

# 背腔式缝隙天线阵列的分析与设计

方 良, 童创明

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)



**摘要:**采用等效磁流分析方法, 将波导激励的单背腔缝隙单元阵场求解问题离散, 得到缝隙表面的边界积分方程。应用矩量法求解该边界积分方程, 得到单背腔缝隙单元阵的场结构。再应用阵列天线理论仿真计算了一种易于共形的缝隙天线阵的方向图, 与实际测量结果进行了对比, 取得了较好的效果。

**关键词:**等效磁流法; 单背腔缝隙天线; 矩量法

中图分类号: O441. 4

文献标识码: A

文章编号: 1671-654X(2009)04-0031-03

## 引言

缝隙天线阵由于其结构紧凑且易于共形的特点, 常常在设计飞行器天线时被优先考虑。通过将辐射缝隙放在谐振腔体壁上, 而达到对缝隙单元进行激励的目的, 是诸多激励方法之一。Galejs<sup>[1]</sup>已在这方面理论上作了大量工作, 详细地推导了背矩形腔式矩形缝隙天线单元的导纳计算公式; Paoloni<sup>[2]</sup>在前人的基础上分析计算了18单元和32单元的以单个矩形腔体为背底、由窄谐振缝隙组成的边射阵列的方向图; Kumar<sup>[3]</sup>给出了背腔式天线的几种实际应用形式。

Galejs、Paoloni、Kumar考虑的背腔式天线都为单腔激励式背腔天线, 当实际要求的天线缝隙单元增多时, 将要求天线腔体谐振在高次模上, 而在实际应用过程中, 模次越高势必会给控制模式纯度带来更多困难, 进而影响天线的特征参数。甚至影响了背腔式天线在某些场合的应用。一种更为可行的方法是采用多腔激励缝隙阵列, 从而降低谐振腔体的工作模次。本文从分析单背腔四单元缝隙阵入手, 计算分析了多背腔缝隙天线阵的可行性, 并与实测结果进行了对比。

## 1 基本原理

### 1.1 单腔结构

分析单腔缝隙天线模型如图1所示, 总的缝隙天线阵是由多个该形式的单腔模型组成。为简化起见, 考虑在工作频率下, 矩形腔体和缝隙都处于谐振状态并且假设谐振腔的场与特征模式场结果一样。谐振腔

谐振于 $TE_{201}$ 模式, 与 $x-y$ 面平行的平面上电场可以表示为:

$$E = E_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l}\right) z_0 \quad (1)$$

其中 $l = \frac{3}{2}\lambda_0$ , 缝长 $\frac{1}{2}\lambda_0$ ,  $a = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , 其中 $\lambda_0$ 是自由空间波长,  $\epsilon_r$ 是填充腔体介质的相对介电常数。

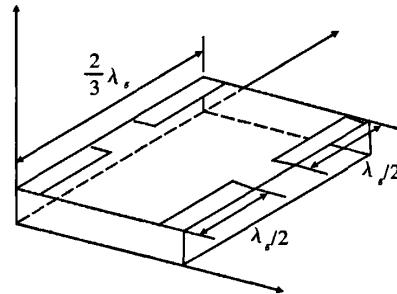


图1 单腔缝隙天线模型

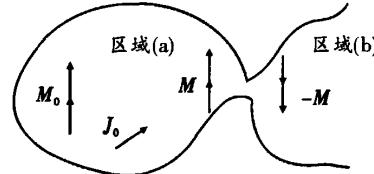


图2 缝隙天线等效模型

### 1.2 矩量法求解

图2表示在两个区域(a)和(b)之间孔径耦合的

问题,结合要考虑的模型,区域(a)表示封闭腔体而区域(b)是外部半无界空间初级激励源(外加) $\mathbf{J}_0$ 和 $\mathbf{M}_0$ 是在封闭区域,则图1单背腔缝隙天线可表示为图2所示模型。因而图1所示背腔式缝隙天线的孔径问题可用广义网络表达式来处理。

