

# 复合振子在相控阵天线中的应用研究

王茂彬

南京电子技术研究所,南京,210013

**【摘要】**本文比较了几种常规的相控阵天线宽角扫描匹配方法,简要地叙述了相控阵天线的盲点效应的产生机理,分析了带H面寄生杆复合振子辐射元的阵列环境辐射特性,结果表明,该辐射元不仅能消除扫描盲点,而且能改善宽角匹配性能,并将该研究成果应用于工程项目,实现了宽频带、宽扫描角的有源相控阵天线。

**【关键词】**方向图零点;盲点;H面寄生杆;耦合系数;有源相控阵

## Study of Using Compound Dipole for Phased Array

Wang Mao-bin

Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China

**【Abstract】**This paper compared some methods of impedance matching for wide-angle scanning phased array. The mechanism for blindness producing of phased array is given with a brief introduction. And the radiation characteristics of compound dipole with H-plane parasitic posts in array is described. The result indicates this dipole not only eliminate scanning blindness, but also improve the property of array with wide-angle matching. Using this achievement in research for a engineering project, the active phased array with wide-band and wide-angle has been developed.

**【Key words】**pattern nulls; blindness; H-plane parasitic posts; coupling coefficients; Active phased array

## 1 引言

相控阵天线辐射元的输入阻抗和馈线及激励源之间的失配,不仅引起天线阵的增益降低,还会影响发射机的工作稳定性。在相控阵天线中,由于波束是扫描的,所以阵列环境辐射元的输入阻抗随扫描角而改变,使用一般的天线阵匹配技术,只能在某一固定角度上对天线阵进行匹配,当扫描角变化时,失配将在其余角度上发生,为此要求进行宽角匹配。

常规的宽角匹配方法大体有以下三种:

- (1) E面方向加金属隔板<sup>[1]</sup>;
- (2) 阵面前加介质薄板<sup>[2,4]</sup>;
- (3) 在馈电网络中增加一补偿耦合电路<sup>[3]</sup>。

方法(1)结构简单,但工作频带窄;方法(2)介质薄板离辐射单元距离较近,不利于有源相控阵天线的散热;方法(3)克服了上述两种方法的缺点,但复杂程度高,可实现性差。

## 2 盲点效应

相控阵天线的盲点是指天线扫描到该角度时将没

有(或很少)能量从阵列发射出或被阵列接收。如果盲点出现在相控阵天线要求的扫描角域内,将会严重影响雷达的整体性能。

对于全部单元都被激励的无限大波导辐射元面阵来说,盲点效应可以作如下解释:盲点效应的产生是因为阵列不仅传播基模,还将存在高阶模的耦合。当条件适当时,在某个扫描角度,基模和高次模相叠加,其合成场强值为零,即在该角度上产生一个盲点。图1可简要地说明这个抵消机理。这个抵消效应反映在辐射元上便是辐射元的有源反射系数 $\Gamma = 1.0$ ,即全反射。

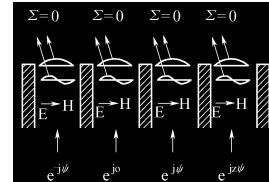


图1 两个低阶波导模式辐射抵消示意图

而对于宽带宽角扫描的相控阵天线来说,其辐射元一般采用对称振子形式,考虑到天线的工作频带相

对较宽,大多采用宽带平衡器馈电,此类辐射元阵列的盲点效应的产生可解释为:振子的辐射与平衡器上感应电流的寄生辐射在某个角度叠加,其合成场强出现零点,即在该角度上产生一个盲点。

对于只有一个单元(中心单元)被激励,其余单元接匹配负载的无限大面阵来说,盲点效应可由单元方向图来解释。对于无限阵列来说,单元方向图为

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

式中:  $Ae$  为单元的面积;  $\cos(\theta)$  为理想孤立单元的方向图;  $g(\theta, \phi)$  为无源阵列环境中的单元方向图;  $\Gamma(\theta, \phi)$  为辐射单元的有源反射系数;  $(\theta, \phi)$  为空间观察角;  $\lambda$  为工作波长。

