



KUANPINDAI WEIDAI TIANXIAN  
JISHU JIQI YINGYONG

# 宽频带微带天线 技术及其应用

◎ 马小玲 丁 丁 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

# 宽频带微带天线技术及其应用

马小玲 丁 丁 编著

人民邮电出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

宽频带微带天线技术及其应用/马小玲, 丁丁编著. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 6  
ISBN 7-115-14676-4

I. 宽... II ①马... ②丁... III. ①宽波段天线—研究②条带传输线—天线—研究  
IV. TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 029054 号

## 内 容 提 要

本书对微带天线做了较为完整的研究, 包括从单元设计、阵列综合、馈电、测量到有源微带天线在合成孔径雷达 (SAR) 上的应用等内容。该书可作为电子与通信专业本科或研究生的教材或参考书, 也可供从事天线与雷达方向工作的工程技术人员参考。

## 宽频带微带天线技术及其应用

- 
- ◆ 编 著 马小玲 丁 丁  
责任编辑 梁 凝
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 787 × 1092 1/16  
印张: 9.25  
字数: 221 千字  
印数: 1-3 000 册
  - 2006 年 6 月第 1 版  
2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-14676-4/TN · 2758

---

定价: 24.00 元

读者服务热线: (010) 67129258 印装质量热线: (010) 67129223

# 前 言

微带天线现已应用于工作在大约 100MHz ~ 100GHz 的宽广频域上的大量无线电设备中，特别是在飞行器上和地面便携式设备中。微带天线的特征是比通常的微波天线有更多的物理参数，它们可以有任意的几何形状和尺寸，但其固有的缺陷是频带窄。本书介绍了设计共用一个物理孔径的双频、双极化、宽频带的微带天线的方法和实例。

有源天线是印制贴片微带天线和有源电路（如放大器和发射/接收组件等）的集成，以提高系统性能、降低成本。它可应用于无线通信系统中，如移动通信、卫星通信、无线本地局域网络等领域。本书介绍的应用主要集中在合成孔径雷达中，可安装于飞机或卫星上，用于获取尽可能多、分辨率尽可能高的地面目标信息。书中还提出了一种灵活方便的波束生成方法，用于提高合成孔径雷达系统的分辨率，并通过双频双极化来获取更多的地面信息。

天线阵的多极化，方位向、距离向的自动扫描是我国新一代 SAR 要实现的目标，在本书中实现了此目标的设计仿真。

书中 7.2、7.3 部分为丁丁撰写。

感谢王贞松老师的悉习指导。

感谢 504 所五室和天线室的同志们，特别是高选正老师和李正军研究员的帮助。

感谢我家人的扶持。

感谢所有关心我的人。

马小玲  
2006. 3. 9

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 绪论                 | 1  |
| 1.1 微带天线的历史与优缺点        | 1  |
| 1.2 微带天线的分析设计方法        | 1  |
| 1.3 微带天线的应用            | 3  |
| 1.4 本书的主要内容及结构安排       | 4  |
| 1.5 本书的主要贡献            | 5  |
| 参考文献                   | 5  |
| 第二章 微带阵列天线的基本理论        | 7  |
| 2.1 微带天线单元             | 7  |
| 2.1.1 微带天线的传输线模型       | 7  |
| 2.1.2 辐射元方向图           | 8  |
| 2.2 微带阵列               | 9  |
| 2.2.1 线阵辐射特性           | 9  |
| 2.2.2 平面阵天线            | 11 |
| 2.3 电扫描天线              | 12 |
| 2.3.1 相控阵天线            | 13 |
| 2.3.2 盲点效应             | 13 |
| 2.3.3 天线的副瓣性能          | 14 |
| 2.3.4 阵列单元随机幅度与相位误差的影响 | 15 |
| 2.4 互耦效应对阵性能的影响        | 15 |
| 2.4.1 互耦对阵元方向图的影响      | 15 |
| 2.4.2 互耦对阵元输入阻抗和匹配的影响  | 16 |
| 2.4.3 互耦对相控阵天线增益的影响    | 16 |
| 2.4.4 确定微带天线元之间互耦的方法   | 17 |
| 2.5 辐射单元、排列栅格和阵形       | 19 |
| 2.5.1 微带天线阵元的类型        | 19 |
| 2.5.2 排列栅格与阵形          | 20 |
| 2.6 电磁波的极化             | 20 |
| 参考文献                   | 22 |
| 第三章 微带天线的馈电方法          | 23 |
| 3.1 微带单元天线馈电           | 23 |
| 3.1.1 微带线馈电            | 23 |
| 3.1.2 同轴线馈电            | 24 |
| 3.1.3 电磁耦合型馈电          | 27 |
| 3.2 阵的馈电形式与设计          | 29 |
| 3.2.1 并联馈电             | 29 |

