

阵列天线阵元互耦的一种校正方法

刘 源, 邓维波, 许荣庆

(哈尔滨工业大学 电子工程技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001, E-mail: liuyuan@riee.hit.edu.cn)

摘 要: 提出了一种阵列天线阵元间互耦的补偿方法. 该方法避开了天线阵列互阻抗难于准确测量的问题, 通过无互耦的理想阵列模型下逼近实际测量得到的方向图, 求得阵列的互耦矩阵, 并利用该矩阵消除互耦对阵列综合的影响. 仿真结果表明了这种方法的正确性和有效性.

关键词: 阵列天线; 互耦; 方向图; 阵列综合

中图分类号: TN820.1

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2005)06-0724-03

A calibration method for mutual coupling effects in array antennas

LIU Yuan, DENG Wei-bo, XU Rong-qing

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, E-mail: liuyuan@riee.hit.edu.cn)

Abstract: A mutual coupling compensation method is presented. Using this method, the difficulty of measuring the mutual impedance matrix is avoided. The mutual coupling matrix is computed by making the pattern of array without mutual coupling approaching the measured array pattern including the effects of mutual coupling. The matrix is then used to eliminate the influence of mutual coupling on array synthesis. The simulation result shows the correctness and validity of this calibration method.

Key words: array antenna; mutual coupling; pattern; array synthesis

传统的阵列综合及测向方法往往是在假定阵元间无互耦的前提下进行的,但在实际情况下,当阵元间距离较近时,互耦的影响就不可忽略了.互耦的存在,影响了天线单元的幅相特性,引起了阵列方向图的畸变,并最终影响系统对电磁波来波方向的判定,所以,必须对其进行补偿. Yeh 等人^[1]指出,如果已知阵列的互阻抗矩阵 Z ,则能够对互耦进行补偿.通过计算得到了矩阵 Z ,并校正了互耦对等间距线阵列测向的影响.文献[2]提出了一种新的计算互阻抗的方法,该方法使用了一种不同于传统方法的开路电压的计算方法,较好地提高了 MUSIC 算法的性能.由于受到实际环境等因素的影响,理论计算得到天线间的互耦与实际系统的互耦差异较大,需要研究获取实际天线阵元互耦的方法.

提出了一种基于阵列的实测方向图来校正互耦的方法.这种方法将互耦补偿问题转化为在不考虑互耦的理想情况下对实测方向图的逼近问题,它无需借助于互阻抗的计算,适用于均匀线阵和均匀圆阵等阵列互耦矩阵中独立变量个数不大于阵元数的阵列形式,且对任意类型单元构成的阵列均能有效,仿真结果表明了这种方法的有效性.

1 基于实测方向图的互耦补偿方法

对阵元间距为 d 的 N 元等间距线阵列,理想情况下其阵列的方向向量 $v_i(\theta)$ 为

$$v_i(\theta) = [1, e^{jkd\cos\theta}, e^{j2kd\cos\theta}, \dots, e^{j(N-1)kd\cos\theta}]. \quad (1)$$

由于阵元间互耦的影响,方向向量被转换为另一个向量 $v(\theta)$, 且有

$$v(\theta) = v_i(\theta)C. \quad (2)$$

称 C 为互耦矩阵,是一 $N \times N$ 的复矩阵,可将其进一步表示为

收稿日期: 2003-06-17.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(19832020).

作者简介: 刘 源(1978-),男,博士研究生;

邓维波(1961-),男,博士,教授,博士生导师;

许荣庆(1958-),男,博士,教授,博士生导师.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix}$$

式中: c_{mn} ($m \neq n$) 表示第 n 个阵元对第 m 个阵元的互耦, c_{mm} 表示的是第 m 个阵元的自耦。

阵列的方向图函数可以表示为 $F(\theta) = \mathbf{v}(\theta)\mathbf{w}$, 其中, \mathbf{w} 是阵列的加权向量, 为 $N \times 1$ 的复向量。

在理想情况下, 选取阵列的加权向量为 \mathbf{w}_l 时, 阵列的方向图函数为 $F_l(\theta)$, 则有

$$F_l(\theta) = \mathbf{v}_l(\theta)\mathbf{w}_l$$

但由于互耦的存在, 当将加权向量 \mathbf{w}_l 作用于实际阵列时, 方向图函数为

$$F(\theta) = \mathbf{v}(\theta) \cdot \mathbf{w}_l = \mathbf{v}_l(\theta) \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{w}_l \quad (3)$$

可见, 由于互耦矩阵 \mathbf{C} 的影响使得实际的方向图 $F(\theta)$ 与期望的方向图 $F_l(\theta)$ 之间有了差异, 差异的大小直接受到了 \mathbf{C} 的影响。进一步从式(3)可以看出, 如果能通过某种方法求得 \mathbf{C} , 则通过选取加权向量 \mathbf{w} 为 $\mathbf{w} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{w}_l$, 就可消去互耦对方向图的影响。

