

文章编号 :1673-5439(2006)04-0034-05

天线阵列的双正交模分析法

张云峰,曹 伟

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要 提出一种新型分析天线阵列的方法,该方法利用模式理论,结合阵列特点选取每个阵元的双正交模函数组为整个阵列矩量法的分域展开函数和加权函数,考虑耦合性较强那部分互耦矩阵,产生稀疏阻抗矩阵,进行运算得到所需特性。分析了天线阵列和散射体阵列特性,计算结果与传统矩量法相比一致性较好。方法既保持了传统矩量法的精确性,而且概念清晰,节约存储空间,提高了计算效率。

关键词 线性阵列,矩量法,双正交模,稀疏矩阵

中图分类号 :TN823 ,O241.8 **文献标识码** :A

Analysis of Multiple Scatterers and Radiators Using Biorthogonal Modes

ZHANG Yun-feng ,CAO Wei

(College of Communication and Information Engineering , Nanjing University of Posts and Telecommunications , Nanjing 210003 , China)

Abstract :An novel algorithm is proposed for analysis of multiple scatterers and radiators using the biorthogonal modal technique. The biorthogonal expansion functions/weighting functions of each single conductor constructed applied to the MoM basis functions are used to generate a sparse moment matrix. The new matrix equation is solved in a way that only the significant mutual impedances are considered. The proposed algorithm is applied to multiple scatterers , a linear dipole array and a linear array of bow-tie antennas. Computed results are compared to those obtained using the direct moment method solution and exhibit very good agreement. Compared to the conventional moment method , biorthogonal modal method owns the merits of clarity in concept , simplicity in computation and saving storage space etc.

Key words :Linear array ;Method of moments ;Biorthogonal mode ;Sparse matrix

1 引 言

复杂物体的模拟、天线辐射场预测和天线设计等重要电磁问题,均离不开对散射体或天线阵列进行分析^[1-6]。在这些阵列单元上,除了入射场或者馈源在本单元上产生作用外,其他单元在该单元上

也会有一定的作用,我们称之为单元之间的互耦作用,相对于此,单个阵元之间的作用称为自耦作用。对于各种散射体或天线阵列,可以通过多种方法获得多个散射体或天线阵列表面电流分布、阵列之间耦合及其他相关特性^[7-9]。其中矩量法结果和实测结果通常有较好的吻合,因而常被用来分析阵列特性。但由于自耦和互耦作用的存在,对于电大尺寸或者单元较多的阵列,矩量法矩阵是一个巨大稠密矩阵,其生成、存储和逆运算均需很大存储空间以及

较长计算时间。

在矩量法对算子方程的离散运算中,选择适当基函数可以减少阻抗矩阵各种运算^[10]。理论上有无限多个基函数系可供选择,实际中分为全域和分域两类基函数。全域基函数如特征模基函数,其基函数是与物体本身结构紧密相关,与外加电磁波或馈源无关,有时由于模式电流谐振特性,仅需一次模展开即可获得阵列天线或者散射体的特性^[11]。采用分域基时,基函数与物体本身结构没有关系,需要对全部域进行展开运算,计算的时间较长。但由于全域基的基函数获取时间较长,因而使用全域基函数往往比使用分域基函数还要更耗时。本文工作在于,选择单个阵元双正交模的基函数和加权函数作为整个阵列的分域展开函数和加权函数,来分析整个阵列特性以及阵元之间的耦合特性。双正交模是在文献[12]中提出一种比特征模^[11]和 Inagaki 模^[13]更为广泛和普遍的模式。由于模式收敛特性^[14],表面电流分布和其他特性只要少量的本征模即可以获得准确的结果。为了验证本文方法的正确性,文中首先分析了 TM 波激励下多个无限长圆柱体和空间偶极子阵列的耦合特性,接着对 Bowtie 天线阵列全部耦合和强耦合进行分析,所得的计算结果与直接矩量法运算结果相比,一致性较好,计算时间和存储空间与直接矩量法相比均有较大提高。特别是在阵元相同仅考虑强耦合的情况下,阵元数目越多计算效率越高。

