

测向天线阵互耦效应分析

白春惠

(中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066001)

摘要 天线阵元间的互耦效应将导致天线阵列的电参数和方向性的改变, 从而影响测向系统的性能。针对天线阵列各单元之间的互耦现象, 提出了利用矩量法精确分析天线阵列各单元上的电流分布, 进一步通过互阻抗网络计算法求出测向天线单元的实际激励电压的幅度和相位, 进而得到天线的辐射和接收特性。对实际的均匀直线阵列超分辨测向系统中的互耦效应进行了分析, 给出了仿真结果, 验证了互耦效应对测向性能的影响。

关键词 测向天线阵; 互耦效应; 矩量法; 互阻抗

中图分类号 TN918

文献标识码 A

文章编号 1003-3106(2011)10-0040-04

Analysis on Mutual Coupling Effect of Antenna Arrays in Direction Finding Systems

BAI Chun-hui

(Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao Hebei 066001, China)

Abstract Mutual coupling effect between antenna elements would change their electric parameters and direction characteristic. In this paper, the method of moment (MoM) technique is used to analyze the actual current distribution in array elements precisely. Then, using mutual impedance network, we can obtain the practical amplitude and phase of the excited voltage in array elements. Consequently, the radiation characteristic of the elements can be analyzed precisely. And the accuracy and resolution of direction finding system would be improved by correcting the direction finding algorithm with the analysis results. Finally, the simulation results with MATLAB are provided to demonstrate mutual coupling effectiveness.

Key words direction finding antenna arrays; mutual coupling effect; MoM; mutual impedance

0 引言

在无线电测向系统中, 一般根据不同的测向体制和测向算法, 结合工作频段和测向精度等具体要求, 来确定测向天线阵最优阵型。为了处理运算的方便, 阵元的排列都按某种规则的几何排列, 如单直线阵列、圆阵、L形阵或其他阵型。线阵的优点是排列简单便于控制, 容易实现相对较高的测向精度。然而由于通道失配、阵元位置误差和阵元间互耦等因素的影响, 将导致测向性能的恶化。一般测向精度要求不高、天线间距较大时, 可以近似认为天线单元间理想工作、互不干扰, 即不存在阵元间电磁耦合效应。但实际上, 阵元间的互耦效应对测向精度有着一定的影响, 特别是阵元间距较小时, 互耦对测向性能的影响十分明显。为了保证高精度测向, 必须对天线阵中各单元天线之间的互耦效应进行正确的估计和精确分析。

1 互耦分析方法

当 2 个以上的天线单元组成天线阵时, 每一天

线单元除受本身电流产生的电磁场作用之外, 还要受到阵列中其他单元上的电流产生的电磁场作用, 引入了耦合电流, 这种影响叫做互耦。互耦是阵列天线固有的特征, 由于各单元之间通过空间电磁场的相互作用和影响, 发生电磁耦合效应, 特别是当单元间距较小的时候, 耦合作用表现得很强烈。有别于单个天线置于自由空间的情况, 这种电磁耦合(或感应)的结果将会导致每个单元天线的电流和阻抗都要发生变化。此时, 可以认为单元天线的阻抗由两部分组成, 即一部分是不考虑相互耦合影响时本身的阻抗, 称为自阻抗; 另一部分是由相互耦合作用而产生的阻抗, 称为互阻抗。可以借助于互阻抗的概念, 对这种互耦效应进行分析。一般这些互阻抗是复数值, 与阵列的几何位置有关。当天线阵元的间距增加时, 互阻抗的作用将会减小。

无线电测向通过对接收信号矩阵的特征结构进行处理, 获得来波方向的信息。互耦改变了阵列相应矢量, 因此接收信号相关矩阵的特征值结构也改

收稿日期: 2011-07-27

变了,所以影响了DOA估计的精度。Gupta建立了阵列天线的等效网络模型,通过阵列天线的互阻抗矩阵来表征互耦合。计算互阻抗矩阵的方法因阵列单元的不同而异,感应电动势(EMF)法和矩量法(MoM)是比较常用的2种方法。前者的特点是解析的形式,但是计算的精度不如后者;而矩量法是一种经典的数值计算方法,在电磁计算中已经广泛应用。

2 互耦计算

精确计算互耦的影响有一定的困难,人们在理论和实验上已进行了大量的研究。一种广泛采用的分析互耦的数值计算方法是以单元间互阻抗便于计算为基础的阻抗法,而利用矩量法可以对线天线进行更精确、可靠的分析。

