

· 天馈系统 ·

中图分类号: TN821

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2010)09-0063-04

# 超宽带天线辐射信号失真分析

王建路, 张建华, 胡伟

(电子工程学院信息工程系, 合肥 230037)

**摘要:** 超宽带信号在辐射过程中存在信号失真, 会导致系统性能的下降。以电偶极子天线、线天线和椭圆超宽带天线为研究对象, 从理论上分析了信号失真的原因, 进一步从传输函数的角度预测了辐射信号的波形, 仿真结果证明了结果的正确性; 指出了仅依靠辐射信号波形选择基准信号的不足, 分析了同一个天线的保真度随信号变化的原因。

**关键词:** 保真度; 传输函数; 电偶极子天线; 超宽带

## Analysis on UWB Signal Distortion

WANG Jian-lu, ZHANG Jian-hua, HU Wei

(Department of Information Engineering, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Distortion of UWB signals during radiation will result in performance degradation of radar systems. In this paper, electric dipole antenna, linear antenna and elliptical UWB antenna are studied. The reason for signal distortion is theoretically analyzed, and the waveform of radiated signal can be predicted on basis of the transfer function. Conclusions are proven to be correct by simulation results. Finally, it is presented that it is inefficient to choose a reference signal on basis of a solo signal waveform. The reason for the same antenna having different fidelities varying with signals is also studied.

**Key words:** signal fidelity; transfer function; dipole antenna; UWB

## 0 引言

用于超宽带系统的天线与窄带天线有所不同, 超宽带天线辐射脉冲信号时会产生失真<sup>[1-3]</sup>, 波形保真系数成为衡量超宽带天线性能的一个重要指标<sup>[4]</sup>, 选择不同的基准信号会对信号保真度产生显著影响。由于天线的微分效应, 通常选择激励信号的一阶或者高阶导数作为基准信号<sup>[5-6]</sup>。由于天线对信号的效应比较复杂, 所以没有准确的方法来选择基准信号。另外天线对不同信号的保真度不同<sup>[7]</sup>, 说明保真度并不能完全反映天线对超宽带信号的保真性能。本文从传输函数的角度预测了辐射电场的波形, 为基准信号的选择提供了依据, 指出了仅依靠辐射电场波形选择基准信号的不足。从传输函数的角度解释了同一个天线对不同信号具有不同保真度的原因。

## 1 传输函数与无失真传输

图1展示了天线辐射超宽带信号时波形失真情况。定义发射天线的传输函数为

$$H(\omega) = \frac{E(\omega)}{V(\omega)} = \hat{a} | H(\omega) | e^{-j\varphi(\omega)} \quad (1)$$

式中:  $V(\omega)$  为谱域激励电压;  $E(\omega)$  为接收点电场;  $\hat{a}$  为单位矢量; 由电场方向决定。

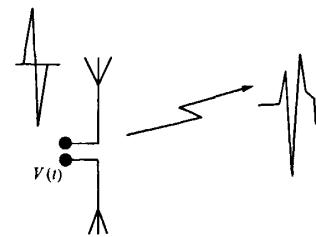


图1 天线辐射信号失真示意图

下面通过分析电偶极子天线的传输函数, 来说明传输函数和辐射波形的关系。沿  $z$  轴放置的电偶极子远区辐射场为

$$E_\theta(\omega) = \frac{\mu_0 l \sin \theta e^{-jkz}}{4\pi r} j\omega I(\omega) \hat{\theta} \quad (2)$$

电偶极子天线阻抗近似为  $Z_A = R_A + jX_A \approx 1/j\omega C$ <sup>[8]</sup>, 激励电压为理想电压源时, 取  $z$  轴为正方向, 天线输入端电流为

$$I(\omega) = -V(\omega)/Z_A \approx -j\omega C V_s(\omega) \quad (3)$$

式中:  $V_s(\omega)$  为频域内的电压源电压。

时域表达式为

$$I(t) \approx -C \frac{dV(t)}{dt} \quad (4)$$

传输函数

$$H(\omega) = -\frac{\mu_0 l \sin \theta e^{-jkr}}{4\pi r} (j\omega)^2 \dot{\theta} \quad (5)$$

