

# 任意线天线阵分析及通用软件的实现<sup>\*①</sup>

蒋 芹<sup>\*\*</sup> 林昌禄

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

**【摘要】** 利用空域分解法对任意形状任意位置的多个线天线系统进行了分析,并用面向对象的程序设计思想编制了一套通用程序用于计算任意线天线的互耦、阵方向图等天线特性。在给定线天线系统基本参数情况下,添加一定程序便可给出最优天线配置方案。

**关键词** 空域分解法; 线天线系统; 互耦; 面向对象编程

中图分类号 TN820

线天线及其阵作为电子信息传输设备(如通信、雷达、电子对抗、三遥等)中电磁能量的发射和接收装置具有重要的作用,而对于线天线阵的场方向图综合,各单元阻抗互耦特性分析等最后往往归结为各阵单元上的电流分布。过去对线天线阵通常仅分析平行规则阵列天线,而对任意形状不同位置的线天线系统分析较少,更缺乏通用计算软件。

本文利用空域分解法(SDM)对于任意形状任意位置的线天线进行了分析<sup>[1]</sup>,并编制了一套通用软件用于分析任意形状线天线之间的互耦、阵方向图、增益等天线阵特性。该软件除可用于电磁兼容的预测分析之外,还对电子信息传输系统中线天线的优化设计、安装、调试有着重要价值。

## 1 理论分析

### 1.1 电场积分方程

理想导体存在于有限区域,在外电场  $\vec{E}^i(r)$  的作用下,导体表面产生感应电流  $\vec{J}(r')$ ,由  $\vec{J}(r')$  又辐射散射场  $\vec{E}^s(r)$ 。空间任一点  $P(r)$  处的总电场为

$$\vec{E}(r) = \vec{E}^i(r) + \vec{E}^s(r) \quad (1)$$

散射场 
$$\vec{E}^s(r) = -j\omega\vec{A}(r) - \nabla\Phi(r) \quad (2)$$

其中 
$$\vec{A}(r) = \mu \iiint_V \vec{J}(r') G(r|r') ds' \quad (3)$$

$$\Phi(r) = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \sigma(r') G(r|r') ds' \quad (4)$$

$\vec{A}(r)$ 、 $\Phi(r)$  分别为矢量磁位、标量电位,  $\sigma(r')$  为感应电荷密度,  $G(r|r')$  为三维空间标量格林函数

$$G(r|r') = \frac{1}{4\pi R} \exp(-jkR) \quad (5)$$

$R = |r - r'|$  为场点到源点的距离,由电流连续性原理可得

① 1997年8月28日收稿,1997年10月7日修改定稿。

\* 中国物理研究院基金资助项目

\*\* 女 22岁 硕士生

$$\vec{E}^s(r) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left[ \nabla \iint_{S'} \nabla' \cdot \mathcal{J}(r' | r') ds' + k^2 \iint_{S'} \mathcal{J}(r') G(r | r') ds' \right] \quad (6)$$

由导体表面电场边界条件可得算子方程

$$L[\mathcal{J}(r')] = \vec{E}^i(r) \cdot \hat{t} \quad (7)$$

其中  $L = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \left[ \hat{t} \cdot \nabla \iint_{S'} ds' G \nabla' \cdot + k^2 \hat{t} \cdot \iint_{S'} ds' G \right]$  磁能 (8)

式中  $\hat{t}$  为导体表面切向单位矢量;  $k = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  为工作波长。

### 1.2 线天线的广义阻抗矩阵方程

对于半径为  $a$ 、长度为  $L$  的细线天线, 当  $a \ll \lambda$  时则可认为电流沿导体表面径向均匀分布; 当  $a \ll L$  时, 进一步假定电流集中在导体轴上。因而, 在线天线问题的工程计算中, 式(7)的算子积分方程可以写成

$$L[\mathcal{I}(r')] = \vec{E}^i(r) \cdot \hat{t} \quad (9)$$

式中  $\mathcal{I}$  为待求的线天线轴向电流。采用伽略金法<sup>[3]</sup>, 选择分段正弦函数作为基函数和权函数, 则

$$\mathcal{I}(l) = \sum_{n=1}^N I_n \vec{F}_n(l) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 用权函数对式(9)取内积可得广义阻抗矩阵方程

$$[Z][I] = [V] \quad (11)$$

对于细线天线, 其阻抗矩阵元素

$$Z_{mn} = \frac{-1}{j\omega\epsilon} \left\{ \int_{l_n^-}^{l_n^+} \int_{l_m^-}^{l_m^+} [k^2 F_m F_n (l_m \cdot l_n) - F'_m F'_n] G(r | r') dl_m dl_n + \left[ F_m \int_{l_n^-}^{l_n^+} F'_n G(r | r') dl_n \right]_{l_m^-}^{l_m^+} \right\} \quad (12)$$

