

模式匹配法分析有限圆盘地面单极天线

孙保华, 张福顺, 刘其中

(西安电子科技大学天线研究所, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文给出了一种严格分析有限尺寸圆盘地面单极天线的新方法——模式匹配法。该方法通过在天线上、下两边平行放置两个无限大良导电平面, 以及合理划分区域, 使得每个分区中的场分量能够采用柱谐展开式解析表示, 且展开系数由导体表面边界条件及分区交界处场分量连续条件加以确定。在此基础上, 进一步分析天线的输入阻抗等电性能。计算结果表明: 对不同尺寸圆盘地面单极子天线, 理论分析与文献中的实验结果均十分吻合。同时, 由于场量的解析表示, 使得计算速度较快。

关键词: 模式匹配法; 有限圆盘; 单极天线

中图分类号: TN821⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)06-0832-03

Analysis of Monopole Antennas on Circular Disk Using Mode Matching Method

SUN Bao-hua, ZHANG Fu-shun, LIU Qi-zhong

(Institute of Antennas, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A new method, mode matching, is presented for the analysis of monopole antennas on a circular disk. This approach is facilitated by placing two parallel PEC grounds above and below the antenna and dividing the space into several subregions reasonably, thus allowing use of cylindrical harmonic expansions in each subregion. Then expansion coefficients are found by enforcing the PEC boundary condition and continuity condition at the regional boundary surface. The current and input impedance of monopole antennas on disk is computed based on the above calculation. For monopole antennas with different circular disc in radius, this method can lead to very good agreements between the theoretical results and the experimental results available in literatures. In addition, this method is efficient since the fields are expressed in closed form.

Key words: mode matching method; circular disk; monopole antenna

1 引言

单极天线因其结构简单、易于加工、便于携带以及水平全向辐射等优点, 在现代通信系统中, 有着十分广泛的用途。实用中, 这类天线通常具有一个有限尺寸的地面, 如金属圆盘等。有限尺寸圆盘地面单极天线, 较早采用矩量法与 GTD 相结合的方法^[2~4]分析, G. A. Thiele^[2]发现, 当圆盘地面尺寸较小时(小于 0.2λ), 理论分析与实验结果相差很大, 说明该方法已不再适用。J. R. Richmond^[5]采用矩量法分析上述天线, 可能是由于计算中天线顶端电流未予考虑, 使得只有加长振子长度, 计算结果才能与文献[1]中的实验结果相吻合。

模式匹配法分析圆柱形结构天线^[5~7], 是近年来由 M. A. Morgan 和 F. K. Schwing 提出的一种新的分析方法, 从已有的文献来看, 仅限于分析具有无限大地面的天线结构, 如无限大地面上单极天线^[6]和顶电容加载单极子天线^[7,8]等。本文通过引入两个良导电(PEC)平面以及合理划分区域, 得到一种分析有限尺寸圆盘地面单极子天线的新方法, 与其它方法相比, 具有计算精度高、适用范围广等优点, 同时, 由于计算中所

涉及的场分量和内积运算均解析表示, 因而计算速度较快。

2 基本原理

2.1 计算模型

图1所示为本文使用的理论分析模型。在单极子天线的上下两边, 平行放置了两个无限大的良导电(PEC)平面, 它们与圆盘地面的间距分别为 l 和 d 。单极子天线高度为 h , 半径为 a , 圆盘地面的半径为 b 。建立柱面坐标系, 使其坐标原点位于圆盘的中心, z 轴沿单极子天线轴心向上。

将两个 PEC 平面之间的空间划分成四个区域, 称作分区, 如图1所示。分区的目的, 是为了将来每个区域中的场分量能够采用柱谐展开式解析表示。信号源采用理想电压源模型, 计算结果表明, 该模型不仅可使问题得以简化, 同时也可以获得满意的计算结果。

2.2 基本公式

在柱面坐标系中, 上述四个分区中的电磁场分量, 均可以采用级数的形式解析表示出来^[7~10], 例如在 I 区($a \leq \rho \leq b, 0 \leq z \leq l$)有:

