

介质平面上高频单极天线特性分析¹

邓维波 刘永坦 刘小国

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要 该文用时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 计算介质平面上单极天线的阻抗特性。用 FDTD 法计算天线的辐射特性可以使用不同的激励方式, 文章比较了采用不同激励方式时, 天线的输入阻抗。文章的主要内容是将表面阻抗法用于 FDTD 中, 计算架设在介质平面上单极天线的辐射特性, 并用 FDTD 法计算了介质平面上铺设不同尺寸的导体平面时, 天线的阻抗特性。

关键词 时域差分, 表面阻抗, 天线

中图分类号 TN820

1 前 言

时域有限差分法现已广泛应用于电磁场散射和反射的计算。随着吸收边界条件、激励方式等问题的解决, 它在天线辐射的研究中也得到了应用。如用于微带天线、线天线等。本文对 3 种不同馈电方法 (即同轴电缆馈电、周边源馈电和电压源馈电), 计算天线特性进行了比较。

在线天线的分析中, 仅对架设在无限或有限导体平面上的单极线天线进行过深入分析, 而对架设在不同介质平面上的单极线天线则分析很少。本文利用表面阻抗法对这类问题进行了分析。随着研究对象的复杂化, FDTD 法计算量大大增加了。为了减少由不同介质面带来的计算量, 将表面阻抗概念引入 FDTD 法中, 用于计算物体的反射和散射^[1,2]。本文将表面阻抗法用于计算架设在有损介质表面的天线辐射问题中, 用这种方法计算天线特性, 使研究的问题仅限于自由空间, 不需要考虑计算介质中的电磁波特性, 使计算量大为减少。另外, 工作在高频波段的天线 (2~30MHz) 由于其尺寸较大, 不可能将其架设在无限大的导体平面上, 只能用有限的导体平面替代。为使天线的性能达到设计指标, 且地网的设计经济、合理, 需考虑导体平面的尺寸, 为此, 计算了在有损介质平面上铺设不同尺寸的导体平面时, 单极天线的辐射阻抗。

2 理论分析

2.1 馈电方法比较

目前用 FDTD 法计算天线辐射问题时, 分为两种激励方式: “软” 激励方式和 “硬” 激励方式。所谓 “软” 激励方式是通过同轴电缆对天线进行馈电, 如图 1 所示。激励源为

$$V_i = V_0 \exp(-t^2/2\tau) \quad (1)$$

其中 V_0 为常数, τ 定义为高斯脉冲宽度, 是常数, t 为时间变量。在这种激励方式下由天线体引起的反射波将被信号源设置的边界条件吸收。这使得计算结果能较快的收敛^[3]。

“硬” 激励方式有两种方法, 电压激励和周边电源激励。电压激励是在天线底部馈入一个电压源, 使天线与地之间的电场值为 $E_z(i, j, k) = V_i(n)/\Delta S$; 其中 ΔS 为天线根部与地之间的间距, $V_i(n)$ 为 (1) 式中的表达式。周边电源激励是在环绕天线根部定义 4 个切向电场分量使其满足^[4]:

$$E_x^n(i, j, k) = -E_x^n(i-1, j, k) = 2V_i(n)/[\Delta x \ln(\Delta x/r)] \quad (2)$$

$$E_y^n(i, j, k) = -E_y^n(i, j-1, k) = 2V_i(n)/[\Delta y \ln(\Delta y/r)] \quad (3)$$

¹ 2000-07-10 收到, 2001-01-04 定稿

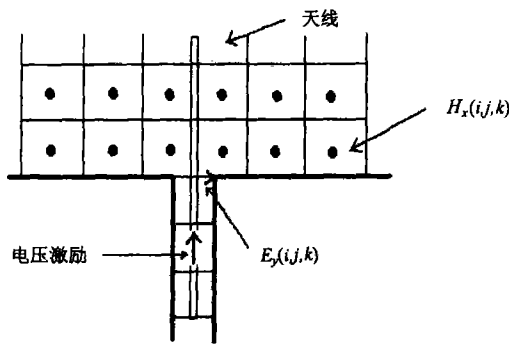


图 1 同轴电缆激励示意图

由于“硬”激励没有对天线产生的反射波设置吸收边界条件，要得到稳定解，需要比“软”激励更多的时间步。无论采用哪一种激励方式，天线根部的响应电流均由其附近的磁场获得，即

$$I_{in}[(n + 1/2)\Delta t] = H_x^{n+1/2}(i_0, j_0 - 1, k_0) - H_x^{n+1/2}(i_0, j_0, k_0) + H_y^{n+1/2}(i_0, j_0, k_0) - H_y^{n+1/2}(i_0 - 1, j_0, k_0) \quad (4)$$

