

单极粗振子天线的超宽带性能分析

刘刚, 秦建军, 王春阳, 师剑军

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:采用矩量法研究了单极粗振子天线的超宽带性能,分别计算了该天线的电流分布、输入阻抗、辐射方向图以及驻波比随频率的变化规律。通过分析表明该天线具有良好的超宽带性能。在频率 $f_0 = 1.4 \text{ GHz}$,设计了一个臂长为 50 mm 、直径为 5 mm 、底部接在无限大导体平面上、采用 50Ω 同轴线馈电的单极粗振子天线,实测结果与理论分析结果基本吻合,并在实用中验证了它的超宽带性能。

关键词:单极粗振子天线;超宽带;矩量法

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2002)04 - 0036 - 04

对称振子天线或单极振子天线是一个古老而很有实际意义的天线^[1]。该类型天线结构简单、应用广泛。一般的振子天线是一种谐振天线,频带较窄,因此人们在应用中研究出许多展宽天线频带的方法,发展出多种形式的具有宽频带性能的天线,如双锥天线、对数周期天线、阿基米德螺旋天线等。超宽带天线是1955~1958年期间开始发展起来的一种新型天线,又叫无频变天线,它可以把带宽扩展到40:1或更大^[2]。对一单振子天线,为了展宽频带,通常是降低阵子的长度直径比 l/a (简称长细比),这种方法对改善工作频带内的阻抗特性具有明显的效果,随着长细比的减小,输入阻抗随频率变化的敏感性减小,从而改善阻抗的频率特性。本文讨论的单极粗振子天线,就是基于上述出发点并采用矩量法来进行分析的。

1 理论分析

1.1 单极粗振子的矩量法模型

如图1所示,假定单极粗振子的结构尺寸总长为 $0.5L$,半径为 a ,将振子首先进行分段,每段长度为 Δ ,且第一小段从振子上端计起。

振子天线上的电流近似为正弦分布,采用分段正弦基,电流分布可表示为

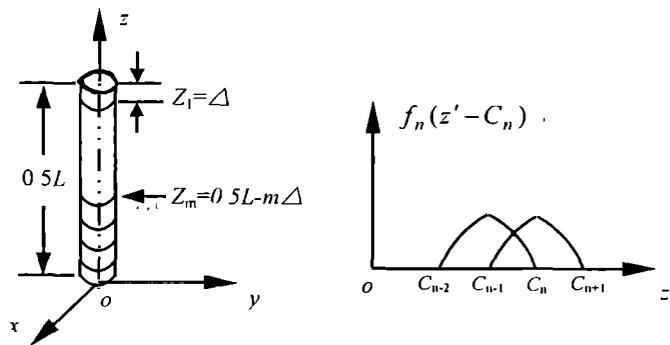


图1 天线的分段和分段正弦基函数示意图

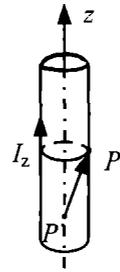
$$I(z) = \sum_{n=1}^N \alpha_n f_n(z, -z_n) \tag{1}$$

$$\text{式中: } f_n(z - z_n) = \begin{cases} \frac{\sin[k(z - z_{n-1})]}{\sin[k(z_n - z_{n-1})]} \cdots z_{n-1} \leq z < z_n \\ \frac{\sin[k(z_{n+1} - z)]}{\sin[k(z_{n+1} - z_n)]} \cdots z_n \leq z < z_{n+1} \end{cases}, (n = 1, 2, \dots, N)$$

式中:用带“'”的坐标表示源点,不带“'”的坐标表示场点。为加快收敛速度,检验函数选取与基函数相同的

形式,即采用伽略金法。

由于振子较粗 $a/\lambda \geq 0.01$, 可以认为振子上的电流主要分布于导体表面,且沿纵向(z 方向)分布,其产生的电场可以近似认为只有 E_z 分量(振子远区场),如图 2 所示。选取第 n_i 个选配点,将基函数和检验函数求内积分可得满足求解线天线电流分布的 Pocklington 的阻抗矩阵如下^[3]



$$Z_{m \ n} = - \int_{z_{m-1}}^{z_{m+1}} f_m(z - z_n) \cdot E_{zn} dz \quad (2)$$

