

## 直线终端金属细线天线特性的数值及实验分析

胡海涛<sup>①②</sup> 方广有<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所高功率微波与电磁辐射重点实验室 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要:** 该文对一种直线终端金属线状结构的天线相关特性进行了分析,对天线在自由空间的辐射特性、辐射有效区以及电压驻波比(VSWR)用时域有限差分方法(FDTD)进行了分析,同时进行实际测试;研究了终端阻抗、介质介电常数、天线张角和距地面高度的变化对天线特性的影响,对在不同调制频率下的近场分布特性进行了仿真。结果表明,仿真和测试结果基本一致,该种类型天线比常规 bow-tie 天线对测试环境变化的适应能力更强。

**关键词:** 直线终端金属细线天线; FDTD; 输入阻抗; VSWR

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2759-04

## Numerical and Experimental Analysis of Linear-End Metallic Thin Wire Antennas

Hu Hai-tao<sup>①②</sup> Fang Guang-you<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(The Key Laboratory of High Power Microwave and Electromagnetic Radiation, The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this paper, a kind of linear-end metallic thin wire antenna is studied. The properties of the transmitted waveforms in free space, the footprints and the VSWR are simulated with the FDTD method and tested. Simulations are carried out for various parameters such as end resistor values, permittivity values, flare angles, and height above the ground. The electronic field distributions in near field are simulated in different modulated frequencies. The results show that the simulation results and the measurement results are basic agreement. The results also show that this kind of antenna is more adaptive to the different working conditions than the common bow-tie antenna.

**Key words:** Linear-end metallic thin wire antenna; FDTD; Input impedance; VSWR

### 1 引言

在探地雷达应用中,由于探测区域的复杂性和探测方式的特殊性,它与普通探空雷达系统的工作条件有一些显著的区别,主要表现在:与普通雷达信号相比,冲击体制探地雷达的激励信号在时域上窄的多;一般雷达作用于远距离,而探地雷达只探测地下的极近距离;由于大地介质的复杂性,探地雷达在工作时的目标背景要复杂得多。这些应用背景决定了探地雷达天线的基本特性,即强调辐射效率、近场特性和对不同环境的适应能力<sup>[1]</sup>。在探地雷达的发展中研究各种新型的天线是一个主要的研究方向,前人已经提出了很多天线类型。这类天线主要有各种振子、TEM 喇叭,以及它们的变形等<sup>[2]</sup>。

在探地雷达的应用中,要求天线在一个很宽的频率范围内工作,根据传输线理论,在天线末端适当加载电阻,并加

盖屏蔽罩,可以使常用的 Bow-tie 天线在行波状态下工作,具有良好的工作特性。圆弧状终端的金属线状 Bow-tie 天线的仿真及实验分析已有文献报导<sup>[3,4]</sup>,本文研究了一种新的直线终端金属细线天线,其相关特性及测试结果则未见文献报道,这里对它的特性进行初步分析,为该类型天线的应用研究做好前期准备。

### 2 天线结构

根据探地雷达系统中天线的工作特点,天线系统的俯视图如图 1 所示,天线工作的中心频率为 500MHz,图中相邻线条之间的张角为 12°,天线末端和屏蔽罩之间加载终端电阻,天线固定在基板上,该基板同时作为屏蔽罩的基座。

### 3 计算方法

本文采用基于 Yee 网格的时域有限差分(FDTD)方法,并结合 Gedney 完全匹配层(PML),实现无限大或半无限大空间的仿真。终端加载电阻的模型及相关 FDTD 迭代公式的推导可以参考相关文献<sup>[5,6]</sup>。

## 4 计算及试验结果

在采用 FDTD 进行仿真时, 激励脉冲为调制高斯脉冲, 表达式如下,

$$E_i(t) = -\cos(\omega t) \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right]$$