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2 串联馈电 .....                                                   | 29        |
| 3.3 相控阵天线的馈电方式 .....                                               | 30        |
| 3.3.1 强制馈电 .....                                                   | 31        |
| 3.3.2 空间馈电 .....                                                   | 31        |
| 3.3.3 波束跃度与移相器的虚位技术 .....                                          | 32        |
| 3.4 固态功率放大器的阻抗匹配 .....                                             | 33        |
| 参考文献 .....                                                         | 34        |
| <b>第四章 用于星载 SAR 的双频双极化天线</b> .....                                 | <b>36</b> |
| 4.1 引言 .....                                                       | 36        |
| 4.2 单口面双频双极化微带天线的设计方案 .....                                        | 36        |
| 4.2.1 天线单元设计方案 .....                                               | 36        |
| 4.2.2 馈电线路的考虑 .....                                                | 37        |
| 4.3 双频双极化贴片单元指标参数 .....                                            | 38        |
| 4.3.1 贴片单元的电路指标参数: 品质因数 $Q$ 值、带宽、输入阻抗 .....                        | 38        |
| 4.3.2 贴片单元的辐射指标参数 .....                                            | 39        |
| 4.4 组阵 .....                                                       | 45        |
| 4.5 星载 SAR 系统特性 .....                                              | 48        |
| 4.5.1 SAR 系统基本指标 .....                                             | 48        |
| 4.5.2 L 波段水平极化的 SAR 特性 .....                                       | 52        |
| 4.5.3 S 波段垂直极化的 SAR 特性 .....                                       | 53        |
| 4.6 结论 .....                                                       | 54        |
| 参考文献 .....                                                         | 54        |
| <b>第五章 DBF 相控阵天线在超高分辨率机载 SAR 中的应用</b> .....                        | <b>56</b> |
| 5.1 引论 .....                                                       | 56        |
| 5.2 基本原理 .....                                                     | 57        |
| 5.2.1 相控阵天线的扫描原理 .....                                             | 57        |
| 5.2.2 数字波束形成 (DBF) 原理 .....                                        | 58        |
| 5.3 DBF 在相控阵天线中的应用 .....                                           | 58        |
| 5.3.1 宽波束、低旁瓣的波束生成方法 .....                                         | 58        |
| 5.3.2 天线的方向性系数和增益 .....                                            | 60        |
| 5.4 将宽波束天线用于超高分辨率机载 SAR ( $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ ) ..... | 61        |
| 5.4.1 系统的信号设计和方位向波束宽度要求 .....                                      | 61        |
| 5.4.2 天线设计 .....                                                   | 61        |
| 5.4.3 天线阵性能分析 .....                                                | 64        |
| 5.4.4 系统性能分析 .....                                                 | 64        |
| 5.5 讨论 .....                                                       | 66        |
| 5.5.1 功率与噪声比 .....                                                 | 66        |
| 5.5.2 天线效率 .....                                                   | 66        |
| 5.5.3 条带 SAR 与 Spotlight SAR 的优缺点比较 .....                          | 66        |
| 参考文献 .....                                                         | 66        |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| <b>第六章 天线的测量</b> .....                   | 68  |
| 6.1 测量基础 .....                           | 68  |
| 6.1.1 微波网络分析仪介绍 .....                    | 69  |
| 6.1.2 主要的误差源 .....                       | 70  |
| 6.1.3 一般的校准过程 .....                      | 71  |
| 6.1.4 天线电路参数的测量 .....                    | 71  |
| 6.1.5 天线辐射参数的测量 .....                    | 72  |
| 6.2 小天线要考虑的一些问题 .....                    | 76  |
| 6.2.1 小天线的定义 .....                       | 77  |
| 6.2.2 测量之前要考虑的一些问题 .....                 | 77  |
| 6.2.3 小天线的测量 .....                       | 78  |
| 6.3 测量结果 .....                           | 79  |
| 参考文献 .....                               | 83  |
| <b>第七章 SSAR 有源天线分系统设计仿真</b> .....        | 84  |
| 7.1 多极化星载合成孔径雷达有源天线系统的天线单元和阵列的设计仿真 ..... | 84  |
| 7.1.1 天线单元的设计仿真 .....                    | 84  |
| 7.1.2 天线单元和阵列的设计仿真 .....                 | 85  |
| 7.1.3 T/R 组件方案 .....                     | 86  |
| 7.1.4 方位向扫描 .....                        | 91  |
| 7.1.5 距离向扫描 .....                        | 105 |
| 7.2 天线主瓣宽度、增益、峰值辐射功率及积分旁瓣比的计算机模拟计算 ..... | 106 |
| 7.2.1 计算公式 .....                         | 106 |
| 7.2.2 均匀分布的随机损坏 .....                    | 107 |
| 7.2.3 相关联的 T/R 组件的大面积损坏 .....            | 115 |
| 7.3 天线工作可靠性的定义及计算 .....                  | 131 |
| 7.3.1 天线工作可靠性及平均损坏间隔时间的定义 .....          | 131 |
| 7.3.2 天线工作可靠性及平均损坏间隔时间的计算 .....          | 131 |
| 参考文献 .....                               | 132 |
| <b>附录</b> .....                          | 133 |
| 参考文献 .....                               | 137 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 微带天线的历史与优缺点

