

· 天线与系统 ·

中国分类号: TM821

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2012)02-0055-03

一种展宽波导缝隙阵列天线驻波带宽的新方法

高志国, 徐国兵

(中国航天科工集团第二研究院二十五研究所, 北京 100854)

摘要:辐射缝隙导纳和耦合缝隙阻抗的频率特性,是影响缝隙阵列天线驻波带宽的主要因素。以改善整个缝隙阵阻抗匹配频率特性为出发点,提出了一种展宽波导缝隙阵列天线驻波带宽的新方法,即选择合适的辐射缝隙的总导纳常数。仿真分析表明,改变后的缝隙阵列天线的驻波带宽有了较大改善,其与理论分析的结果是一致的。

关键词:缝隙阵列天线; 驻波带宽; 导纳

A Novel Method to Improve the VSWR Bandwidth of Waveguide Slot Array Antenna

GAO Zhi-guo, XU Guo-bing

(No. 25 Institute of the Second Academy, CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: The frequency characteristic of the admittance of radiation slot and the impedance of coupling slot is the main factor that influences the bandwidth of the slot array antenna. Based on the idea of improving the frequency characteristic of the whole array, a novel method of improving the VSWR bandwidth of the slot array antenna is presented in the paper, which selects a suitable admittance constant to reduce the influences of frequency. The simulation analysis has indicated that the VSWR bandwidth of the changed slot array has been improved, and it is consistent with the result of the theory. The result of this paper brings forward a new idea for improving the VSWR bandwidth of the slot array antenna.

Key words: slot array antenna; VSWR bandwidth; admittance

0 引言

波导缝隙天线已广泛应用于机载、弹载及导航雷达中^[1]。该天线具有体积小、重量轻、口径利用率高及副瓣低等特点。

根据缝隙单元间距和馈电方式的选择,波导缝隙阵列天线可分为谐振阵(驻波阵)和非谐振阵(行波阵)2种。驻波阵是一种窄带天线,为保证天线所需带宽,每根辐射波导上的缝隙数受到限制。目前,常用的改善波导缝隙阵列天线驻波带宽的方法有2种:(1)将天线划分为适当数目的子阵。但划分子阵会增加馈电网络的复杂性,以及子阵间的短路板也会对方向图副瓣产生影响^[2],导致副瓣周期性抬高,给超低副瓣的实现带来困难。(2)用脊波导代替常用波导^[3]。但脊波导会增加天线阵列的厚度,这对于厚度要求很高的弹载天线来说是无法实现的。由于抗干扰的要求,雷达系统对天线的带宽及低副瓣的要求越来越高。因此,如何展宽缝隙阵列天线的驻波带宽成为急需解决的问题。

1 理论分析

波导缝隙阵天线的驻波带宽与辐射缝隙导纳和耦

合缝隙阻抗的频率特性有关^[4],随工作频率变化越慢,天线的驻波带宽就越宽。下面具体分析常用平板缝隙阵列天线的阻抗频率特性变化情况。

平板缝隙阵列天线,最常用的结构如图1所示,它由一系列宽边开缝的辐射波导构成天线阵面,在天线背面由耦合波导对辐射波导馈电。辐射波导内部馈电,耦合波导端馈。

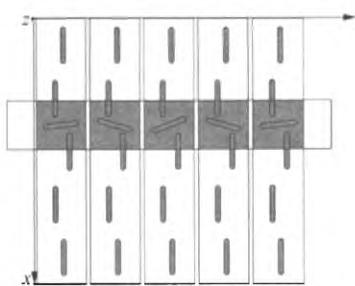


图1 平板缝隙阵结构图

通常为保证缝隙阵列天线中的阻抗匹配,须满足下列条件^[5]

$$\sum_{i=1}^M Y_i^* = 2 \quad (1)$$

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

式中: $\sum_{i=1}^M Y_i^*$ 为任意行辐射波导的总导纳; $\sum_{n=1}^N R_n^*$ 为耦合

波导的总阻抗。

文献[6]提出了缝隙阵列天线的广义匹配方程

$$\sum_{i=1}^M Y_i^a = C \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N R_n^a = \frac{2}{C} \quad (4)$$

即

$$\sum_{n=1}^N R_n^a \cdot \sum_{i=1}^M Y_i^a = 2 \quad (5)$$

辐射波导总导纳 $\sum_{i=1}^M Y_i^a$ 可以为不等于 2 的常数 C , 此时虽然辐射波导是失配的, 但只要满足式(5)即可实现缝隙阵列整个天线的匹配。

$$Y_n^a = \frac{2f_n^2}{2f_n^2 + MC_n} \quad (6)$$

当频率偏离中心频率时, $\sum_{i=1}^M Y_i^a$, $\sum_{n=1}^N R_n^a$ 都发生变化, 导致匹配变坏, 驻波变差。

当不考虑互耦时 $Y_n^a \approx Y_n$,

$$\begin{aligned} Y_n(d_c, l) &= g(d_c) \cdot h(p) \\ h(p) &= h_1(p) + j \cdot h_2(p) \\ p &= l/l_{\text{res}} \\ l_{\text{res}} &= L_{\text{res}}(d_c) \cdot \lambda \end{aligned} \quad (7)$$

$$g = 2.09 \frac{a\lambda_s}{b\lambda} \cos^2\left(\frac{\pi\lambda}{2\lambda_s}\right) \sin^2\left(\frac{\pi d_c}{a}\right) \quad (8)$$

$$\lambda_s = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\lambda = c/f \quad (10)$$