2 理论与方法

2.1 散射体与天线阵列特性分析

图1描绘了平面波入射场中多个散射圆柱体的情况。

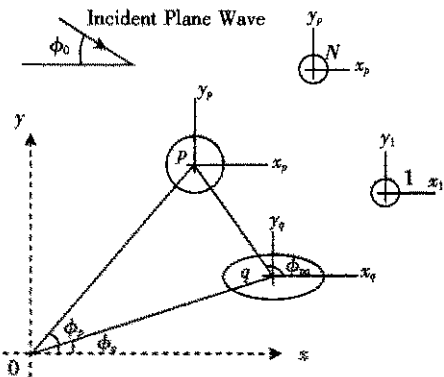


图1 平面波入射下多个散射体

将平面波移除,把散射体用天线来代替即可得

到天线阵列,其中空间天线并不局限于线天线阵列,可以是任意形状的天线阵列。这些阵元之间除了外加场和馈源在本单元产生自耦合作用外,相互阵元之间也有互耦合作用。由于阵元之间相互作用,使得阵列每个单元与单个阵元表面电流分布之间有着一定的区别,因而对应的散射场与不考虑单元耦合之间的分布有着较大区别。阵元之间的耦合作用对于多散射体的雷达散射截面(RCS)分析以及天线阵的方向图设计均有重要意义。

首先考虑无限长理想圆柱导体,其轴线方向为 z 轴,导体阵列不随 z 轴方向改变。为了简便起见,考虑入射平面波为沿 z 轴方向的 TM 波

$$\vec{E}^{inc} = \hat{z} E_0 e^{jk r \cos(\phi - \phi_0)} \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数, λ 为入射波波长; ϕ_0 为电场入射方向与 x 轴的夹角。TM 波激励下二维导体柱的散射特性表面电流分布 \vec{J} 用第一类 Fredholm 积分方程可以表示为

$$\left(\frac{Z_0 k}{4} \oint_{C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_N} H_0^2(k|\vec{r} - \vec{r}'|) \vec{J}(\vec{r}') dC \right)_{tan} = \vec{E}_{tan}^{inc} \quad (2)$$

其中 \vec{r} 和 \vec{r}' 分别为坐标原点至场点和源点的距离矢径,围线 C 由 N 个圆柱的二维平面圆周线 C_1, C_2, \dots, C_N 构成, H_0^2 是第二类零阶 Hankel 函数, Z_0 为自由空间波阻抗。

接着分析空间天线阵列,设有 N 个阵元,各单元天线表面分别为 S_1, S_2, \dots, S_N ,根据电场边界条件,可以得到

$$(-j\omega \vec{A} - \nabla \Phi)_{tan} = -\vec{E}_{tan}^i \quad \text{on } S \quad (3)$$

其中 ω 为角频率, \vec{A} 和 Φ 分别为天线阵的矢量磁位和标量电位。由于多个阵元存在,单个阵元上的量为所有阵元在该阵元上叠加量

$$\vec{A} = \mu \int_{S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_N} \vec{J}(\vec{r}') \frac{\exp(-jk|\vec{r} - \vec{r}'|)}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}'|} dS \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon} \int_{S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_N} \sigma(\vec{r}') \frac{\exp(-jk|\vec{r} - \vec{r}'|)}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}'|} dS \quad (5)$$

$$\nabla_s \cdot \vec{J} = -j\omega\sigma \quad (6)$$

式中 ω 和 μ 分别为介电常数和磁导率, \vec{J} 和 σ 分别为导体表面电流分布及其电荷密度。对于线天线则有

$$\hat{l} \cdot \vec{E}^i = \frac{1}{j\omega\epsilon} \oint_{L_1 \cup L_2 \cup \dots \cup L_N} \left[\hat{l} \cdot \hat{l}' k^2 \chi(l') + \frac{d\chi(l')}{dl'} \frac{\partial}{\partial l} \right] \frac{\exp(-jk|\vec{r} - \vec{r}'|)}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}'|} dl' \quad (7)$$