2.1 矩量法分析

很多文献一般采用网络法来分析天线单元间的互耦效应。但是网络法只能解决阵列天线口径上的抽样电流(输入端电流)值,淹没了各个单元上的电流分布的细节。下面采用矩量法来进行较为精确的互耦分析。

矩量法是将算子方程化为矩阵方程,然后求解该矩阵方程的方法。以其求解思路简单清晰,处理灵活简便,分析计算精确快速等特点,在大量电磁问题的数值分析技术中获得了成功地应用。

矩量法的基本模型可表示为一个算子方程:

$$Lf = g. \quad (1)$$

式中, L 为算子,可为差分方程、微分方程或积分方程; g 为已知函数,如激励源; f 为未知函数,如电流分布。

适当地选择基函数与权函数,将未知函数用基函数展开,若选一组函数 $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$ 作为检验函数,分别与算子方程等号的两边求内积,便可得:

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle \omega_n, L[F_N(z)] \rangle = \langle \omega_n, g(z) \rangle. \quad (2)$$

将式(2)写为矩阵形式:

$$ZI = V. \quad (3)$$

求解上述矩阵方程,得到未知量展开系数,即可得天线表面的电流分布 f 。

2.2 天线辐射特性计算

计算天线的辐射场可以分为2步进行:①根据馈电电源决定天线沿线的电流分布;②根据电流分布决定空间的辐射场。如图1所示任意分段电流的三维坐标示意图。

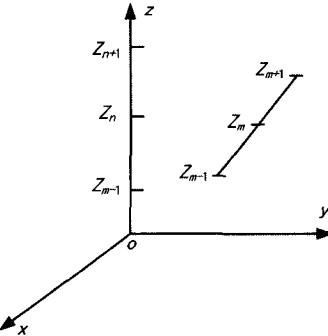


图1 任意分段电流坐标示意图

分段电流表达式如下:

$$f_n(z') = \begin{cases} \sin \frac{[k(z' - z'_{n-1})]}{\sin[k(z'_n - z'_{n-1})]} & \dots z'_{n-1} \leq z' \leq z'_n \\ \sin \frac{[k(z'_{n+1} - z')]}{\sin[k(z'_{n+1} - z'_n)]} & \dots z'_n \leq z' \leq z'_{n+1} \end{cases}. \quad (4)$$

任意两段分段电流之间的互阻抗计算表达式:

$$z_{mm} = 30j \left[\int_{z'_{m-1}}^{z'_m} \sin \frac{[k(z' - z'_{n-1})]}{\sin[k(z' - z'_{n-1})]} + \int_{z'_n}^{z'_{m+1}} \sin \frac{[k(z' - z'_{n-1})]}{\sin[k(z' - z'_{n-1})]} \right] \times \sum_{s=1}^3 C(s) \frac{\exp(-jkR(s))}{R(s)} dz. \quad (5)$$

式中,

$$\begin{cases} c(1) = 1/\sin k(z_n - z_{n-1}) \\ c(2) = \sin k(z_{n+1} - z_{n-1})/\sin k(z_{n+1} - z_n) \sin k(z_n - z_{n-1}) \\ c(3) = 1/\sin k(z_{n+1} - z_n) \end{cases}$$

$$R(s) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}.$$

式中, $s = 1, 2, 3$ 分别对应 $i = n-1, n, n+1$; $R(s)$ 为分段电流 I_1 的端点 $n-1, n, n+1$ 分别到分段电流 I_2 上任意点的距离。

这里 $R(s)$ 是没有作任何近似的距离表达式,这对于计算和分析近区场分布和相位关系是非常必要的,式(5)是互阻抗的精确计算公式。

采用矩量法精确分析一副 N 单元天线阵,考虑各单元间互耦的广义阻抗矩阵:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} & \cdots & \mathbf{Z}_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{N1} & \mathbf{Z}_{N2} & \cdots & \mathbf{Z}_{NN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{Z}_{ii} 和 $\mathbf{Z}_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, N$) 分别为天线阵各单元的阻抗矩阵和单元间互阻抗矩阵。

当单元数目较多时, 矩阵 \mathbf{Z}_{mn} 将是一个非常庞大的一个矩阵, 这使计算时间大大增加。但是, 仔细观察一下就不难发现该矩阵是一个分块的 Toeplitz 矩阵, 只需要计算和存储矩阵的一列或者一行即可得到整个矩阵, 从而大大减少了计算时间。

各分块矩阵元素之间的关系如下:

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{i+1,j+1} = \mathbf{z}_{i,j} \\ \mathbf{z}_{j,i} = \mathbf{z}_{i,j} \end{cases} \quad (7)$$