根据方向图乘积原理,天线系统的总方向图等于阵列因子乘上单元方向图,若在某一波束指向角  $(\theta, \phi)$  上反射系数  $\Gamma(\theta, \phi) = 1.0$ ,由式(1)可见,该角度上  $g(\theta, \phi) = 0$ ,单元方向图存在一零值点。所以在该角度上,阵列就没有功率辐射出(或被接收),天线是“盲的”。

盲点效应不仅在实验中观察到过,而且从理论上也得到了计算证明<sup>[5]</sup>,有人曾对阵列做过各种直接的测量<sup>[6,7]</sup>,表明有单元方向图零值点存在。

### 3 复合振子辐射特性研究

#### 3.1 单元特性

复合振子的典型辐射单元如图 2 所示,其计算模型如图 3 所示,理论和实践都证明了这一类振子辐射元在 E 面扫描时出现扫描盲点<sup>[8]</sup>,文献[9]中对这种带 H 面寄生杆的复合振子的特性进行了研究。

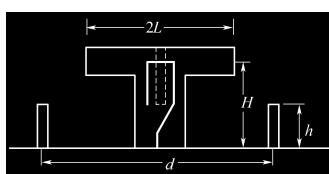


图 2 复合振子典型辐射单元简图

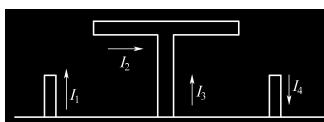


图 3 复合振子计算模型

该复合振子可以通过选择寄生杆的高度来控制辐射特性、阻抗特性和耦合特性,并可展宽辐射振子的 E 面波瓣。根据参考文献[9]的研究结果,取  $h \approx 1/7\lambda$  时,既可保持简单振子原有的阻抗特性,又能改善振子

的 E 面波瓣宽度,特别是端馈方向获得 6dB 以上的展宽,且单元间耦合系数下降 5dB 左右。

#### 3.2 阵列特性

##### 3.2.1 理论计算

采用分段正弦函数和检验函数的伽略金法求解有源振子、无源振子以及寄生杆上的电流分布,计算了  $5 \times 5$  小面阵中心辐射单元的阵列环境单元方向图、耦合系数和输入阻抗。计算参数为:E 面单元间距  $d_x = 0.49\lambda$ , H 面单元间距  $d_y = 0.516\lambda$ , 振子长  $2L = 0.48\lambda$ , 振子高  $H = 0.30\lambda$ , 寄生杆放在两振子之间,振子的等效直径与寄生杆的直径均取  $0.02\lambda$ 。

图 4 理论计算的阵列中心单元 E 面方向图,从图中可以看出,当寄生杆不存在时( $h/\lambda = 0$ ),方向图在  $\theta = 50^\circ$  附近出现零值点;当  $h/\lambda = 0.13$  时,则可以有效地消除零值点;当  $h/\lambda = 0.3$  时,在  $\theta = 45^\circ$  附近出现零值点,也就是说,当寄生杆高度超过某一数值时,单元波瓣特性将退化,这是因为寄生杆上电流与有源振子上的电流趋于反相所致<sup>[9]</sup>。比较上述三种条件下的方向图,可以发现,选择合适的寄生杆高度,可以有效地消除盲点。