式中: g 为辐射缝隙的谐振电导^[7]; $h_1(p)$ 为辐射缝隙的归一化电导; $h_2(p)$ 为辐射缝隙的归一化电纳, 都是与频率相关的函数; $L_{\text{res}}(d_c)$ 为缝隙偏置的函数, $h_1(p)$ 、 $h_2(p)$ 、 $L_{\text{res}}(d_c)$ 都可用仿真或矩量法计算的数据来拟合。

$$R = 0.131 \left(\frac{\lambda}{\lambda_s}\right) \left(\frac{\lambda}{ab}\right) \left[I(\theta)\sin(\theta) + \left(\frac{\lambda_s}{2a}\right) J(\theta)\cos(\theta)\right]^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I(\theta) \\ J(\theta) \end{aligned} = \left[\cos\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right)(1-\zeta^2)\right] \pm \left[\cos\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right)/(1-\zeta^2)\right] \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{\lambda}{\lambda_s} \cos(\theta) \pm \frac{\lambda}{2a} \sin(\theta) \quad (13)$$

对式(3)求频率 f 的偏导, 即对辐射缝隙谐振总导纳 $\sum_{i=1}^M Y_i^a$ 和耦合缝隙谐振总阻抗 $\sum_{n=1}^N R_n^a$ 的乘积求偏导, 即可得出整个缝隙阵导纳特性随频率的变换特性。

$$\frac{\partial}{\partial f} \left(\sum_{n=1}^N R_n^a \cdot \sum_{i=1}^M Y_i^a \right) = C \cdot \frac{\partial}{\partial f} \left(\sum_{n=1}^N R_n^a \right) + \frac{2}{C} \cdot \frac{\partial}{\partial f} \left(\sum_{i=1}^M Y_i^a \right) \quad (14)$$

这里以 Ku 波段波导缝隙阵为例计算。选取不同的 C 值, 缝隙阵导纳特性变化速率曲线如图 2 所示。

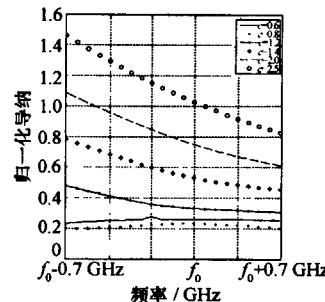


图 2 不同 C 值下缝隙阵匹配特性随频率的变化速率曲线

由图 2 可发现, 当辐射缝隙的总导纳 C 降低时, 整个缝隙阵导纳特性相对于频率的变化速率降低, 即相对于频率的变化不敏感。

因此, 可以采用适当的辐射缝隙的总导纳常数 C , 来减弱整个缝隙阵导纳特性对频率变化的敏感性, 从而展宽缝隙阵的驻波带宽。

2 阵列设计

根据理论分析结果, 设计了辐射缝隙总导纳不同的 7 种 5×5 的波导缝隙阵, 结构如图 1 所示, 这 7 种阵列 E 面、H 面分布都采用 30 dB 副瓣的切比雪夫分布。辐射波导采用中间馈电, 耦合波导采用一端馈电。

3 数值结果

下面使用 HFSS 对 7 种不同辐射缝隙总导纳的缝隙阵列天线进行仿真, 计算其频率特性和辐射特性。

通过图 3 和表 1 可明显发现, 当辐射缝隙总导纳常数 C 选取 1 比选取 2 时, 驻波带宽有了较大改善。

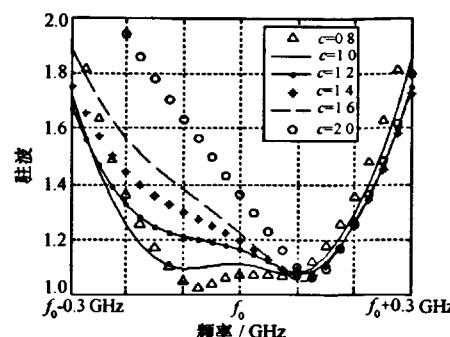
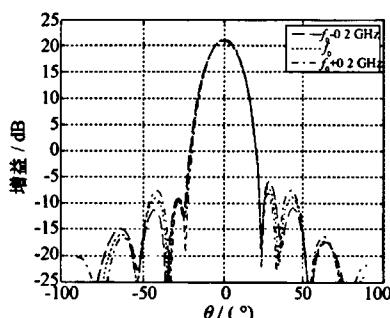
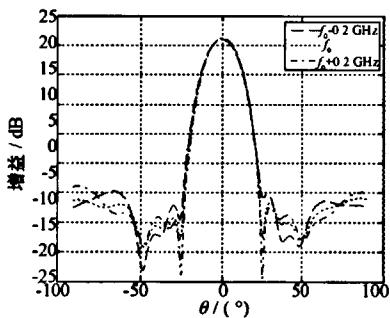