其中 L 为天线阵中所有天线轴线,由 L_1, L_2, \dots, L_N

组成,其中 L_p 为第 p 根天线轴线。

对于面或者体天线,考虑使用 RWG 三角基函数^[14],将平面或者导体表面划分为三角分区,根据基函数

$$\bar{f}_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n} \bar{\rho}_n^+ & \mathbf{r} \text{ in } T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n} \bar{\rho}_n^- & \mathbf{r} \text{ in } T_n^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中 \bar{f}_n 为平面三角基函数; A_n 为三角形的面积; l_n 为公共边的长度; $\bar{\rho}_n$ 为三角形顶点至公共边的距离矢径。依据式(8)代入式(3),求得 RWG 电流系数 I_n ,进而由下式

$$\bar{\mathbf{J}} = \sum_{n=1}^N I_n \bar{f}_n(\bar{\mathbf{r}}) \quad (9)$$

可以获得导体表面电流分布,然后获得散射体或天线阵列的其他特性。

2.2 双正交模基本公式与理论

现将双正交模理论公式^[12]概括描述如下。考虑第 p 个散射体或者天线单元,单个散射体或天线可以用算子方程统一表示为

$$(\mathcal{L}(\bar{\mathbf{J}}) - \mathbf{E}^{inc})_{\text{tan}} = 0 \quad (10)$$

用算子 T 表示为

$$T\bar{\mathbf{J}} = [\mathcal{L}(\bar{\mathbf{J}})]_{\text{tan}} \quad (11)$$

取算子 T 的右本征函数 $\{\bar{\mathbf{u}}_n\}$ 和左本征函数组 $\{\bar{\mathbf{v}}_n\}$,得如下本征值方程

$$T\bar{\mathbf{u}}_n = \lambda_n \bar{\mathbf{u}}_n \quad (12)$$

$$T^* \bar{\mathbf{v}}_n = \mu_n \bar{\mathbf{v}}_n \quad (13)$$

这里 μ_n 和 λ_n 分别为算子 T 的左、右本征值,且满足如下关系式

$$\mu_n = \lambda_n^c \quad (14)$$

定义值域中一个标准内积空间

$$\bar{\mathbf{f}} \cdot \bar{\mathbf{g}}^c = \int_{\Omega} \bar{\mathbf{f}} \cdot \bar{\mathbf{g}}^c d\Omega \quad (15)$$

其中 $\bar{\mathbf{g}}^c$ 的上标“ c ”表示其复数共轭。

$$\bar{\mathbf{v}} \cdot T \bar{\mathbf{u}}_n = \mu_n \delta_{mn} \quad (16)$$

这里 δ_{mn} 是 Kronecker delta 函数。这里双正交模式函数组 $\{\bar{\mathbf{u}}_n\}$ 和 $\{\bar{\mathbf{v}}_n\}$ 可以通过矩量法获得^[12]。将左右模式函数组归一化,即

$$\bar{\mathbf{u}}_n \cdot \bar{\mathbf{v}}_n = 1 \quad (17)$$

导体表面电流 $\bar{\mathbf{J}}$ 的模式解可以通过 $\{\bar{\mathbf{u}}_n\}$ 和 $\{\bar{\mathbf{v}}_n\}$ 作为矩量法展开和加权函数运用矩量法获得。则表面电流 $\bar{\mathbf{J}}$ 可以是双正交模式函数组 $\{\bar{\mathbf{u}}_n\}$ 的线性组合,即

$$\bar{\mathbf{J}} = \sum_k \alpha_k \bar{\mathbf{u}}_k \quad (18)$$

应用式(16)到算子方程(11),可以得到表面电流的模式解

$$\bar{\mathbf{J}} = \sum_k \frac{V_k^i \bar{\mathbf{u}}_n}{\mu_n} \quad (19)$$

这里

$$V_k^i = \bar{\mathbf{v}}_k \cdot \bar{\mathbf{E}}_{\text{tan}}^{inc} \quad (20)$$

