隙的两边数值相等,方向相反,不会发生交叉极化辐射。振子两臂的电流仍然相等,不会破坏对称性,也可以增加振子与同轴线外表面的去耦作用,故这种天线可以在宽频带内工作,并且都能保证对称激励<sup>[5]</sup>。

### 1.2 与其他天线相比较的优缺点

强电磁环境测试天线采用上面短偶极子的结构

具有频带宽、口径小等优点。

单极子天线也可以通过缩短天线长度来减小天线效率,从而可以使接收到的信号衰减。随着天线杆长度的减小,特别是在  $\lambda/4$  以下时,则会使天线阻抗减小,效率降低。根据公式  $AF = \frac{z_0 + z_{ant}}{z_0 l_e}$  <sup>[6]</sup> 可知,理论上单极子天线的天线系数也可以达到符合要求的程度<sup>[6]</sup>。随着天线杆长度的减小,天线的输入阻抗会减小,输入的电抗会变大,导致谐振曲线很尖锐,天线频带会变窄,无法像上面设计的短偶极子天线可以达到很宽的频带。

喇叭天线是一种宽带天线,完全可以满足宽频带的需求,但是喇叭天线的口径比较大。根据公式  $D = 10 \lg \left( \frac{7.5 A_p}{\lambda^2} \right)$  <sup>[7]</sup> 可知,喇叭天线的方向性比短偶极子天线的好,天线系数也会比短偶极子天线小,而且结构较复杂,所以还是短偶极子天线比较适合。为了进一步证明短偶极子天线更适合作为测试强电磁环境的天线,在同样条件下对这几种天线进行测试,并比较测试结果。

## 2 基于 HFSS 的仿真设计

根据 HFSS 仿真确定总体结构,优化各部分的具体结构尺寸,包括外导体内径、内导体直径、缝长及缝宽<sup>[8]</sup>。然后进行具体结构的设计,仿真模型如图 2 所示。

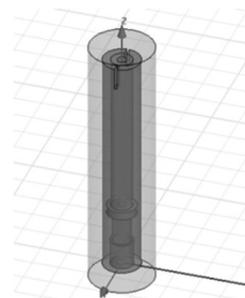


图2 仿真模型<sup>[9]</sup>

Fig.2 Simulation model

仿真的目的是为了确定天线增益与外导体内径(6.5~8 mm)、内导体直径(2.5~4.5 mm)、缝宽(0.7~2 mm)、缝长在中频 1/4 波长附近变化的关系,确定最优化的尺寸组合,得到较小的增益。

短偶极子天线增益的理论值如图 3a 所示。由图 3a 可知,短偶极子天线的增益在 12~18 GHz 频段内的理论增益  $G$  为 -12~5 dB。上面的增益是没有考虑失

配影响时的结果,根据公式 $G_0=G_1+G_2$ 可以求得广义增益 $G_0$ ,其中 $G_1$ 是仿真值, $G_2$ 是反射损耗引起的增益变化。可以根据仿真得到的反射率来计算 $G_2$ ,进而得出广义增益 $G_0$ 。反射损耗增益的具体计算方法为 $G_2=10 \lg(1-\eta^2)^{[10]}$ ,其中 $\eta$ 为反射率。采用该公式进行计算,得到天线的广义增益,如图3b所示。