微带天线最初作为火箭和导弹上的共形全向天线获得了应用。现已被广泛应用于大约 100MHz ~ 100GHz 的宽广频域上的大量无线电设备中，特别是在飞行器上和地面便携式设备中。微带天线的特征是比通常的微波天线有更多的物理参数，它们可以有任意的几何形状和尺寸。微带天线有三种基本类型：微带贴片天线、微带行波天线和微带缝隙天线。

和常用的微波天线相比，微带天线有如下一些优点：

(1) 体积小，重量轻，低剖面，能与载体（如飞行器）共形，并且除了在馈电点处要开出引线孔外，不破坏载体的机械结构，这对于高速飞行器特别有利。

(2) 性能多样化。不同设计的微带元，其最大辐射方向可以在边射到端射范围内调整；易于得到各种极化方式；特殊设计的微带元还可以在双频或多频方式下工作。

(3) 能和有源器件、电路集成为统一的组件，因此适合大规模生产，简化了整机的制作和调试，大大降低了成本。

和其他天线相比，微带天线也有如下一些缺点：

(1) 相对带宽较窄，特别是谐振式微带天线（现在已经有了一些改进方法）。

(2) 损耗较大，因此效率较低，这类似于微带电路。特别是行波型微带天线，在匹配负载上有较大的损耗。

(3) 单个微带天线的功率容量较小。

(4) 介质基片对性能影响大。由于工艺条件的限制，批量生产的介质基片的均匀性和一致性还有欠缺，这影响了微带天线的批量生产和大型天线阵的构建。

微带天线有其独特的优点，而它的一些缺点也正在研究克服中。例如，相对带宽较窄一般被认为是微带天线的主要缺点，但现在采用孔径耦合的层叠式结构的微带天线，其阻抗带宽已达到 69% 左右 [8]，因此它有广阔的应用前景。一般说来，它在飞行器上的应用处于优越地位，可用于卫星通信、导弹测控设备、导引头、环境检测设备、共形相控阵等。微带天线在地面设备上应用也有其优势，特别是较低功率的各种军用民用设备，例如医用探头，直播卫星的接收天线等，由于微带天线能集成化，使得它在毫米波段的优势更为明显。

