

文章编号:1005-6122(2002)-0011-04

# 大型波导纵缝阵列天线的分析与设计

李 龙 张 玉 李 建瀛 梁 昌洪

(西安电子科技大学, 西安 710071)

TN82 A

**摘要:** 本文利用矩量法和等效网络法对矩形波导宽边纵缝阵列进行了精确的理论分析,严格计算阵中缝隙的内都和外部互耦,并利用等效网络法提取阵中缝隙的等效导纳特性。在此基础上,提出模型阵列和模型缝隙的大型波导缝隙阵列的设计方法,理论结果与实验比较吻合。

**关键词:** 矩量法、等效网络法、波导缝隙阵, 模型阵列, 模型缝隙

## Analysis and Design of Large Waveguide Longitudinal Slot Arrays

LI Long, ZHANG Yu, LI Jianying, LIANG Changhong

(Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract:** A rigorous analysis of the rectangular waveguide longitudinal slot arrays is made by using the method of moment and the equivalent network method in this paper. The inner and outer mutual couplings and the characteristics of the equivalent admittance of the slots in the arrays are determined accurately. On this basis, a method of the model array and model slots is presented for designing the large waveguide slot arrays. Theoretical results obtained are in good agreement with the experimental values.

**Key words:** Method of moment, Equivalent network method, Waveguide slot array, Model array, Model slot

### 1 引言

波导缝隙天线阵具有结构紧凑、体积小、重量轻、天线口径利用率高、宽角副瓣低及容易实现低副瓣乃至超低副瓣等特点,被广泛应用于雷达和通讯领域。随着计算机技术的发展,数值方法的应用使波导缝隙天线阵的CAD设计得以实现。波导缝隙天线阵在构成上包括辐射阵面和馈电网络,其分析与综合研究相应分成辐射阵面分析与综合和馈电网络的分析与综合两个部分。本文重点研究天线部分的分析与设计,利用矩量法和等效网络理论对波导宽边组成的面阵进行了精确分析,针对大型缝隙阵,采用模型阵列和模型缝隙的思想进行较为准确的设计。

### 2 矩量法分析

如图1所示,假设有 $M$ 个波导,每个波导上开有 $N$ 个裂缝(波导上缝的个数也可以不相等),阵参数如

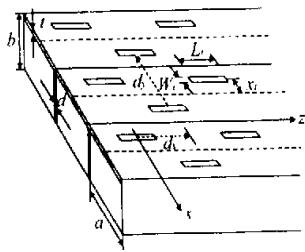


图1 波导纵缝阵列示意图

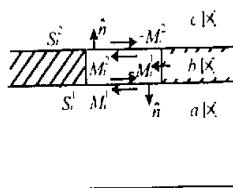


图2 缝隙口面等效磁流分布

• 收稿日期:2001-12-03

图 1 所示,假设所有缝都为窄缝,即满足  $L_i/W > 10$ ,如图 2 所示,把缝隙天线结构分成波导内部区域  $a$ 、腔体  $b$  和半空间  $c$  三个区域, $M_a^i, M_b^i$  分别为缝隙口面  $S_a^i, S_b^i$  上的磁流分布,由在  $S_a^i, S_b^i$  上磁场切向分量的连续性可建立如下积分方程组<sup>[1,2]</sup>:

$$\frac{1}{j\omega\mu}(k^2 + \frac{d^2}{dz^2}) \left( \sum_{i=1}^N \iint_{S_a^i} (-M_a^i) G_a^{ii}(\vec{r}, \vec{r}') ds + \iint_{S_b^i} (-M_b^i) G_b^{ii}(\vec{r}, \vec{r}') ds + \iint_{S_c^i} M_c^i G_c^{ii}(\vec{r}, \vec{r}') ds \right) = H_i^i(\vec{r}) \quad (1)$$

$$\frac{1}{j\omega\mu}(k^2 + \frac{d^2}{dz^2}) \left( \iint_{S_a^i} M_a^i G_a^{ii}(\vec{r}, \vec{r}') ds + \iint_{S_b^i} (-M_b^i) G_b^{ii}(\vec{r}, \vec{r}') ds + \sum_{i=1}^{M+N} \iint_{S_c^i} (-M_c^i) G_c^{ii}(\vec{r}, \vec{r}') ds \right) = 0 \quad (2)$$