利用傅里叶变换可以得到电偶极子电磁场的时域解为

$$E_\theta(t) = -\frac{\mu_0 l \sin \theta C}{4\pi r} \frac{d^2 V(t - c/r)}{dt^2} \quad (6)$$

可以看出电偶极子的传输函数是频率的二阶导数,根据傅里叶变换的性质可知电偶极子天线具有微分效应,辐射电场的时域波形是激励电压的二阶导数,其中电偶极子的容性阻抗贡献一次导数,电流的辐射贡献一次。

然而对于超宽带天线来说,传输函数是一个复杂的函数,无法通过解析解得到传输函数的表达式。理想情况为信号无失真传输,需要满足

$$|H(\omega)| = \text{const}, \varphi(\omega) = A\omega + B \quad (7)$$

式中: $A, B$ 是与频率无关的常数。在这种情况下,天线辐射的信号波形与激励信号波形相同,不会发生信号失真。利用傅里叶变换的特性,可以通过传输函数频域的性质预测辐射信号的波形。在不同的频段超宽带天线传输函数具有不同的形式,可以通过激励脉冲信号带宽内传输函数谱域形式,预测辐射信号的波形。如果传输函数跟频率的平方成正比,可以得出时域中辐射电场是激励电压的二阶导数的结论;而如果传输函数变化平稳,说明天线只会导致轻微的信号失真。

## 2 超宽带天线分析

本节分别对电偶极子天线、线天线和超宽带天线进行了仿真,其中电偶极子、线天线会导致信号失真,属于色散天线,而超宽带天线能够保持激励信号的波形,属于非色散天线。

电偶极子天线长度为0.03 m,激励电压采用高斯脉冲,  $V(t) = \exp[-4\pi(t - t_0)/\tau^2]$ ,  $\tau = 4 \times 10^{-9}$  s, 仿真结果如图2所示,辐射信号是激励信号的二阶导数,符合前面的分析。

然后仿生线天线辐射波形,天线长度为0.25 m,采用相同的高斯脉冲,辐射波形如图3所示,信号失真严重。

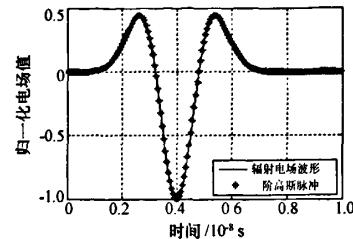


图2 电偶极子天线辐射信号波形

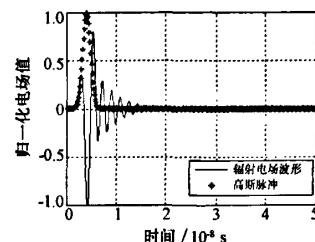


图3 电偶极子天线辐射信号波形

采用文献[9]中的超宽带天线作为研究对象,如图2所示,结构为2个椭圆,椭圆轴比 $x:z = 0.03\text{m}:0.02\text{m}$ ,  $L = 0.08\text{m}$ ,  $W = 0.06\text{m}$ 。天线的 $S_{11}$ 参数如图5所示,天线的工作频段为1.3 GHz~6 GHz,相对带宽大于20%,属于超宽带天线。