式中  $\omega$  为载波的角频率,  $t_0$  为高斯脉冲峰值出现的时刻,  $\tau$  为高斯脉冲宽度。在仿真时, 可以根据实际的激励脉冲波形选择适当的参数值。

### 4.1 天线的辐射特性

天线在自由空间中的辐射波形如图 2 所示, 为了和实际激励脉冲相近似, 仿真激励脉冲参数值为  $\tau = 8.0\text{ns}$ ,  $t_0 = 7.1\text{ns}$ ,  $\omega = 2\pi \times 150\text{MHz}$  (rad/s), 图 2 中两条曲线差异的原因在于, 测试曲线是接收天线接收点的电压(V), 而计算曲线是接收天线馈电点的电场强度(V/m)。

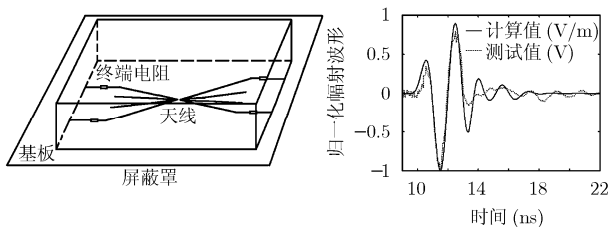


图 1 天线的俯视结构

图 2 天线的归一化辐射波形

### 4.2 终端阻抗值的变化

激励源为高斯脉冲,  $t_0 = 2.3\text{ns}$ , 脉冲宽度  $\tau = 2.0\text{ns}$ , 天线尺寸为: 长 0.22m, 宽 0.07m, 屏蔽罩尺寸为: 长 0.25m, 宽 0.14m, 高 0.085m, 仿真时上述参数不变, 终端电阻分别取  $100\Omega$ ,  $220\Omega$ ,  $400\Omega$ 。天线下方放置半无限大介质, 介质参数为  $\sigma = 0.004\text{(S/m)}$ ,  $\epsilon_r = 4$ 。0-1.5GHz 频率范围内的仿真结果如图 3 所示。

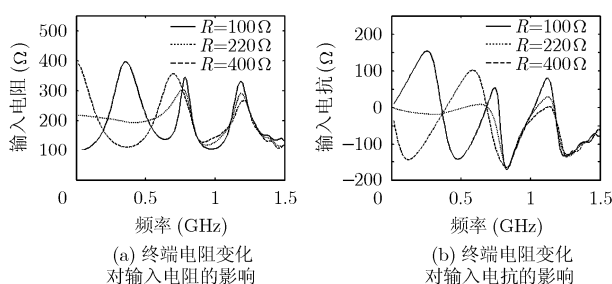


图 3

从仿真结果可以看出, 当激励信号频率为零时, 相当于直流电压激励, 仿真结果反映了终端阻抗的取值。频率较低时, 输入阻抗受到终端电阻和介质加载的共同作用, 随着频率的增大, 不同条件下的阻抗取值趋于一致, 这是因为高频时的输入阻抗主要受到介质电特性的影响, 另外天线本身的

特性阻抗以及天线与介质重合面积等因素也有影响, 而这些参数在仿真中是不变的。当激励脉冲的低频分量较为丰富时, 就应当考虑终端阻抗的影响。

### 4.3 张角变化

本节研究天线张角变化对输入阻抗的影响。取相邻两根金属细线之间的张角为  $12^\circ$ , 天线单极的张角  $\alpha$  分别为  $36^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $84^\circ$ , 天线整体分别用 8 根、12 根和 16 根金属线, 3 种情况下均保持直线终端, 末端接  $220\Omega$  电阻, 天线在半无限大介质上方辐射, 介质参数同上。3 种情况下屏蔽罩的尺寸作适当变化。输入阻抗的仿真结果如图 4 所示。从图中可以看出, 随着天线张角的减小, 阻抗曲线向高频端偏移。