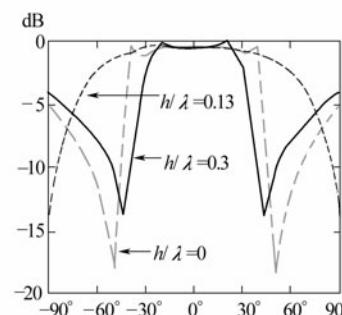


图 4 中心单元 E 面波瓣图

图 5 不同高度  $h$  时中心单元与相邻单元的耦合系数。寄生杆的存在使 E 面耦合系数有较大幅度的下降,  $h/\lambda = 0.13$  时,耦合系数下降可达 6dB, 相同条件下, H 面的耦合系数的变化小于 2.5dB, 可见寄生杆的存在对降低天线系统的总耦合效应是有益的, 这为相控阵天线宽带宽角扫描匹配提供了帮助, 并为实现低

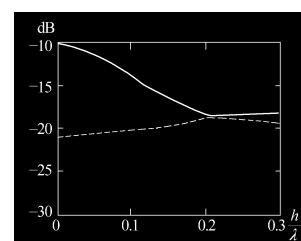


图 5 耦合系数曲线

——E 面; ---H 面。

或超低副瓣相控阵天线创造了有利条件。

图 6 振子的无源输入阻抗与寄生杆高度  $h$  的关系曲线, 从图 6 可以看出, 当  $h/\lambda = 0.125$  附近阻抗变化最小, 基本上保持了简单振子的阻抗特性, 当  $h/\lambda \geq 0.2$  时, 其变化迅速增加。

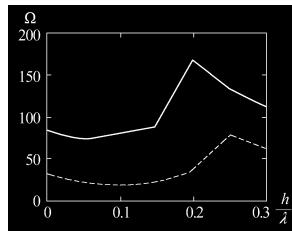


图 6 输入阻抗与寄生杆高度曲线  
——实部(R); ---虚部(-X)。

### 3.2.2 $7 \times 7$ 小面阵实验结果

本文给出的实验例子:

天线极化形式: 水平线极化

辐射单元: 带 H 面寄生杆的复合振子

扫描范围: 一维相扫, E 平面  $\pm 60^\circ$

单元间距:  $d_x = 0.49\lambda_0$   $d_y = 0.516\lambda_0$

振子高:  $0.30\lambda_0$

寄生杆高:  $0.13\lambda_0$

$\lambda_0$ : 中心工作波长

将复合振子组成  $7 \times 7$  小面阵, 进行阵列环境辐射特性的实验研究。主要研究小面阵阵列中心单元的阻抗特性、波瓣特性以及耦合特性。

根据上述理论分析, E 面方向单元间加寄生杆可以降低单元间 E 面方向的耦合系数, 耦合系数的降低可以提高阵列环境辐射单元的阻抗带宽, 改善天线系统的宽角匹配性能, 实验结果也证明了这一点。

图 7、图 8 所示曲线为中心单元与相邻单元间互耦系数随频率变化曲线。由图可知, 采取匹配措施后, E 面面临近中心单元的单元互耦系数大致下降 8dB 左右, 而 H 面的互耦系数变化不大于 2.5dB。

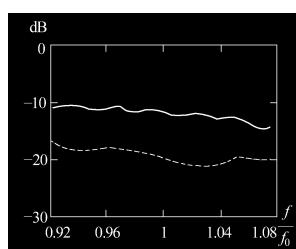


图 7 E 面单元间互耦系数  
——简单振子; ---复合振子。

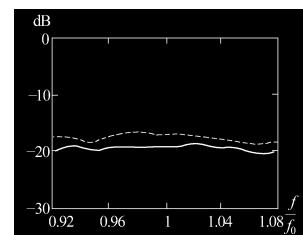


图 8 H 面单元间互耦系数  
——简单振子; ---复合振子。

图 9 所示曲线为阵列中心单元馈电, 其它单元接匹配负载时, 中心单元的单元方向图, 图 10 所示曲线为阵列等幅、等相全馈电情况下, 中心单元在不同扫描角的驻波值。从图 9 可知, 大致在  $50^\circ$  左右单元波瓣存在零值点, 这与理论计算结果非常吻合, 结合图 10 的扫描驻波曲线可进一步得到佐证, 天线扫描到  $45^\circ$  时, 电压驻波比大于 4。