式中 E_{zn} 的表达式为^[4]

$$E_{zn} = \frac{j30}{\sin k\Delta} \left[\frac{e^{-jkR_{n-1}}}{R_{n-1}} - 2\cos(k\Delta) \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} + \frac{e^{-jkR_{n+1}}}{R_{n+1}} \right] \quad (3)$$

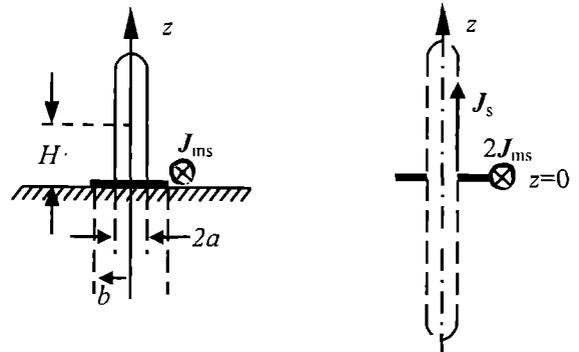
图 2 源点与场点示意图

式中, Δ 是一个小段的长度,如图 1 所示, $R_{n+1} = \sqrt{a^2 + (z - z_{n+1})^2}$,

$R_n = \sqrt{a^2 + (z - z_n)^2}$, $R_{n-1} = \sqrt{a^2 + (z - z_{n-1})^2}$ 。

虽然,正弦激励电源的数学模型常常是正确的,但有时为了更精确的求天线输入阻抗,也采用磁流环圆盘模型来描写同轴线激励天线振子的情况^[3]。如果工作频率能使条件 $kb < 0.1$ 近似满足,而且图 3 中的同轴线开口端的 TEM 模逼近,就能得到天线导纳的十分满意的结果^[5]。

如图 3 所示,应用等效定理以及镜像原理,同轴线激励单极振子天线可以等效为只有表面电流 J_s 的空腔。可以求得磁流环 J_{ms} 在天线表面产生的沿 z 轴的电场为^[4]



$$E_z = \frac{V}{\ln(b/a)} [G(R_a) - G(R_b)] \quad (4)$$

式中: $R_a = \sqrt{a^2 + z^2}$, $R_b = \sqrt{b^2 + z^2}$ 。

将 E_z 的表达式代入^[3]

$$V_m = \int_{z_{m-1}}^{z_{m+1}} E_z f_m(z - z_n) dz \quad (5)$$

图 3 同轴线激励单极天线的等效系统

可得矩阵方程:

$$ZI = V \quad (6)$$

求解该方程后可得到电流 $I(z) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n f_n(z)$ 中的系数 α_n ,再代入 $I(z)$ 表达式中即可求得天线上的电流分布,进而计算天线的其它参数。

1.2 天线远区场的计算

该单极粗振子天线是垂直立于无限大导体平面上的,可按对称振子远区辐射场的情况处理,其电场为^[4]

$$E(\theta) = \frac{j\omega\mu}{4\pi r} e^{-jkr} \sin\theta \sum_{n=0}^N \left| \frac{\alpha_n}{\sin k\Delta} \left[\int_{z_{n-1}}^{z_n} \sin k(z - z_{n-1}) e^{jkz} \cos\theta dz + \int_{z_n}^{z_{n+1}} \sin k(z_{n+1} - z) e^{jkz} \cos\theta dz \right] \right| \quad (7)$$

1.3 天线的方向性函数

对于图 2 所示的单极粗振子天线的辐射情况,其归一化方向函数为^[5]

$$|F(\theta)| = \left| \frac{f(\theta)}{f(0^\circ)} \cos\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin\theta\right) \right| \quad (8)$$

式中: $\cos\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin\theta\right)$ 为考虑地面对单振子天线的方向函数因子, H 为天线中点到地面的距离。

1.4 天线输入阻抗计算

$$Z_m = \frac{V(0)}{I(0)} \quad (9)$$

式中: $V(0)$ 和 $I(0)$ 分别为天线输入端的电压和电流。经计算在中心频率 $f_0 = 1.4$ GHz 下天线的输入阻抗为

46.667 + j8.318 (Ω), 可近似与 50 Ω 的同轴线相匹配。

2 计算结果及宽带性能分析

对于尺寸为 $l = 50 \text{ mm}$, $a = 2.5 \text{ mm}$, 中心频率为 $f_0 = 1.4 \text{ GHz}$ 而设计的天线而言, 其在各频率点的电流分布、方向图、输入阻抗、及驻波比随频率变化的结果分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