其中,(1)式是在  $S_a^i$  面上时满足的磁场边界条件,(2)式是  $r$  在  $S_c^i$  面上时满足的边界条件, $G_a^{ii}$  为波导内部并矢格林函数的  $zz$  分量; $G_b^{ii}$  为腔体内部并矢格林函数的  $zz$  分量; $G_c^{ii}$  为半空间并矢格林函数的  $zz$  分量; $H_i^i(\vec{r})$  为第  $i$  个缝的激励场切向分量。

采用 Galerkin 法,对第  $i$  号缝,将  $S_a^i$  面上的磁流  $M_a^i$  展开成如下形式:

$$M_a^i = \sum_{s=1}^{N_b} a_{is}^i f_s^i(\vec{r}) \quad r \in S_a^i \quad (j=1,2; i=1,2,\dots,N_s) \quad (3)$$

其中, $a_{is}^i$  ( $s=1,2,\dots,N_b$ ) 为第  $i$  个缝上  $S_a^i$  面上磁流  $M_a^i$  的展开系数; $N_b$  为基函数展开个数; $N_s = M \times N$  为缝隙的总个数; $f_s^i(\vec{r})$  为基函数,选为

$$f_s^i(\vec{r}) = \sin\left(\frac{s\pi(\eta + L_i/2)}{L_i}\right) \quad -L_i/2 \leq \eta \leq L_i/2 \quad (j=1,2; i=1,2,\dots,N_s; s=1,2,\dots,N_b) \quad (4)$$

定义内积

$$\langle f_1, f_2 \rangle = \iint_{S_a^i} f_1 f_2 ds \quad (5)$$

则可把积分方程组(1)和(2)转化为矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N_s} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{N_s 1} & Y_{N_s 2} & \cdots & Y_{N_s N_s} \end{bmatrix} \cdot A = H \quad (6)$$

$$\begin{cases} A = [a_{11}^i, a_{12}^i; a_{21}^i, a_{22}^i; \cdots; a_{N_s 1}^i, a_{N_s 2}^i]^T \\ H = [H_{11}^i, 0; H_{21}^i, 0; \cdots; H_{N_s 1}^i, 0]^T \end{cases} \quad (7) \quad (8)$$

式中, $Y_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,N_s; j=1,2,\dots,N_s$ ) 为  $N_b \times N_b$  阶子矩阵, $N_s = 2N_b$ 。(6)式的系数矩阵中,波导内部互耦项仅限于同一根波导上的  $N$  个缝之间,而外部互耦项存在于所有的缝( $N_s$  个)之间。对角线元素及两个次对角线元素仅与所对应缝的参数有关,其他奇数行元素对应波导内部缝的互耦,偶数行元素对应波导外部缝的互耦。 $a_{is}^i$  为待求的磁流展开系数,均为  $N_b$  列的子行矩阵; $H_i^i$  为已知的激励量,均为  $N_b$  列的子行矩阵,0 为  $N_b$  列的零元子行矩阵。

### 3 等效网络参数

矩量法对阵面的整体分析可以精确获得包含内、外部互耦影响下的缝隙口面磁流,利用馈电波导区域内的并矢格林函数式,可得馈电波导中主模  $TE_{10}$  波的前向和后向散射磁场。根据传输线理论,可将平面阵中的第  $i$  个缝等效为一个二端口网络,端口参考面选在缝隙中心,如图 3 所示。由散射参数的定义可得:

$$S_{11} = -\frac{H_{11}^-(x, z)}{H_{11}^+(x, z)}, \quad S_{21} = \frac{H_{12}^+(x, z)}{H_{11}^+(x, z)} + 1 \quad (9)$$

其中, $H_{11}^-(x, z), H_{12}^+(x, z)$  分别表示第  $i$  个缝的后向散射场和前向散射场的横向分量; $H_{11}^+(x, z)$  表示在第  $i$  个缝的参考面处的入射场,它应包含这根波导中其他缝隙的前向和后向散射场在这里作用的总和,即

$$H_{11}^+(x, z) = A_{11} e^{-j\beta_{11}} + \sum_{p=1}^{i-1} H_{p1}^+(x, z) e^{-j\beta_{p1}} + \sum_{q=i+1}^N H_{q1}^+(x, z) e^{-j\beta_{q1}} \quad (10)$$

