

# 全向波导裂缝阵列天线的数值分析\*

李建瀛<sup>1</sup> 李乐伟<sup>2</sup>

(1. 新加坡—MIT 联盟(SMA) 新加坡 117576)

(2. 新加坡国立大学 新加坡 119620)

【摘要】介绍了一种新的分析全向矩形波导裂缝阵列天线方向图的方法。以电场积分方程为基础,选用 Rao, Wilton 和 Glisson 的 RWG function 作为矩量法计算的基函数和检验函数,计算了裂缝波导内外壁上的电流分布,继而对全向波导裂缝阵列的辐射方向图作了计算。数值计算结果也验证了 T. Takeshima 的实验结论即裂缝对矩形波导的 E 面全向辐射特性及波导高度对方向图不圆度的影响。同时也说明了文中所介绍的方法的有效性。

【关键词】裂缝天线,天线方向图,矩形波导,数值分析

中图分类号:TN959 文献标识码:A

## Numerical Analysis of Omnidirectional Slotted Antenna

LI Jian-ying<sup>1</sup> LI Le-wei<sup>2</sup>

(1. Singapore-MIT Alliance(SMA) Singapore 117576)

(2. National University of Singapore Singapore 119620)

【Abstract】This paper proposes a new approach for analyzing omnidirectional waveguide slots and their arrays. The electric field integral equation (EFIE) is formulated in a standard way, and the integral equation is then solved by using the method of moments where the Rao, Wilton and Glisson (RWG) functions are employed as both basis and weighting functions in the Galerkin's procedure. After the currents on the wall of waveguide are acquired the radiation pattern of omnidirectional waveguide slot antenna is computed. The measurement results (by T. Takeshima) are verified by the computed results in this paper. And the results shown that the high of the waveguide affect the roundness of the radiation pattern very strong. The analysis method which is introduced in this paper is verified at the same time.

【Key words】slot antenna, radiation pattern, rectangle waveguide, numerical algorithm

## 0 引言

水平极化全向矩形波导裂缝阵列天线广泛应用于通讯系统和信标雷达系统。这种天线易于设计和工程机械加工,它是一种结构紧凑的高增益天线。全向矩形波导裂缝对阵列天线的 E 面辐射特性由文献[1]作了比较全面的实验分析。文献[2]利用矩量法(MoM)对以缝隙对为对象建立的等效磁流积分方程作了严格的理论分析。文献[3]也对空气填充及介质填充的波导缝隙天线作了详细的矩量法分析。但至今对这种缝隙天线的辐射问题的严格理论分析还没有文献发表。

基于对电场积分方程的矩量法直接求解,给出了缝隙对的方向图的严格理论计算结果。选用文献[4]作为基函数和检验函数,以分析矩形波导的内外壁及裂缝壁上的等效电流,继而对缝隙的辐射做了进一步的分析。

## 1 理论分析

假设金属导体的表面用  $S$  表示,入射电场  $E^i$  导体表面  $S$  上产生的感应电流为  $J(r)$ 。根据电场的边界条件得到的电场积分方程(EFIE)如下

$$\hat{t} \cdot \int_S \bar{G}(r, r') \cdot J(r') dS' = \frac{4\pi i}{k\eta} \hat{t} \cdot E^i(r) \quad (1)$$

$r$  在金属表面  $S$  上  $\hat{t}$  表示金属表面  $S$  的单位切向矢量

$$\bar{G}(r, r') = \left( \bar{I} - \frac{1}{k^2} \nabla \nabla' \right) g(r, r') \quad (2)$$

$$g(r, r') = \frac{e^{ik|r-r'|}}{|r-r'|} \quad (3)$$

利用矩量法(MoM)求解 EFIE(1),即可得到金属表面的等效电流  $J(r)$ 。把  $J(r)$  用矢量 RWG 函数<sup>[4]</sup>作为基函数展开  $\{J_n(r)\}$ ,即

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N I_i \mathbf{J}_i(\mathbf{r}) \quad (4)$$