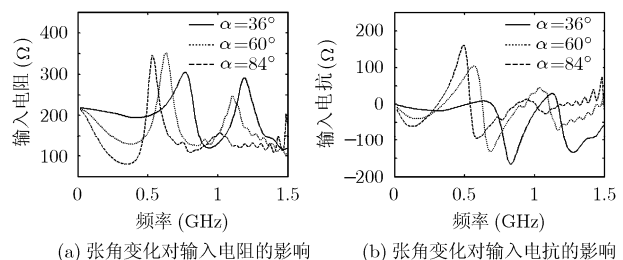


图 4

### 4.4 天线距地面高度变化

由于大地是有耗介质, 当天线接近地面工作时, 大地对天线起到加载作用, 对天线的辐射特性产生影响。为了考察这种影响, 我们在天线距地面的不同高度时对天线进行仿真。天线工作的中心频率为  $500\text{MHz}$ , 介质参数为  $\sigma = 0.004\text{(S/m)}$ ,  $\epsilon_r = 4$ , 介质定义为半无限大空间。天线在介质中的辐射波形的仿真结果如图 5 所示。从图中可以看出:

- (1) 天线离地面越近, 天线与介质的耦合越强。
- (2) 因为介质的电导率有限, 当天线越靠近介质时, 介质作为电阻性负载的作用越明显, 即降低了天线的终端反射。
- (3) 天线越靠近有耗介质分界面, 辐射波形的“振铃拖尾”就变得更加不明显。这也说明, 探地雷达在工作时, 离地面的距离不宜太大, 否则将有过多的“振铃拖尾”, 不利于后续的信号提取和处理。

### 4.5 介质介电常数的变化

考察不同介质参数情况下天线辐射特性的变化。介质参数值为: 电导率为  $0.004\text{(S/m)}$ , 介电常数分别为 2, 4, 10。天线距地面高度均为  $20\text{mm}$ 。介质参数对辐射波形和输入阻抗的影响如图 6、图 7 所示。从图 6 可以看出, 介电常数的变化对辐射波形有较大的影响, 表现为随着介电常数的增大波形上时间滞后, 信号拖尾变化比较大。从图 7 可以看出, 随着介电常数的增大, 输入电阻和输入电抗曲线均向低频端偏移; 结合图 4, 当天线张角减小, 输入电阻和输入电抗曲线均向高频端偏移, 当探地雷达工作环境中由于土壤的介电

常数增大而使天线输入阻抗曲线发生偏移时，可以适当减少构成天线的金属线根数，这样就可以抵消介质介电常数变化对天线的影 响，使天线在更广泛的环境条件下较好地工作。由于增减金属细线对这种类型的天线相对方便，所以这是该种类型天线优于常规 Bow-tie 天线的方面。

