

# T 形波导缝隙天线特性的矩量法分析

王萌 李斌 张玉 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国防重点实验室, 710071)

**摘要:** 波导缝隙天线是一种被广泛使用的天线。波导缝隙天线的辐射特性研究也一直是计算电磁学的一个热点。矩量法计算准确、概念清晰, 因此成为电磁计算领域的一种重要方法。本文采用矩量法分析零壁厚波导宽边的 T 形缝隙。尽管文中做了波导无限长、壁厚为零等近似, 但是通过算例可以看出, 文中方法在工程实践中还是非常有效的。

**关键词:** 波导缝隙天线 T 形缝隙 矩量法

## 一、引言

波导缝隙天线在雷达、通讯等领域有着广泛的应用。矩量法是一种高效的电磁计算方法, 因此利用矩量法分析波导缝隙阵天线的辐射特性, 在国内一直是一个热点<sup>[1]</sup>。国内分析的缝隙, 多是纵向或横向的缝隙, 就笔者所知, 国内对于 T 形缝隙的辐射特性分析的研究还比较少。因此本文采用矩量法, 分析单个 T 形缝的特性。本文假定所讨论的波导无限长, 并且不考虑波导的壁厚, 入射波为  $TE_{10}$  波。这样的假定虽然有一些理想化, 但是从计算结果可以看出, 这样的假定还是可以接受的。

## 二 T 形缝隙特性的理论分析

1864 年 Maxwell 建立了 Maxwell 方程组, 以数学形式揭示了电磁场的普遍规律。现在的电磁计算问题其实就是 Maxwell 方程组在各种边界条件下的求解。但是, 只有少数的问题可以得到精确的求解, 大多数的问题都必须依赖数值算法来解决。MOM 就是基于积分方程的一种数值算法。MOM 是一种典型的数值算法, 但是依然依赖很多推导工作。在此作者限于篇幅就不给出具体推导过程仅给出最后结果。

根据切向的磁场的连续性, 因此我们可以得到:

$$H_x^{ext}(\bar{R}) - H_x^{int}(\bar{R}) = H_x^{inc}(\bar{R}) \quad (1)$$

$$H_z^{ext}(\bar{R}) - H_z^{int}(\bar{R}) = H_z^{inc}(\bar{R}) \quad (2)$$

根据上面两个方程建立方程组即可以求得沿缝隙的电场的分布。我们可以得到外部磁场表达式为<sup>[2]</sup>:

$$H_x^{ext}(\bar{R}) = \frac{-2}{j\omega\mu_0} \int_{slot} \left[ E_z(\bar{R}') \left( k^2 + \frac{\partial^2}{\partial x'^2} \right) G(\bar{R}, \bar{R}') - E_x(\bar{R}') \frac{\partial^2}{\partial x' \partial z'} G(\bar{R}, \bar{R}') \right] ds' \quad (3)$$

$$H_z^{ext}(\bar{R}) = \frac{-2}{j\omega\mu_0} \int_{slot} \left[ E_x(\bar{R}') \left( k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right) G(\bar{R}, \bar{R}') - E_z(\bar{R}') \frac{\partial^2}{\partial x' \partial z'} G(\bar{R}, \bar{R}') \right] ds' \quad (4)$$

$$\text{其中: } G(\bar{R}, \bar{R}') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$$

内部磁场为:

$$H_x^{int}(\bar{R}) = \frac{1}{j\omega\mu_0} \int_{slot} \left[ E_z(\bar{R}') \left( \frac{\partial^2}{\partial x'^2} + k^2 \right) G_2(\bar{R}, \bar{R}') - E_x(\bar{R}') \frac{\partial^2 G_2(\bar{R}, \bar{R}')}{\partial x' \partial z'} \right] ds' \quad (5)$$

$$H_z^{\text{int}}(\bar{R}) = \frac{-1}{j\omega\mu_0} \int_{\text{slot}} \left[ E_x(\bar{R}') \left( \frac{\partial^2}{\partial z'^2} + k^2 \right) G_1(\bar{R}, \bar{R}') + E_z(\bar{R}') \frac{\partial^2 G_1(\bar{R}, \bar{R}')}{\partial x' \partial z'} \right] ds' \quad (6)$$

