

平板裂缝天线子阵激励装置

设计及带宽分析^{*}

顾卫军

(南京电子技术研究所 南京 210013)

【摘要】 子阵激励装置的带宽特性对平板裂缝天线的波瓣带宽和驻波带宽有着重要影响。本文针对目前国内常用的几种子阵激励形式的带宽特性作了一些分析,并给出了其中几种子阵激励形式的设计计算。文中主要讨论、分析了几种子阵激励装置的相位带宽和驻波带宽,并给出了相应的仿真结果和实验验证结果,为工程应用提供了设计参考。

【关键词】 平板裂缝天线,子阵激励,带宽分析

Design and Bandwidth Analysis of Subarray Excited Devices for Planar Array Antenna

GU Wei-jun

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology Nanjing 210013)

【Abstract】 The bandwidth characteristics of subarray excited devices have important influence on the beam bandwidth and VSWR bandwidth of a planar array antenna. This paper analyses bandwidth characteristics of each subarray excited forms in common use in home and abroad and describes the designs and the calculations of some subarray excited forms. The phase bandwidth and VSWR bandwidth of some subarray excited forms are discussed and analyzed, and some related simulation results and experiment results are presented. This paper has also offered the design reference for engineering application.

【Key words】 planar array antenna, subarray excited, bandwidth analysis

限,每个象限再根据天线的带宽指标、天线直径及天

1 引言

当今国际上机载火控雷达所采用的天线形式主要是平板裂缝天线,对平板裂缝天线的带宽性能要求越来越高,除了要求平板天线在雷达频段具有宽带性能外,还要求平板天线在火控制导频段具有较高的增益。根据国外资料介绍和作者的经验认为对平板裂缝天线各组成部分的带宽性能进行最优化设计和精心研制后,这样的带宽要求是有可能达到的。

由于平板裂缝天线中的关键组成部分——子阵激励装置对平板裂缝天线的带宽性能影响甚大,故本文这里着重对子阵激励装置的设计和带宽性能进行分析与讨论。文中给出了几种常用子阵激励装置的设计、驻波带宽和馈电相位带宽的分析、仿真与实验结果。

2 几种子阵激励装置

根据雷达要求,平板裂缝天线一般分为 4 个象

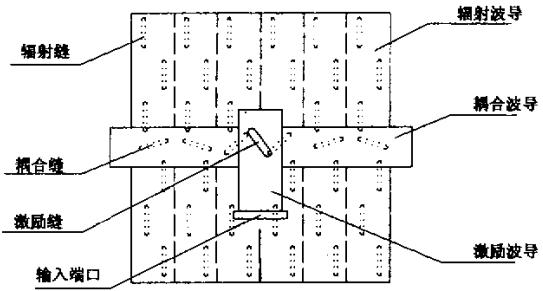


图 1 中间馈电形式的子阵激励装置

限重量等要求分为若干个子阵。子阵是由若干根辐射波导、一根耦合波导和一根激励波导组成,见图 1。其工作原理为:电磁波通过激励波导、耦合波导和辐射波导,把功率按天线口径的幅相分布设计要求分配并馈电到子阵中每个辐射缝上。对耦合波导的

激励通常有端馈和中间馈两种形式。端馈结构简单,设计容易,但带宽性能不好,其带宽一般只有中间馈的一半左右,故平板裂缝天线实际应用较少,所以本文主要讨论中间馈电形式的各种子阵激励装置,即类似于图1中的子阵激励装置。

2.1 H面T型接头激励装置(波导窄边馈电)

H面T型接头激励装置的结构示意图见图2(a)。本例包括本文中其他例子,其耦合缝缝间距均为 $\lambda_g/2$,耦合缝数均以6个为例。根据耦合波导的边界条件和激励源形式可得到耦合波导内TE¹⁰主模的电场、磁场和表面电流分布,如图2(b)。从图2(b)可以看出,对于这种子阵激励形式,除了在T型接头附近可能存在高次模外,其耦合波导中的场分布基本为一理想驻波场。所以,只要使耦合波导中每个耦合缝的倾斜方向互为相反,即可保证所有耦合缝对相应的辐射波导进行同相馈电。当然,邻近T型接头的两个耦合缝因高次模影响,其倾斜方向、耦合缝长都要进行适当处理和修正,以达到最优设计。H面T型接头激励装置的等效电路如图2(c)。