## 1.2 微带天线的分析设计方法

天线分析的基本问题是求解天线在周围空间建立的电磁场，求得电磁场后，进而得出其方向图、增益和输入阻抗等特性指标。分析微带天线的基本理论大致可分三类。最早出现的也最简单的是传输线模型（TLM, Transmission Line Model）理论，主要用于矩形贴片。更严

格更有用的是空腔模型 (CM, Cavity Model) 理论, 可用于各种规则贴片, 但基本上限于天线厚度远小于波长的情况。最严格而计算最复杂的是积分方程法 (IEM, Integral Equation Method), 即全波 (FW, Full Wave) 理论。从原理上说, 积分方程法可用于各种结构、任意厚度的微带天线, 然而要受计算模型的精度和机时的限制。从数学处理上看, 第一种理论把微带天线的分析简化为一维的传输线问题; 第二种理论则发展到基于二维边值问题的求解; 第三种理论又进了一步, 可计入第三维的变化, 不过计算也费时得多。自然, 这三种理论仍不断地在某些方面有所发展, 同时也出现了另外的一些分析方法。基于对积分方程的简化, 产生了格林函数法 (GFA, Green's Function Approach); 而由空腔模型的扩展, 出现了多端口网络法 (MNA, Multiport Network Approach) 等。

微带线的传输模式是将微带线看成一种开放线路, 因此它的电磁场可无限延伸。这样, 微带线的场空间由两个不同介电常数的区域 (空气和介质) 构成。只有充填均匀媒质的传输线才能传输单一的纯横向场——TEM 模。现在由于空气—介质分界面的存在, 使微带中的传输模是具有电场和磁场所有三个分量 (包括纵向分量) 的混合模。不过, 在频率不太高的情况下, 如 12GHz 以下, 基片厚度远小于工作波长, 能量大部分都集中在导体带下面的介质基片内, 且此区域的纵向场分量很弱, 因此沿微带传输的主模与 TEM 模分布非常接近, 故称为准 TEM 模。在各种方法中, 传输线法最为简单, 也最为直观。利用端缝辐射的概念清楚地说明了辐射的机理。可惜由于传输线模式的限制, 它难于应用在矩形片以外的情况。对于矩形片, 传输线模式相当于腔模理论中的基模。在谐振频率上, 计算的场分布与实际很接近, 参量计算合乎工程精度, 但失谐大时, 场分布与实际相差较大, 计算就不可靠了。基本的传输线法对谐振频率预测是不够准确的, 利用一些修正方法 (如等效伸长) 可将误差减小到 1% 以内。如果通过样品实测谐振频率, 然后再行调整, 效果会更好。

罗远芷 (Y. T. Lo) 等在 1979 年提出了空腔模型理论。该理论基于薄微带天线的假设, 而将微带贴片与接地板之间的空间看成是四周为磁壁、上下为电壁的谐振空腔 (或确切地说是漏波空腔)。天线辐射场由空腔四周的等效磁流来得出, 天线输入阻抗可根据空腔内场和馈源边界条件来求得。腔模理论特别是多模理论是对传输线法的发展。它能应用于范围更广泛的微带天线, 并且由于计及了高次模, 因此算得的阻抗曲线较准, 且计算量不算大, 比较适合工程设计的需要。但是, 基本的腔模理论同样要经过修正, 才能得到较准确的结果。特别值得注意的是边界导纳的引入, 把腔内外的电磁问题分成为独立的问题, 这在理论上是严格的, 只是边界导纳确定比较困难, 使计算只能是近似的。在腔模理论中, 认为腔内场是二维函数, 这在薄基片时是合理的, 而对于厚基片则将引入误差。由于应用微带天线的目的就是降低剖面高度, 因此在大多数情况下这不成问题, 而在毫米波段就需要另行考虑了。

