

利用信号与系统概念分析线天线的互阻抗

胡 浩¹, 朱 旗¹, 丁文武²

(1. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027; 2. 天津大学, 天津 300000)

摘要: 基于信号与系统理论, 并利用数字信号处理技术, 提出了一种分析线天线互阻抗的新方法。在这种方法中, 借用信号与系统的概念, 将天线阵中天线单元的电流视为激励信号, 将天线阵的空间结构视为系统函数(或传递函数), 而将单元天线间的互阻抗(或其它电磁特性)视为整个系统的响应。通过这种等效, 可将天线阵中天线单元间相互耦合看作信号与系统中的系统响应, 进而可利用数字信号处理方法进行分析。最后给出了利用该方法计算对称振子天线互阻抗的实例, 计算结果证明了该方法的有效性。

关键词: 数字信号处理(DSP); 信号与系统; 天线互阻抗

中图分类号: TN820.1⁺⁷ **文献标识码:**A

0 引言

现有的电磁场数值方法, 如有限元法、时域有限差分法^[1]、矩量法等, 都是直接利用Maxwell方程或由其导出的积分方程或微分方程来求解电磁场问题的。这些方法虽然直接由物理定律导出, 但求解过程纷繁复杂, 特别是在应用积分方程法、矩量法分析具体问题时, 需要结合相互作用对象的电流分布来求解, 其典型表达式如公式(1)、(2)所示。

$$[U]_n = [Z]_{n \times n} [I]_n \quad (1)$$

$$Z_{mn} = \int_{s_m} \int_{s_n} J_m \bar{S} J_n ds_m ds_n \quad (2)$$

其中, Z_{mn} 表示被分析对象空间划分的第 m 单元和第 n 单元间的互阻抗。为了计算第 m 单元和任意第 n 单元间的互阻抗, 就需要反复调用第 m 单元上的电流函数 J_m 来计算公式(2)的积分, 使得整个分析过程运算量大、耗时长, 十分不便。

如果从信号与系统^[2]角度来看电磁场问题, 例如求解天线阵中单元天线间的互耦, 其实质就是将单元天线的电流分布看作输入信号, 将其它影响天线间互耦的因素看作系统函数(或传递函数), 而将单元天线间的互耦看作输出信号, 就可以利用信号处理方法来求解天线阵中单元天线间的互耦。

在本文中, 将空域函数看作为广义时域函数, 先利用信号处理方法^[2]通过抽样和周期

收稿日期: 2003-03-05

作者简介: 胡浩, 男, 1982年生, 本科生。

延拓将连续空域函数(输入信号或系统函数)转化为离散周期函数,再利用快速傅立叶变换(FFT)方法,将空域函数的积分运算转化为离散周期函数的频域形式相乘,进而计算出所要求解的电磁特性。这样做可以避免电磁场计算中复杂的积分运算。同时,由于各单元天线上电流分布和天线阵结构相互独立,可以利用DSP方法,构建独立的输入信号和系统函数模块及其库函数。当需要求解不同天线单元间互耦 Z_{mn} 时,只需从库函数中调用相应的模块进行乘积运算,就可得到所要求解的不同单元天线间的互耦。上述方法从信号和系统概念出发,具有明显的物理意义,概念清晰,可以避免大量重复的积分运算。为了验证以上思想,以下给出了利用本文方法计算对称振子互阻抗的计算实例。

1 利用信号与系统的概念分析对称振子的互阻抗

1.1 基本思路

考虑如图1所示的对称振子,设振子1和振子2的归一化电流分别为 $I_1(z')$ 和 $I_2(z)$ 。

采用圆柱坐标,振子1上的电流 $I_1(z')$ 在空间产生的矢量位为:

$$\mathbf{A}(z, \rho, h) = \int_{-\frac{l_1}{2}}^{\frac{l_1}{2}} I_1(z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' = z A_z \quad (3)$$