利用傅氏变换可得到频域的 $I_{in}(\omega)$ 和 $V_i(\omega)$ ，然后利用 (5) 式可得到各频率点的输入阻抗值

$$Z_{in} = V_i(\omega)/I_{in}(\omega) \quad (5)$$

图 2 给出了用 3 种馈电法计算的天线输入阻抗值和实际测试结果，天线的高度为 6m，半

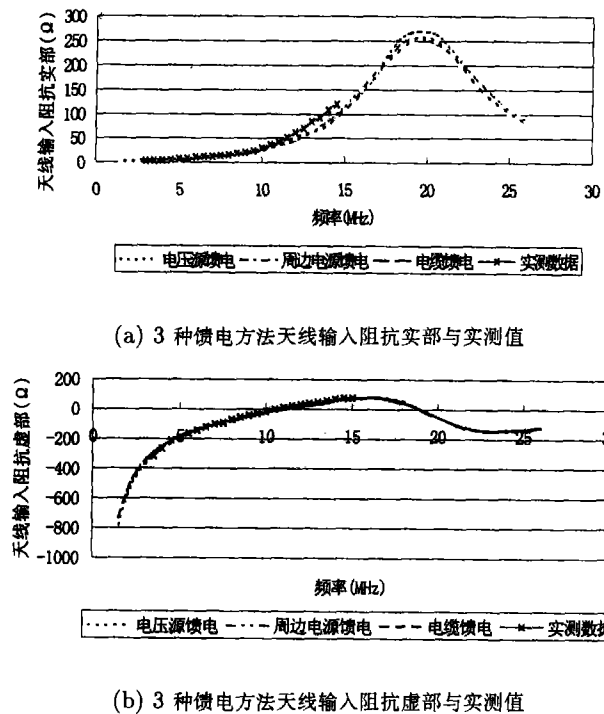


图 2

径为 0.22m。由图中可以看出 3 种馈电方法计算的结果与实际测试在频率低端非常一致。在频率高端略有差异, 这种差异是由于天线实际架设时, 用网格作成的地网代替导体平面所引起的。本文在以下的计算中均采用周边电源激励法。

2.2 表面阻抗法

对于架设在介质平面上的单极天线, 计算其辐射特性时需考虑介质面的存在。如设介质的介电常数为 ϵ , 电导率为 σ , 则电磁波在介质内的相对波长为 $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{|\epsilon_r + \sigma / (j\omega\epsilon_0)|}$, 其中 $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$, λ_0 为自由空间的波长。用 FDTD 法计算天线辐射特性时, 为保证计算精度, 要求网格空间 $\Delta S < \lambda / 10$ 。对有耗介质, 其内部电磁波的波长 $\lambda < \lambda_0$, 所以计算有耗介质中电磁波特性时, 要减小网格空间尺寸, 这样势必增加了计算量和存储空间。为解决这个问题, 本文采用表面阻抗法计算天线的辐射特性。

对于介质, 其频域的表面阻抗可以表达如下:

$$Z(\omega) = \sqrt{\mu_0 / (\epsilon + \sigma / (j\omega))} \quad (6)$$

在高频波段, 由于 $\sigma / (j\omega\epsilon) \gg 1$, 所以有

$$Z(\omega) \approx \sqrt{j\omega\mu_0 / \sigma} \quad (7)$$

介质分界面上, 切向电场可通过该点的磁场值获得:

$$E_x(\omega) = Z_s(\omega)(\hat{n} \times H_y(\omega)) = [Z_s(\omega) / (j\omega)] [j\omega(\hat{n} \times H_y(\omega))] \quad (8)$$

由于 FDTD 是在时域进行计算的, 需将上式转为时域表达式, 通过变换可得下式^[5]:

$$E_x(t) = Z(t) * \partial(\hat{n} \times H_y(t)) / \partial t \quad (9)$$

* 表示 $Z(t)$ 与 $H_y(t)$ 的卷积。 $Z(t)$ 为时域表面阻抗:

$$Z(t) = \sqrt{\mu_0 / (\pi\sigma t)}, \quad t > 0 \quad (10)$$

为使 (10) 式能用于 FDTD 的计算中, 必须将其离散化。设在 Δt 时间范围内 $H_y(t)$ 为常数, 则 (9) 式离散化后变为

$$E_x^n(i, j + 1/2, k_0) = \sqrt{\frac{\mu_0 \Delta t}{\pi\sigma}} \sum_{m=0}^{n-1} Z_0(m) \frac{H_y^{n-m+1/2}(i, j + 1/2, k_0) - H_y^{n-m-1/2}(i, j + 1/2, k_0)}{\Delta t} \quad (11)$$