将阻抗矩阵代入式(3)中, 采用 δ —电压源激励模型, 求解式(3)所示的矩阵方程可得各单元天线的电流系数, 从而求出输入阻抗和归于馈电点电流的互阻抗, 进而得到其辐射特性。

3 对测向性能的影响分析

均匀线阵超分辨测向在理想情况下较常规的测向方法有着很多优势, 如测向精度高, 能同时分辨多个同频信号等。但实际应用中, 天线阵各个单元之间的互耦使得实际的阵列流形与理想的阵列流形之间有一定的误差, 从而导致测向性能的下降甚至完全失效。因此, 在测向算法中必须考虑阵元间的互耦对测向性能的影响, 并采用合理的措施进行校正。

对于均匀天线线阵, 假设空间有 $D + 1$ 个窄带信号入射到天线阵上, 在不考虑互耦情况下在第 K 次快拍阵列的输出信号矢量为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{AS}(k) + \mathbf{N}(k) \quad (8)$$

考虑互耦时阵列的输出信号为:

$$\bar{\mathbf{X}}(k) = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{AS}(k) + \mathbf{N}(k) \quad (9)$$

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k) &= [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_M(k)]^T, \\ \bar{\mathbf{X}}(k) &= [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_M(k)]^T, \\ \mathbf{S}(k) &= [s_1(k) \ s_2(k) \ \cdots \ s_{D+1}(k)]^T, \\ \mathbf{N}(k) &= [n_1(k) \ n_2(k) \ \cdots \ n_M(k)]^T, \\ \mathbf{A} &= (a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_{D+1}))^T, \\ \mathbf{a}(\theta_i) &= (a_1(\theta_i), a_2(\theta_i), \dots, a_M(\theta_i))^T. \end{aligned}$$

式中, $n_m(t)$ ($m = 1, 2, \dots, M$) 为第 m 个阵元中均值为零, 方差为 σ^2 的高斯加性白噪声, 且与所需信号和干扰信号均不相关。

$a_m(\theta_i)$ ($m = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, D + 1$) 为第 m 个阵元对第 i 个信号的响应:

$$a_m(\theta_i) = \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{p}_m \cdot \mathbf{e}_i) \quad (10)$$

式中, \mathbf{p}_m 为第 m 个阵元位置空间向量; \mathbf{e}_i 为入射方向上的单位向量。输出协方差矩阵:

$$\mathbf{R} = E[\bar{\mathbf{X}}(k) \bar{\mathbf{X}}(k)^H] = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{R}_{SS} (\mathbf{Z}^{-1} \mathbf{A})^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{R}_{SS} = E[\mathbf{S}(k) \mathbf{S}(k)^H]$ 是信号复包络的协方差矩阵。从式(9)和式(11)可以看出, 由于互耦影响使阵列输出信号发生变化, 从而进一步影响输出协方差矩阵。

根据子空间基本原理, 对 \mathbf{R} 进行特征值分解后, 可以得到信号子空间 \mathbf{E}_S 和噪声子空间 \mathbf{E}_N , 而阵元间的互耦影响使得方向矩阵张成的空间不再与噪声子空间正交。根据式(11)对方向矩阵修正后, 可以得到:

$$\text{span}\{\mathbf{Z}^{-1} \mathbf{A}(\theta)\} = \text{span}\{\mathbf{E}_S\} \perp \text{span}\{\mathbf{E}_N\} \quad (12)$$

在互耦存在情况下的空间谱函数:

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\|\mathbf{E}_N^H \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{a}(\theta)\|^2} \quad (13)$$

式中, $\|\cdot\|$ 为 Frobenius 范数。由式(13)可以看出, 互耦的存在严重影响天线阵的测向性能。

可见, 天线阵阵元间的互耦对测向结果有着重要的影响, 在实际应用中, 一定要考虑阵元间的互耦影响并加以校正。

4 仿真分析

对图 2 所示的均匀直线阵, 阵元间距为半个波长, 2 个待测信号分别从不同的角度入射到天线阵上。信噪比 $SNR = 10$ dB, 快拍数 $N = 1000$, 信号入射角 30° 和 45° , 角频率为 $\pi/4$ 和 $\pi/6$ 。仿真结果如图 3 和图 4 所示。