图 3 不同辐射缝隙总导纳带宽($f_0 \pm 0.3$ GHz)内的驻波曲线

表 1 不同辐射缝隙总导纳下的驻波带宽

天线编号	辐射缝隙 总导纳 C	驻波 <1.3 的 带宽/MHz	驻波 <1.5 的 带宽/MHz
1	2.0	190	303
2	1.8	225	363
3	1.6	260	425
4	1.4	314	483
5	1.2	400	515
6	1.0	413	506
7	0.8	373	456

通过图 4、图 5 可发现, 当辐射缝隙总导纳常数 C 选取 1 时, 方向图在整个频带内, 总体形状不变, 边频时比中心频率的副瓣略有提高。

图 4 总导纳 C 为 1.0 时在带宽内 $f_0 \pm 0.2$ GHz 的 H 面方向图图 5 总导纳 C 为 1.0 时在带宽 $f_0 \pm 0.2$ GHz 内的 E 面方向图

4 结束语

辐射缝隙导纳和耦合缝隙阻抗的频率特性, 是影响缝隙阵列天线驻波带宽的主要因素。本文以改善其频率特性为出发点, 提出了一种展宽波导缝隙阵列驻波带宽的新方法, 即选择合适的辐射缝隙总导纳常数。文中给出了理论和仿真分析, 仿真分析与理论分析结

(上接第 54 页)

- Zhao Gang. Analysis of the adaptive side lobe disappears [J]. Space Electronic Technology, 2009(2): 69–72, 87.
 [9] 李宏, 杨英科, 薛冰, 等. 雷达信号处理旁瓣对消性能的静态测试[J]. 中国测试技术, 2003, 5(3): 10–12.
 Li Hong, Yang Yingke, Xue bing, et al. Static state test of side waves self counteract performance in radar signal transac-

果一致。与目前通常用的总导纳为 2 的驻波带宽相比, 有了较大改善。本文的研究成果为展宽波导缝隙阵列天线的驻波带宽提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] 张贞卓, 王湖庄, 陈抗生. 一种新型矩形波导裂缝天线的分析与设计[J]. 微波学报, 1996, 12(1): 42–49.
 Zhang Zhenzhuo, Wang Huzhuang, Chen Kangsheng. Analysis and design of a new kind of slot antenna fed by rectangular waveguide[J]. Journal of Microwaves, 1996, 12(1): 42–49.
 [2] 金林, 何国瑜, 孙庆锋. 平板裂缝天线短路板边缘辐射裂缝的研究[J]. 微波学报, 2002, 18(2): 59–63.
 Jin Lin, He Guoyu, Sun Qingfeng. Study of slots adjacent short board of planar slot antenna [J]. Journal of Microwaves, 2002, 18(2): 59–63.
 [3] 张亚飞, 吕晓德. 一种展宽波导裂缝天线带宽的新方法 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(1): 60–63.
 Zhang Yafei, Lv Xiaode. A novle method to improve the bandwidth of waveguide slot array antenna [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006, 23(1): 60–63.
 [4] Hamadallah M. Frequency limitations on broad-band performance of shunt slot arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(7): 817–823.
 [5] Elliott R, Kurtz L. The design of small slot arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, 26(2): 214–219.
 [6] 孙庆锋, 郭先松. 平板裂缝天线阻抗匹配的广义匹配方程[J]. 现代雷达, 2009, 31(12): 70–72.
 Sun Qingfeng, Guo Xiansong. Generalized matching equations for slotted-waveguide array antenna impedance match [J]. Modern Radar, 2009, 31(12): 70–72.
 [7] Stevenson A F. Theory of slots in rectangular wave-guides [J]. Jounary of Applied Physics, 1948, 19(1): 24–38.

高志国 男, 1980 年生, 高级工程师, 硕士。研究方向为波导缝隙阵列天线。

徐国兵 男, 1976 年生, 高级工程师, 硕士。研究方向为弹载天线。

tions [J]. China Measurement Technology, 2003, 5(3): 10–12.

李森 男, 1986 年生, 硕士研究生。研究方向为电子对抗装备作战效能评估。

李彦志 男, 1965 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向为电子对抗指挥、仿真及作战效能评估。

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>