

多波束阵列天线单元互耦效应分析

李畅游

(船舶重工集团公司723所,扬州225001)

摘要:互耦效应导致阵列天线单元间耦合能量的矢量和随扫描角而变化,在特定频率和方向上可能产生较大的功率反射,并且引起方向图出现虚假波瓣。运用散射参数法对阵列天线单元互耦效应进行理论分析,阐述了其对天线性能的影响,提出了各种指标的实验测试方法。

关键词:阵列天线;互耦效应;散射参数

中图分类号:TN821.8

文献标识码:A

文章编号:CN32-1413(2004)03-0017-03

Analysis of The Effect by Mutual Coupling between Multibeam Array Antenna Elements

LI Chang-you

(The 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225001, China)

Abstract: The mutual coupling effect brings about vector sum of coupling energy between array antenna elements changing with the scan angle, that may result in larger power reflection in specific frequency and direction, and makes radiation pattern resulting in false beam segment. This paper analyzes the mutual coupling effect of array antenna elements reasonably, applying mode of scatter parameter, describes the influence of this effect to antenna performance, presents the experimental test method of various parameter indexes.

Keyword: array antenna; mutual coupling effect; scatter parameter

0 引言

随着现代战场条件下空间电磁环境密集程度越来越高,电子战设备必须能同时侦收、跟踪多方位雷达信号,并且对多个威胁目标同时进行有效干扰。在此背景下,多波束阵列天线成为新型电子战设备主流天线体制和技术。

根据天线口径场相位线性渐变时波束产生偏移的原理,多波束天线通过罗特曼透镜、巴特勒矩阵等馈电网络控制阵列天线各单元辐射信号的相位来实现波束空间扫描。经典天线理论中,阵列天线的辐射方向图可表示为阵因子和单元因子的乘积,但实际上由于阵列单元之间存在互耦,位于阵列中不同区域的各单元所处环境是

不同的,因而几何尺寸相同的单元天线所形成的单元方向图并不相同。

互耦效应还使得阵单元的输入阻抗随扫描角而变化,因此在多波束阵列天线设计中,除了要解决一般天线的宽带匹配问题,还要克服宽角扫描的匹配问题。阵列天线的互耦研究对天线性能的调试有着重要指导作用。

1 互耦影响与单元方向图

波束扫描的阵列天线由于辐射单元的阻抗随波束扫描角 θ 而变化,天线与自由空间不匹配不仅会在某些扫描角产生大的功率反射,对系统中的器件安全构成较大威胁;而且方向图中可能出现虚假波瓣,单元阻抗和方向图都要发生变

化。这种变化是由于各辐射单元的能量耦合引起的,当单元间距小到一定程度,例如一个波长,

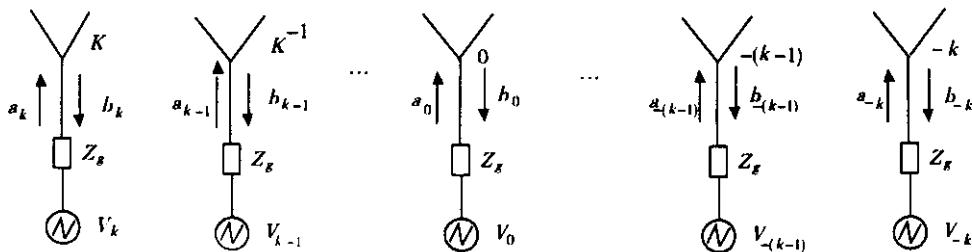


图 1 阵列天线信号激励示意图

设 C_{jk} 为第 k 个单元对第 j 个单元的耦合系数,则第 j 个单元受到其它单元耦合效应产生的总量为:

$$C_j = C_{j1} + C_{j2} + \cdots + C_{jk} + C_{j,k+1} + \cdots + C_{jN} \quad (k = 1, \dots, N, k \neq N) \quad (1)$$