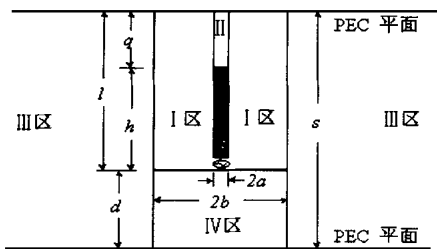


图 1 理论分析模型

$$E_z^I(\rho, z) = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \sum_{n=0}^{N_1} \gamma_n^2 [a_n H_0^{(1)}(\gamma_n \rho) + b_n H_0^{(2)}(\gamma_n \rho)] \cos\left(\frac{n\pi z}{l}\right) \quad (1)$$

$$H_x^I(\rho, z) = \sum_{n=0}^{N_1} \gamma_n [a_n H_1^{(1)}(\gamma_n \rho) + b_n H_1^{(2)}(\gamma_n \rho)] \cos\left(\frac{n\pi z}{l}\right) \quad (2)$$

式中 N_1 为 I 区的模式数, $H_x^{(1)}$ 和 $H_x^{(2)}$ 分别为第一类和第二类 x 阶的 Hankel 函数, γ_n 为 n 阶模式的波数, $\gamma_n = \sqrt{k_0^2 - (n\pi/l)^2}$, k_0 是自由空间的波数。 a_n 和 b_n 为待确定的展开系数。当 γ_n 为虚数时, 开方运算应取负根以满足物理意义。

同理, II 区、III 区和 IV 区中的电磁场分量均可采用含有 Hankel 函数或 Bessel 函数解析表示。需要提起的是, 在 II 区和 IV 区中存在 $\rho=0$ 的情况, 因此上述两个区域中的电场和磁场应分别采用 0 阶和 1 阶的 Bessel 函数表示; 而在 III 区中为了满足 $\rho \rightarrow \infty$ 成立, 电场和磁场应分别采用第二类 Hankel 函数表示。

利用天线表面电场边界条件以及分区交界处电磁场连续条件, 通过内积运算, 即可得到有关各个分区电磁场展开系数 (a_n, b_n 等) 的多个矩阵方程。求解上述矩阵方程, 从而得到每个分区电磁场展开系数, 亦即确定了每个分区中的电磁场分量。需要指出的是, II 区与信号源存在共同边界, 馈源采用理想电压源模型, 即认为馈电间隔无限小。在求解矩阵方程时, 特别是对于地面尺寸较大 ($b > 0.5\lambda$) 的情况, 为了改善方程组条件数很差, 本文采取一种变换, 即在矩阵方程中, 对应于电场和磁场展开系数的矩阵元素分别除以 $H_1^{(1)}(\gamma_n b)$ 和 $H_1^{(2)}(\gamma_n b)$, 从而使得变换后的方程组条件数得到改善, 通常的数值方法均可精确求解。

于是, 单极子天线和圆盘地面上的电流很容易由导体表面磁场边界条件 $J_s = \hat{n} \times H$ 求出, 即:

$$I_{\text{wire}}(z) = 2\pi a J_{\text{wire}}(z) = 2\pi a H^{\parallel}(a, z) \quad (3)$$

$$J_{\text{disk}}(\rho) = J_s^I(\rho) + J_s^{IV}(\rho) = H^{\parallel}(\rho, 0) - H^{\perp}(\rho, 0) \quad (4)$$

