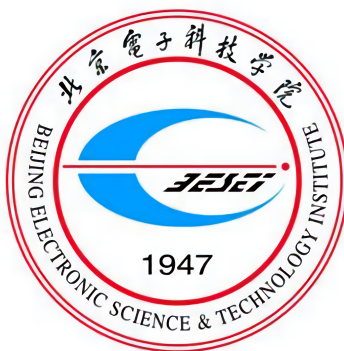


北京电子科技学院

BEIJING ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY INSTITUTE

# 硕士学位论文

MASTER THESIS



论文题目 介质谐振器及宽带印刷缝隙天线研究

学科专业 网络空间安全

学 号 20199101

作者姓名 解建国

指导老师 陈小明 教授

提交日期 2022 年 5 月 2 日



学校代码 10018  
分类号 TN82

学号 20199101  
密级 公开

# 学位论文

介质谐振器及宽带印刷缝隙天线研究

作者姓名 解建国

指导老师 陈小明 教授  
北京电子科技学院 北京

申请学位级别 硕士 学科专业 网络空间安全

提交论文日期 论文答辩日期

学位授予单位 北京电子科技学院

学位授予日期 年 月

答辩委员会主席

评阅人



# **A Study of Dielectric Resonator Antennas and Broadband Printed Slot Antennas**

**A Master Thesis Submitted to  
Beijing Electronic Science and Technology Institute**  
in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master  
in **Cyberspace security**

By  
Xie Jianguo  
Supervisor: Dr. Xiaoming Chen  
2 May, 2022



## 独创性声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得北京电子科技学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切的法律责任。

作者签名：\_\_\_\_\_

日期： 年 月 日

## 论文使用授权

本人完全了解北京电子科技学院有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京电子科技学院。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律署各单位为北京电子科技学院。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

## 摘 要

近年来，介质谐振器天线（Dielectric Resonator Antenna, DRA）和宽带印刷缝隙天线由于其良好的性能受到了学者的广泛关注。介质谐振器天线具有频带宽、效率高及激励简单等诸多优点，在毫米波段中具有良好的应用前景。宽带印刷缝隙天线以其低剖面、加工简单以及易于与电路集成等优点，在现代无线通信中得到了广泛的应用。本文对介质谐振器天线及宽带印刷缝隙天线进行了系统的研究，所取得的主要研究成果为：……

**关键词：**XXX, XXX, XXX, XXX, XXX



## ABSTRACT

In recent years, dielectric resonator antennas (DRA) and broadband printed slot antennas have been widely studied owing to their good performances. Due to their several advantages such as wide bandwidth, high efficiency and ease of excitation, DRAs have been widely used in millimeter wave regions. Broadband printed slot antennas are widely used in modern wireless communications due to their advantages of low profile, simple fabrication process and ease of integration with circuits. This dissertation is mainly concerned with the design and implementation of various DRAs and broadband printed slot antennas. The author's major contributions are outlined as follows:

**Keywords:** XXX, XXX, XXX, XXX, XXX

## 插图索引

图 2-1 RWG 基函数几何参数示意图.....	2
图 2-2 调制高斯脉冲时域与频率波形，时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一。(a) 调制高斯脉冲信号的时域波形；(b) 调制高斯脉冲信号的频域波形 .....	3
图 4-1 $2m \times 2m$ 的理想导体平板中心处感应电流 $x$ 分量随时间的变化关系。(a) 不同存储方式的计算结果与 IDFT 方法的结果比较；(b) 不同时间步长的计算结果比较比较比较 .....	8

## 表格索引

表 4-1 计算 $2m \times 2m$ 理想导体平板时域感应电流采用的三种存储方式的 存储量比较。 .....	7
--	---

## 缩略语对照表

## 符号对照表

# 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
插图索引.....	III
表格索引.....	IV
缩略语对照表.....	V
符号对照表.....	VI
<b>第一章 绪 论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究工作的背景与意义.....	1
1.2 时域积分方程方法的国内外研究历史与现状.....	1
1.3 本文的主要贡献与创新.....	1
1.4 本论文的结构安排.....	1
<b>第二章 时域积分方程基础</b> .....	<b>2</b>
2.1 时域积分方程的类型.....	2
2.2 空间基函数与时间基函数.....	2
2.2.1 空间基函数.....	2
2.2.2 时间基函数.....	3
2.3 入射波.....	3
2.4 本章小结.....	4
<b>第三章 时域积分方程数值方法研究</b> .....	<b>5</b>
3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算.....	5
3.1.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征.....	5
3.1.2 数值算例与分析.....	5
3.2 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解.....	6
3.3 本章小结.....	6
<b>第四章 时域积分方程数值方法研究</b> .....	<b>7</b>
4.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算.....	7
4.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储.....	7
4.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征.....	7
4.2.2 数值算例与分析.....	7
4.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解.....	8