积分方程法与腔模理论的基本立足点不同, 它讨论的是开放的空间。积分方程法是以开放空间中的格林函数为基础的, 因此基本方程是严格的。除了少数例外, 积分方程通常用矩量法求解。

另外, 有限元法作为一种数值方法也越来越引人注目, 它和分域基函数矩量法一样, 不受天线形状的限制; 它也和矩量法一样, 也应用了变分原理, 并且形式更为直接。但是有限元法所涉及的场量、单元和基函数的选择乃至表达式都和矩量法不同。由于它的特殊选择, 得到的代数方程矩阵是稀疏矩阵, 并且矩阵元素易于计算, 这是有限元法的突出优点, 但是它只能得到纯数值解, 这可以说是一个主要的缺点。

然而，同一般微波天线一样，要得到高增益、扫描波束或波束控制等特性，只有将离散的辐射元组成阵列才有可能。同一阵列中的辐射元可以相同，也可不同，在空间可排列成线阵、面阵或立体阵。

### 1.3 微带天线的应用

在无线电技术领域，对于信息的传输，天线的作用是不可或缺的。随着社会的发展和进步，对信息传输的要求也越来越高，因此，天线的发展方兴未艾。微带天线优势有低剖面、价钱便宜并可制成多功能、可共形的天线；可集成到无线电设备内部，可用于室内（例如，贴在墙上或挂在天花板上，见图 1.1），也可用于室外；其尺寸可大可小，大的微带天线其长宽可到十几米，而一副用于 PCS 的内部集成的宽带微带天线，其尺寸是  $15.0\text{mm} \times 15.0\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 。显然，其优势是明显的。

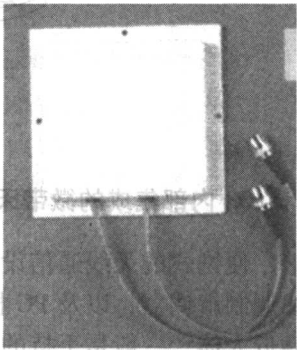


图 1.1 双极化微带天线

在国内，幅域广阔。虽然有有线网发展迅速，但对于广大的农村以及偏远的地域，无线传输可能是惟一的选择。在电视技术领域，随着电视在农村的普及以及高清晰度电视的出现，微带天线的发展和应用有着广阔的市场和光明的前景。

#### 1. 微带天线在空间技术中的应用

在 Seasat（海洋卫星）和 SIR（航天飞船成像雷达）的第一代、第二代和第三代（SIR - A、SIR - B、SIR - C）系统中都使用了平面结构的微带天线阵列。X - SAR（X 波段合成孔径雷达）是 SIR - C 系统的补充，X - SAR 天线是  $12\text{m}$  长、 $40\text{cm}$  宽的平面缝隙波导阵，工作于  $9600\text{MHz}$ （X 波段）。SIR - C/X - SAR 系统第一次提出了多频多极化的工作模式，SIR - C 可工作于  $1250\text{MHz}$ （L 波段）和  $5300\text{MHz}$ （C 波段）。其 L 波段和 C 波段天线阵的垂直极化和水平极化共用同一口面的微带天线。SIR - C/X - SAR 天线共  $12\text{m}$  长、 $4.1\text{m}$  宽，由三页组成，每页  $4\text{m}$  长、 $4.1\text{m}$  宽；由六块 C 波段面板（1 行  $\times$  6 列）、六块 L 波段面板（2 行  $\times$  3 列）和  $4\text{m}$  长、 $0.4\text{m}$  宽的 X 波段缝隙波导阵组成。每块 L 波段面板  $1.3\text{m}$  长、 $1.47\text{m}$  宽，是由微带贴片组成的面阵；C 波段面板也是由微带贴片组成的面阵，每块  $1.3\text{m}$  长、 $0.75\text{m}$  宽，见图 1.2。

