

# 大型波导裂缝阵列天线中广义导纳参数的快速提取

金雯，王文博，徐金平  
(东南大学毫米波国家重点实验室，南京 210096)

**摘要：**本文采用了一种有效的方法来提取大型波导裂缝阵列天线中的广义导纳矩阵参数 ( GAM )。以波导裂缝所在平面法线方向为参考方向，将天线分成内外两层。对于内部区域通过将波导裂缝阵列天线以缝隙为单元划分为单元网络，利用HFSS软件并结合插值技术，建立相应的导纳参数数据库，从而快速获取任意缝隙长度和偏移位置的广义导纳矩阵，根据网络级联理论最终实现大型波导裂缝阵列天线的导纳参数的准确快速提取。

**关键字：**广义导纳矩阵 ( GAM )，波导裂缝天线，快速算法

## Fast Calculation of GAMs of Large Waveguide Slotted Arrays

Wen JIN, Wenbo WANG, Jinping XU,  
(State Key Laboratory of Millimeter Waves, University, Nanjing 210096)

**Abstract:** A fast method to calculate the generalized admittance matrices(GAMs) of large slotted waveguide planar arrays is implemented in this paper. The method is based on the segmentation of the whole array structure into two regions: one is the external region including the plate containing the slots, and the other one is the internal region including the whole waveguides below the plate. The internal region is divided into blocks which contains only one slot, connected to each other via their GAMs. It is convenient to build a data base containing such GAMs for discrete sets of geometrical parameters of slot length and their position aided by the Ansoft HFSS and interpolation technology.

**Key Words:** generalized admittance matrix (GAM), waveguide slotted array, fast algorithm

### 1 引言

波导裂缝天线是一种重要的微波天线，在微波通信和雷达系统中获得了广泛的应用，它具有口面利用率高、低副瓣、功率大、重量轻、可靠性高、环境适应性好等优点。

对于大型波导裂缝阵列天线的设计分析，波导的导纳参数是一个决定辐射方向图和天线机械机构的关键参数。它可以通过理论分析或试验得到。由于试验操作工作量大，耗费耗时多，对加工要求很高，要获得精确的导纳参数难度大。因此波导的导纳特性的理论分析计算对于工程设计十分重要。电磁仿真工具

如Ansoft HFSS、CST Microwave Studio的出现和发展，虽然大大简化了天线的设计分析，但是对于大型裂缝天线阵列，它们将消耗大量的计算机资源和计算时间。实际上大型阵列天线的分析在一般中小型计算设备上很难实现。因此研究大型裂缝阵列天线准确而快速的分析与设计方法，在工程分析与设计中具有重要意义。

传统的研究方法[1]，都是以波导轴向为参考方向，单缝作为全局电路的一个并联单元，只考虑沿轴向传播主模影响，至于高次模、波导壁厚度、涂敷介质、非同根波导之间裂缝的互耦以及裂缝在半空间中的相互作用往往被忽略。

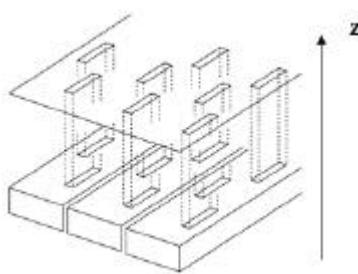


图1 波导裂缝阵列天线的分层结构

如图1所示，如果以波导裂缝所在平面法线方向为参考方向，将天线分成内外两层：外部区域由辐射裂缝所在的半空间平面构成，内部区域包括整个辐射波导，二者通过辐射裂缝连接起来。

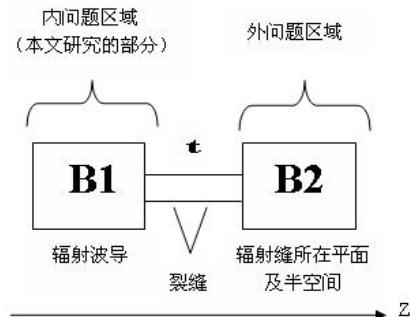


图2 内外区域的分析示意图

分析区域如图2所示，整个外部区域可以充分考虑缝隙与缝隙、缝隙与半空间之间的相互耦合，利用成熟的矩量法进行计算，而内部区域通过整体分析，也能充分考虑内部缝隙之间的影响，这种分析方法既能突破大型波导裂缝阵列天线难以用商业软件处理，而且计算速度和效率都能大大提高。Morini[2][3]等人研究发现，采用广义导纳矩阵（GAM），连接内外区域具有较强的鲁棒性，非常适合这种大型波导裂缝天线的分析方法。

为了快速提取波导裂缝天线内部区域的广义导纳矩阵，实现最终获取远场辐射情况，本文采用了一种有效的波导裂缝阵列天线内部区域导纳参数的分析方法，充分利用了商业软件和插值技术的灵活性，实现了导纳参数的快速提取。