其中 $R = \sqrt{\rho^2 + (z + h - z')^2}$,利用公式(3),结合 A_z 的旋转对称性可求得电场 \mathbf{E} 。考虑到只有 z 轴电场分量对互阻抗有影响,可求得振子1所产生的在振子2处 Z 方向的电场 $E_{z21}(z, \rho, h)$ 为:

$$E_{z21}(z, \rho, h) = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial\rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial\rho} \int_{-\frac{l_1}{2}}^{\frac{l_1}{2}} I_1(z') \frac{e^{-jk\sqrt{\rho^2 + (z+h-z')^2}}}{4\pi \sqrt{\rho^2 + (z+h-z')^2}} dz' \right) \quad (4)$$

从信号与系统概念出发,公式(4)所表示的电场,可以认为是输入信号 $I_1(z')$ 的系统响应,因而 $E_{z21}(z, \rho, h)$ 也可看成输入信号 $I_1(z')$ 和系统函数 $S(z', \rho, h)$ 的卷积。

1.2 系统函数的求解

为了求解出(4)中的系统函数,根据信号系统方法,令 $I_1(z') = \delta(z')$ (为单位冲击函数)代入公式(4)中,得

$$S(z', \rho, h) = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial\rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial\rho} \frac{e^{-jk\sqrt{\rho^2 + (z'+h)^2}}}{4\pi \sqrt{\rho^2 + (z'+h)^2}} \right) \quad (5)$$

在求得系统函数后,可将公式(4)表示为

$$E_{z21}(z, \rho, h) = I_1(z') * S(z', \rho, h) |_{z'=z} \quad (6)$$

1.3 利用系统函数表示对称振子的互阻抗

任意两个对称振子的互阻抗可表示为:

$$Z_{21}(\rho, h) = - \int_{-\frac{l_2}{2}}^{\frac{l_2}{2}} E_{z21}(z, \rho, h) I_2(z) dz \quad (7)$$

由信号系统概念,两个信号的内积表征两个信号的互能量。如果此时进一步将 $E_{z21}(z, \rho, h)$

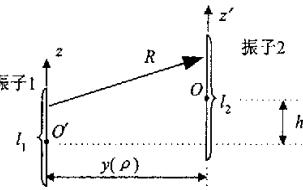


图1 对称振子结构示意图

Fig. 1 Dipole positioning for mutual coupling

和 $I_2(-z)$ 看作为两个输入信号, 则它们的互能量在此即反映了振子 1 上电流和振子 2 上电流的相互作用, 即为互阻抗。根据内积与卷积的关系

$$\langle x(\tau), g(\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g^*(\tau) d\tau = x(t) * g^*(-t) |_{t=0} \quad (8)$$

将等式(7)改写为

$$Z_{21}(\rho, h) = -E_{21}(z, \rho, h) * I_2(-z) |_{z=0}, \quad (9)$$

最后将电场强度表达式(6)代入(9)得

$$Z_{21}(\rho, h) = -I_1(z) * S(z, \rho, h) * I_2(-z) |_{z=0}. \quad (10)$$

上述分析利用信号与系统的概念, 将电磁场中求解互阻抗(2)的积分转化为信号系统中的卷积形式(10)式。其中输入信号 $I_1(z')$ 和 $I_2(z)$ 包含了天线振子的电磁特性信息如电流系统, 而系统函数(或传递函数) $S(z', \rho, h)$ 包含了对称振子的空间结构特性。下面我们利用上述公式来计算对称振子的互阻抗。

1.4 利用 DSP 方法计算对称振子的互阻抗

首先利用 FFT 来计算(10)式。将(10)在 z 轴上以周期 T 取样得:

$$Z_{21}(\rho, h) = -T^2 I_1[n] * H[n, \rho, h] * I_2[-n] |_{n=0}, \quad (11)$$

再把(11)式各序列以周期 $N = (l_1 + l_2)/T$ 延拓, 并作离散傅立叶变换(DFT), 得到(11)的频域形式为:

$$Z_{21}(\rho, h, k) = -T^2 I_1[k] H[k, \rho, h] I_2[-k], \quad (12)$$

其中 $I_1[k]$, $H[k, \rho, h]$ 和 $I_2[-k]$ 分别是 $I_1[n]$, $H[n, \rho, h]$ 和 $I_2[-n]$ 的 DFT。