4.4 本章小结 .....	8
第五章 全文总结与展望 .....	9
5.1 全文总结 .....	9
5.2 后续工作展望 .....	9
附录 A 中心极限定理的证明 .....	10
A.1 高斯分布和伯努利实验 .....	10
参考文献 .....	11
致 谢 .....	12
作者简介 .....	13

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究工作的背景与意义

计算电磁学方法<sup>[1-6]</sup>从时、频域角度划分可以分为频域方法与时域方法两大类。频域方法的研究开展较早，目前应用广泛的包括：矩量法（MOM）<sup>[7,8]</sup>及其快速算法多层快速多极子（MLFMA）<sup>[9]</sup>方法、有限元（FEM）<sup>[1,3]</sup>方法、自适应积分（AIM）<sup>[5]</sup>方法等，这些方法是目前计算电磁学商用软件<sup>①</sup>（例如：FEKO、Ansys 等）的核心算法。由文献 [6,7,9] 可知

### 1.2 时域积分方程方法的国内外研究历史与现状

时域积分方程方法的研究始于上世纪 60 年代，C.L.Bennet 等学者针对导体目标的瞬态电磁散射问题提出了求解时域积分方程的时间步进（marching-on in-time, MOT）算法。

### 1.3 本文的主要贡献与创新

本论文以时域积分方程时间步进算法的数值实现技术、后时稳定性问题以及两层平面波加速算法为重点研究内容，主要创新点与贡献如下：

### 1.4 本论文的结构安排

本文的章节结构安排如下：

---

① 脚注序号“①，……，⑨”的字体是“正文”，不是“上标”，序号与脚注内容文字之间空 1 个半角字符，脚注的段落格式为：单倍行距，段前空 0 磅，段后空 0 磅，悬挂缩进 1.5 字符；中文用宋体，字号为小五号，英文和数字用 Times New Roman 字体，字号为 9 磅；中英文混排时，所有标点符号（例如逗号“，”、括号“（）”等）一律使用中文输入状态下的标点符号，但小数点采用英文状态下的样式“.”。



## 第二章 时域积分方程基础

时域积分方程（TDIE）方法作为分析瞬态电磁波动现象最主要的数值算法之一，常用于求解均匀散射体和表面散射体的瞬态电磁散射问题。

### 2.1 时域积分方程的类型

### 2.2 空间基函数与时间基函数

利用数值算法求解时域积分方程，首先需要选取适当的空间基函数与时间基函数对待求感应电流进行离散。

#### 2.2.1 空间基函数

RWG 基函数是定义在三角形单元上的最具代表性的基函数。它的具体定义如下：

$$f_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+ = \frac{l_n}{2A_n^+} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_+) & \mathbf{r} \in T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^- = \frac{l_n}{2A_n^-} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_-) & \mathbf{r} \in T_n^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中， $l_n$  为三角形单元  $T_n^+$  和  $T_n^-$  公共边的长度， $A_n^+$  和  $A_n^-$  分别为三角形单元  $T_n^+$  和  $T_n^-$  的面积（如图2-1所示）。

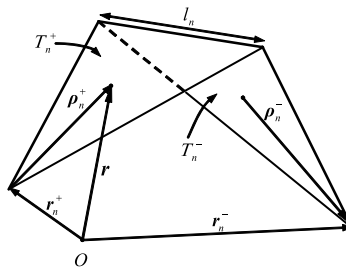


图 2-1 RWG 基函数几何参数示意图

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程

时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, f(\mathbf{x}^i; \mathbf{w}) \cdot f(\mathbf{x}^j; \mathbf{w}) \geq u(\lambda), \\ 0, f(\mathbf{x}^i; \mathbf{w}) \cdot f(\mathbf{x}^j; \mathbf{w}) < l(\lambda), 1 \leq i, j \leq n. \\ f(\mathbf{x}^i; \mathbf{w}) \cdot f(\mathbf{x}^j; \mathbf{w}), \text{ otherwise,} \end{cases} \quad (2-2)$$