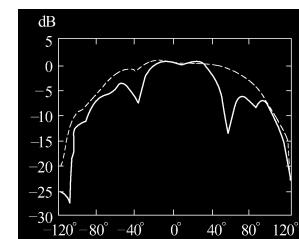


图 9 中心单元 E 面波瓣图  
——简单振子; ---复合振子。

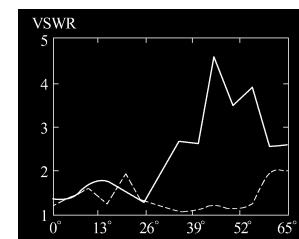


图 10 中心单元驻波系数  
——简单振子; ---复合振子。

## 4 $8 \times 10$ 有源相控阵实验结果

应用上述研究成果, 采用复合振子组成  $8 \times 10$  天线阵, 阵列垂直方向 8 单元, 水平方向 10 单元, 实测天线波瓣图如图 11 所示, 从图中可以看出, 复合振子组成的阵列, 能够有效地消除扫描盲点, 达到宽角宽带扫描匹配。

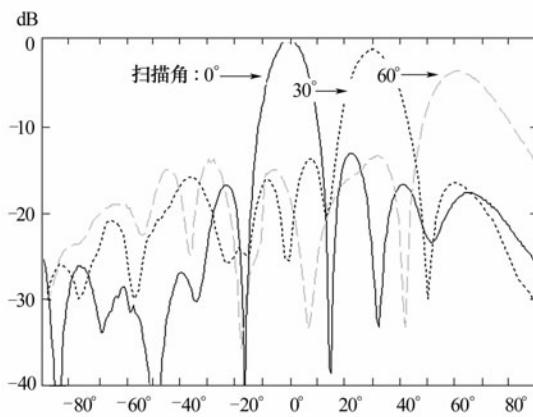


图 11 实测扫描波瓣图

## 5 结论

本文提出的带 H 面寄生杆的复合振子匹配结构,形式简单,易实现,并且能改善相控阵天线宽带宽角匹配性能,较之常规的宽角匹配方法具有许多优点。

## 参 考 文 献

- [1] Hansen R C. Microwave Scanning Antennas. Arrays Theory and Practices. Vol 2, 1966.

- [2] Magill E G and Wheeler H A. "Wide Angle Impedance Matching of a Planar Array Antenna by a Dielectric Sheet" IEEE Trans. Antennas and Propagation, AP-14 PP49-53, (January 1966).
- [3] Amitay N. Improvement of Planar Array Match by Compensation Through Contiguous Element Coupling. IEEE Trans. Antennas And Propagation, AP-14 PP580-586 (September 1966).
- [4] Laughlin G J, Byron E V and Cheston T C. "Very Wide-Band Phased array Antenna" IEEE Trans. AP-20 PP699-704 (November 1972).
- [5] Farrell G F. Mutual coupling effects of triangular-grid arrays by model analysis, IEEE Trans. Vol AP-14, PP. 652-654 (September 1966).
- [6] Lechtreck L W. Effect of coupling accumulation in antenna arrays. IEEE Trans. Vol AP-16, PP. 31-37 (January 1968).
- [7] Bates R H T. Mode theory approach to arrays, IEEE Trans. AP-13, PP. 321-322 (March 1965).
- [8] Schuman H K, Pflug D R and Thompson L D. Infinite planar arrays of arbitrarily bent thin wire radiators. IEEE Trans. Antennas Propagation, AP-32, PP364-377 (April 1984).
- [9] 王茂彬. 复合振子辐射特性分析[J]. 现代雷达, 1998(2), 23-26.

## 作 者 简 介

王茂彬 男, 1965 年生, 学士, 研高工, 南京电子技术研究所, 研究方向是相控阵雷达天线、宽带电子战天线等。

## 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](http://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](http://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](http://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>