当 $n = 0$ 时, $Z_{21}(\rho, h)$ 可以通过如下的傅立叶反变换得到

$$Z_{21}(\rho, h) = -\frac{T^2}{N} \sum_{k \in [-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]} I_1[k] H[k, \rho, h] I_2[-k]. \quad (13)$$

由于 DFT 变换可通过 FFT 来实现, 但是 FFT 中 n 的取值范围要由 $[-N/2, N/2]$ 变为 $[0, N]$, 则在计算 $I_1[n]$, $H[n, \rho, h]$ 和 $I_2[n]$ 的 FFT 时需要将它们右移 $N/2$, 因此 DFT 变换与 FFT 变换存在一个时移, 时移因子为 $e^{-j\frac{2\pi k n_0}{N}} |_{n_0=\frac{N}{2}} = (-1)^k$ 。考虑到这一时移因子, (13) 式可改为

$$Z_{21}(\rho, h) = -\frac{T^2}{N} \sum_{k \in [0, N-1]} I_1[k] H[k, \rho, h] I_2[-k] (-1)^k, \quad (14)$$

其中 $I_1[k]$, $H[k, \rho, h]$ 和 $I_2[-k]$ 分别是 $I_1[n]$, $H[n, \rho, h]$ 和 $I_2[-n]$ 的 FFT。

至此, 我们得到了互阻抗 $Z_{21}(\rho, h)$ 离散表示形式(14)式, 利用这个表达式, 计算互阻抗的结果如下。

2 计算结果

下面给出了本文方法所得计算结果和文献[4]的比较。设在图 1 所示的对称振子中, $l_1 = l_2 = L$, $\rho = d$, 其上的电流分布为:

$$I_1(z') = \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{L}{2} - |z'|\right)\right], I_2(z) = \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{L}{2} - |z|\right)\right] \quad (15)$$

(I) 当 $d \neq 0, h = 0$ 时, 设 $L = \lambda/2$, 振子平行排列时, 其互阻抗随着间距 d 的变化如图

2(a) 所示, 其中 R_{21} 为互电阻, X_{21} 为互电抗; 设 $L = 0.4\lambda$, 振子平行排列时, 其互阻抗随着间距 d 的变化如图 2(b) 所示.

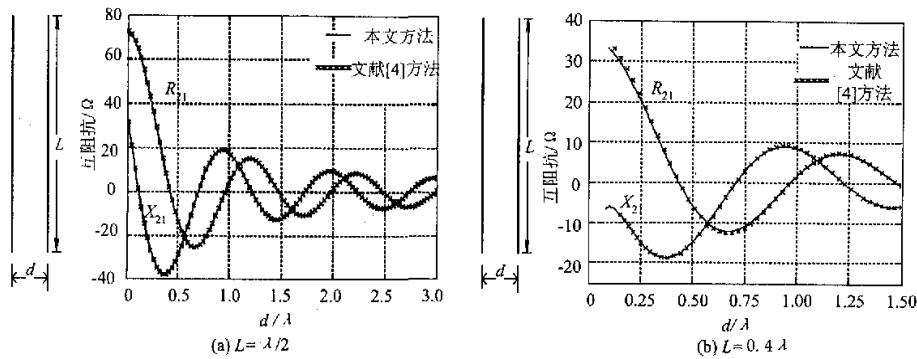


图 2 平行排列的振子间互阻抗和距离的关系

Fig. 2 Relationship between side-by-side mutual coupling and spacing d

(II) 当 $d \neq 0, L = \lambda/2$, 且 $h = 0.2\lambda$ 时, 即振子错开排列时, 其互阻抗随着间距 d 的变化如图 3 所示.