式中

$$Z_0(m) = \int_m^{m+1} \frac{1}{\sqrt{\alpha}} d\alpha \quad (12)$$

在 FDTD 计算中, 切向磁场值可通过该点的前一个时间步的磁场值和前半步的时间步的周围电场值获得, 即

$$H_y^{n+1/2}(i, j + 1/2, k_0 + 1/2) = a_0 H_y^{n-1/2}(i, j + 1/2, k_0 + 1/2) + a_1 [E_x^n(i, j + 1/2, k_0 + 1) - E_x^n(i, j + 1/2, k_0) + a_2 [-E_z^n(i, j + 1, k_0 + 1/2) + E_z^n(i, j, k_0 + 1/2)]] \quad (13)$$

由于网格空间非常小, 故有

$$H_y^n(i, j + 1/2, k_0) \approx H_y^n(i, j + 1/2, k_0 + 1/2) \quad (14)$$

将 (11) 和 (14) 式代入 (13) 式, 可得

$$\begin{aligned}
 H_y^{n+1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) &= \frac{a_0 + Z_0(0)Z_1a_1}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} H_y^{n-1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) \\
 &+ \frac{a_1}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} E_x^n(i, j+1/2, k_0+1) + \frac{a_2}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} [-E_z^n(i, j+1, k_0+1/2) \\
 &+ E_z^n(i, j, k_0+1/2)] - \frac{Z_1}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} \sum_{m=1}^{n-1} Z_0(m) [H_y^{n-m+1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) \\
 &- H_y^{n-m+1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2)] \quad (15)
 \end{aligned}$$

其中

$$Z_1 = \sqrt{\mu_0 \Delta t / (\pi \sigma)} \quad (16)$$

由 (15) 式可知, 计算第 $n+1/2$ 时间步的值, 需存储该点第 $n+1/2$ 步之前的所有磁场值。为减少存储空间, 应用 Prony 法^[6] 将 $Z_0(m)$ 展开为指数和的形式:

$$Z_0(m) = \sum_{i=1}^N b_i e^{m a_i} \quad (17)$$

设 $F_i^n = \sum_{m=1}^{n-1} b_i e^{m a_i} [H_y^{n-m+1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) - H_y^{n-m-1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2)]$, 这样由第 $n-1$ 个时间步可递推出第 n 个时间步的值:

$$F_i^n = b_i e^{a_i} [H_y^{n-1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) - H_y^{n-3/2}(i, j+1/2, k_0+1/2)] + e^{a_i} F_i^{n-1} \quad (18)$$

将 (18) 式带入 (15) 式可得

$$\begin{aligned}
 H_y^{n+1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) &= \frac{a_0 + Z_0(0)Z_1a_1}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} H_y^{n-1/2}(i, j+1/2, k_0+1/2) \\
 &+ \frac{a_1}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} E_x^n(i, j+1/2, k_0+1) + \frac{a_2}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} [-E_z^n(i, j+1, k_0+1/2) \\
 &+ E_z^n(i, j, k_0+1/2)] - \frac{Z_1}{1 + Z_0(0)Z_1a_1} \sum_{i=1}^N F_i^n \quad (19)
 \end{aligned}$$

由 (19) 式可以看出, 存储空间由原来的 n_{\max} 减少到 N 个。

由以上推导可知, 在 FDTD 法中应用表面阻抗法, 不需要求解界面上的切向电场, 只需按 (19) 式计算距离介质表面 $\Delta Z/2$ (ΔZ 为 z 方向的空间网格尺寸) 处磁场切向分量, 其它各点的电磁场均按经典 FDTD 法计算。

3 计算结果

由于架设在介质平面上的单极天线是轴对称的, 所以可以采用二维 FDTD 计算空间内各场点的值, 然后利用 (5) 式计算天线的输入阻抗。取单极天线的高度分别为 9.375m, 18.75m, 天线半径分别为 0.10m, 0.21m, 表 1 给出了天线架设在不同介质平面上时, 天线的输入阻抗。

为了减少发射功率的损耗, 往往在有耗介质平面上放置有限的导体平面替代无限大导体平面, 以提高天线的发射效率。图 3 给出了在介电常数为 $\epsilon = 4$, 电导率为 $\sigma = 2 \times 10^{-3}$ 的介质平面上, 放置不同直径的导体平面时, 天线的辐射阻抗。计算频率 $f = 12\text{MHz}$ 。