#### 2. 微带天线在可移动卫星通信中的应用

在可移动卫星通信中，对于地面车用天线，需要在低俯仰角上有高增益，在方位角上覆盖范围为  $360^\circ$  的圆极化天线。在文献 [5] 中介绍了一种结构简单、造价便宜、低剖面的圆环贴片的微带天线（ARMSA）。由共面的分支混合耦合器激励圆极化波，为  $\text{TM}_{21}$  模，得到圆锥状的辐射方向图，并可使天线尺寸最小。天线总的高度为  $7.4\text{mm}$ 。在 ARMSA 上有一寄生元，以展宽频带、降低输入阻抗。在 L 波段可得到  $8.5\%$  的带宽（ $\text{VSWR} < 2$ ）、 $3\text{dB}$  或更小的轴比、 $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$  的圆极化的圆锥状方向图。在日本，这是一种有用的车用天线。

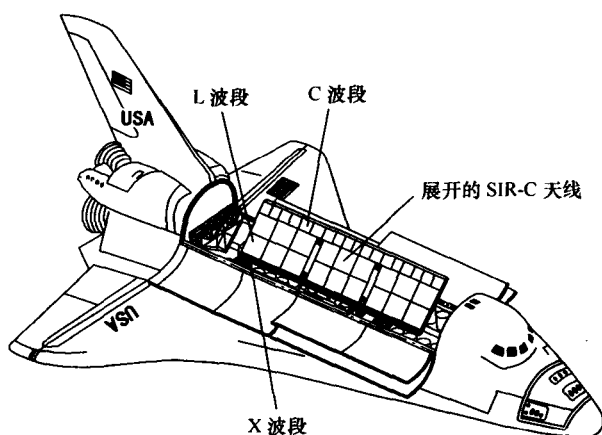


图 1.2 航天飞船上的展开天线

### 3. 内部集成的微带天线在 PCS/蜂窝电话和其他手持便携式通信设备中的应用

便携式的无线通信设备有：无绳电话、个人通信业务（PCS）、蜂窝电话、寻呼机、无线调制解调器，以及 PC 机存储卡国际协会（PCMCIA）寻呼卡。通常，这些设备工作时都靠近人体，一般是手持的并且方向随机，因此，天线要小、轻、对两个正交极化波灵敏。辐射方向图在所有主平面上必须是准各向同性的，并且，在许多应用中，需要宽频带。人体对天线的辐射影响以及人体对天线辐射的吸收都要尽可能小。此外，在便携式的无线通信设备中总是希望将天线集成在印制电路板上或塑料盒里，见图 1.3。

要满足这些要求的最有希望的技术是使用内部集成的天线，例如，微带天线。内置天线机械强度大，不易折断；不增加设备总的尺寸；使用时不需要拉伸，人为影响小；而且，使用高水平的防护技术，可使天线与人体的相互作用减到最小。微带天线能提供  $50\Omega$  输入阻抗，因此，不需要匹配电路或变换器；比较容易精确制造，可重复性较好；可通过耦合馈电，天线和 RF 电路不需要物理连接；较易将发射和接收信号频段分开，因此，可省掉收发转换开关或至少使设计简化；容易制成双频双极化模式。由于这些优点，微带天线被认为是最好的选择之一。

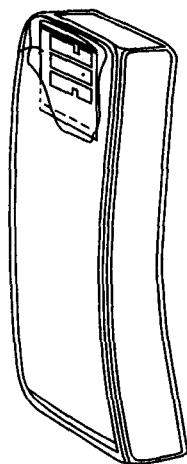


图 1.3 蜂窝电话的内置微带天线

目前，现有的微带天线还不能完全满足需要。然而，微带天线有很多设计参量可供调整优化，以进一步减少天线的尺寸和造价、增加带宽，使之对垂直极化波和水平极化波都敏感，提高其各向同性的辐射参数，减小天线与人体的相互作用。