式中,  $H_p^+$  表示第  $p$  个缝的前向散射磁场的横向分量;  $H_q^-$  表示第  $q$  个缝后向散射磁场的横向分量;  $\theta_i = \beta_1 d_i$ ,  $d_i$  是第  $i$  个缝到激励端的距离,  $d_m$  表示第  $p$  个缝与第  $t$  个缝的距离;  $A_i$  是入射波的幅度。该二端口网络可以等效为一个并联导纳, 如图 4 所示, 则第  $i$  个缝的等效导纳可以表示为

$$\bar{Y} = -2S_{11}/(1 + S_{11}) \quad (11)$$



图 3 缝的等效二端口网络

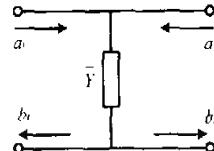


图 4 缝等效导纳

用缝隙的等效网络可以方便地进行缝阵的分析和设计。对于平面阵中的一根波导网络或线阵网络, 可以采用网络  $T$  参数的级联来获得总的等效网络参数和总输入导纳, 如图 5 所示。选择缝网络和中间传输线  $\theta$  网络作为级联的  $T$  网络矩阵单元, 即

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{\bar{Y}}{2})e^{j\theta} & \frac{\bar{Y}}{2}e^{-j\theta} \\ -\frac{\bar{Y}}{2}e^{j\theta} & (1 - \frac{\bar{Y}}{2})e^{-j\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于行波阵, 终端负载  $Y_L$  为匹配负载; 对于驻波阵, 终端为短路, 利用  $T$  矩阵级联特性, 可以获得输入端反射系数  $\Gamma$ , 则总输入导纳为  $\bar{Y}_m = (1 - \Gamma)/(1 + \Gamma)$ 。

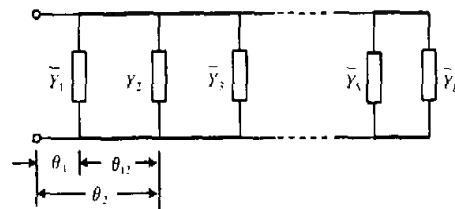


图 5 缝等效网络级联模型

## 4 大型阵的设计

大型波导缝隙阵的设计是相当复杂的, 缝隙之间的耦合比较强, 必须仔细考虑缝隙之间的内部和外部互耦, 才能实现预定的工作特性。无限大阵模型的提出, 是基于阵中缝隙所处的电环境基本相同, 对于大型阵列, 这一前提基本满足, 从而在工程设计中取得了较好的结果。文献[3]指出, 无限大缝隙模型缝导纳的特性与  $7 \times 7$  的有限缝隙中心缝的特性基本一致, 因此, 本文提出了“模型阵列”和“模型缝隙”的矩量法设计思想, 大致可归纳为以下几个步骤:

- (1) 按天线的电气指标要求, 确定波导尺寸、面阵单元个数、单元排列方式及各缝上的缝电压等。
- (2) 建立“模型阵列”, 以模型阵列中的中心缝和边缘中心缝(横向边缘和纵向边缘)作为“模型缝隙”, 采用 MoM 法对模型阵列进行精确分析, 计算模型缝隙的等效网络参数、等效导纳与谐振缝长、缝偏置等关系特性。
- (3) 根据天线的口径分布, 利用中心模型缝隙的等效网络特性, 计算除了边缘缝隙以外的其他缝隙的等效电导, 设计其谐振缝长和缝偏置等参数, 并利用网络级联计算总的输入导纳和反射系数。
- (4) 利用边缘模型缝隙特性, 计算横向边缘波导缝隙和纵向边缘波导缝隙的设计参数, 利用网络理论计算总反射系数, 注意缝隙的匹配。

利用模型阵列和模型缝隙的思想, 结合矩量法的阵面分析技术和网络技术, 可以方便地对大型波导缝隙阵进行简化设计。如果要进行较低副瓣的设计, 必须更精确地计算阵中所有缝隙的等效导纳和缝上实际电压, 调整其特性以满足设计要求, 这是一个优化过程。