式中 I_{wire} 和 J_{wire} 单极子天线上的电流和电流密度; J_s^I 和 J_s^{IV} 分别表示圆盘上、下表面电流密度, J_{disk} 表示上、下表面电流密度之和; H^{\perp} 、 H^{\parallel} 和 H^{\perp} 分别表示 I 区、II 区和 IV 中的磁场分量。进一步求得天线输入阻抗为:

$$Z_{\text{in}} = \frac{V_0}{I_{\text{wire}}(0)} \quad (5)$$

3 算法应用

3.1 PEC 平面的影响

在图 1 所示的理论分析模型中, 圆盘地面单极子天线上、下两边的无限大 PEC 平面, 是分析方法需要而人为放置的, 该条件的引入, 势必会给原有天线性能带来一定的影响。不过, 由于圆盘地面单极子天线在 z 轴方向辐射为零, 当 PEC 平面离开天线一定距离时, 其存在对原有天线的影响已变得很小, 因而对计算结果造成的误差也很小。计算结果发现, $d = l \geq 1.8\lambda$ 时, 天线输入阻抗随 l 和 d 的变化已很小。不同尺寸圆盘地面的单极子天线, 均存在着与此相似的规律, 一般地, 在三个有限圆盘地面单极子天线结构参数中 (h, a 和 b), 与两个无限大 PEC 平面间距选择最为相关的是金属圆盘半径 b , 这主要是因为一方面天线振子通常较细, 另一方面天线正上和正下方辐射均为零, 天线辐射场经下两个无限大导电平面反射后的场主要落在金属圆盘上的缘故。圆盘半径 b 较小, 间距 l 和 d 可适当减小, 反之, b 较大, 则间距 l 和 d 应适当增大以减小其影响。对于 $h \leq \lambda/4, b < 3.0\lambda$ 有限圆盘地面单极子天线, 计算中发现只需选取 $d, l \geq 2.0\lambda$, 即可获得较好的计算精度。间距 l 和 d 的选择, 是建立在数值计算基础上的, 其它不同结构尺寸的天线, 均可通过几次简单的数值计算加以确定。

3.2 模式数目选取

模式匹配法中, 适当选取模式数目也是十分关键的, 特别是相邻分区模式数的比例^[9]。为了保证圆盘地面边缘电流为零, 即 I 区、III 区和 IV 区在该处磁场连续, 需要^[8]:

$$N_1/N_4 = 1/d \quad (6)$$

$$N_3 = N_1 + N_4 \quad (7)$$

在 I 区、II 区和 III 区, 有:

$$N_1/N_2 = h/q \quad (8)$$

依据以上三个关系式, 只要给出四个模式数中的一个, 例如 N_1 , 另外三个也就确定了。 N_1 的选择与高度 l 有关, 但一个总的原则就是, 不仅要保证最低阶模式存在, 还要有一定的消失模式存在。 N_1 太小, 计算结果不收敛, N_1 过大, 则会使组成的线性方程组条件数变差, 因而 N_1 存在适当选择。计算表明, $N_1 = 80 \sim 160$ 均能得到较好的计算结果。

3.3 计算实例

首先, 让我们来考察圆盘地面尺寸较小时的情况。天线结构参数为 $b = 0.2 \sim 0.5\lambda, h = 0.25\lambda, a = 0.003\lambda$, 利用本文介绍的模式匹配法对该天线进行分析, 并将计算结果与文献[2]实验结果同绘于图 2 中。尽管实验数据存在一定的误差, 但仍不难看出, 理论计算与实验结果十分吻合。

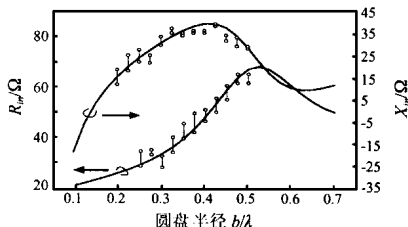


图 2 小尺寸圆盘地面单极子天线输入阻抗随地面尺寸变化曲线

模式匹配法不仅适用于小接地面的情况,同时也适用于圆盘地面尺寸较大的情况.图3所示曲线为模式匹配法计算结果,天线高度 $h = 0.224\lambda$, 半径 $a = 0.003\lambda$, $b = 0.9 \sim 2.1\lambda$. 图中的实验结果,是由 A. S. Meier 在文献[1]中所作的测试结果.同样可以看到,利用本文方法得到的计算结果,不论是电阻曲线还是电抗曲线均吻合良好.