是模式激励系数。由导体表面模式电流 $\bar{\mathbf{u}}_n$ 产生电场 $\bar{\mathbf{E}}_n$ 和磁场 $\bar{\mathbf{H}}_n$,称为对应于模式 $\bar{\mathbf{u}}_n$ 的模式场。模式场 $\bar{\mathbf{E}}_n$ 或 $\bar{\mathbf{H}}_n$ 构成了由表面电流产生远区场的 Hilbert 空间的基。外场与模式场之间也具有线性关系,可以用以下模式形式来表示

$$\bar{\mathbf{E}} = \sum_k \frac{V_k^i \bar{\mathbf{E}}_k}{\mu_k} \quad (21)$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \sum_k \frac{V_k^i \bar{\mathbf{H}}_k}{\mu_k} \quad (22)$$

其中 $\bar{\mathbf{E}}$ 和 $\bar{\mathbf{H}}$ 是导体表面电流 $\bar{\mathbf{J}}$ 在远区场任意点的场强。将本征值按照 $|\mu|$ 从小到大的顺序排列,那么从式(19)、式(21)与式(22)中可以看出, $|\mu|$ 越小对应的电流分布和场强值越大,因此只要选取部分较小本征值对应的模式即可获得较好的精确结果。

2.3 阵列特性双正交模分析

设阵列表面未知电流为 $\bar{\mathbf{J}}$,每个单元选取 M 个模式对其展开,对每个单元表面运用边界条件的双正交模式展开可得

$$\bar{\mathbf{J}} = \sum_{k=1}^N \sum_{h=1}^M \alpha_h^k \bar{\mathbf{u}}_h^k \quad (23)$$

其中 α_h^k 为待定系数。对算子方程(11)应用 Galerkin 方法离散展开

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{B}^{11}] & [\mathbf{B}^{12}] & \dots & [\mathbf{B}^{1N}] \\ [\mathbf{B}^{21}] & [\mathbf{B}^{22}] & \dots & [\mathbf{B}^{2N}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\mathbf{B}^{N1}] & [\mathbf{B}^{N2}] & \dots & [\mathbf{B}^{NN}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\alpha}^1 \\ \bar{\alpha}^2 \\ \vdots \\ \bar{\alpha}^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{V}^1] \\ [\mathbf{V}^2] \\ \vdots \\ [\mathbf{V}^N] \end{bmatrix} \quad (24)$$

每个分块矩阵由下式决定

$$[\mathbf{B}^{pq}] = \begin{bmatrix} \mu_1^p & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mu_2^p & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mu_M^p \end{bmatrix} \quad (p=q) \quad (25)$$

$$[\mathbf{B}^{pq}] = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_1^p | T \bar{\mathbf{u}}_1^q & \bar{\mathbf{v}}_1^p | T \bar{\mathbf{u}}_2^q & \dots & \bar{\mathbf{v}}_1^p | T \bar{\mathbf{u}}_M^q \\ \bar{\mathbf{v}}_2^p | T \bar{\mathbf{u}}_1^q & \bar{\mathbf{v}}_2^p | T \bar{\mathbf{u}}_2^q & \dots & \bar{\mathbf{v}}_2^p | T \bar{\mathbf{u}}_M^q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\mathbf{v}}_M^p | T \bar{\mathbf{u}}_1^q & \bar{\mathbf{v}}_M^p | T \bar{\mathbf{u}}_2^q & \dots & \bar{\mathbf{v}}_M^p | T \bar{\mathbf{u}}_M^q \end{bmatrix} \quad (p \neq q) \quad (26)$$

$$[V^p] = \begin{pmatrix} \bar{v}_1^p | E_{\tan}^{inc} \\ \bar{v}_2^p | E_{\tan}^{inc} \\ \vdots \\ \bar{v}_M^p | E_{\tan}^{inc} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$n, m \in \{1, 2, \dots, M\}; p, q \in \{1, 2, \dots, N\}$$

式(25)、式(26)和式(27)分别为阵元自耦合作用块、互耦合作用块与模式激励矢量。所有的分块矩阵均为已知,模式激励矢量也是已知,由此可以求出未知系数 α^p ,再由式(23)即可获得各导体表面的电流分布,然后阵列的各项特性均可方便获得。