提出了一种通过测量得到阵列方向图进而求出互耦矩阵 \mathbf{C} 的方法, 该方法描述如下: 首先通过测量得到实际的阵列方向图 $F(\theta)$ (包含幅度和相位), 在不考虑互耦即阵列的方向向量为 $\mathbf{v}_l(\theta)$ 的情况下采用某种阵列综合方法使阵列的方向图逼近 $F(\theta)$, 如果逼近的效果很好, 则此时对应的加权向量 \mathbf{w}_d 就应该满足

$$\mathbf{w}_d = \mathbf{C} \cdot \mathbf{w}_l \quad (4)$$

式中: \mathbf{w}_d 与 \mathbf{w}_l 均是已知的 $N \times 1$ 的复向量, 如果 \mathbf{C} 中独立变量的个数不大于阵元数 N , 就可以通过上式来求得互耦矩阵 \mathbf{C} 。对于等间距的线阵列或圆阵列, 其互耦矩阵 \mathbf{C} 为对称的 Toeplitz 矩阵或循环矩阵^[5], 其第一行元素包含了所有的未知量, 均能直接应用这种方法求得互耦矩阵。

2 方向图的逼近方法

上面提出的互耦补偿方法中关键的一步是对实测方向图的逼近, 逼近程度的精确与否对最终校正互耦的结果会有很大的影响, 这里采用带有线性约束的最小二乘法作为逼近算法。

使用的线性约束条件是主瓣约束条件, 其目的是保证逼近后的方向图的主瓣与实测方向图的主瓣指向完全相同, 没有任何偏移。将目标函数 (即实测方向图, 包括幅度和相位) 用 F_D 来表示, 则线性约束的最小二乘问题可写为

万方数据

$$\min_{\mathbf{w}} [\mathbf{v}_l(\theta)\mathbf{w}_d - F_D]^T \cdot [\mathbf{v}_l(\theta)\mathbf{w}_d - F_D]$$

满足下面两个主瓣约束条件^[4]:

$$\mathbf{v}_s\mathbf{w}_d = f_s, \operatorname{Re}\{\mathbf{v}_d\mathbf{w}_d\} = 0.$$

式中: \mathbf{v}_s 和 \mathbf{v}_d 分别是在 F_D 的主瓣方向 θ_s 上的方向向量 $\mathbf{v}_l(\theta_s)$ 及其一阶导数 f_s 是 θ_s 处的实测方向图函数的值, \mathbf{w}_d 为待求的加权向量。

由文献[6]可得到这类问题的解, 计算得到的 \mathbf{w}_d 即为用理想情况下的阵列模型逼近实测方向图时的加权向量, 进而通过式(4)就可计算出这种阵列的互耦矩阵。

3 仿真结果

应用提出的方法对圆阵列进行互耦补偿, 仿真过程中采用矩量法计算得到的阵列方向图来等效实际测量得到的方向图, 作为逼近的目标。对一等间距的圆阵列, 不考虑互耦时其方向向量:

$$\mathbf{v}_l(\theta) = [e^{jkr\cos\theta}, e^{jkr\cos(\theta-2\pi/N)}, \dots, e^{jkr\cos(\theta-2\pi(N-1)/N)}]$$

其中, k 是波数, r 为阵列的半径, N 为阵元数。考虑阵元数 $N=5$, 阵列半径 $r=3$ m 的等间距圆阵列, 工作频率 $f=10$ MHz, 阵单元采用半波阵子, 采用文献[4]中的综合方法对不考虑互耦影响的圆阵列进行等旁瓣综合, 取旁瓣电平为 -25 dB, 主瓣指向 180° , 得到的加权向量记为 \mathbf{w}_l , 其方向图如图1所示。

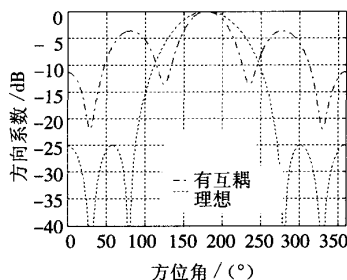


图1 无互耦和有互耦的方向图比较

图1中, 虚线是忽略了互耦在理想情况下综合的结果, 点划线是考虑互耦后以 \mathbf{w}_l 作为加权向量通过矩量法计算得到的方向图, 也是下一步要逼近的目标函数。此时互耦对方向图的影响很大, 必须对其进行校正。