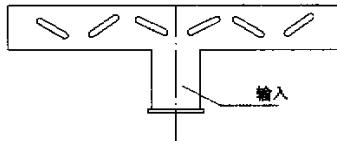


图 2(a) H 面 T 型接头形式

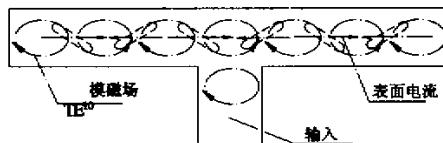


图 2(b) H 面 T 型接头耦合波导内主模磁场结构和表面电流分布

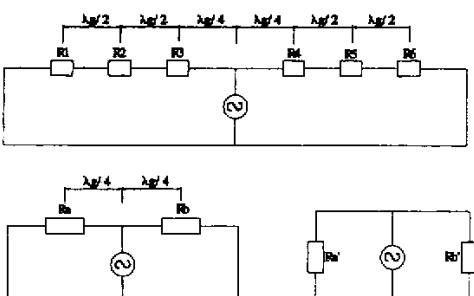


图 2(c) H 面 T 型接头激励装置的等效电路

由于耦合缝是位于耦合波导下表面宽边中心线上的倾斜缝,根据波导理论,可等效为一串联缝或串联阻抗。另从耦合波导视入,H面T型接头可等效为一并联激励源,所以H面T型接头激励装置可看为并—串耦合装置,最终应以导纳量纲分析计算。

由图2(c)有 $R_a=R_1+R_2+R_3$, $R_b=R_4+R_5+R_6$,经 $\lambda_g/4$ 变换后,有 $R'_a=1/R_a$, $R'_b=1/R_b$,并有

$$Y_a = 1/R'_a = R_a = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1)$$

$$Y_b = 1/R'_b = R_b = R_4 + R_5 + R_6 \quad (2)$$

从馈电端视入的总导纳为

$$Y = Y_a + Y_b \quad (3)$$

为了满足带宽要求,同时也考虑到仿真和实验的方便,即H面T型接头的两输出端一般都接负载,等效 $Y_a=Y_b=1$,所以一般取总导纳 $Y=2$ 。当然, Y 取其他值也可以,通过仿真和实验也可得到匹配,但因相当于增加了 $\lambda_g/4$ 阻抗变换器的变换比,故子阵带宽将受到一定影响。实践表明, $Y=2$,子阵驻波带宽将达到最宽。

耦合缝电阻的计算可参见文献【1】,为了方便,这里给出了最终结果。

$$R_n = \frac{\sum_{m=1}^M f_m^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^2} \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N R_n = 2 \quad (5)$$

这里 N 为 N 个耦合缝, M 为 M 个辐射缝, f_m 为第 m 个辐射缝的缝电压。

从以上分析可知,耦合波导中的驻波场结构基本不受激励源的影响,近似一谐振腔体,各耦合缝对辐射波导的馈电相位带宽主要决定于耦合波导中的耦合缝数,故馈电相位带宽应是最宽的。然而,这种激励装置的馈电端输入匹配特性不好,调配困难,导致输入驻波带宽较窄,因而采用这种激励装置的平板裂缝天线的带宽性能无法满足雷达带宽的要求。

2.2 激励缝中间馈电(波导宽边耦合)