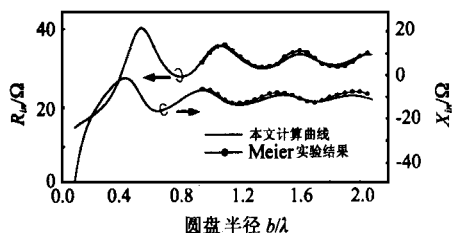


图3 大尺寸圆盘地面单极子天线输入阻抗随地面尺寸变化曲线

模式匹配法还可用于圆盘地面半径很小的情况,而这种情况采用矩量法,常常会因为分段太小而失效.图4给出一组圆盘地面半径 $b = 0.01 \sim 0.1\lambda$ 时的天线输入阻抗计算曲线.

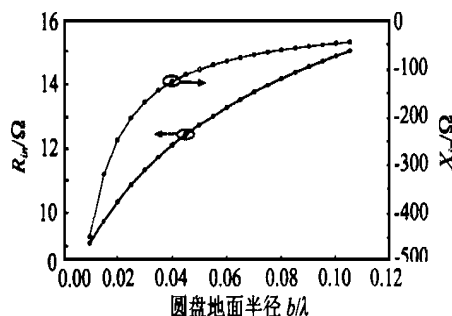


图4 圆盘半径 $b = 0.01 \sim 0.1\lambda$ 时天线输入阻抗

4 结论

圆盘地面单极天线尽管结构非常简单,但其分析却较为复杂.本文给出的模式匹配法,是一种有效分析这一类天线的新方法.计算实例表明,对不同尺寸圆盘地面单极子天线,该方法均能获得较高的计算精度.另外,由于计算过程中矩阵方程中的每一个元素,都可以解析表示而无需计算积分,因此,和其它一些分析方法(如矩量法等)相比,该方法不失为一种计算速度较快的分析方法.

参考文献:

- [1] A S Meier, W P Summers. Measured impedance of vertical antennas over finite ground planes [J]. Proc. IEEE, 1949, 37(6): 609-616.
- [2] G A Thiele. A hybrid technique for combining moment method with the geometrical theory of diffraction [J]. IEEE Trans., 1975, AP-23(1): 62-69.
- [3] K H Awadalla, T S M Macleena. Input impedance of a monopole at the center of a finite ground plane [J]. IEEE Trans., 1978, AP-26(3): 244-248.
- [4] K H Awadalla and T S M Macleena. Monopole antenna at center of circular ground plane: input impedance and radiation pattern [J]. IEEE Trans., 1979, AP-27(3): 151-154.
- [5] J H Richmond. Monopole antenna on circular disc [J]. IEEE Trans., 1984, AP-32(12): 1282-1287.
- [6] M A Morgan, et al. Computation of monopole antenna currents using cylindrical harmonics [J]. IEEE Trans., 1990, AP-38(7): 1130-1133.
- [7] M A Morgan, F K Schwing. Eigenmode analysis of dielectric loaded top hat monopole antennas [J]. IEEE Trans., 1994, AP-42(1): 54-61.
- [8] L A Francavilla, et al. Mode matching analysis of top hat monopole antennas loaded with radially layered dielectric [J]. IEEE Trans., 1999, AP-47(1): 179-185.
- [9] R M Mittra, S W Lee. Analytical techniques in the theory of guided wave [M]. New York: Macmillan, 1971.
- [10] R F Harrington. Time harmonic electromagnetic field [M]. New York, McGraw Hill, 1971.

作者简介:



孙保华 1969年生,1996年在西安电子科技大学获工学硕士学位.现为该校博士研究生.



张福顺 副教授,1960年生于西安,1995年获硕士学位,1999年获博士学位.长期从事天线理论与工程的教学和科研,从1995年至今,共发表学术论文30余篇,获部级奖3项,主持10余项科研项目,主要著作有《天线测量》、《天线工程手册》、《近场测量误差分析与系统》.