## 5 数值结果

将本文方法与文献[1]中小型阵的实验结果进行了比较, 两者比较吻合。此处, 建立了一个  $9 \times 9$  的模型阵列, 计算了中心模型缝隙和边缘模型缝隙的特性, 利用此特性设计了一个 X 波段  $20 \times 20$  均匀分布的大型纵缝驻波阵列, 理论与实测结果比较吻合, 如图 6 所示。模型缝隙特性的差异在阵列的设计中必须考虑, 如图 7 所示。

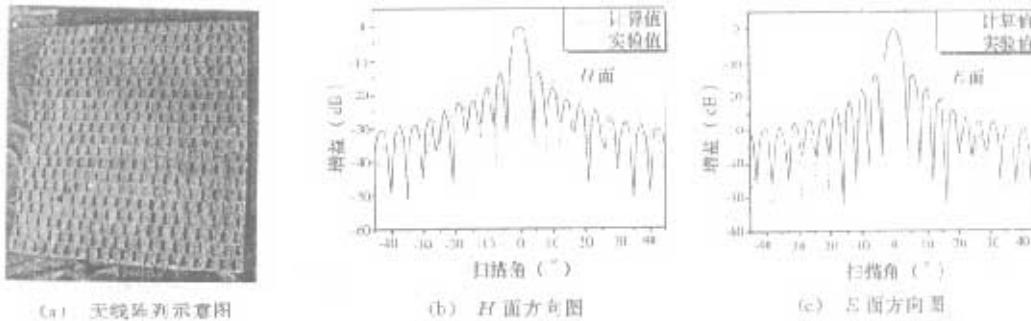


图6 均匀分布的大型驻波阵模型及远场方向图

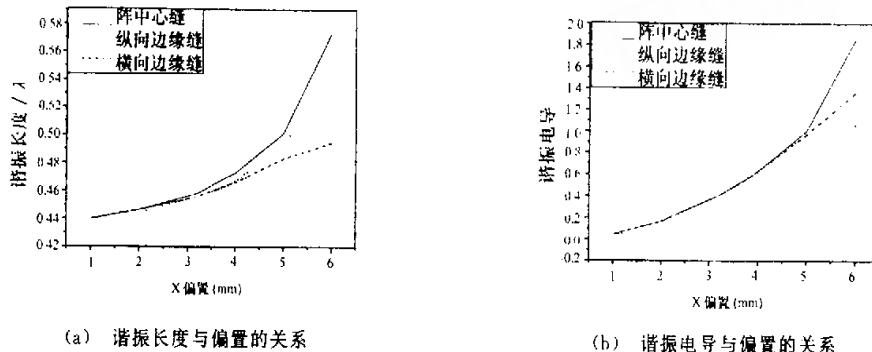


图7 模型缝隙的偏置与谐振长度和谐振电导的关系特性

## 6 结论

本文采用矩量法和等效网络法对宽边纵缝阵列进行了精确的分析,在严格考虑阵中缝隙内部和外部互耦的基础上,利用等效网络法提取阵中缝隙的等效纳特性。在此基础上,我们建立“模型阵列”,并提取“模型缝隙”的特性,结合边缘效应,对大型波导缝隙阵进行了设计,理论与实验结果比较吻合。

## 参 考 文 献

- [1] 任济时,吕善伟.伽略金法分析矩形波导缝隙天线耦合特性.北京航空学院学报,1983(1): 75~95.
- [2] 李建瀛,梁昌洪.矩形波导纵缝阵列的矩量法分析与设计.电波科学学报,1998(4): 428~432.
- [3] Hung Yuet Yee. The design of large waveguide arrays of shunt slots. IEEE Trans. AP, 1992, 40(7): 775~781.

**李 龙** 1977年出生,1998年毕业于西安电子科技大学,获电磁场与微波技术专业学士学位,同年进入硕士研究生阶段的学习,现为西安电子科技大学直接攻博研究生。主要从事电磁场数值计算、电磁兼容、波导缝隙阵、孔耦合理论等方面的研究工作。

**张 玉** 1978年出生,现为西安电子科技大学博士研究生,主要感兴趣的领域为:缝隙阵分析与设计、复杂系统电磁兼容分析、电磁场数值计算等。

## 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>