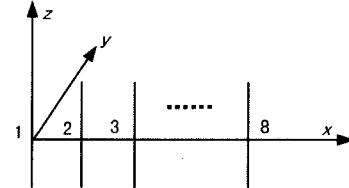


图 2 均匀直线阵

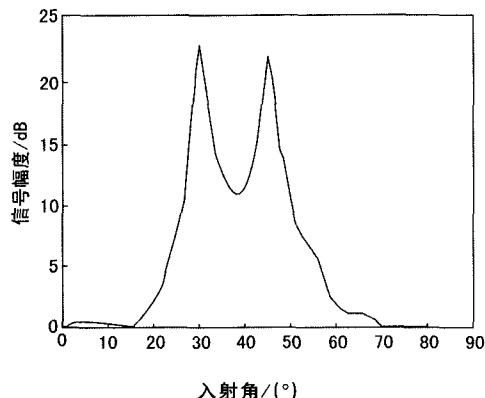


图3 不考虑互耦时的理想频谱曲线

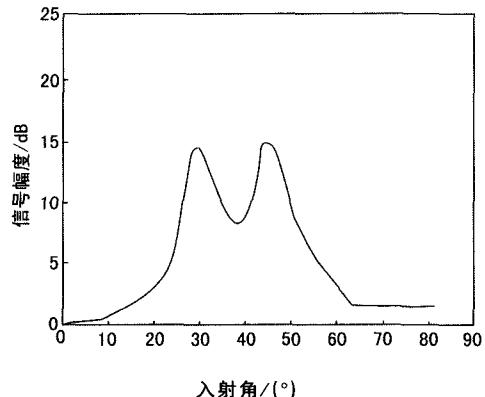


图4 考虑互耦后的失真频谱

从仿真结果看出,天线阵阵元间的互耦对空间谱估计测向有着重要的影响,所以在实际应用中,阵元间的互耦影响一定要考虑;另外,通过对几种天

(上接第23页)

⑦通过T-Ex(时间-幅度)曲线获得鸟的回波幅度(归一化RCS)及变化信息,翅膀扇动重复信息等;

⑧通过T-F(时-频)曲线获得鸟的频谱分布特征、频率变化特征等;

⑨通过光学观测,获得鸟图像,进行鸟外形的识别等。

通过上述信息,建立鸟种的数据样本,通过大量样本的积累,提取样本模型。使用神经网络,判别新发现样本的种类归属。

系统根据数据库中有关候鸟和留鸟的先验知识与当前鸟情信息,通过统计分析、模糊数学、逻辑推理和数据融合等方法,对未来若干天鸟的种群、数量、可能分布区域和活动时间进行预测,便于机场预先做好防鸟和驱鸟的准备工作。

5 结束语

采用三坐标搜索雷达,提供鸟群的三维数据,快

线阵互耦影响下的测向性能的比较,直线阵阵元间的互耦影响是最小的。这是因为直线阵中,各个阵元只对相邻的阵元上分布的电流影响较大,但是其它平面阵中,各个阵元之间的影响都比较严重。

5 结束语

当阵列的单元类型、数目、取向和位置确定的情况下,由于天线单元自身激励电流以及周围其他单元引起的激励电流,使得天线单元的方向图发生了变化。可以通过矩量法精确分析实际天线阵各单元上的电流分布,分析各单元的实际激励电流,再通过互阻抗网络求出其实际激励电压的幅度和相位,对测向算法进行修正,获得精确的测向结果。

参考文献

- [1] INDER J GUPTA, AHARON A KSIENSKI. Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays [J]. IEEE Trans. on AP, 1983, 31(5): 785-791.
- [2] 杨超, 邱文杰. 自适应天线阵元间互耦的校正 [J]. 电子学报, 1993, 21(3): 58-62.
- [3] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.

作者简介

白春惠 男,(1966—),中国人民解放军91404部队高级工程师。主要研究方向:通信对抗技术研究。

速引导高分辨观测雷达对鸟群进行长时间跟踪,获取精确数据。光学辅助设备在可视范围内,给出鸟群的图像信息,实现更准确的分类判决。这种光电一体化探测系统最大限度地获取了鸟群信号特征,通过信息处理,获得较准确的机场周围鸟情信息,生成较可靠的威胁度分析报告。该系统具有较强的探测能力与识别能力,能够有效地解决机场鸟击问题。

参考文献

- [1] GAUTHREUX S J, BELSER C. Bird Movement on Doppler Weather Surveillance Radar [J]. Birding, 2003, 35(6): 616-628.
- [2] 宁焕生, 刘文明, 李敬, 等. 航空鸟击雷达鸟情探测研究 [J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2232-2237.
- [3] 刘勇. 机场鸟害防治重在综合治理 [J]. 中国民用航空, 2003, 33(9): 55-56.
- [4] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用 [M]. 陕西: 西安电子科技大学出版社, 2004.

作者简介

赵锦华 男,(1955—),中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师。主要研究方向:电子系统工程。

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>