3 计算机仿真结果

3.1 TM 波激励下多个圆柱体

图2所示是TM平面波入射下两个无限长理想圆柱导体,两圆柱体之间的距离 $2d = 2\lambda$,柱体半径 $a = 0.25\lambda$ 。从图3中电流分布可以看出,由于受到耦合作用的影响,围线之间靠得越近部分(A点附近),电流分布与无耦合时比较变化越大;反之(如B点附近)离得越远变化越小。耦合前后所得电流分布与矩量法结果一致,这里不再单独列出。

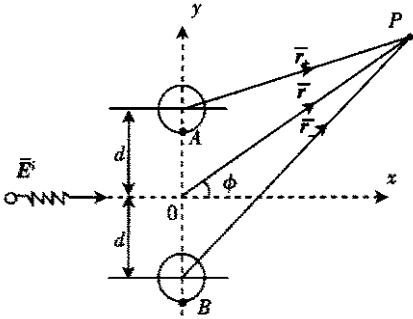


图2 TM平面波入射下两个无限长理想圆柱体

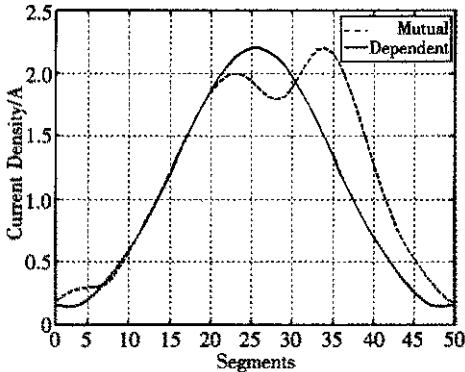


图3 单根柱体表面耦合前后电流分布

3.2 线天线阵列

图4为5单元偶极子线性阵列,其中每个偶极子的长度 $l = 0.5\lambda$,间距 $d = 0.2\lambda$ 。

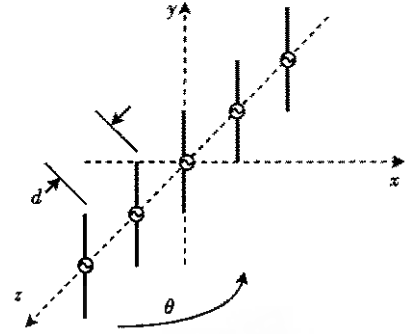


图4 空间线性偶极子阵列

由于受到阵元之间互耦作用,各单元表面的电流分布与无耦合时有较大区别(见图5),天线阵列的方向图也发生变化(见图6),所得的电流分布与方向图和矩量法所得结果一致。从图6中可以看出,互耦作用的存在对天线阵方向图主瓣影响不大,而对旁瓣的影响较大,因此在天线方向图设计中必须考虑阵列之间的互耦作用。