总的说来，对微带天线的研究正在蓬勃地展开，这是一个具有极强生命力的课题。随着相关技术的发展，微带天线无论在理论研究，还是在工艺制造上都将越来越成熟，必将开辟更为广阔的应用领域。

## 1.4 本书的主要内容及结构安排

本书共分为七章，各章的主要内容是：

第一章：绪论。包括微带天线的历史与优缺点、分析设计方法、应用，本书的主要内容及结构安排，以及本书的主要贡献。

第二章：微带阵列天线的基本理论。

第三章：微带天线的馈电方法。在这一章里讲述了微带天线的单元馈电方法和阵列馈电方法。利用传输线模型对微带贴片天线的单元馈电进行了比较详细的分析和计算，并与测量结果进行了比较。

第四章：用于星载 SAR 的双频双极化天线。设计了共用一个物理孔径的双频双极化的微带天线。天线采用了可折叠的充气式聚酯薄膜介质结构，有较小的介电常数，较大的相对带宽。天线采用孔径耦合馈电方式，对 L 波段和 S 波段的馈电路径可各自优化。讨论了此天线的交叉极化特性和阻抗匹配，计算了天线的各个参数和天线用于星载 SAR 时的系统性能指标。

第五章：DBF 相控阵天线在超高分辨率机载 SAR 中的应用。从叠加原理和相控阵天线的扫描原理出发，提出了一种灵活方便的波束生成方法。用此方法由微带贴片天线单元组成了  $145\text{cm} \times 48\text{cm}$  的天线阵，生成了波长为  $24\text{cm}$ ，方位向半功率波束宽度为  $23^\circ$  的宽波束。由合成孔径原理可知，条带 SAR 的方位分辨率随波束宽度的变宽而提高。本章将宽波束天线用于超高方位分辨率机载 SAR，计算了天线的性能指标和 SAR 的系统参数。比较了条带 SAR 和 Spotlight SAR 这两种常见的 SAR 模式的分辨率和测绘范围。

第六章：天线的测量。包括天线电路特性参数的测量和辐射特性参数的测量。

第七章：SSAR 有源天线分系统设计仿真。包括多极化星载合成孔径雷达有源天线系统的天线单元和阵列的设计、性能参数计算和可靠性分析等几方面的仿真。

## 1.5 本书的主要贡献

本书试图对微带天线有一个完整的研究，从单元设计、阵列综合、馈电、测量、应用等方面都有一些考虑。本书主要的贡献有以下几点：

(1) 设计了共用一个物理孔径的双频双极化的微带天线。天线采用了可折叠的充气式聚酯薄膜介质结构，有较小的介电常数，较大的相对带宽。

(2) 从叠加原理和相控阵天线的扫描原理出发，提出了一种灵活方便的波束生成方法。特别适用于大的天线阵生成宽的波束。

(3) 研究了采用双频双极化的微带天线阵的星载合成孔径雷达 (SAR) 的系统性能。

(4) 研究了采用宽波束的微带天线阵的机载合成孔径雷达 (SAR) 的系统性能。

(5) 对星载二代 SAR 有源天线阵实现了多极化和方位向、距离向的自动扫描的设计仿真。

## 参考文献

- [1] I.J. 鲍尔, P. 布哈蒂亚. 微带天线. 北京: 电子工业出版社, 1984. 12
- [2] 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991. 6

[3] 张钧, 刘克诚, 张贤铎, 赫崇骏. 微带天线理论与工程. 北京: 国防工业出版社, 1988. 7

[4] Rolando L. Jordan, Bryan L. Huneycutt, Marian Werner. The SIR - C/X - SAR Synthetic Aperture Radar System. Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No. 6, June 1991, pp827 ~ 838

[5] Hiroyuki Ohmine, Yonehiko Sunahara, Makoto Matsunaga. An Annular - Ring Microstrip Antenna Fed by a Co - Planar Feed Circuit for mobile satellite communication use. IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 45, no. 6, June 1997, pp1001 ~ 1008