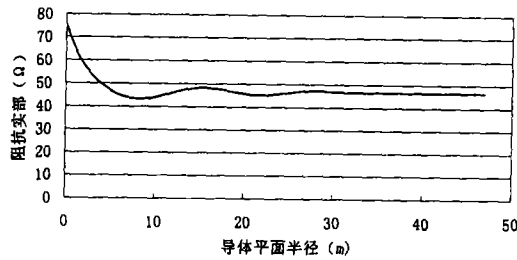
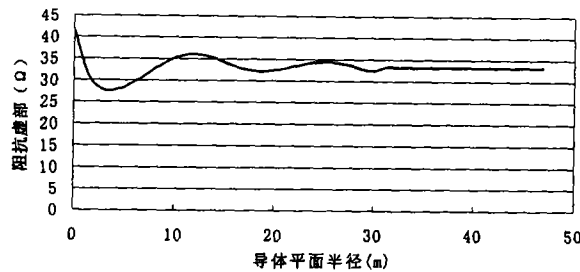
(a) 输入阻抗实部随导体平面半径的变化 ($f = 12\text{MHz}$)(b) 输入阻抗虚部随导体平面半径的变化 ($f = 12\text{MHz}$)

图 3

表 1 不同介质平面上单极天线的输入阻抗

频率 (MHz)	$\epsilon = 4$	$\sigma = 0.002$	$\epsilon = 30$	$\sigma = 0.003$	$\epsilon = 80$	$\sigma = 0.001$	$\epsilon = 70$	$\sigma = 5$
4.0	$93.0 + j52.9$		$70.4 + j47.2$		$60.7 + j43.8$		$46.9 + j38.3$	
8.0	$109.1 + j50.4$		$73.3 + j44$		$62.5 + j40.7$		$49.7 + j35.9$	

4 结 论

从表 1 可以看出, 天线的输入阻抗随地面损耗的降低而减少, 这种减少是单调的。但如果在地面上铺设圆平面导体时, 天线的输入阻抗并不随导体平面尺寸的增大而单调减小, 而是震荡式减小, 有时天线的输入阻抗会小于完全导体平面上单极天线的输入阻抗。随着导体平面尺寸的增加, 最终趋近于完全导体平面上单极天线的输入阻抗。这种现象表明, 导体平面与介质地之间存在的突变, 会引起电磁波的反射使根部的电流发生变化, 而这种影响与圆导体平面的尺寸有关。

实际天线架设时, 往往用网格组成的地网替代完全导体平板, 这时地面的等效阻抗不为零, 计算时可以利用 R. A. Frank^[7] 给出的公式计算地面的等效阻抗, 然后利用本文方法计算天线的输入阻抗。

参 考 文 献

- [1] J. G. Maloney, G. S. Smith, The use of surface impedance concepts in the finite difference time domain method, IEEE Trans. on Electromagnetic Compat., 1992, EC-40(1), 38-48.
- [2] J. H. Beggs, R. J. Luebbers, Finite difference time domain implementation of surface impedance boundary condition, IEEE Trans. on Antenna and propagation, 1992, AP-40(1), 49-56.
- [3] G. M. Jams, S. S. Glmn, Accurate computation of the radiation from simple antennas using the finite difference time domain method, IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1990, AP-38(7), 1059-1068.

- [4] L. Chen, T. Uno, FDTD method analysis of a mono-pole antenna mounted on a conducting rectangular box, IEEE AP-S Int. Symp. Dig., 3, 1992, 1670-1678.
- [5] K. Karls, J. L. Raymond, Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, London, CRC Press, Inc. 1993, Chapter 9.
- [6] F. B. Hildebrand, Introduction to Numerical Analysis, New York, Dover, 1974, 457-462.
- [7] R. A. Frank, Design of optimum buried-conductor RF ground system, Proc. IRE 1952, 846-852.

ANALYZING HF ANTENNA CHARACTERISTICS ON DIELECTRIC PLANE

Deng Weibo Liu Yongtan Liu Xiaoguo

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract In this paper, Finite Difference Time Domain(FDTD) method is used to calculate the radiation characteristics of the antenna located on loss ground. For FDTD method, there are different feed models to calculate the input impedance of antenna. The results calculated by different feed models are compared with each other. The important point of the paper is to calculate the radiation characteristics of monopole on dielectric plane, and analyzes input impedance change with the size change of conducting ground system on the surface of dielectric plane.

Key words FDTD, Surface impedance, Antenna

邓维波: 男, 1961年生, 副教授, 主要研究方向为天线、电磁场及电波传播。
刘永坦: 男, 1936年生, 院士, 主要研究方向为雷达系统。
刘小国: 男, 1965年生, 高工, 主要研究方向为天线和电磁场。