式中  $l_m, l_n$  分别为  $m$  和  $n$  单元振子的单位方向矢量;  $l_m, l_n$  为单元振子坐标变量;  $F_m, F_n$  和  $F'_m, F'_n$  为展开基函数及其一阶导数。上述所有公式中“ $\cdot$ ”表示两矢量点积。

### 1.3 空域分解法(SDM)<sup>[4]</sup>

许多数值分析方法最后往往归结为求解大型复数线性方程组。对于大系统问题, 矩量法由于计算时间、内存和矩阵病态等问题限制了其应用<sup>[3]</sup>。共轭梯度法也由于收敛率等问题并不是十分理想的方法, 近来又出现了其他一些方法, 例如追加法、网络分解法、矩阵分块法、空域分解法等。研究表明<sup>[4]</sup>, 空域分解法是求解大系统问题的有效方法之一。与其他数值方法相比, SDM 法可以降低计算量、减少存储量、克服矩量法的大矩阵病态问题, 而且适合于并行计算。

空域分解法是将系统分成若干个子域来求解的一种方法。记总天线阵列为  $C$ , 分为子阵  $C_1$  和  $C_2$ , 则  $C_1 \cup C_2 = C$ ,  $C_1 \cap C_2 = \Phi$ (空集)。设  $C_1$  的广义阻抗矩阵为  $Z_{11}$ ,  $C_2$  的广义阻抗矩阵为  $Z_{22}$ , 互阻抗矩阵为  $Z_{12}$  和  $Z_{21}$ 。则有如下迭代公式

$$[Z_{11}][I_1^{n+1}] = [V_1] - [Z_{12}][I_2^n] \quad (13)$$

$$[Z_{22}][I_2^{n+1}] = [V_2] - [Z_{21}][I_1^{n+1}] \quad (14)$$

式中  $Z_{11}, Z_{12}, Z_{21}, Z_{22}$  都仅须计算一次, 且  $Z_{12}$  和  $Z_{21}$  满足互易关系, 只需计算其中之一。这种方法目前大多应用于研究复杂物体(如飞行物)的散射特性<sup>[5]</sup>, 此处我们首次将它应用于复杂多天线系统中。这种迭代方式收敛非常迅速, 因而计算时间很短。

### 1.4 场方向图计算

求出天线电流分布后,便可得到天线系统远区辐射场及其他天线特性。由式(6)可得线天线辐射场

$$\text{电场} \quad \vec{E}^s(r) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left[ \nabla \int_{l'} \nabla \cdot \mathcal{I}(l') G dl' + k^2 \int_{l'} \mathcal{I}(l') G dl' \right] \quad (15)$$

对于  $N$  个单元组成的多天线系统远区辐射场为

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = -j\omega\mu \sum_{i=1}^N \frac{e^{-jk_r r}}{4\pi r} e^{jk(\vec{d}_i \cdot \vec{r})} \sum_{n=1}^{N_i} I_n l'_n \int_{l'_n}^{l_n^+} F_n(l) e^{-jk(\vec{r}' \cdot \vec{r}')} dl \quad (16)$$

式(15)、式(16)中,  $\vec{d}_i$  为第  $i$  个天线单元中心到参考点矢量;  $r$  为场点到参考点距离;  $N$  为天线单元总数;  $N_i$  为第  $i$  个天线单元分段数;  $I_n$  为分段电流;  $\vec{r}'$  为距离单位矢量;  $l'_n$  为源天线单元分段单位矢量;  $\vec{r}'$  为源点到参考点距离矢量。

## 2 通用软件实现

为了对任意形状任意位置的复杂天线阵系统进行分析,我们采取了面向对象的程序实现思路<sup>[6]</sup>。面向对象的基本思想就是把客观世界的实体(如天线系统)及其相互的联系表示为若干对象的集合,用一种数据结构一类来描述每个对象(如天线类)。类中的数据 and 过程函数即反映对象的形态和运动规律,因此,这种设计思路更接近现实世界思维方式。

对于大型线天线阵系统,用一天线类来模拟阵元,点类模拟天线坐标,各种计算类来模拟天线的方向图、互耦等特性。例如,天线类中各种数据和函数意义见表 1。由此思路而实现的仿真软件系统具有简单、明确的窗口界面,使用方便。分析天线系统时只需要输入包含天线位置、激励、分段信息的文件和参数,即可方便地得到天线的各种特性。