## 2 波导裂缝阵列天线中GAM的快速提取

提取波导缝隙阵列天线内部区域GAM参数的流程如图3所示。



图3 GAM提取流程图

首先将内部区域划分成更小的单元，通常只包含一条缝，然后利用现有商业软件HFSS，对同一类单元进行参数扫描分析。在实际工程中，如果对每一个独立的单元进行仿真计算，仍将耗费大量的时间和计算机资源。考虑到波导裂缝导纳是一个关于缝隙长度和位置的复杂二元函数，如果能建立起每条缝导纳参数关于位置信息的数据库，采用插值计算，就能大大提高计算效率。实践经验表明，对于每个频率点，大概需要5-10个缝长，20-30个偏移值，就能建立起满足精度要求的数据库。然后通过Matlab编写离散数据的二元插值函数程序，实现快速获取单元广义导纳矩阵 $Y^i$ 。最后利用Matlab编写级联程序，级联每个单元的广义导纳矩阵 $Y^i$ ，最终得到波导内部区域所有的导纳参数信息GAM，进而得到天线的辐射场以及各项指标。

在划分单元的时候，涉及到行波状态和谐振状态两种情况，需要分情况讨论。

对于行波天线，如图4所示，行波天线基本单元的是一个T型结构，将每一种模式处理成相应的一个端口，其等效网络模型如图4右所示。它是一个 $(2P+M)$ 端口网络，其中 $P$ 个馈联端口， $M$ 个辐射端口。 $P$ 端口用于实现内部级联， $M$ 端口即为内外问题连接的接口。

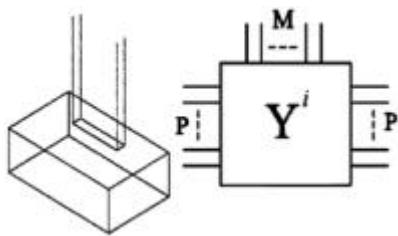


图4 行波天线的基本单元示意图

考虑到抛开辐射面的影响，这就是一个无耗互易网络，因此它的导纳矩阵将进一步简化为一个纯虚数的矩阵，这就意味着，对于每个GAM，实际的数据量仅为 $((2P+M)*(2P+M+1))/2$ 个实数。级联  $Y^i$  得到内部区域的GAM，包含波导裂缝阵列天线输入导纳和辐射端口导纳两个重要参数。

对于谐振天线，考虑简单的端馈形式，处理行波的方法很容易推广到驻波天线阵的处理，其分块结构与电路模型基本相同，只是包含短路面的单元需要单独进行计算，该单元退化成一个  $(P+M)$  端口的网络。

平面阵可以看成是线性阵的组合，并且根据实际工程经验，波导裂缝天线缝隙之间的互耦主要是同一根波导之间，波导与波导之间的互耦非常小，可以忽略不计。因此只需讨论一般单根波导裂缝阵列天线的处理，平面阵可以沿用此方法。

### 3 计算结果

运用文中提出的方法，分别对波导行波阵列天线和驻波阵列天线进行导纳参数的提取，并将计算结果与文献资料进行了比对。

#### 3.1 波导行波阵列天线的计算结果

取文献[4]中的21缝波导裂缝天线为分析实例，采用BJ - 100标准波导，忽略壁厚影响，中心频率为9.375GHz。在本文中，只考虑主模的影响，取  $M=P=1$ 。

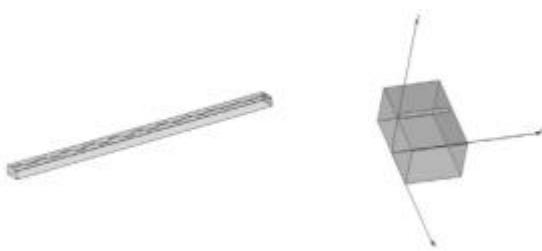


图5 21元波导裂缝天线及其单元

将21元波导裂缝天线分成21个单元，不考虑其上表面的辐射，提取导纳参数。这21个单元基本结构类似，只需建立1个数据库。

#### 情况一 不考虑辐射缝的影响

不考虑辐射缝影响的前提下，天线的每个单元退化为一般二端口网络。表1给出了天线的输入导纳插值级联后的结果与HFSS整体仿真结果对比，结果吻合。

表1 不考虑辐射缝的输入导纳计算结果

输入导纳	插值级联后的计算结果	HFSS整体仿真结果	误差
$Y_{11}$ ( im )	-0.0012502	-0.001298	3.68%
$Y_{12}$ ( im )	-0.0036744	-0.0036876	0.36%
$Y_{21}$ ( im )	-0.0036744	-0.0036876	0.36%
$Y_{22}$ ( im )	-0.0012502	-0.0012843	2.65%