C_j 为矢量和,当相邻单元相位改变而发生波束扫描时,耦合信号的矢量和将随之改变,因而使 j 单元的阻抗产生明显变化。

已知均匀照射面积为 A 的无损耗匹配口径的法向增益为 $G_0 = 4\pi A / \lambda^2$ 。如果从能量的角度将口径看成是完全匹配的,那么阵的增益将随口径投影面积的变化而变化,其表达式为:

$$G(\theta) = 4\pi A / \lambda^2 \cos\theta = G_0 \cos\theta \quad (2)$$

若设定 N 元阵的每个单元的增益均相等,则单个单元的增益为:

$$g(\theta) = 4\pi A \cos\theta / (N\lambda^2) \quad (3)$$

如果单元失配,其反射系数为 $\Gamma(\theta)$,它是扫描角的函数,因此单元的增益方向图为:

$$g(\theta) = 4\pi A \cos\theta [1 - |\Gamma(\theta)|^2] / (N\lambda^2) \quad (4)$$

式(4)表示的单元方向图既从能量的观点考虑了随扫描角变化单元口径投影面积的变化,也考虑了由于互耦效应, $\Gamma(\theta)$ 随扫描角变化对单元波瓣的影响,显然其与孤立的单元方向图是不同的。而对于阵单元阻抗而言,其包括自阻抗和互阻抗,其中互阻抗恰好反映了由于互耦在单元中引起的反射,归一化值为:

$$Z(\theta) / Z_0 = [1 + \Gamma(\theta)] / [1 - \Gamma(\theta)] \quad (5)$$

式中: Z_0 为单元天线馈电线的特性阻抗。

由式(4)可知, $|\Gamma(\theta)| = 0$ 是最理想的情况。此时单元增益方向图为:

$$g(\theta)_{\max} = 4\pi A \cos\theta / (N\lambda^2) = 4\pi a \cos\theta / \lambda^2 \quad (6)$$

其大小就不可忽视。图 1 为阵列天线信号激励示意图。

式中: a 为单元天线面积。

式(6)表明若单元波瓣的形状为 $\cos\theta$, 单元辐射对于不同扫描角始终匹配。则阵列天线的增益可令其为 $G = k \cos\theta n N$ (其中: $k \cos\theta$ 为单元方向性系数, n 为单元效率), 则:

$$k \cos\theta n N = 4\pi A \cos\theta [1 - |\Gamma(\theta)|^2] / \lambda^2 \quad (7)$$

即:

$$|\Gamma(\theta)| = 1 - kn N \lambda^2 / (4\pi A) = c \text{ (常数)} \quad (8)$$

由以上分析可知,要实现宽角匹配应使单元方向图尽量接近余弦分布。若单元波瓣不为余弦分布,对于某个扫描角即使 $|\Gamma(\theta)|^2 = 0$, 而其它扫描角将产生失配, $\Gamma(\theta)$ 不再为零; 若单元波瓣为余弦分布, $\Gamma(\theta)$ 与扫描角无关, 任一扫描方向上 $\Gamma(\theta) = 0$ 或 $= c$ (常数), 因此互耦效应产生的单元阻抗变化和方向图变化的影响可降至最小。

2 互耦效应的分析方法

阵列天线互耦效应的研究,从理论分析和实验技术上来讲都是比较复杂的。单元天线形式多种多样,没有统一有效的理论模型,各单元之间的互耦阻抗难以精确计算。将多波束天线看成多端口网络,从各单元的入射波、反射波出发,以散射参数为工具,可以对阵元数不多的小型阵列天线进行具有一定精度的分析计算。

图 1 中当每个阵元各自独立馈电时,随着波束的扫描,有效导纳也随之改变,馈电端等效阻抗 Z_g 上的电压也跟着变化。因此这种馈电方式不是恒定电压馈电,而是恒定入射波馈电或恒定入射功率馈电。设阵中任一单元的入射波电压幅度为 a , 反射波电压幅度为 b , 则:

$$[b] = [S][a] \quad (9)$$

式中: $[b]$ 、 $[a]$ 分别表示反射和入射行波电压幅度的列矢量; $[S]$ 为散射矩阵, 是一方阵。

矩阵方程式(9)中的典型元素为:

$$b_m = \sum_{p=-\infty}^{\infty} C_{mp} a_p \quad (10)$$

式中: C_{mp} 为第 p 单元对第 m 单元的耦合系数, 也称为散射系数。

由排列的周期性和对称性可知: $C_{mp} = C_{pm}$, $C_{mp} = C_{-m} C_{-p}$ 。阵列中心 0 单元的馈电入射波、反射波电压 a_0 、 b_0 都为行波电压, 它们与驻波电压和电流的关系为:

$$V_0 = a_0 + b_0 \quad I_0 = a_0 - b_0 \quad (11)$$

如果所有入射电压 a_p 的幅度相同且均匀递变相位, 并使波束指向 θ_0 方向, 则:

$$a_p = a_0 \exp[-j(k \sin \theta_0) p dx] \quad (12)$$

阵中单元的辐射特性可由它的输入反射系数或输入阻抗来确定。输入反射系数为:

$$\Gamma_e = \frac{b_0}{a_0} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{a_p}{a_0} \quad (13)$$

$$\text{或: } \Gamma_e = \sum_{p=-\infty}^{\infty} C_{0p} \exp[-j(k \sin \theta_0) p dx] \quad (14)$$

而输入阻抗为:

$$Z_e = \frac{V_0}{Z_0} = \frac{a_0 + b_0}{a_0 - b_0} = \frac{1 + \sum_{p=-\infty}^{\infty} C_{0p} \frac{a_p}{a_0}}{1 - \sum_{p=-\infty}^{\infty} C_{0p} \frac{a_p}{a_0}} \quad (15)$$

将式(12)代入式(15), 则:

$$Z_e = (1 + \Gamma_e) \cdot (1 - \Gamma_e) \quad (16)$$

由以上可知有效反射系数 Γ_e 、阻抗 Z_e 可以利用求和法, 根据扫描角、单元间距和互耦系数直接进行计算。

互耦和自耦系数 C_{0p} 、 C_{00} 确定后, 才能依照上述方法计算。对于这两个重要参数的获得, 我们可以看出, 若除 a_s 外, 其余所有入射波电压 $a_p = 0$ 时, 式(10)为:

$$b_m = C_{ms} a_s \quad \text{即 } C_{ms} = \frac{b_m}{a_s} \quad (17)$$

$$\text{而 } C_{ss} = \frac{b_s}{a_s} \quad (18)$$

式(17)、(18)明白无误地指出, 从多端口网

络理论出发, 除激励阵元以外的其余阵元接上匹配负载, 分别测得任一阵元的反射波及激励阵元的入射波、反射波, 就可算出互耦和自耦系数。

3 互耦效应的实验技术

根据上述分析方法, 在实验室中可采取小规模阵列天线(如 6 元阵、8 元阵)进行性能测试。主要对单元方向图、耦合系数及有源阻抗测量。

在多元阵激励某一单元, 其余单元无源并接匹配负载, 测量单元方向图。由于单元的几何面积为 A/N , 代入式(5)中得:

$$g(\theta, \varphi) = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \cos \theta [1 - |\Gamma(\theta, \varphi)|^2] \quad (19)$$

由测得的单元方向图即可求得反射系数的模值, 将此方向图与理想的余弦方向图比较, 可获得对失配大小的粗略估计。

在多元阵中激励一单元, 测量两单元之间的互耦电压, 其余单元无源并接匹配负载。根据测得的耦合系数, 即可按反射矩阵法计算反射系数与扫描角的关系。但是实验中可能由于某些频率信号太小, 测量误差比较大。

当然, 多元阵各端口同时激励, 波束控制任一扫描角, 理论上可直接测量各单元反射系数。但是需要馈电点匹配良好及馈电网络的精确控制, 实验操作有较大困难, 必须反复摸索, 不断修正误差。

4 结束语

阵列天线单元的互耦效应对天线性能的影响较大, 基于多端口网络理论, 运用 S 参数分析互耦效应并指导实验测量。当然要做大量测试工作取得可靠数据, 才能得出具有一定精度的结果。

参考文献

- [1] 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [2] 汪茂光, 吕善伟, 刘瑞祥. 阵列天线分析与综合[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1989.

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>