宽边激励缝耦合的具体形式可分为中心倾斜缝激励(见图3(a))、纵向缝激励(见图3(b))、横向缝激励(见图3(c))和共线纵向缝激励(见图3(d))等四种形式。

2.2.1 中心倾斜缝激励

从耦合波导视入,倾斜激励缝可看为一串联激励源,即串—串耦合形式。因此耦合波导的等效电路

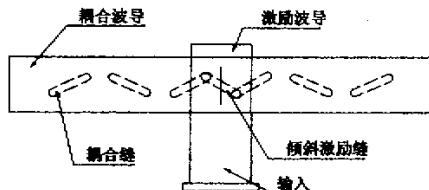


图 3(a) 倾斜缝激励

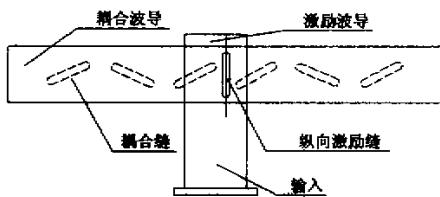


图 3(b) 纵向缝激励

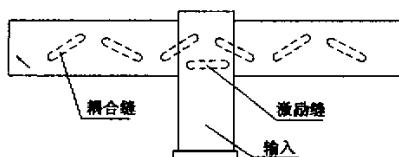


图 3(c) 横向缝激励

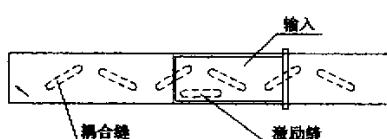


图 3(d) 共线纵向缝激励

应以阻抗量纲为本。本文针对文献【1】有关等效电路图及耦合缝等效电阻计算作了进一步的推导与说明,最终结果与文献【1】一样。首先这种串—串耦合形式的等效电路图如图 4 示。

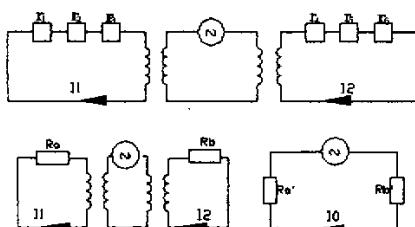


图 4 串—串耦合形式等效电路

这里 I_1, I_2 为 $\lambda_g/4$ 变换前激励缝两边的等效电流, I_0 为经 $\lambda_g/4$ 变换后的等效电流。其中 $R_a = r_1 + r_2 + r_3$, $R_b = r_4 + r_5 + r_6$, 再由 $\lambda_g/4$ 阻抗变换有 $R_a' = 1/R_a$ 和 $R_b' = 1/R_b$ 。每个耦合缝的馈电功率为

$$P'_{11} = \frac{1}{2} I_1^2 r_1, P'_{22} = \frac{1}{2} I_2^2 r_2,$$

$$\dots P'_{44} = \frac{1}{2} I_2^2 r_4, P'_{66} = \frac{1}{2} I_2^2 r_6 \quad (6)$$

故激励缝两边的馈电总功率为

$$P_1 = P'_{11} + P'_{22} + P'_{33} = \frac{1}{2} I_1^2 (r_1 + r_2 + r_3) \\ = \frac{1}{2} I_0^2 R_a' = \frac{1}{2} I_0^2 \frac{1}{r_1 + r_2 + r_3} \quad (7)$$

$$P_2 = P'_{44} + P'_{55} + P'_{66} = \frac{1}{2} I_2^2 (r_4 + r_5 + r_6) \\ = \frac{1}{2} I_0^2 R_b' = \frac{1}{2} I_0^2 \frac{1}{r_4 + r_5 + r_6} \quad (8)$$

设

$$k = \frac{P_1}{P_2} = \frac{R_a'}{R_b'} = \frac{\frac{6}{4} \sum r_n}{\sum r_n} \quad (9)$$

再由 $R_a' + R_b' = 2$ 推得

$$r_1 = \frac{(1+k)}{2k} \frac{P'_{11}}{P_1}, \quad r_2 = \frac{(1+k)}{2k} \frac{P'_{22}}{P_1} \\ r_3 = \frac{(1+k)}{2k} \frac{P'_{33}}{P_1}, \quad r_4 = \frac{(1+k)}{2} \frac{P'_{44}}{P_2} \\ r_5 = \frac{(1+k)}{2} \frac{P'_{55}}{P_2}, \quad r_6 = \frac{(1+k)}{2} \frac{P'_{66}}{P_2} \quad (10)$$