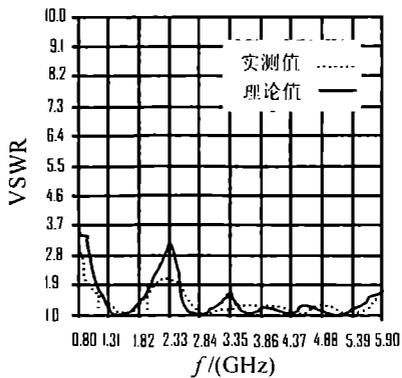


图 4 频率 - 驻波比曲线图

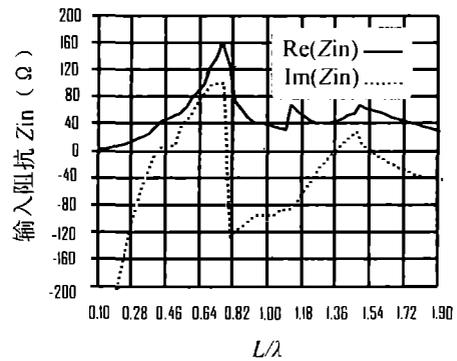


图 5 输入阻抗与 L/λ 的关系曲线

要求驻波比 $\rho \leq 1.8$ (满足工程应用要求) 时, 有两个频段范围满足要求: 一个是 $f \approx 1.10 \sim 2.05 \text{ GHz}$; 另一频率范围为 $f \approx 2.50 \sim 5.9 \text{ GHz}$ 以上。其阻抗匹配带宽分别达到 $\Delta f/f_0 = 0.95/1.4 \approx 68\%$ 和 $\Delta f/f_0 = 3.5/1.4 \approx 2.5:1$ 。可见该单极粗振子天线对于频率 $f > 2.5 \text{ GHz}$ 以上的阻抗匹配性能更好, 有着较好的超宽带性能。在 $f = 1.4 \text{ GHz}$ 附近, 它是一个良好的宽带天线。实测的驻波比随频率变化的曲线如图 4 中的虚线所示, 二者的差异主要是由于理论计算中, 将振子底部的金属板当成无限大来看待的缘故, 实际的是一个尺寸有限的金属板。