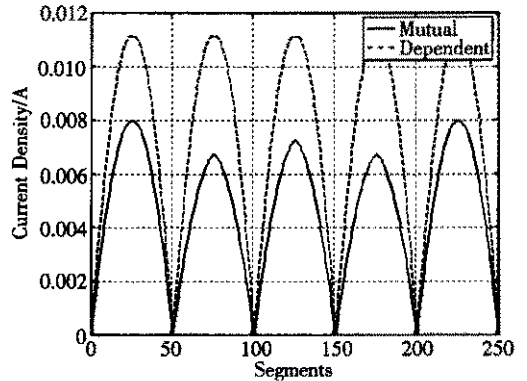


图5 $d = 0.2\lambda$ 时天线单元表面电流分布

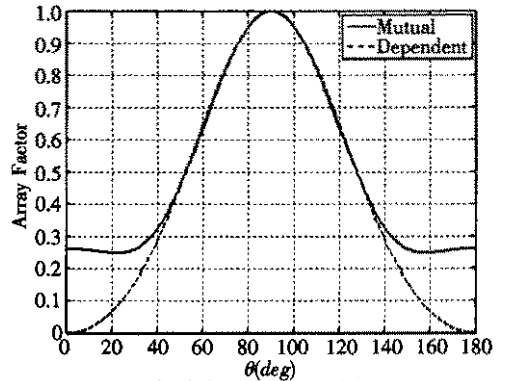


图6 耦合前后天线阵列方向图

3.3 空间 Bowtie 天线阵列

利用本文方法,我们分析了图7所示的Bowtie天线阵列。每个Bowtie天线长0.5 m,馈电宽度0.02 m,蝶形张角为 90° ,相邻两个bowtie天线间隔为1 m,工作频率为75 MHz。图8给出了直接矩量法RWG基函数运算得出的中心天线输入阻抗以及本文双正交模(BM)方法全部耦合和仅考虑强耦合

情况下得出的中心天线输入阻抗。从图8中可以看出考虑强耦合而忽略弱耦合,对于输入阻抗计算影响并不是很大,因为利用本文方法并且仅考虑强耦合作用,节约了存储空间,提高了运算效率。

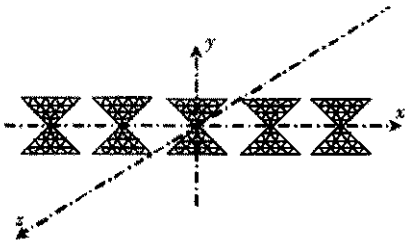


图7 空间 Bowtie 天线阵列

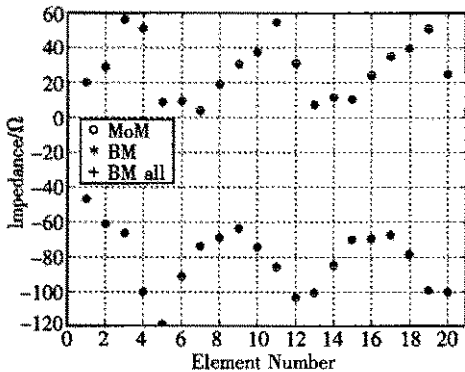


图8 Bowtie 天线阵列中心天线输入阻抗

4 结 论

在利用基于电场积分方程的矩量法对多个散射体或者天线阵列表面电流求解过程中,可以利用单个导体的双正交模的左右本征函数组作为矩量法的加权和展开函数。仅考虑耦合性较强那部分阻抗矩阵,可以获得稀疏阻抗矩阵,获得阵列特性。该方法既有矩量法精确性作保证,计算效率也很高。由于模式快速收敛性,取得前面几个幅度较小的基模即可获得导体表面较为精确的电流分布。该方法运算过程中将稠密的阻抗矩阵转化为稀疏矩阵,节约了存储空间,提高了计算效率,是一种有效而且实用的分析散射体与天线阵的方法。文中采用的双正交模式概念清晰,收敛性好,可以获得阵列表面电流以及其他各项特性参数。

参考文献:

- [1] RICHMOND J. Scattering by an arbitrary array of parallel wires [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Tech, 1965, 13(4): 408-412.
- [2] ELSHERBENI A Z, KISHK A A. Modeling of cylindrical Objects

by circular dielectric and conducting cylinders[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1992, 40(1): 96-99.

- [3] RAGHEB, HAMID M. Simulation of a cylindrical reflector by conducting circular cylinders[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1987, 35(3): 349-353.
- [4] LUDWIG A C. Wire grid modeling of surfaces[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1987, 35(9): 1045-1048.
- [5] POZAR D M. Antenna synthesis and optimization using weighted Inagaki modes[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1984, 32(2): 159-165.
- [6] LIU D, GARBACZ R J, POZAR D M. Antenna synthesis and optimization using generalized characteristic modes[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1990, 38(6): 862-868.
- [7] ANGIULLI G, MASSA G D. Mutual coupling evaluation by characteristic modes in multiple scattering of electromagnetic field[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 2002, 50(10): 1445-1452.
- [8] ANGIULLI G, MASSA G D. Mutual coupling evaluation in microstrip arrays by characteristic modes[C]//Millennium Conference on Antennas Propag. Davos, Switzerland, 2000: 924-926.
- [9] GUPTA L J, KSIENSKI A A. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1983, 31(5): 785-791.
- [10] WALLER M L, RAO S M. Application of adaptive basis functions for a diagonal moment matrix solution of arbitrarily shaped three-dimensional conducting body problems[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 2003, 51(10): 144-145.
- [11] HARRINGTON H F, MAUTZ J R. Theory of characteristic modes for conducting bodies[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1971, 19(5): 622-628.
- [12] 曹伟, 严鑫海, 朱效军. 双正交本征函数方法及其应用[J]. 电子学报, 1989, 17(5): 124-127.
- [13] INAGAKI N, GARBACZ R I. Eigenfunctions of composite Hermitian operator with application to discrete and continuous radiating systems[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1982, 30(7): 571-575.
- [14] RAO S M, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Trans on Antennas and Propag, 1982, 30(5): 409-418.