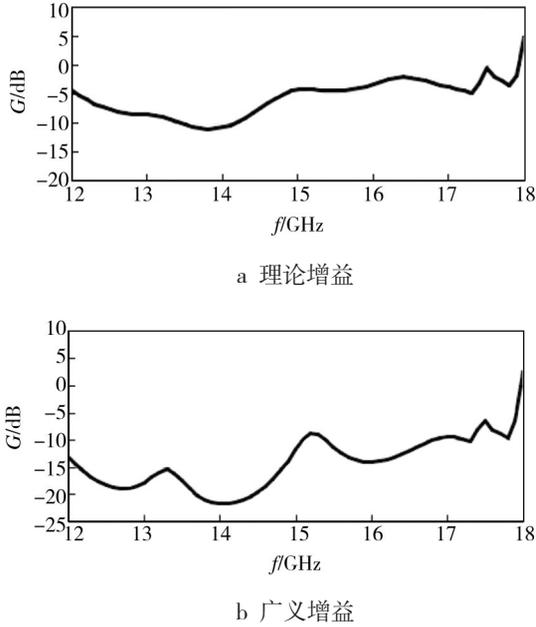


图3 12~18 GHz短偶极子仿真计算的增益

Fig.3 Simulation of generalized gain of short dipole in 12~18 GHz band

由图3b可知,短偶极子天线的增益在12~18 GHz频段内的广义增益 $G_0$ 为-22~2 dB。假设环境电场强度为10 kV/m,根据公式 $AF=-29.75+20 \lg f_{MHz}-G_0$ 可知,理论计算得到的天线系数 $AF$ 在53~75 dB/m范围内。根据公式 $AF=U+E$ ,得仪器接收的电压 $U$ 为27~5 dBV,也就是1.78~22.39 V,加上30 dB衰减器,则得到的电压为50.1~794.3 mV,基本在仪器的安全接收范围内。

### 3 参考天线法校准天线

根据CISPR16-1-4,参考天线法可以用于两个不同的天线情形下,其中一个天线是已经校准过的标准天线,另一个是待校准天线<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 校准原理

在50欧姆测试系统中,天线系数 $AF$ 与天线增益 $G$ 的关系式如式(1):

$$AF=20 \lg 9.73/\lambda -G^{[12]} \quad (1)$$

式中: $G$ 为天线增益。

此公式需满足远场条件,即两天线之间的距离大于 $2D^2/\lambda$ <sup>[13]</sup>, $D$ 为天线的最大尺度,单位为m。由于频率范围为12~18 GHz,所以距离1 m为天线的远场。

天线增益采用参考天线法进行测量。参考天线法适用于发射天线已校准的情况,其接收与发射的功率关系式如式(2)<sup>[14]</sup>:

$$10 \lg P_R=10 \lg P_T+G_T+G_R-20 \lg (4 \pi d/\lambda) \quad (2)$$

式中: $P_R$ 为接收天线的接收功率,W; $P_T$ 为发射天线的发射功率,W; $G_T$ 为发射天线的增益,dB; $G_R$ 为接收天线的增益,dB; $d$ 为两天线水平距离,m。

根据式(2),得接收天线的增益为:

$$G_R=20 \lg 4 \pi d/\lambda +10 \lg P_R/P_T-G_T \quad (3)$$

在接收和发射系统阻抗相同的情况下,功率测量可由电压测量代替,因此可得到式(4):

$$G=20 \lg 4 \pi d/\lambda +(U_R-U_T)-G_T \quad (4)$$

式中: $U_R$ 为天线接收电压,dB $\mu$ V; $U_T$ 为天线发射电压,dB $\mu$ V。

由于发射天线为自制喇叭天线且已校准,天线系数已知,所以发射天线的增益为:

$$G_T=20 \lg 9.73/\lambda -AF_T \quad (5)$$

由式(5)可得接收天线的天线系数:

$$AF_R=28.01-20 \lg d-20 \lg f_{GHz}-(U_R-U_T)-AF_T \quad (6)$$

#### 3.2 试验布置

采用矢量网络分析仪测试两天线之间的传输系数,即 $S_{21}$ 。通过式(6)可以计算得到天线系数。试验布置如图4所示。

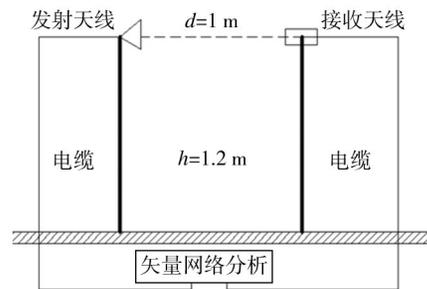


图4 实验布置

Fig.4 Experiment layout

其中 $S_{21}=U_R-U_T$ ,由此得到式(7):

$$AF_R=28.01-20 \lg d-20 \lg f_m+|S_{21}|-AF_T \quad (7)$$

式中: $f_m$ 单位为GHz; $AF$ 单位为dB/m。

天线校准步骤为:

1) 将两个天线高度调节到1.2 m,距离移动到1 m。天线水平布置,两天线正对。天线距离和高度与

标称值的偏差在2 cm之内,地面铺设好吸波材料。

2) 将接收天线与矢量网络分析仪相接,测得环境噪声并保存数据图像。

3) 将电缆与天线连接好,网络分析仪1端口与发射天线相连,2端口与待测接收天线相连,测得场衰减,计算得到天线系数。

### 4 实际测试及其结果分析

在开阔场中搭建测试系统。测试仪器为矢量网络分析仪E5071C,发射天线使用2#12~18 GHz自制喇叭天线,矢量网络分析仪的两个端口分别连接发射天线和接收天线,测量传输系数 $S_{21}$ 。测试频段为12~18 GHz,在测试之前要先校准直通,将电缆的影响去除掉。