其中:

$$G_1(\bar{R}, \bar{R}') = \frac{2}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_{mn}^2}{\gamma_{mn}} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{m\pi x'}{a} e^{-\gamma_{mn}|z-z'|}$$

$$G_2(\bar{R}, \bar{R}') = \frac{2}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_{mn}^2}{\gamma_{mn}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{m\pi x'}{a} e^{-\gamma_{mn}|z-z'|}$$

入射磁场为:

$$H_z^{\text{inc}}(\bar{R}) = jA_{10} \cos \frac{\pi(x_0 + \xi)}{a} e^{-j\beta_{10}\zeta} \quad (7)$$

$$H_x^{\text{inc}}(\bar{R}) = \frac{-\beta_{10}}{\pi/a} A_{10} \sin \frac{\pi(x_0 + \xi)}{a} e^{-j\beta_{10}\zeta} \quad (8)$$

入射波为  $TE_{10}$  波,  $A_{10}$  表示入射波的振幅,  $\beta_{10}$  表示波数。

$$\beta_{10} = k \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}$$

根据式 (1) — (6) 我们可以得到  $H_x^{\text{int}}$ ,  $H_z^{\text{int}}$ ,  $H_x^{\text{ext}}$ ,  $H_z^{\text{ext}}$ ,  $H_x^{\text{inc}}$ ,  $H_z^{\text{inc}}$ 。

### 三 T形缝隙特性的矩量法分析

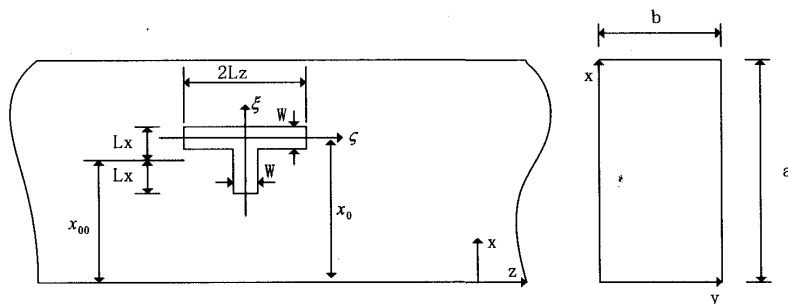


图1 T形波导缝隙天线

波导 T 形缝隙如图 1 所示。我们以纵向为  $x$  轴, 横向为  $z$  轴对波导建立坐标系  $(x, y, z)$ 。

然后以纵向的缝隙中线为  $\xi$  轴, 横向的缝隙中线为  $\zeta$  轴, 建立  $(\xi, \zeta)$  坐标系。我们假设波导无限长, 长是  $a$ , 宽是  $b$ 。  $2L_x$  表示横向缝隙的长度,  $2L_z$  表示纵向缝隙的长度。  $W$  表示缝隙的宽度, 在此我们取纵向和横向的缝隙宽度相等,  $x_0$  表示纵向的缝隙中线到波导边缘的距离,  $x_{00}$  表示 T 形缝隙的中线到波导边缘的距离。

从图中可以看出:

$$x_{00} = x_0 + \frac{W}{2} - L_x$$

采用矩量法<sup>[3]</sup>, 沿横向缝隙的电场分布可以表示为:

$$E_x(\bar{R}') = \sum_{p=1}^{N_z} E_p e_p(\zeta')$$

沿纵向缝隙的电场分布可以表示为:

$$E_z(\bar{R}') = \sum_{r=1}^{N_x} E_r e_r(\xi')$$

上式中,  $e_p$ ,  $e_r$  为基函数,  $E_p$ ,  $E_r$  是待求的系数。

基函数  $e_p$ ,  $e_r$  取为:

$$e_p(\zeta') = \sin \frac{p\pi}{2L_z} (\zeta' + L_z)$$

$$e_r(\xi') = \sin \frac{r\pi}{2L_x} (\xi' + L_x)$$

我们采用 Galekin 方法选择检验函数, 检验函数为:

$$\omega_q(\xi, \zeta) = \sin \left[ \frac{q\pi}{2L_z} (\zeta + L_z) \right] \delta(\xi) \quad q=1, 2, 3, \dots, N_z$$

$$\omega_s(\xi, \zeta) = \sin \left[ \frac{s\pi}{2L_x} (\xi + L_x) \right] \delta(\zeta) \quad s=1, 2, 3, \dots, N_x$$