采用线性约束的最小二乘法对该目标函数的逼近结果如图2所示, 图中显示逼近的结果很好, 逼近结果与目标函数的曲线完全重合在了一起, 记此时阵列的加权向量为 \mathbf{w}_2 , 将 \mathbf{w}_l 与 \mathbf{w}_2 代入式(4), 可得到 $\mathbf{w}_2 = \mathbf{C}\mathbf{w}_l$, 其中 $\mathbf{w}_l, \mathbf{w}_2$ 均是 $N \times 1$ 的已知复向量, \mathbf{C} 是 $N \times N$ 的对称循环矩阵, 可以通过上式求出互耦矩阵 \mathbf{C} 。得到互耦矩阵 \mathbf{C} 后, 令实

际阵列的加权向量为 $C^{-1}w_1$, 就可以消去互耦对阵列方向图的影响. 这样, 就将含有互耦的阵列综合问题转化为了不含互耦的阵列综合问题, 经过补偿后的方向图如图3、4所示.

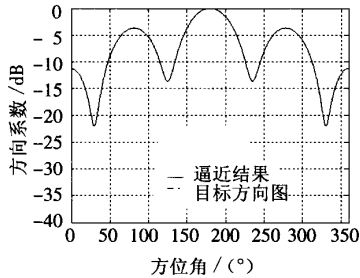


图2 线性约束的最小二乘法逼近结果

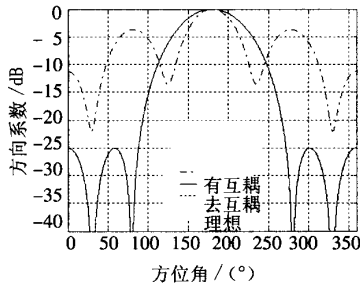


图3 互耦补偿结果1

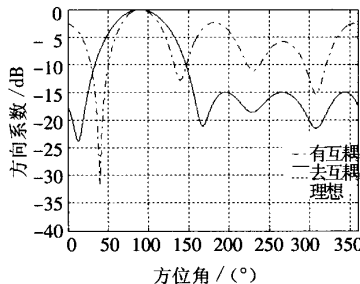


图4 互耦补偿结果2

图3、4均是采用上面得到的矩阵 C 对互耦校正后的方向图. 图3中的虚线是在不考虑互耦情况下主瓣指向 180° , 旁瓣电平 -25 dB 的方向图, 点划线是考虑互耦时阵列的方向图, 实线是经过互耦补偿后阵列的方向图. 图4中虚线是在不考虑互耦情况下主瓣指向 90° , 旁瓣电平 -15 dB 的方向图, 同样的点划线和实线分别是考虑互耦时阵列的方向图和经过互耦补偿后阵列的方向图. 两图中, 经过互耦补偿和理想情况下的方向图几乎完全重合在了一起.

由仿真结果可看出, 通过这种方法求得的互耦矩阵 C , 很好地校正了互耦对阵列的方向图的影响. 同样这种方法能够应用于超分辨率测向中, 在存在互耦的情况下提高测向的精度.

由于方向图测量的误差以及实际环境的影响, 会导致阵列的互耦矩阵 C 可能不再是 Toeplitz 矩阵, 不能直接通过式(4)来求取. 此时可以通过测量多组该阵列在不同激励下的方向图并分别进行逼近来求取 C 矩阵, 这样还能够将文中的方法推广到对任意阵列形式的互耦进行补偿, 这部分内容正在进一步的研究中.

4 结 论

提出的基于实测方向图进行阵列互耦补偿的方法将阵列互耦的补偿问题转化为在不考虑互耦的理想情况下对实测方向图的逼近问题. 逼近算法性能的好坏对最终互耦补偿的效果有直接的影响. 使用线性约束最小二乘法能够很好地对等间距圆阵列的实测方向图进行逼近, 仿真结果表明这种方法很好地消除了互耦对阵列方向图的影响.

参考文献:

- [1] YEH C C, LEOU M L, UCCI D R. Bearing estimations with mutual coupling present[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1989, 37(10): 1332 - 1335.
- [2] HUI H T. Compensation for the mutual coupling effect in direction finding based on a new calculation method for mutual impedance[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003, 2: 26 - 29.
- [3] WAX M, SHEINVALD J. Direction finding of coherent signals via spatial smoothing for uniform circular arrays [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1994, 42(5): 613 - 620.
- [4] TSENG C Y, GRIFFITHS L J. A simple algorithm to achieve desired patterns for arbitrary arrays [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1992, 40(11): 2737 - 2746.
- [5] FRIEDLANDER B, WEISS A J. Direction finding in the presence of mutual coupling[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1991, 39(3): 273 - 284.
- [6] 《现代应用数学手册》编委会. 现代应用数学手册: 运筹学与最优化理论卷[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

(编辑 刘 彤)

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>