其中  $I_n$  是未知的电流的展开系数。

同时也选用 RWG 函数为检验函数  $\{t_j(\mathbf{r})\}$ , 则可把式 (1) 转换成  $N$  阶线性方程组

$$\sum_{i=1}^N Z_{ji} I_i = V_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中

$$V_j = \frac{4\pi i}{k\eta} \left[ \int_s t_j(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) dS \right] \quad (6)$$

$$Z_{ji} = \int_s t_j(\mathbf{r}) dS \cdot \int_s \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{r}') dS' \quad (7)$$

当计算物体的散射时, 矩阵方程 (5) 的右端可用公式 (6) 得到。在分析天线的辐射问题时可以另外考虑激励情况。本文的分析的激励源是在波导内设置一个小偶极子。

求出金属物体表面的等效电流  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  后, 计算金属体的散射和辐射的公式是一致的

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = \frac{ik\eta e^{-ikr}}{4\pi r} \hat{\mathbf{i}}_r \times \left\{ \hat{\mathbf{i}}_r \times \int_s \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{ik(\mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{i}}_r)} dS' \right\} \quad (8)$$

其中  $\hat{\mathbf{i}}_r$  是观察方向  $\mathbf{r}$  的单位矢量。分别考虑公式 (8) 中  $\mathbf{E}^s(\mathbf{r})$  的  $\theta$  分量和  $\varphi$  分量即可得到散射体不同的极化分量及天线的 E 面或 H 面方向图。

## 2 数值结果

在计算裂缝波导的辐射问题时把一个小的偶极子放置在波导内的一端作为激励源, 波导的另一端短路。波导的宽度是 22.86 mm。假设工作频率是 9.375 GHz。偶极子放置在离波导端头的四分之一导波长处 ( $0.25\lambda_g$ ,  $\lambda_g = 44.8036$  mm)。缝隙的宽度选为 1.00 mm。

波导宽面纵向裂缝对如图 1 所示, 两个缝被刻在波导宽面的相对位置。第一个例子的几何参数为波导的臂厚为 1 mm, 波导的窄边  $b$  分别选为 10.16 mm, 5.00 mm, 2.00 mm 和 1.00 mm。只有一个缝对。缝隙长 16 mm, 所有 4 种情况的偏置  $x$  都是 5.43 mm。波导长度是 156.81 mm, 为了降低短路块对裂缝的辐射的影响, 选裂缝的中心距离波导的短路块  $1.25\lambda_g$ 。

缝对的辐射方向图如图 2 所示。当  $b$  选取的值不同时, E 面方向图的最大值与最小值的差变化很大, 它们的差分别为 1.4 dB ( $b = 1.00$  mm), 2.3 dB ( $b = 2.00$  mm), 4.8 dB ( $b = 5.00$  mm) 和 13 dB ( $b = 10.16$  mm)。

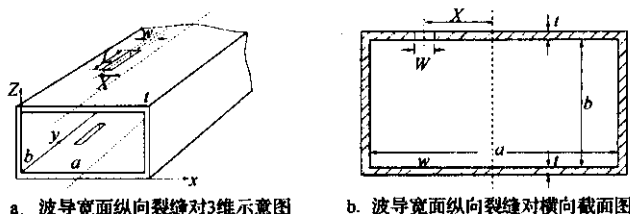


图 1 波导宽面纵向裂缝对示意图

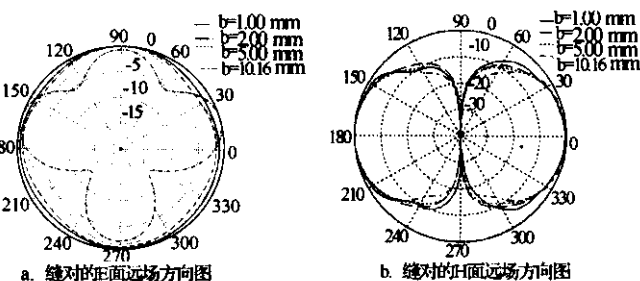


图 2 缝对的远场方向图

mm), 但 H 面的远场方向图差别不太大。

例二在波导的宽边刻 4 个缝隙对, 缝隙的几何参数为波导的臂厚为 1.00 mm, 波导的窄边  $b$  仍分别选为 10.16 mm, 5.00 mm, 2.00 mm 和 1.00 mm。缝隙长 16 mm, 波导长度是 134.41 mm, 最后的一个缝对的中心距离波导的短路块为  $0.25\lambda_g$ 。所有 4 种情况的偏置  $x$  都是 1.43 mm。