作者简介:



张云峰(1976-),男,江苏高邮人。南京邮电大学通信与信息工程学院电磁场与微波技术专业博士研究生。1997年毕业于南京邮电学院电信工程系。目前从事计算电磁学及其在信息技术的应用和电磁场数值计算等方面的研究工作。



曹 伟(1939 -) ,男 ,湖南长沙人。南京邮电大学通信与信息工程学院教授 ,博士生导师 ,日本名古屋工业大学工学博士。1961年毕业于北京邮电学院无线电通信工程系。1992 年获国务院政府特殊津贴 ,1993 年获江苏省优秀学科带头人称号和江苏省优秀研究生指导教师称号。

(上接第 33 页)

参考文献 :

[1] TAROKH V , SESHADRI N , CALDERBANK A R. Space-time codes for high data rate wireless communication : Performance criteria and code construction[J]. IEEE Trans on Inform Theory ,1998 , 44 :744 - 765.

[2] TAROKH V , NAGUIB A , SESHADRI N , et al. Space time codes for wireless communication : Combined array processing and space time coding[J]. IEEE Trans on Inform Theory ,1999 ,45 :1121 - 1128.

[3] ALAMOUTI S. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal on Select Areas Commun ,1998 , 16 :1451 - 1458.

[4] 邬钢 ,程时昕. 空时扩频与空时发射分集在 cdma2000 中的性能比较[J]. 应用科学学报 ,2002 ,20(3) :234 - 238.

[5] MURAT U , NAOFAL A D , COSTAS N G. A space-time block-coded OFDM scheme for unknown frequency-selective fading channels [J]. IEEE Communications Letters 2001 ,5(10) :393 - 395.

[6] HU Fengye ,WANG Shuxun ,SUN Xiaoying. A frequency diversity scheme for OFDM systems based on space-time block coding[C]// IEEE Int Conf Neural Networks & Signal Processing. 2003 :487 - 491.

[7] NAOFAL A D. Single-carrier frequency-domain equalization for space-time block-coded transmissions over frequency-selective fading channels[J]. IEEE Communications Letters 2001 ,5(7) :304 - 306.

[8] PROAKIS J G. Digital Communications[M]. Boston : Mc Graw Hill 2001.

[9] KLEIN A , PAUL W B. Linear unbiased data estimation in mobile radio systems applying CDMA[J]. IEEE Journal on Selected Areas Commun ,1993 ,11 :1058 - 1066.

[10] VOLLMER M ,GOTZEL J ,HAARDT M. Efficient joint detection techniques for TD-CDMA in the frequency domain[C]//Proc Cost 262 Workshop Multiuser Detection in Spread spectrum Communications. Jan 2001.

[11] VOLLMER M ,HAARDT M , GOTZEL J. Comparative study of joint-detection techniques for TD-CDMA based mobile radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications , 2001 ,19 :1461 - 1475.

作者简介 :



曹卫锋(1977 -) ,男 ,江苏姜堰人。现任职于中国网络通信集团江苏省分公司。2005 年在北京邮电大学信号与信息处理专业获博士学位。目前主要研究方向是第三代移动通信系统的规划研究。

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,一直致力和专注于微波、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>