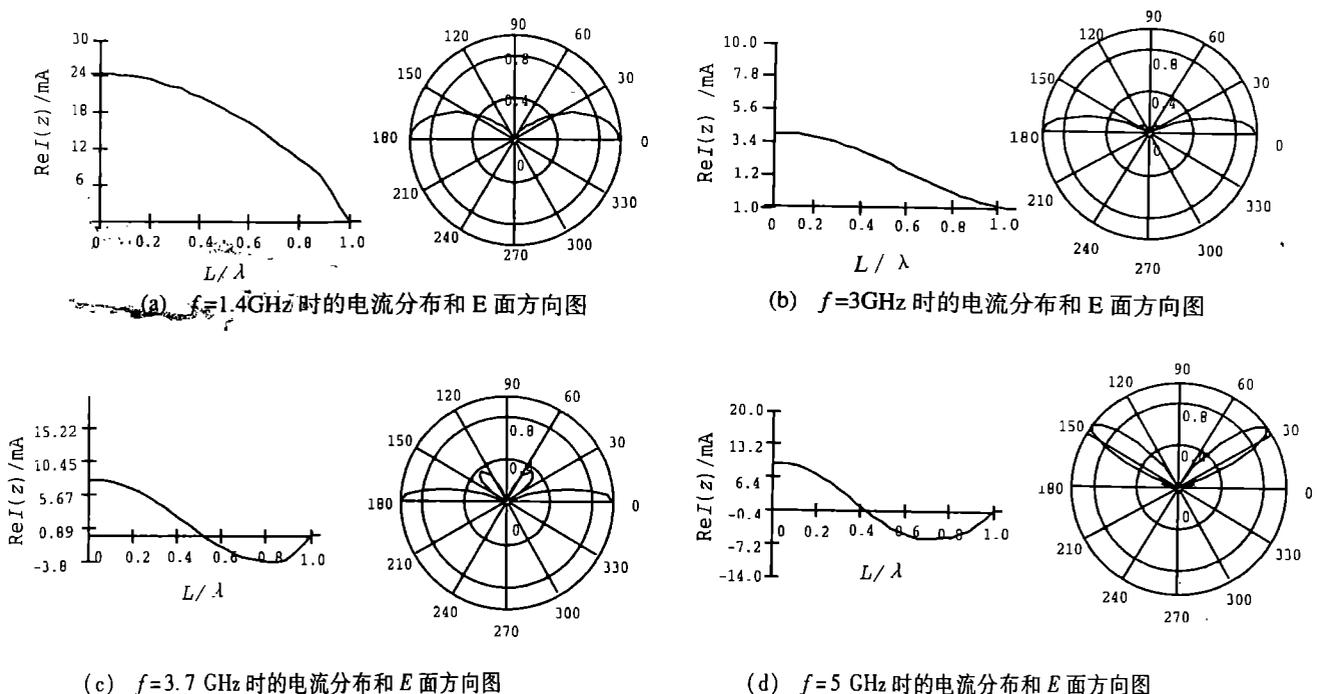


图 6 几个典型频率点上的电流分布和 E 面方向图

可见, 当 $f \geq 3.0 \text{ GHz}$ 时, E 面方向图将出现栅瓣。H 面方向图始终为一个大圆 (图 6 中没有给出)。对

于要求全向辐射的情况下(实际应用的要求),在不出现栅瓣的情况下,其方向图带宽达 $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{3}{1.4} = 2.14:1$,具有良好的超宽带性能^[7]。

3 结论

$\ell/\lambda \ll 0.1$ 时,可将振子看成电基本振子,并已有现成的分析结论;而对于 $0.1 < \ell/\lambda < 0.5$ 、半径 $a/\lambda \geq 0.2$ 较粗的单极振子,通过以上的分析,可以看出,它是一个超宽带的全向辐射天线,输入阻抗和方向图都具有良好的超宽带性能,且理论分析结果和实际测试结果解基本吻合,依此制作的天线,已在微功率雷达运动传感器的实际应用中得到了验证,为今后超宽带天线的设计提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] 林昌禄. 近代天线设计[M]. 北京:人民邮电出版社,1990.
- [2] 杨恩耀,杜加聪. 天线[M]. 北京:电子工业出版社,1984.
- [3] 波波维奇 B D,杨 渊. 导线天线的分析与综合[M]. 北京:人民邮电出版社,1987.
- [4] Warren L, Stutzman. ANTENNA THEORY AND DESIGN, ISBN 0 - 471 - 04458 - X[M]. New York: Printed in the united states of America, 1981.
- [5] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京:电子工业出版社,1985.
- [6] 谢处方,邱文杰. 天线原理与设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985.
- [7] 王元坤,李玉权. 线天线的宽带技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [8] [苏]阿斯塔宁 ЛЮ,考斯泰列夫 АА. 超宽带天线测量基础[M]. 杨逢春,王积勤. 长沙:国防科技大学出版社,2000.
- [9] 吕善伟,杨学斌,贾晓笑,等. 一种宽频带振子天线[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(1):8-11.

(编辑:田新华)

Analysis of Ultra Wide Band Capability of the Thick Single Pole Vibrator Antenna

LIU Gang, QIN Jian - jun, WANG Chun - yang, SHI Jian - jun

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyaun, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The ultra wide band capability of the thick single pole vibrator antenna is studied with the method of moment (MOM) in this paper. The antenna's current distribution, input impedance, radiation direction patterns, the varying characteristics of voltage standing wave ratio (VSWR) with frequency are studied respectively. The results show that this antenna has a good ultra wide band capability. A thick single pole vibrator antenna, 50mm long and 5mm in diameter, fed with 50Ω coaxial line and with its base connected to an infinite large conductor plate, is designed at frequency $f_0 = 1.4\text{GHz}$. The testing results are satisfied with the theoretical ones on the whole. And the ultra wide band capability is proved and verified in practical use.

Key words: thick single pole vibrator antenna; ultra wide band; method of moment