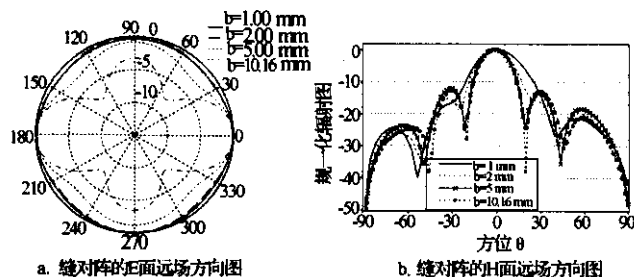


图 3 缝对阵的远场方向图

例二的天线阵的辐射方向图如图 3 所示。E 面方向图的最大值与最小值的差分别为 0.81 dB ( $b = 1.00$  mm), 0.89 dB ( $b = 2.00$  mm), 2.87 dB ( $b = 5.00$  mm) 和 7.87 dB ( $b = 10.16$  mm)。不同高度的波导导致 H 面的远场方向图差别较大, 这也与电导变化引起不匹配有关 (如图 5 所示)。

为了更好的分析波导裂缝对的辐射特性, 例三在选取裂缝的几何尺寸时选取其谐振尺寸。第三个例子同样在波导的宽边也刻 4 个缝隙对, 分以下几种情况 (1)  $b = 1.00$  mm, 缝长 13.95 mm, 偏置  $x$  为 0.73 mm。 (2)  $b = 2.00$  mm, 缝长 14.55 mm, 偏置 1.03 mm。 (3)  $b = 5.00$  mm, 缝长 15.10 mm, 偏置 1.63

mm。(4)  $b = 1.00$  mm, 缝长 13.95 mm, 偏置 0.73 mm。(5)  $b = 10.16$  mm, 缝长 15.12 mm, 偏置 2.33 mm。波导长度是 134.41 mm, 最后的一个缝对的中心距离波导的短路块为  $0.25 \lambda_g$ 。除了第 4 种情况波导的臂厚为 0.5 mm 外其他几种情况波导的臂厚都为 1.0 mm。

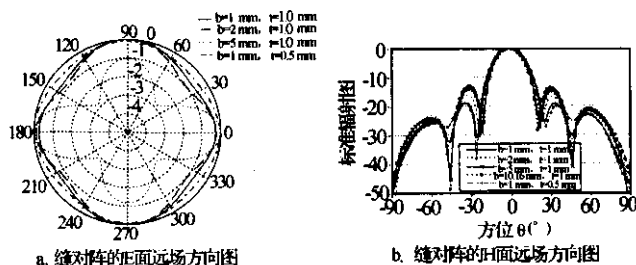


图 4 缝对阵的远场方向图

例三的天线阵的辐射方向图如图 4 所示。E 面方向图的最大值与最小值的差分别为 0.69 dB ( $b = 1.00$  mm), 1.02 dB ( $b = 2.00$  mm), 2.87 dB ( $b = 5.00$  mm) 和 7.98 dB ( $b = 10.16$  mm)。当  $b = 1.00$  mm 且  $t = 0.5$  mm 时, E 面方向图的最大值与最小值的差为 0.42 dB。当  $b = 10.16$  mm 时, E 面方向图与例二的计算结果没有大的变化, 这里没有绘出。

从以上的计算结果可以看到理论计算结果与文献 [1] 的试验结论是吻合的。不同高度的波导对 E 面远场方向图的影响很大, 对于阵列缝隙来说缝隙的谐振状态导致 H 面的远场方向图有较大差异, 处于谐振时的裂缝的 H 面辐射方向图比较理想。