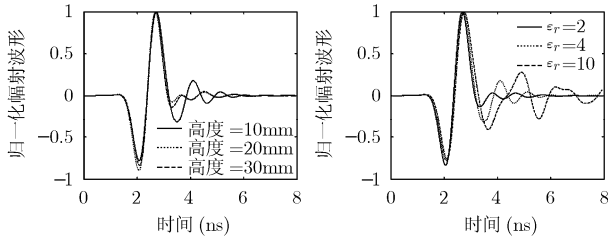


图 5 天线距地面高度变化对辐射波形的影响

图 6 介电常数变化对辐射波形的影响

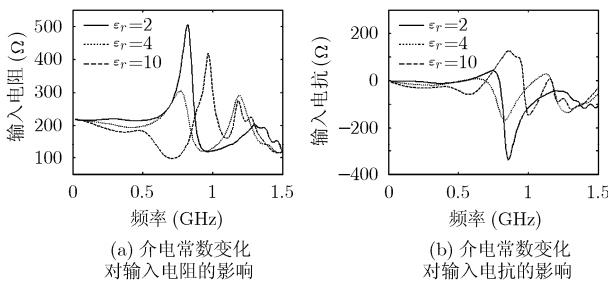


图 7

4.6 近场辐射模式

当激励信号的调制频率为 100MHz, 500MHz, 850MHz, 1.5GHz, 3GHz, 4GHz 时，天线在自由空间中的近场 H 面辐射模式的仿真结果如图 8 所示。仿真结果清楚表明了加载背腔对天线辐射特性的作用。在介质中的近场辐射，由于网格的划分方式及 FDTD 的数值色散等原因会产生微小的波动，但是不影响问题的分析。天线的主波束在频率不超过 850MHz 的频率范围内有较好的稳定性，当调制频率高于 3GHz 时，主瓣发生分裂，这是因为激励信号的频率分布已经严重偏离了天线正常工作的频率范围。

4.7 天线辐射的有效区域

这里的近场分布定义为天线下方水平面内辐射波形的峰值分布(dB)，它表明了天线辐射波形在该平面内分布的形状和尺寸，即通常所说的“脚印”(footprint)。Lestari 等人<sup>[3]</sup>指出，当天线近场分布太大，地面会对天线的性能产生不利的影响；当天线近场分布太小，不利于探测结果的二维成像。当近场分布的形状和尺寸可以和目标物相比拟时，探地雷达就更容易探测出该种类型的物体。天线下方 11cm 处的近场分布如图 9 所示，实际测试在微波暗室中进行，发射天线水平放置，轴向平行于 x 轴。用探针测试天线正下方近场内的场强峰值分布，测试频率范围 100MHz–1000MHz，图 9(a)为仿真结果，图 9(b)为测试结果，两图在 y 方向上的

差异主要是由于仿真是在理想条件下进行，而测试时存在外部条件的干扰，如周围测试设备的金属部件产生的电磁散射，手持式探针的影响等。在天线轴向两侧垂直于轴向的方向上辐射较弱，较易受干扰的影响。测试及仿真结果表明，该类型天线较适合于测试长条形的物体。

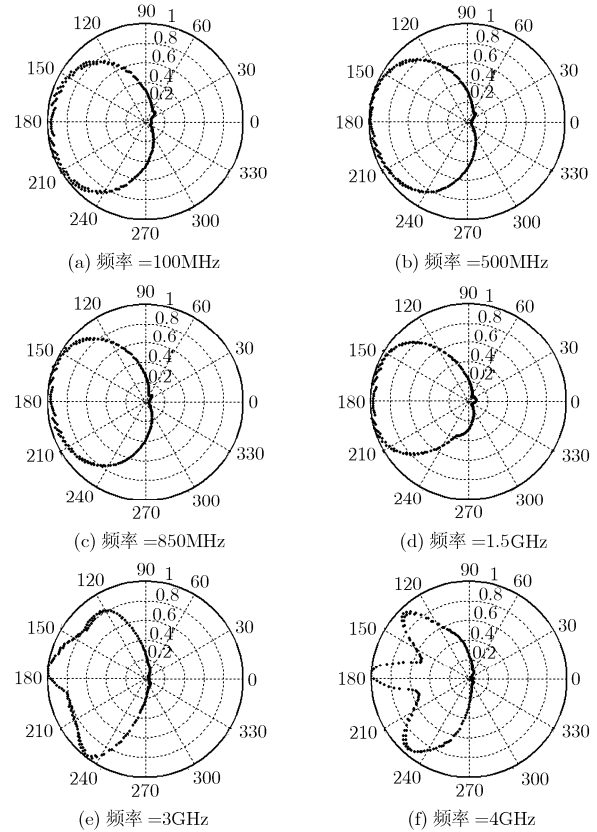


图 8 不同调制频率下天线的近场辐射模式

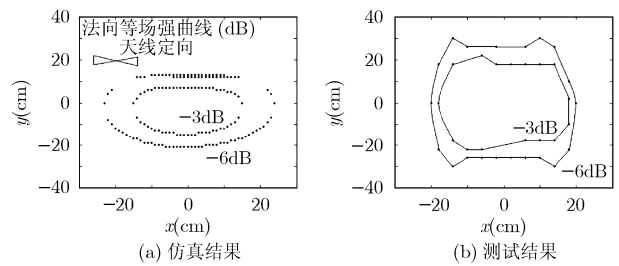


图 9 天线近场分布

4.8 电压驻波比(VSWR)