式(10)则为串—串耦合方式耦合缝电阻的设计公式。

2.2.2 纵向缝激励

尽管从激励波导看,这是一并联缝。但从耦合波导视入,它仍是一串联激励源,即串—串耦合形式。所以耦合缝等效电阻设计计算与上述倾斜缝设计完全一样。

实际上从激励波导看,无论激励缝是串联倾斜缝还是并联纵向缝,都仅起功率耦合作用,与耦合波导中耦合缝的等效电路无关。对激励波导的主要指标只有一个,驻波带宽尽可能宽。下面对倾斜缝和纵向缝两种激励形式的带宽性能作定性探讨。

首先两种激励缝的驻波带宽都可以做到很宽,完全可满足天线在频段上的要求。然而,两种激励缝引起的耦合波导中各耦合缝的馈电相位一致性的带宽却不一样。经理论分析和实验验证,对于串—串耦合方式,在激励源和边界条件的约束下,耦合波导中的主模场结构及表面电流分布见图 5。

纵向缝激励的耦合波导内主模磁场结构与表面电流分布与图 5 完全一样。

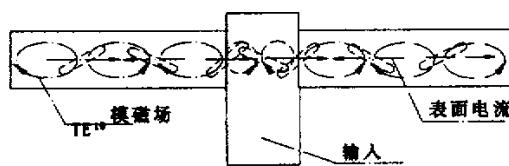


图 5 倾斜缝激励耦合波导内

主模磁场结构与表面电流分布

由图 5 可看到,由于激励缝的存在,原耦合波导中理想的驻波场结构已被改变,即刚好把激励缝两边的馈电相位变成反相关系,同时还引入了 $\lambda_g/4$ 阻抗变换器。显然在这种场结构下,各耦合缝馈电相位一致性的带宽将小于理想驻波场结构下的各耦合缝馈电相位一致性的带宽,即相位带宽将窄于 H 面 T 型接头激励形式。

那么如何在激励缝存在的条件下,尽量保持原理想驻波场结构基本不变呢?上述 H 面 T 型接头形式是一种途径,但驻波带宽不理想。另一种办法是使激励缝平移 $\lambda_g/4$,直接位于某耦合缝正上方。从理论上说,可基本恢复原理想驻波场结构,其相位带宽将增加。但实验表明,由于激励缝与正下方的耦合缝处于强耦合,即使该耦合缝已作了适当修正与补偿,在整个带宽内,该耦合缝的相位变化仍很大,且幅度难以控制,所以基本无实用价值。采用横向缝激励方式也许是一种较好的办法。

2.2.3 横向缝激励

横向缝激励方式如图 3(c)和图 3(d)。从耦合波导视入,激励缝可看成是一并联纵向缝,即并—串耦合方式。这种激励方式也基本保持了耦合波导中的理想驻波场结构,其耦合缝电阻计算及相位关系与前面 H 面 T 型接头形式完全一样。当然,由于激励缝两端头离下方两邻近耦合缝较近,所以其相位带宽必然会受到一定影响。这种激励缝的带宽性能,还有待于今后进一步的仿真计算和实验验证。

3 仿真与实验结果讨论

本文主要给出了倾斜缝和纵向缝两种激励形式的仿真与实验结果。图 6 为倾斜缝激励方式和纵向缝激励方式的激励波导输入驻波带宽特性实验曲线。本文通过 Ansoft 软件对上述两种激励形式进行了仿真计算,计算结果也较接近实验曲线。图 7(a)给出了倾斜缝激励时,耦合波导中各耦合缝的馈电相位随频率变化的实验曲线;图 7(b)给出了纵向缝激励时,耦合波导中各耦合缝的馈电相位随频率变