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

## 2.2.2 时间基函数

### 2.2.2.1 时域方法特有的展开函数

### 2.2.2.2 频域方法特有的展开函数

## 2.3 入射波

如图2-2(a)和图2-2(b)所示分别给出了参数  $E_0 = \hat{x}$ ,  $a_n = -\hat{z}$ ,  $f_0 = 250\text{MHz}$ ,  $f_w = 50\text{MHz}$ ,  $t_w = 4.2\sigma$  时，调制高斯脉冲的时域与频域归一化波形图。

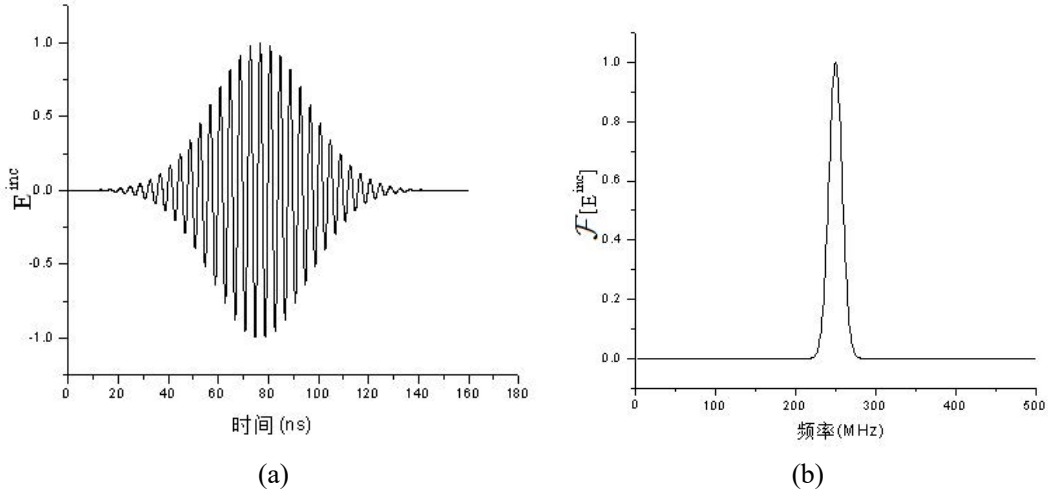


图 2-2 调制高斯脉冲时域与频率波形，时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一。(a) 调制高斯脉冲信号的时域波形；(b) 调制高斯脉冲信号的频域波形

时域阻抗元素的存储技术<sup>[7]</sup>也是时间步进算法并行化的关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

## 2.4 本章小结

本章首先从时域麦克斯韦方程组出发推导得到了时域电场、磁场以及混合场积分方程。

### 第三章 时域积分方程数值方法研究

#### 3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

##### 3.1.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。时域阻抗元素的存储技术也是关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以提高并行算法的计算效率。

##### 3.1.2 数值算例与分析

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

<b>算法 3-1</b> How to wirte an algorithm.	
<b>Data:</b> this text	
<b>Result:</b> how to write algorithm with L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X2e	
1	initialization;
2	<b>while</b> <i>not at end of this document</i> <b>do</b>
3	read current;
4	<b>if</b> <i>understand</i> <b>then</b>
5	go to next section;
6	current section becomes this one;
7	<b>else</b>
8	go back to the beginning of current section;
9	<b>end</b>
10	<b>end</b>

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程

时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

## 3.2 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解

### 3.3 本章小结

本章首先研究了时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算技术，分别采用 DUFFY 变换法与卷积积分精度算法计算时域阻抗元素，通过算例验证了计算方法的高精度。

## 第四章 时域积分方程数值方法研究

### 4.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

### 4.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储

时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

#### 4.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

#### 4.2.2 数值算例与分析

如表4-1所示给出了时间步长分别取 0.4ns、0.5ns、0.6ns 时的三种存储方式的存储量大小。

表 4-1 计算  $2m \times 2m$  理想导体平板时域感应电流采用的三种存储方式的存储量比较。

时间步长	存储方式		
	非压缩存储方式	完全压缩存储方式	基权函数压缩存储方式
0.4ns	5.59 MB	6.78 MB	6.78 MB
0.5ns	10.17 MB	5.58 MB	5.58 MB
0.6ns	8.38MB	4.98 MB	4.98 MB

如图4-1(a)所示给出了时间步长选取为 0.5ns 时采用三种不同存储方式计算的平板中心处  $x$  方向的感应电流值与 IDFT 方法计算结果的比较，……。如图4-1(b)所示给出了存储方式为基权函数压缩存储方式，时间步长分别取 0.4ns、0.5ns、0.6ns 时平板中心处  $x$  方向的感应电流计算结果，从图中可以看出不同时间步长的计算结果基本相同。