根据传输线理论，应用 FDTD 方法计算天线输入端的电压驻波比。实际应用中，电压驻波比小于 2 是可以接受的，在该范围内的仿真及测试结果如图 10(b)所示，图 10(a)中  $Z_{in}$ ,  $Z_0$ ,  $Z_L$  分别为传输线的输入阻抗、特征阻抗和终端负载。从图 10(b)可以看出，天线从 100MHz 到 850MHz 频率范围内的电压驻波比小于 2，相对于天线的工作中心频率 500MHz，可以看出天线具有较宽的阻抗频率特性，这对探

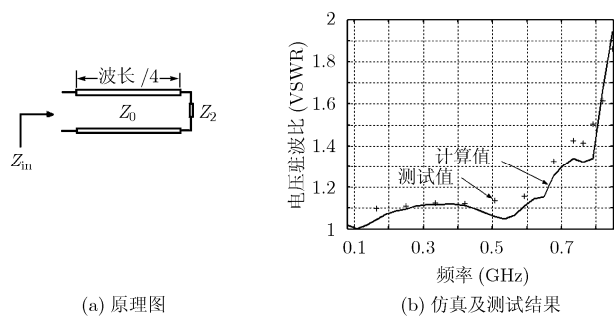


图10 天线输入端电压驻波比

测结果的成像是有利的。

## 5 结束语

本文对直线终端金属细线天线进行了一定程度的研究，应用时域有限差分法，经过理论分析，数值仿真和实际测试，对该类型天线的在不同条件下的辐射特性、阻抗特性、辐射模式、近场分布和电压驻波比进行了研究，在仿真的同时给出了实测结果，结果表明，仿真和实测结果基本吻合，该类型天线具有良好的辐射特性，较宽的阻抗频率特性，与传统的蝶形 Bow-tie 天线相比，该种天线结构变化的灵活性使它适应更广泛的工作环境，同时这种结构的天线具有整体结构简单，加工方便的优点，较适合工程类应用。

## 参考文献

[1] 栗毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用. 第一版, 北京: 科学出版社, 2006年9月: 1-2, 70-71.

- [2] 周蔚红, 刘培国, 刘克成, 何建国. 探地雷达中蝶形振子天线的改进. 电子与信息学报, 2005, 27(7): 1171-1173.  
Zhou Wei-hong, Liu Pei-guo, Liu Ke-cheng, and He Jian-guo. Improvement on bow-tie antenna of ground-penetrating radar. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(7): 1171-1173.
- [3] Lestari A A, Yarovoy A G, and Ligthart L P. Numerical and experimental analysis of circular-end wire bow-tie antennas over a lossy ground. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2004, 52(1): 26-35.
- [4] Lestari A A, Yarovoy A G, and Ligthart L P. Adaptive wire bow-tie antenna for ground penetrating radar. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 25-29 July 2005: 368-371.
- [5] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法. 第一版, 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003年4月: 199-200.
- [6] Taflove A and Hagness S C. *Computational Electrodynamics — The Finite-Difference Time-Domain Method*. Third Edition, London: Artech House, 2005: 288-292.

胡海涛: 男, 1975年生, 博士生, 从事探地雷达天线仿真设计和接收机设计等方面的研究。

方广有: 男, 1963年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”入选者, 研究兴趣主要为超宽带电磁学及其工程应用、损耗介质中隐蔽目标的电磁探测、微波成像新技术、新方法和电磁场的数值计算方法等。