#### 情况二 考虑辐射缝

考虑辐射缝的前提下，天线的每个单元即为三端口网络，其中主要关心的是输入导纳和自导纳部分  $Y_{ii}$ 。

表2 考虑辐射缝的输入导纳计算结果

输入导纳	插值级联后的计算结果	HFSS整体仿真结果	误差
$Y_{(1, 1)}$ ( im )	-0.0013483	-0.0013416	0.50%
$Y_{(1, 23)}$ ( im )	-0.0037235	-0.0037223	0.34%
$Y_{(23, 1)}$ ( im )	-0.0037235	-0.0037223	0.34%
$Y_{(23, 23)}$ ( im )	-0.0013483	-0.0013406	0.57%

表3 辐射缝级联前后导纳值对比结果(只取一半)

辐射缝n	级联前每个单元辐射缝的 $Y_{ii}$ ( im )	级联后辐射缝的 $Y_{ii}$ ( im )
11	-0.00026806	-0.00056479
12	-6.13E-05	-0.00039663
13	-0.0002862	-0.00070021
14	-0.00035853	-0.00063684
15	-0.00041394	-0.00055107
16	-0.0003043	-0.00040013
17	-0.00030832	-0.00040672
18	-0.00043357	-0.00051069
19	-0.00013313	-0.00016251
10	-0.00048436	-0.00049814
21	-0.00048838	-0.00050316

误差分析：HFSS是全波分析软件，建立数据库的单元模型并没有考虑高次模和互耦的影响，但是整体仿真中的高次模和互耦却不可忽略。由表2表3可知，由于级联时考虑了缝隙之间的影响，缝隙的导纳参数产生了变化，中间的缝隙互耦最严重，变化最大。

### 3.2 波导驻波阵列天线的计算结果

取文献[5]中的8元波导裂缝天线为分析实例，采用BJ-100标准波导，忽略壁厚影响，中心频率为9.375GHz。在本文中，只考虑主模的影响，取M=P=1。

沿用行波阵的处理方法，除了包含短路面的单元需要单独仿真，其余7个单元只需建立1个数据库。为了尽量降低高次模的影响，可以将含短路面的单元的端口设置延长 $I_g/4$ 。计算结果如表4, 5, 6所示。

表4 不考虑辐射缝的输入导纳计算结果

输入导纳	插值级联后的计算结果	HFSS整体仿真结果	误差
Yin	0.00024989	0.00026999	7.44%

表5 考虑辐射缝的输入导纳计算结果

输入导纳	插值级联后的计算结果	HFSS整体仿真结果	误差
Yin	0.00017129	0.00019157	10.6%

由上表可见，计算结果与仿真结果基本吻合

表6 辐射缝级联前后导纳值对比结果（只取一半）

辐射缝n	级联前每个单元辐射缝的Y <sub>ii</sub> (im)	级联后辐射缝的Y <sub>ii</sub> (im)
1	-0.017646	-1.8113e-005
2	-0.032373	-0.00020066
3	-0.06747	-0.0001322
4	-0.073505	-0.00025094

误差分析：除了与行波天线一样的情况以外，由于谐振波导的短路面设置在距离缝1中心点 $I_g/4$ 处，级联后对整个波导辐射缝隙的导纳参数影响很大。越靠近短路面影响越大。

## 4 结论

本文采用了一种有效的提取波导裂缝阵列天线内部区域导纳参数的快速方法，利用插值技术，建立起一个具有广泛适用性的单元结构导纳参数的数据库。在整个计算过程中，计算时间和内存资源主要消耗在前期数据库的建立过程中。对于文中所举的两个例子，因为频率相同，波导相同，完全可以共用一个数据库，该数据库包含一个单元结构8个缝长30个偏移缝的广义导纳矩阵，对于普通PC机，大约需要3小时建立完成。对于结构相同的波导裂缝阵列天线，只需前期建立一个数据库文件，因此十分适用于大型阵列的计算，计算效率明显提高。结果表明，该方法能迅速提取大型波导裂缝阵列天线中的导纳参数信息，为后续外部区域的辐射问题研究打下了重要的基础。

## 参考文献

- [1] ELLIOTT R, Antenna Theory and Design[M], Englewood Cliffs:Prentice-Hall , Inc , 1981,pp.325-420.
- [2] Antonio Morini, Tullio Rozzi, and Giuseppe Venanzoni, “On the Analysis of Slotted Waveguide Arrays,” IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol.AP-54, No.7, pp.2016-2021, Jul.2006.
- [3] S.Chiarandini and A.Morini, “Full wave CAD oriented technique for the analysis of airborne flat plate arrays,” in Proc.IEEE AP-S Int.Trans. Antennas and Propagation Symp., Boston, MA, pp.210-213, Jul.2001.
- [4] 杨丽娜，丁君，郭陈江，许家栋，互耦对波导缝隙天线设计的影响及修正，导弹与制导学报,pp.972-976,2005.
- [5] 谢拥军，辛娟，王鹏，波导缝隙阵天线的快速优化设计，电子学报 vol. 34, pp. 1726-1728, Sep. 2006
- [6] 范景云，应用HFSS9.0设计波导裂缝驻波阵天线 [Z]. Ansoft 2004年用户通讯.

## 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>