在区域(a),场由初级源 $\mathbf{J}_0$ 和 $\mathbf{M}_0$ 激励,加上孔径区域上的等效磁流 $\mathbf{M}$ , $\mathbf{M} = [\mathbf{n}^0, \mathbf{E}_r]$ , $\mathbf{n}^0$ 为孔径上的单位法线矢量, $\mathbf{E}_r$ 为孔径内初级电场的切向分量。在区域(b),场是由在孔径上的等效磁流 $-\mathbf{M}$ 产生的,孔径用导电体覆盖,根据横跨孔径的磁场切向分量的连续性,可得

$$\mathbf{H}_r^a(\mathbf{M}) + \mathbf{H}_r^b(\mathbf{M}) = -\mathbf{H}_r^0 \quad (2)$$

式中磁场由下式给出

$$\mathbf{H}_r^a(\mathbf{M}) = - \int_{S_0} \bar{\mathbf{G}}^a(\frac{\rho}{\rho'}) \cdot \mathbf{M}(\rho') dS' \quad (3)$$

式中: $\rho = xx^0 + yy^0$ 是场点的径向矢量; $\rho' = x'x^0 + y'y^0$ 是源点的径向矢量。 $\bar{\mathbf{G}}^a(\rho/\rho')$ 是区域(V)的Green张量函数。将式(3)代入(2)中,就得到了关于未知磁流 $\mathbf{M}(\rho')$ 的一阶面积分方程:

$$\int_R \int_{S_0} [\bar{\mathbf{G}}^a(\frac{\rho}{\rho'}) + \bar{\mathbf{G}}^b(\frac{\rho}{\rho'})] \cdot \mathbf{M}(\rho') dS' = -\mathbf{H}_r^0 \quad (4)$$

应用矩量法,定义孔径 $S_0$ 上的一组磁流 $\mathbf{M}[\mathbf{M}_n(\rho), n=1, 2, \dots, N]$ 的基函数。令

$$\mathbf{M} = \sum_{n=1}^N V_n \mathbf{M}_n \quad (5)$$

式中 $V_n$ 是待定的系数。将式(5)代入式(4)中,得

$$\sum_{n=1}^N V_n \mathbf{H}_r^a(\mathbf{M}_n) + \sum_{n=1}^N V_n \mathbf{H}_r^b(\mathbf{M}_n) = -\mathbf{H}_r^0 \quad (6)$$

取权函数 $W_m(\rho)$ , $(m=1, 2, \dots, N)$ ,对等式(6)两端作内积得

$$\sum_{n=1}^N V_n [W_m, \mathbf{H}_r^a(\mathbf{M}_n)] + \sum_{n=1}^N V_n [W_m, \mathbf{H}_r^b(\mathbf{M}_n)] = -[W_m, \mathbf{H}_r^0], \quad (m=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

求解该线性方程组,便可确定系数 $V_n$ ,应用式(5)可求出等效磁流 $\mathbf{M}$ ,进而可求得场和场有关的其他参数。

### 1.3 辐射方向图的求取

由文献[3]有,天线方向性 $D$ 定义为

$$D = \frac{|F_{\max}|^2}{\frac{1}{4\pi} \int_{\theta} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin\theta d\theta d\varphi} = \frac{|F_{\max}|^2}{[|F|^2]} \quad (8)$$

式中 $F(\theta, \varphi)$ 是缝辐射方向图,且 $F_{\max} = F(0, \varphi)$ 。

$$F(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \sum_{i=1}^N U_i(\theta, \varphi) \cdot V_i \quad (9)$$

式中

$$F_1 = \frac{\cos(\beta l \psi_x) - \cos(\beta l)}{\sqrt{1 - \psi_x^2}} \cdot \frac{\sin(\beta l \psi_x)}{\psi_x} \quad (10)$$

为缝隙单元辐射方向图,

$$U_i(\theta, \varphi) = e^{j(\varphi \psi_x + \gamma \psi_y)} \quad (11)$$

为相位因子,其中

$$\psi_x = \sin\theta \cos\phi, \psi_y = \sin\theta \sin\phi$$

## 2 试验和结果

按以上分析方法,计算得到单腔缝隙天线辐射方向图为图3。

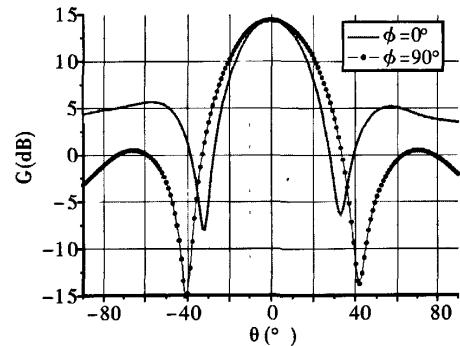


图3 单腔缝隙天线方向图

按照以上分析,实际制作了一个Ku波段的矩形背腔缝隙天线,如图4所示。天线具体尺寸为: $b = 23.6\text{mm}$ , $l = 34.5\text{mm}$ ,缝长 =  $13.4\text{mm}$