矩量法中的内积表达式为:  $\langle H, \omega \rangle = \int_{slot} H(P) \omega(P) ds$

因此, 我们可以得到方程组:

$$\begin{bmatrix} Y_{pq}^{ext} - Y_{pq}^{int} \\ Y_{ps}^{ext} - Y_{ps}^{int} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{rq}^{ext} - Y_{rq}^{int} \\ Y_{rs}^{ext} - Y_{rs}^{int} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_q^{inc} \\ h_s^{inc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

方程左边的导纳矩阵可以根据下式得到:

$$Y_{pq}^{ext} - Y_{pq}^{int} = \left( \langle H_z^{ext}(E_x), \omega_q \rangle - \langle H_z^{int}(E_x), \omega_q \rangle \right) \frac{Z_0}{E_p} \quad (10)$$

$$Y_{rq}^{ext} - Y_{rq}^{int} = \left( \langle H_z^{ext}(E_z), \omega_q \rangle - \langle H_z^{int}(E_z), \omega_q \rangle \right) \frac{Z_0}{E_r} \quad (11)$$

$$Y_{ps}^{ext} - Y_{ps}^{int} = \left( \langle H_x^{ext}(E_x), \omega_s \rangle - \langle H_x^{int}(E_x), \omega_s \rangle \right) \frac{Z_0}{E_p} \quad (12)$$

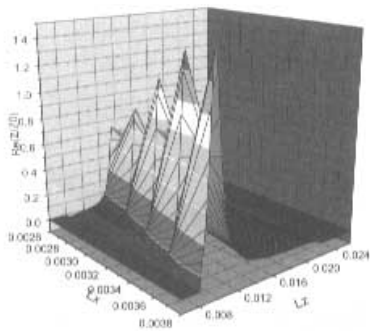


图2 等效阻抗  $\bar{Z}$  实部与缝隙长度关系

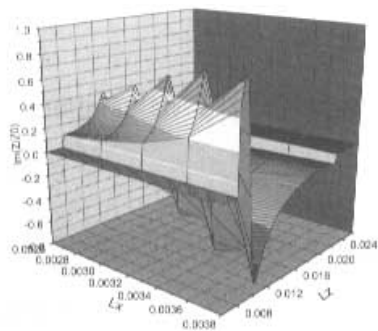


图3 等效阻抗  $\bar{Z}$  虚部与缝隙长度关系

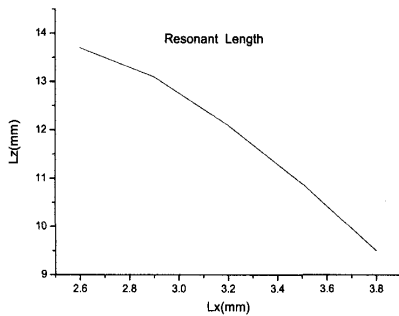


图4 谐振时  $L_x$  与  $L_z$  对应关系

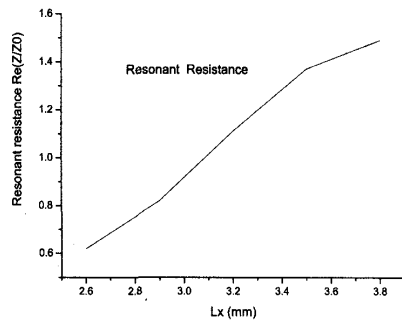


图5 谐振阻抗与  $L_x$  对应关系

图4、图5所示为T形槽波导缝隙阵的谐振特性研究。图4为谐振时  $L_x$  与  $L_z$  的对应关系；图5所示为谐振时，谐振阻抗与  $L_x$  的对应关系。

## 结论

本文以矩量法分析T形波导缝隙阵，采用伽略金法选取检验函数，通过文中算例可以看出，本文中的方法简单、有效。

## 参考文献

- [1] 李建瀛, 梁昌洪. 矩形波导纵缝阵列的矩量法分析与设计[J]. 电波科学学报, 1998 (4):428~432.
- [2] Anders Jensen. Slotted Waveguides An Analysis of T-slotted for Array Applications[D]. California USA: California State University, 2000.
- [3] 哈林登. 计算电磁场的矩量法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [4] 李龙, 张玉, 李建瀛, 梁昌洪. 大型波导纵缝阵列天线的分析与设计[J]. 微波学报, 2003, 18(1):11~14.

## 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>