化的曲线。图 7(a)和图 7(b)中 f_0 为中心频率, $f_0 + f_0 - \Delta f$ 为上、下边频,激励缝均位于耦合波导上方第三和第四耦合缝之间。从图 7(a)可看出,在 f_0 时,各耦合缝馈电相位基本同相,但在边频时,激励缝两边的耦合缝馈电相位差了 30° 左右。如果平板裂缝天线中所有子阵都存在这种有规律的相位差的话,则天线必将产生较高的周期性副瓣。图 8 给出了对应图 7(a)子阵相位起伏所产生天线周期副瓣的一个实例。经验表明,频率偏离 f_0 越多,激励缝两边的耦合缝馈电相位差越大,引起的周期副瓣电平越严重。图 7(b)为纵向缝激励方式的耦合波导相位实验曲线。在边频时,激励缝两边的耦合缝馈电相位差了 12° 左右。可以看出,虽然相位起伏仍存在,但已明显减小。若能够再减少耦合缝数,则相位起伏还可做到更小,即相位带宽可以更宽。可见纵向缝激励的驻波带宽和相位带宽均优于倾斜缝激励方式,主要是由于倾斜缝两缝端头离耦合缝较近,互耦较强,一般需要进行适当修正,但也只能对 f_0 修正较好,无法满足整个频带内的相位一致性。而纵向缝离下方两邻近耦合缝较远,故对耦合缝的互耦影响较小,经验表明,这时耦合缝基本上可以不需修正,从而简化了天线设计。

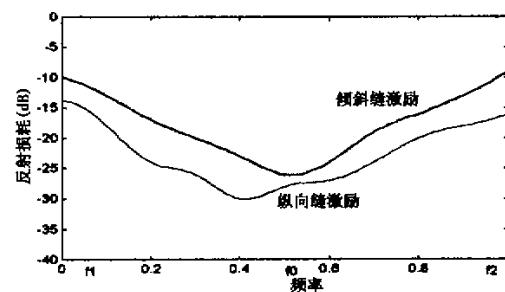
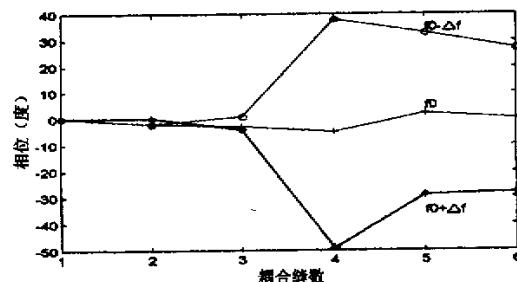


图 6 倾斜缝与纵向缝激励装置驻波带宽

图 7(a) 倾斜缝激励时各耦合缝
实测馈电相位随频率的变化

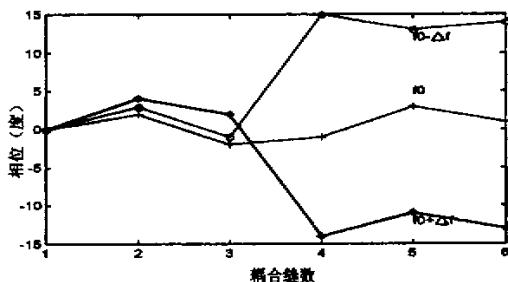


图 7(b) 纵向缝激励时各耦合缝
实测馈电相位随频率的变化

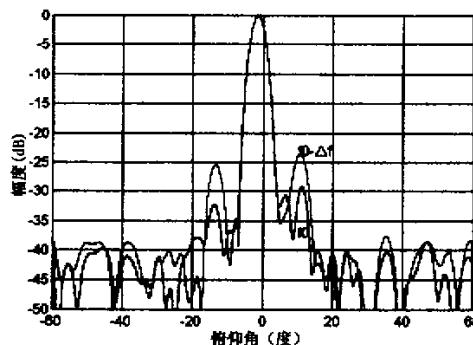


图 8 平板裂缝天线正常波瓣和在边频
因周期相差引起的周期波瓣
万万数据

4 结束语

本文讨论了若干种耦合波导的激励形式,讨论了并—串、串—串结构的理论设计,详细推导了串—串结构耦合缝的等效电路及等效电阻的计算,定性分析了几种子阵激励装置的带宽特性。通过分析对比以及实验验证后认为,就上述几种子阵激励装置的驻波带宽和相位带宽而言,应该说,纵向缝激励形式是目前最好的一种,它的宽带性能已得到工程验证。

参 考 文 献

- 1 李俊沛等. 平板裂缝天线的功率耦合装置. 现代雷达, 1992(4)

顾卫军 1982 年毕业于南京航空学院 6 系机电专业, 1988 年获南京电子技术研究所电磁场与微波天线专业硕士学位。长期从事机载雷达裂缝阵列天线及相控阵天线技术研究。现为该所天线微波部副主任。

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>