短偶极子天线的实际测试得到的测试结果如图6所示。

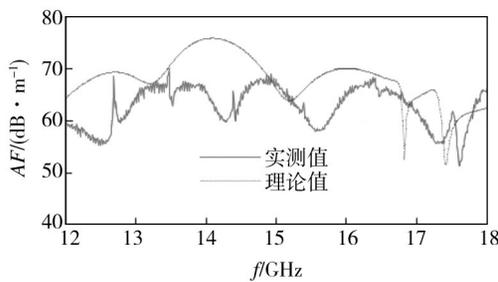


图6 12~18 GHz频段的实测天线系数与理论天线系数

Fig.6 The measured and the theoretical AF in 12~18 GHz band

由图6可知,天线的实测天线系数AF为53~70 dB/m,结果较好。图6中曲线有很多小范围的波动,可能是由于暗室地面和墙面的反射引起的。整体趋势也与理论仿真结果有较大差异,在12~15 GHz频段,理论值比实测值大5 dB左右,15 GHz以上时天线系数相差不大。由于高频时制作误差对天线的影晌会变大,所以两者间的差别可能是制作以及测试误差引起的。由于电缆耦合得到的信号基本都在-80 dB以下,对天线接收的影响较小,所以测得的数据是可信的。假设环境电场强度为10 kV/m<sup>[15]</sup>,根据公式 $AF=U+E$ ,得仪器接收的电压U为10~28 dBV,也就是3.2~25.1 V。如果加上30 dB衰减器,则得到的电压为100~794.3 mV,这个值在接收机的测量范围内。

根据以上实测结果可知,文中研制的天线的最佳天线系数大概在60~70 dB/m范围内,最佳的工作频率范围如图7所示。

由图7可知,天线的最佳工作频段为13~17 GHz,

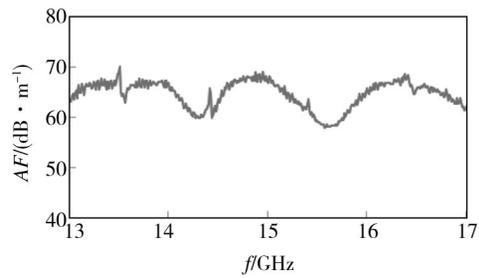


图7 天线的最佳工作频段内的实测天线系数

Fig.7 The measured AF of antenna in the best working frequency band

在此范围内的天线系数AF为58~70 dB/m。根据GJB 1389A中的规定,在11~18 GHz范围内的待测场强最大值为2800 V/m。根据公式 $AF=U+E$ ,仪器接收到的电压U为-1.1~10.9 dBV,也就是118.9~130.9 dB $\mu$ V,即得到的电压为0.9~3.5 V。接收机的测量范围在150 dB $\mu$ V左右,这个值在接收机的测量范围内。在对GJB 1389中规定的场强进行测量时,完全满足要求,可以通过圆周多点测量法来确定所要测场强的方向图等信息。

### 5 结语

文中给出了一种测试强电磁环境的天线,采用HFSS软件进行天线的仿真设计并且与实际测试的结果进行对比,两者结果未能够统一。同时与喇叭天线与单极子天线进行了对比,分析了其优缺点,最终确定短偶极子天线为最适合的天线,基本满足了GJB 1389中的测量要求。接下来需要对某些尺寸进行改进,期望提高其性能。

#### 参考文献:

[1] 周恒. 偶极天线用于高功率微波功率测量的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007:26—43  
ZHOU Heng. Dipole Antenna Used to Study High-power Microwave Power Measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007: 26—43 .

[2] 李名杰,刘进. 电子装备面临的强电磁脉冲环境分析[J]. 装备环境工程,2012,9(2):69—73.  
LI Ming-jie, LIU Jin. Analysising the Electronic Equipment are Faced with the Strong Electromagnetic Pulse Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2) : 69—73.

[3] KRAUS J. D, MARHEFKA R J. 天线[M]. 章文勋译. 北京:电子工业出版社,2006.

- KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antenna[M]. ZHANG Wen-xun, Translation. Beijing: Electronic Industry Press, 2006.
- [4] 曲长云, 蒋全兴, 吕仁清. 电磁发射和敏感度测量[M]. 南京: 东南大学出版社, 1988.
- QU Chang-yun, JIANG Quan-xing, LYU Ren-qing. Electromagnetic Emission and Susceptibility Measurements[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1988.
- [5] THOMAS A Milligan. 现代天线设计[M]. 第二版. 郭玉春, 方加云, 张光生, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- THOMAS A Milligan. Modern Antenna Design[M]. Second Edition. GUO Yu-chun, FANG Jia-yun, ZHANG Guang-sheng, et al. Translation. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [6] IEC 61000-4-20: 2010, Testing and Measurement Techniques—Emission and Immunity Testing in Transverse Electromagnetic (TEM) Waveguides [S].
- [7] 毛钧杰. 微波技术与天线[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- MAO Jun-jie. Microwave Technology and Antennas[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] 孙荣平, 成本茂, 郭龙. 复杂电磁环境下机载电子设备的电磁兼容仿真研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 57—60.
- SUN Rong-ping, CHENG Ben-mao, GUO Long. Under Complicated Electromagnetic Environment of Airborne Electronic Equipment Emc Simulation Research[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 57—60.
- [9] 李明洋. HFSS 天线设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 9—11.
- LI Ming-yang. HFSS Antenna Design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 9—11.
- [10] JOHN Wiley, SONS Inc. Antenna Theory Analysis and Design [M]. Second Edition. USA: Constantine a Balanis Arizona State University, 2005.
- [11] CISPR16-1-4—2010, 无线电干扰与抗干扰测量仪器和方法的规范. 第1-4部分: 无线电干扰与抗干扰测量仪器—辐射干扰测试用天线和测试场地[S].
- CISPR16-1-4—2010, Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods—Part 1-4: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus—Antennas and Test Sites for Radiated Disturbance Measurements [S].
- [12] PAUL C R. 电磁兼容导论[M]. 第2版. 闻映红译. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- PAUL C R. Introduction to Electromagnetic Compatibility[M]. 2nd Edition. WEN Ying-hong Translation. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2007.
- [13] 王英翔, 涂奔, 郑柳刚. 天线测量校准方法[J]. 中国无线电, 2009(8): 1—4.
- WANG Ying-xiang, TU Ben, ZHENG Liu-gang. The Method of Antenna Measurement Calibration[J]. China Radio, 2009 (8): 1—4.
- [14] GJB-J5410—2005, 电磁兼容测量天线的天线系数校准规范[S].
- GJB-J5410—2005, Specification for Calibration of Antennas Used for EMC Measurements[S].
- [15] GJB1389A—2005, 系统电磁兼容性要求[S].
- GJB1389A—2005, Electromagnetic Compatibility Requirements for Systems[S].

(上接第114页)

#### 参考文献:

- [1] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- WEI Bao-ming. Theory and Application of Metal Corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [2] 宋诗哲. 腐蚀电化学研究方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- SONG Shi-zhe. Corrosion Electrochemical Methods[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [3] ZHU X R, HUANG G Q. Research of Contact Corrosion of Metallic Materials in Seawater[J]. Mar Sci, 1994(6): 55—59.
- [4] YADAV A P, NISHIKATA A, TSURU T. Degradation Mechanism of Galvanized Steel in Wet-Dry Cyclic Environment Containing Chloride Ions[J]. Corros Sci, 2004(46): 361—376.
- [5] BARNARD N C, BROWN S G R. Modelling the Relationship between Microstructure of Galvan-type Coated Steel and Cut-edge Corrosion Resistance Incorporating Diffusion of Multiple Species[J]. Corros Sci, 2008(50): 2546—2858.
- [6] 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- CAO Chu-nan. Principle of Corrosion Electrochemical[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [7] SZIR Ki L, SZOCS E, PILB H Z, et al. Study of the Initial Stage of White Rust Formation on Zinc Single Crystal by EIS, STM/AFM and SEM/EDS Techniques[J]. Electrochim Acta, 2001 (46): 3743—3754.
- [8] CHENG Y L, ZHANG Z, CAO F H, et al. A Study of the Corrosion of Aluminum Alloy 2024-T3 under Thin Electrolyte Layers[J]. Corros Sci, 2004 (46): 1649—1667.
- [9] ZHANG Y C, WU Y S, ZHANG J. Galvanic Corrosion of Rusty Cast Iron and 304 Stainless Steel[J]. Corro Sci Technol, 2001, 13(2): 66—70.