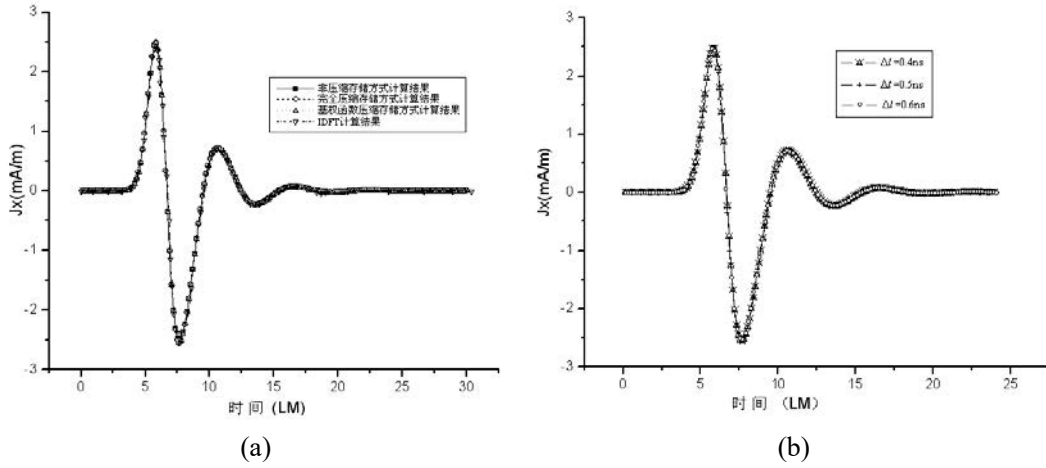


图 4-1  $2m \times 2m$  的理想导体平板中心处感应电流  $x$  分量随时间的变化关系。(a) 不同存储方式的计算结果与 IDFT 方法的结果比较；(b) 不同时间步长的计算结果比较比较比较

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

### 4.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解

**定理 4.1** 如果时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合。

**证明：**由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。 ■

**推论 4.2** 时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究。

**引理 4.3** 因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

### 4.4 本章小结

本章首先研究了时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算技术，分别采用 DUFFY 变换法与卷积积分精度计算法计算时域阻抗元素，通过算例验证了计算方法的高精度。

## 第五章 全文总结与展望

### 5.1 全文总结

本文以时域积分方程方法为研究背景，主要对求解时域积分方程的时间步进算法以及两层平面波快速算法进行了研究。

### 5.2 后续工作展望

时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究：



## 附录 A 中心极限定理的证明

### A.1 高斯分布和伯努利实验

## 参考文献

- [1] 王浩刚, 聂在平. 三维矢量散射积分方程中奇异性分析 [J]. 电子学报, 1999, 27(12): 68-71
- [2] X. F. Liu, B. Z. Wang, W. Shao, et al. A marching-on-in-order scheme for exact attenuation constant extraction of lossy transmission lines[C]. China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings, Chengdu, 2006, 527-529
- [3] 竺可桢. 物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1973, 56-60
- [4] 陈念永. 毫米波细胞生物效应及抗肿瘤研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2001, 50-60
- [5] 顾春. 牢牢把握稳中求进的总基调 [N]. 人民日报, 2012 年 3 月 31 日
- [6] 冯西桥. 核反应堆压力容器的 LBB 分析 [R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1997 年 6 月 25 日
- [7] 肖珍新. 一种新型排渣阀调节降温装置 [P]. 中国, 实用新型专利, ZL201120085830.0, 2012 年 4 月 25 日
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准—量与单位 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994 年 11 月 1 日
- [9] M. Clerc. Discrete particle swarm optimization: a fuzzy combinatorial box[EB/OL]. [http://clere.maurice.free.fr/ps0/Fuzzy\\_Discrere\\_PSO/Fuzzy\\_DPSO.htm](http://clere.maurice.free.fr/ps0/Fuzzy_Discrere_PSO/Fuzzy_DPSO.htm), July 16, 2010

## 致 谢

在攻读博士学位期间，首先衷心感谢我的导师 XXX 教授

## 作者简介

### 1 基本情况

XXXXX

### 2 教育背景

XXXXX

### 3 攻读硕士学位期间的研究成果

#### 3.1 发表的学术论文

#### 3.2 发明专利和科研情况