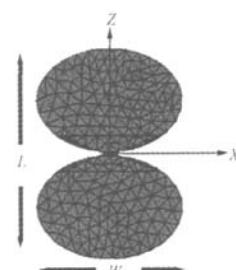


图4 天线模型

通过矩量法仿真可以得到天线的传输函数,图3分别绘制了传输函数的幅值和相位随频率的变化情况。

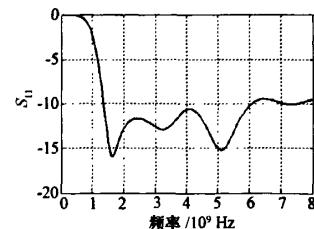


图5 天线 $S_{11}$ 参数

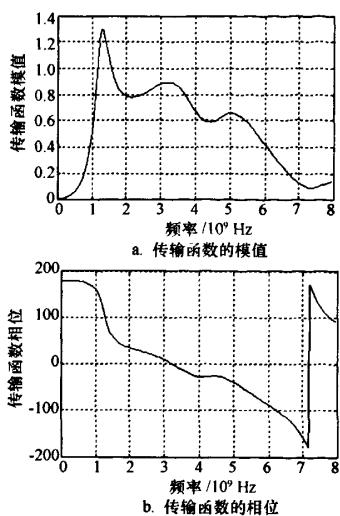


图 6 天线的传输函数

从传输函数可以看出, 在低频段 0~1 GHz, 近似为  $|H(\omega)| \propto \omega^2$ , 与电偶极子相似。可以判断辐射电场的波形应该为激励电压的二阶导数。实际上, 在这个频段, 天线尺寸  $L \ll \lambda$ , 可以认为是电偶极子。仿真实验验证了这个结论, 如图 4 所示, 激励电压采用高斯脉冲,  $V(t) = \exp[-4\pi(t-t_0)/\tau^2]$ ,  $\tau = 4 \times 10^{-9}$  s, 此脉冲的高频小于 1 GHz, 辐射电场与激励信号的二阶导数吻合。

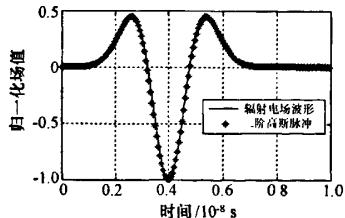


图 7 高斯脉冲激励下辐射信号波形

在 2 GHz~6 GHz, 传输函数比较平缓, 所以可以判断天线对激励电压没有微分作用, 辐射电场的波形应该与激励电压相似。由于高斯脉冲具有直流分量, 这里激励电压选择微分高斯脉冲,  $V(t) = (t-t_0)/\tau \cdot \exp[-4\pi(t-t_0)/\tau^2]$ ,  $\tau = 0.3 \times 10^{-9}$  s, 图 5 绘制了仿真实验结果。可以看出辐射电场有拖尾现象, 不能明显看出波形与激励波形的关系。从波形分析, 似乎更像二阶高斯脉冲。但是首先从传输函数来看, 不会出现微分。其次从波形来看, 由于仿真中已经消除了时延因素, 如果辐射场是激励电压的导数, 则辐射场的第一个零点时刻应该对应激励电压的第一个极点, 辐射场的最大值应该对应激励电压的零点, 从图中可以看

出显然没有对应。反而激励电压的极点出现时刻与辐射电场极点时刻相同, 零点出现时刻相同, 可以断定辐射电场波形为激励电压波形。失真的原因在于传输函数在该脉冲的频谱范围内不是常数, 会导致一定的畸变, 脉冲的辐射会有过冲和拖尾现象。

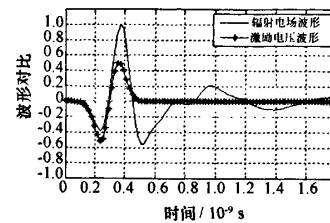


图 8 微分高斯脉冲激励下辐射信号波形

从第 2 个仿真来看, 如果不结合时间分析, 单纯从波形来看, 很容易选择激励信号的导数来作为基准信号, 通过分析可以知道该波形是微分高斯脉冲的失真形式。如果不考虑激励信号和天线, 仅从辐射波形出发选择基准信号是没有根据的, 会得出错误的结论。所以基准信号的选择应该结合信号带宽和天线的传输函数来进行, 分别计算了选择这 2 种基准信号计算得到的保真度, 虽然得到的保真度会有所下降, 但是更能准确反映天线的实际性能。

从传输函数的角度可以解释不同的脉冲具有不同的保真度。不同的脉冲频率范围不同, 相应频段天线的传输函数也不相同, 导致不同的失真度。相对来说, 激励信号带宽越宽, 传输函数变化越大, 导致信号失真越大。

### 3 结束语

针对超宽带应用中信号失真现象, 分析了脉冲信号的辐射和失真的原因, 从传输函数的角度预测了天线的辐射电场的波形, 为基准信号的选取提供了依据。分析了不同脉冲保真度不同的原因。