(III) 当 $d = 0$ 时, 设 $s = h - \left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right) = h - L$, 取 $L = \lambda/2$, 即振子共线排列时, 其互阻抗随着 s 的变化如图 4 所示.

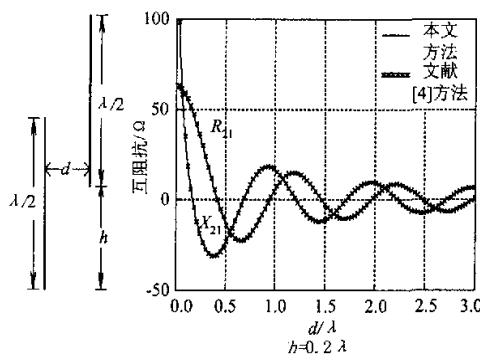


图 3 错开排列的振子间互阻抗和距离的关系

Fig. 3 Relationship between parallel mutual coupling in echelon and spacing d

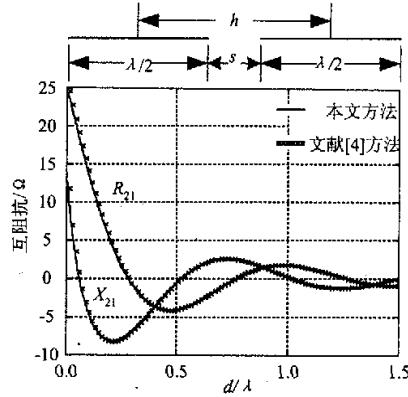


图 4 共线排列的振子间互阻抗和距离的关系

Fig. 4 Relationship between collinear mutual coupling and spacing s

在上面的计算过程中, 固定了电流 $I_1(z')$ 和 $I_2(z)$, 即取定了两个输入信号的模块, 发生变化的是振子的空间分布, 即系统函数模块变化. 这时, 只需重新计算系统函数就可以得到变化后的互阻抗, 从而提高了运算效率.

3 结论

本文基于信号与系统概念,对电磁场问题的求解进行重新定位,将数字信号处理方法引入电磁场计算领域。利用信号与系统的相互独立性将已知系统的电特性与空间结构特性分离开来,并建立不同的模块,然后利用DSP方法求解特定的电磁问题。最后,利用本文方法对几种基本结构对称振子的互阻抗进行运算,发现本文的计算结果和传统方法得出的结果吻合得很好,验证了本文提出的概念和方法的可行性。推广开来,这种概念和方法可以应用到更广阔的电磁问题的解决中去。

参 考 文 献

- [1] Tatsuo Itoh. Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1989.
- [2] Alan V Oppenheim, Alan S Willsky, Ian T Young. Signals and systems [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs,
- [3] Alan V Oppenheim, Ronald W Schafer. Digital Signal Processing [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1975.
- [4] Constantine A Balanis. Antenna theory: analysis and design [M]. Harper & Row, Publishers, Inc. 283-321, 1982.

Mutual Coupling Analysis of Collinear Antennas With Signal and System Concept

HU Hao¹, ZHU Qi¹, DING Wen-wu²

(1. Department of Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

(2. Tianjin University, Tianjin 300000, China)

Abstract: A novel method for analyzing mutual coupling of antennas by means of digital signal processing on the basis of signals and systems concept is presented. In this method, the EM characteristics of the antennas are considered as the input signals, the structure of the array as the system or transmission function, while the mutual impedance of the antennas or other EM characteristics can be regarded as the system response of the input signals. Then, the antenna array can be regarded as a whole signal and system, and can be processed with DSP. In this way, the method brings the signal and system concept to EM problem solving. Finally, mutual impedance between linear dipoles is analyzed. Compared with the literature, the validity of this novel method can be proved.

Key words: digital signal processing (DSP); signal and system; mutual impedance

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>