表 1 天线类中主要数据、函数意义

iSubnum	天线单元分段数	pcSubl	指向天线分段电流值的指针
pTPoint	指向天线坐标参数块的点指针	Antenna()	构造一个天线对象
iVoltageNum	激励电压点所处的分段号	CreateTPC()	给天线坐标分配内存块
cVoltage	激励电压值	CreatepcSubl()	给天线分段电流值分配内存块

此软件最重要的是在内存分配上的优势。由于线电大尺寸的系统需要大量的连续内存以存储阻抗矩阵,通常的 DOS 程序受 64 kB 的内存限制,因而可计算的矩阵大小有限。然而,在面向对象的 Windows 程序中分配内存简单、方便,且突破了 64 kB 内存限制,因此可实现大矩阵运算。对于本文的大型线天线阵系统,又由于采用了 SDM 法将 MOM 法中的大块矩阵划分为若干小矩阵,从而更方便存储分配。对于更大的系统,在必要的情况下,对程序稍作改动即可进行并行计算,因此,面向对象的程序设计思路对于大型系统尤其实用。

## 3 计算实例

三个平行直立的半波振子放置位置如图 1 所示。振子长度  $2l = 0.5\lambda$ ,  $r = d = 0.5\lambda$ , 半径  $a = 0.0005\lambda$ ,  $V = 1\text{ V}$  电压于中点激励。使用本通用软件计算得出振子 1、2 间的互耦阻抗  $Z_{12}$  随着振子 1 的位置(方位角  $\varphi$  变化)变化关系曲线见图 2。振子 1、3 间的互耦阻抗  $Z_{13}$  与  $Z_{12}$  具有一定的对称关系。由图可见:在方位角  $\varphi = 90^\circ$ 、 $270^\circ$  处互耦影响很大,有了这种互耦关系曲线便可以选择适当的天线位置来满足实际工作需要。另外,本软件还可计算出此三天线不同位置组合时的合

成方向图,以得到工程要求的最佳组合方式。

## 4 结 束 语

本文将空域分解法应用于线天线系统特性分析,并采用面向对象的程序设计思想编制了一套通用软件,可用于分析任意形状任意位置的多个线天线系统的特性。作为实例,计算了典型的线天线情况,并得出较好的结果。本文所提供的通用软件可以直接用于任意形状任意排列的多天线组成的天线阵系统的优化设计,对此我们将另文发表。

感谢毛康候研究员给本文工作的支持和帮助。

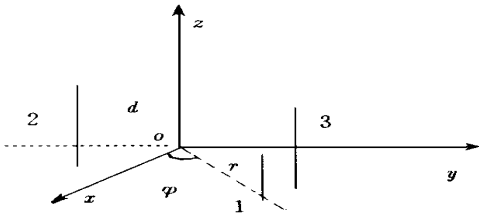


图1 三振子位置示意图

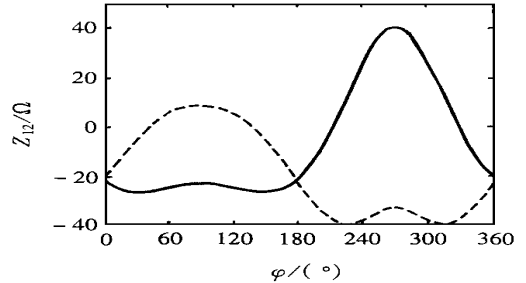


图2 互耦阻抗  $Z_{12}$  随方位角  $\varphi$  变化曲线

## 参 考 文 献

- 1 Umashankar K R Nimmagadda S. Application of integral equation and method of moments for electrically very large scatters using spatial decomposition technique. IEEE Trans AP-S, 1990;76~79
- 2 Mautz J R, Harrington R F. Radiation and scattering from bodies of revolution. Appl Sci Res, 1969, 20: 405~435
- 3 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法. 北京:电子工业出版社, 1985
- 4 梁培康, 方大纲. 电磁问题中几种减小计算时间的方法和比较性研究. 微波学报, 1991, (4):30~35
- 5 于春阳, 汪文秉. 应用空域分解法研究复杂物体的散射特性. 微波学报, 1995, 11(1):34~40
- 6 江明德. 面向对象程序设计. 北京:电子工业出版社, 1993

## Analysis of Arbitrary Shaped Linear Antenna Array and Accomplishment of General Software

Jiang Qin Lin Changlu

(Dept. of Microwave Eng., UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, a multi-linear system in arbitrary shape and arbitrary location is analyzed by using spatial decomposition method(SDM) and the general software is programmed with object-oriented method. With the software, such antenna characteristics as coupling between elements and field pattern can be calculated. Given basic parameters of linear antenna system, the optimum project of an antenna distribution can be obtained by adding special program.

**Key words** spatial decomposition method; linear antenna system; coupling; object-oriented programming