### 参 考 文 献

- [1] 葛利嘉, 曾凡鑫, 刘郁林, 等. 超宽带无线通信 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] Chen Z, Wu X, Li H, et al. Consideration for source pulse and antennas in UWB radio system [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2004, 52(7): 1739~1748.
- [3] Amir Shlivinski, Ehud Heyman, Raphael Kastner. Antenna

- characterization in the time domain [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1997, 45(7):1140–1149.
- [4] David Lamensdorf, Leon Susman. Baseband-pulse-antenna techniques [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1994, 36(1): 20–30.
- [5] 张金平. 超宽带天线及其阵列研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.  
Zhang Jinping. Investigation of ultra-wideband antenna and array [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [6] 花 昀, 刘梦龙, 吕文俊, 等. 超宽带单极子天线脉冲传输特性的分析 [J]. 南京邮电大学学报, 2007, 27(5):22–30.  
Hua Yun, Liu Menglong, Lu Wenjun, et al. Analysis of pulse transmission properties of UWB monopole antennas [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2007, 27(5): 22–30.
- [7] Pozar D M. Waveform optimizations for ultra wideband radio systems [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2003, 51(9): 2335–2345.
- [8] 周壁华, 陈 彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
Zhou Bihua, Chen bin, Shi Lihua. Electromagnetic pulse and engineering protection [M]. Beijing, National Defense Industry Press, 2003.
- [9] Hans Gregory Schantz. Planar Elliptical Element Ultra-Wideband Dipole Antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002(3): 44–47.

王建路 男, 1984 年生, 硕士研究生。研究方向为平面超宽带天线设计。

张建华 女, 1962 年生, 教授。研究方向为天线和电波传播。

胡 伟 男, 1985 年生, 硕士研究生。研究方向电磁场数值分析。

#### (上接第 62 页)

化方法, 采用复调制滤波器组实现均匀信道化, 然后将相邻信道输出相加实现非均匀信道化。文章给出了复调制滤波器组的 ACM 条件, 利用余弦基神经网络训练得到了满足 ACM 条件的低通原型滤波器, 仿真结果表明低通原型滤波器及和信道滤波器性能良好能有效实现非均匀信道化。同时由于复调制滤波器组可以用 FFT 实现, 而邻信道合并只需少量加法运算, 所以本方法具有很高的运算效率, 易于硬件实现。

#### 参 考 文 献

- [1] 张晓发, 梁睿海, 袁乃昌. 信道化侦察接收机优化设计 [J]. 现代雷达, 2007, 29(11):91–93.  
Zhang Xiaofa, Liang Ruihai, Yuan Naichang. Optimized design of channelized reconnaissance receiver [J]. Modern Radar, 2007, 29(11):91–93.
- [2] Harris F J, Dick C, Rice M. Digital receivers and transmitters using polyphase filter banks for wireless communications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(4):1395–1412.
- [3] 陈海红, 汪 欣. 基于 FPCA 的宽带数字信道化接收机的设计 [J]. 现代雷达, 2009, 31(12):73–76.  
Chen Haihong, Wang Xin. A design method of digital channelized wideband receiver based on FPGA [J]. Modern Radar, 2009, 31(12):73–76.

[4] Lee Jeong Jin, Lee Byeong Gi. A design of nonuniform cosine modulated filter banks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1995, 42(11):732–737.

[5] John G Proakis, Dimitris G Manolakis. 数字信号处理 [M]. 方艳梅, 刘永清, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
John G Proakis, Dimitris G Manolakis. Digital signal processing [M]. Fang Yanmei, Liu Yongqing, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.

[6] 曾喆昭, 唐 忠. FIR 线性相位滤波器优化设计研究 [J]. 信号处理, 2001, 17(4):296–301.  
Zeng Jizhao, Tang Zhong. Study on optimization design of FIR filters with linear phase [J]. Signal Processing, 2001, 17(4):296–301.

[7] 徐士良. 数值分析与算法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
Xu Shiliang. Numerical analysis and algorithm [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.

杨 翰 男, 1980 年生, 博士研究生。研究方向为航天器测量控制及数字信道化技术。

袁嗣杰 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师。研究方向为高速数字信号处理及航天测控技术。

吕镜清 女, 1965 年生, 研究员。研究方向为复杂电磁环境下信号微特征提取及可视化技术。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>