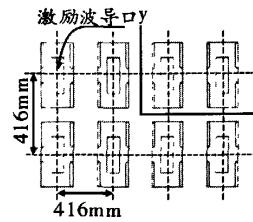


图4 4×8缝隙天线阵模型



图5 实测天线

在实际工作中,设计制作了Ku波段,由八个天线单元共32个缝隙组成的阵列天线(示意图如图4)。在不同频率下计算得到的天线辐射方向图与实测结果对比,如图6所示。在不考虑各单元之间的耦合条件下,计算所得阵列方向图与实际测量结果对比图为图7和图8。

## 3 结论

由测量结果与计算结果对比图可以看出,应用矩量法计算的背腔式天线阵方向图较好的与实际情况相吻合。证明了矩量法应用于腔式天线特性计算的可行性和准确性。

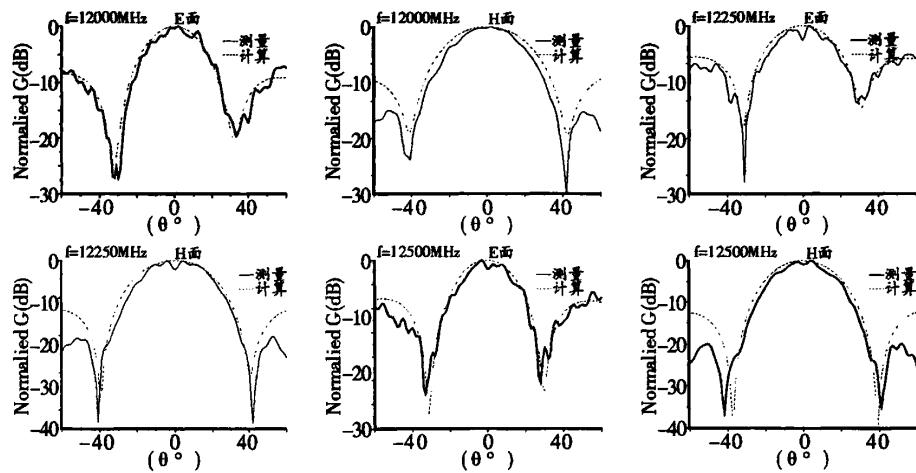
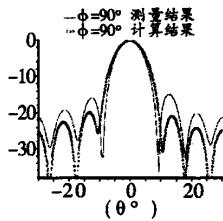
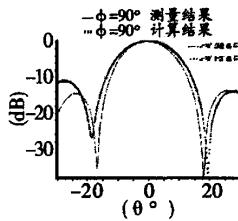


图6 天线辐射方向图的计算结果与实测结果

图7  $\varphi = 0^\circ$  测量与计算结果对比图8  $\varphi = 90^\circ$  测量与计算结果对比

## 参考文献:

- [1] J Galejs. Admittance of a rectangular slot which is backed by a rectangular cavity [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1963, 11: 119 - 126.
- [2] Paoloni F J. A Cavity - Backed Resonant Slot Array - Theory and Measurement [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1980, 28(2).
- [3] A Kumar 等著, 王仁德译. 微波腔式天线 [M]. 南京: 《SSS》丛书编辑部出版, 1999.

## Analysis and Design of Cavity- backed Slot Antenna Array

FANG Liang, TONG Chuang-ming

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** This paper applies the method of equivalent magnetic current to make the field- solve problem of slot antenna which is backed by a single cavity and excited by a waveguide discrete, then it gets the boundary integral equations above the surfaces of the slots. Next uses the method of moment to solve the equations and gets the field structure of the particular antenna. Through using the theory of array antenna, it gets the directivity pattern of the slot array antenna. This directivity pattern is compared to the measured directivity pattern, and gets a nice result.

**Key words:** the method of equivalent magnetic current; single cavity backed slot antenna; the method of moment

## 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>