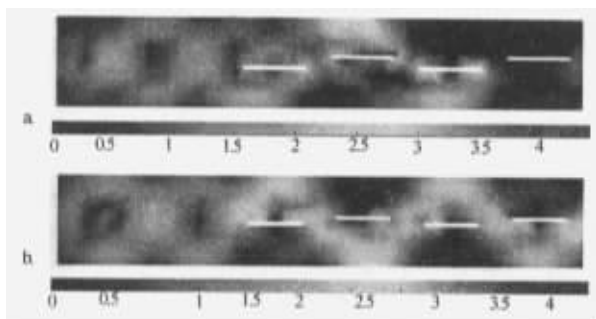


图 5 裂缝波导内壁的电流分布 ( $b = 1.00$  mm  $t = 1.0$  mm)

如图 5 所示的是裂缝波导内壁表面的电流分布。图 5a 和图 5b 的波导尺寸为  $a = 22.86$  mm,  $b = 1.00$  mm,  $t = 1.0$  mm, 分别是例二和例三的计算结果。从图 5a 看出, 由于缝隙没有处于谐振状态导致波导内壁的电流分布呈紊乱分布。当把缝隙的参数调整到缝处于谐振状态时波导内壁的电流分布呈有一定规律分布。

万方数据

## 4 小 结

本文分析了全向波导裂缝天线的辐射特性。着重讨论了缝隙参数及波导尺寸对方向图的影响。与文献 [1] 的结论相比证明了本文采用的分析方法对分析缝隙的辐射特性很有效。分析了全向的 E 面方向图及裂缝谐振与非谐振情况对 H 面方向图的影响。同时本文的分析结果可以清楚了解等效电流在波导壁上的分布情况。限于篇幅, 这里没有讨论缝隙电参数的提取问题。

## 参 考 文 献

- 1 Takeshima T. X-band omnidirectional double-slot array antenna. *Electron Eng.*, 1967, 39(10): 617 ~ 621
- 2 吕善伟. 波导缝隙对特性的研究. *电子学报*, 1988, 16(9): 104 ~ 107
- 3 Sangster A J, Wang H. Resonance properties of omnidirectional slot doublet in rectangular waveguide. *Electronics Letters*, 1993, 29(1): 16 ~ 18
- 4 Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1982, 30(5): 409 ~ 418

李建瀛 Received the degrees of B. Sc. in Mathematics, M. Eng. Sc. and Ph. D. both in Electromagnetic Field and Microwave Technology from Henan Normal University, in 1986, Xidian University, China, in 1992 and 1999, respectively. From 1992 to 1996, he worked at Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an, China as a Research Engineer. Since 1999, he has been first with the Department of Electrical and Computer Engineering at the National University of Singapore (NUS) where he was a Post-doctoral Research Fellow and then with High Performance Computation for Engineered Systems (HPCES) Programme at the Singapore-MIT Alliance (SMA) where he is currently a Research Fellow. His current research interests include the fast multipole method and its applications to radar cross sections, analysis and design of phased arrays, waveguide slot antennas, and microstrip antennas.

李乐伟 Received the degree of B. Sc. in Physics, M. Eng. Sc. and Ph. D. in Electrical Engineering from Xuzhou Normal University, Xuzhou, China, in 1984, China Research Institute of Radio wave Propagation (CRIRP), Xinxiang, China, in 1987 and Monash University, Melbourne, Australia, in 1992, respectively. In 1992, he worked at La Trobe University (jointly with Monash University), Melbourne, Australia as a Research Fellow. Since 1992, he has been with the Department of Electrical and Computer Engineering at the National University of Singapore where he is currently an Associate Professor. Since 1999, he has also been with High Performance Computations on Engineered Systems (HPCES) Programme of the Singapore-MIT Alliance (SMA) where he is a SMA Fellow. His current research interests include electromagnetic theory, radio wave propagation and scattering in various media, microwave propagation and scattering in tropical environment, and analysis and design of various antennas.

## 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,一直致力和专注于微波、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>