[6] Mohamed Sanad, Noha Hassan Amant. An internal integrated microstrip antenna for PCS/ Cellular telephone and other hand-held portable communication equipment. Microwave Journal, July 1998, vol. 41, no. 7, pp64 ~ 77

[7] 马小玲, 康凤兴, 王贞松. 微带天线及其在通信与广播电视中的应用. 电视技术, 5/2000, pp60 ~ 61

[8] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, Apisak Ittipiboon. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, 2001

## 第二章 微带阵列天线的基本理论

天线是各种无线电设备中不可缺少的组成部分，它能有效地、定向地辐射或接收无线电波并通过馈线与收发系统联系起来，起着能量转换作用。

从本质上讲微波传输线（是用来传输微波信息和能量的各种形式的传输系统的总称）是一个封闭系统。它的基本功能是传输电磁能量，其电磁场被束缚在传输线附近而不会传到遥远的空间。它自身的不连续性可以用来构成各种形式的微波元件。而天线是由传输线演变成的，但它的基本功能恰好与传输线相反，是向空间辐射或接收电磁能量，是一个开放系统。

不管是线天线还是面天线，其辐射源都是高频电流元，这是共性。因此，讨论电流元的辐射场是讨论天线问题的出发点。

讨论天线要解决的两个最重要的问题是阻抗特性和方向特性。前者要解决天线与馈线的匹配问题；后者要解决定向辐射或定向接收问题，也就是要解决提高发射功率或接收机灵敏度的问题。而不论是阻抗特性还是方向特性都必须首先求出天线在远区的电磁场分布。为此要求解满足天线边界条件的麦克斯韦方程组。对于这样一个电磁场的边值问题，严格的数学求解是很困难的。因此，经常采用工程近似的方法进行研究，即用某种初始场的近似分布代替真实的准确分布来计算辐射场。这样，既避开了严格的电磁理论的计算又有一定的精确度。

### 2.1 微带天线单元

结构最简单的微带天线是由贴在带有金属底板的介质基片上的辐射贴片所构成的。贴片导体通常是铜或金，它可取任意形状。但是，通常都采用常规的形状以简化分析和预期其性能。基片的介电常数应较低，这样可增强产生辐射的边缘场。微带天线单元或微带天线阵列其结构通常都比较简单，但其电磁场的分析却很复杂。一方面，微带天线的品质因数很高，使得较难得到精确的阻抗特性；并且，介质的各相异性、加载、损耗、表面波效应等影响也较严重。另一方面，微带天线的几何结构也是多种多样，包括不同的贴片形状、馈电方法，以及寄生单元或层叠单元的应用，共面馈电网络与有源线路的集成等。

微带天线的分析方法主要分为基于简化假设的近似方法和全波分析方法两大类。全波分析方法有更好的适应性和更高的精度，但速度较慢。第一类方法包括传输线模型、空腔模型和分段（segmentation）模型。这种方法将贴片单元当作一段传输线或是空腔谐振器，简化了分析和计算，提高了速度，并且物理概念清晰，可以提供设计的初始数据。

#### 2.1.1 微带天线的传输线模型

利用传输线模式分析微带天线是比较早期的方法，也是最简单的方法。图 2.1 所示为传输线法的物理模型。传输线模型的基本假设是：（1）微带片和金属底板构成一段微带传输

线, 传输准 TEM 波, 波的传输方向决定于馈电点。线段长度  $L \approx \lambda_g/2$ ,  $\lambda_g$  为准 TEM 波的波长。场在传输方向是驻波分布, 而在其垂直方向 (图中的宽度方向) 是常数。(2) 传输线的两个开口端 (始端和末端) 等效为两个辐射缝, 长为  $W$ , 宽为  $h$ , 缝口径场即为传输线开口端场强。缝平面看作位于微带片两端的延伸面上, 即是将开口面向上折转  $90^\circ$ , 而开口场强随之折转。

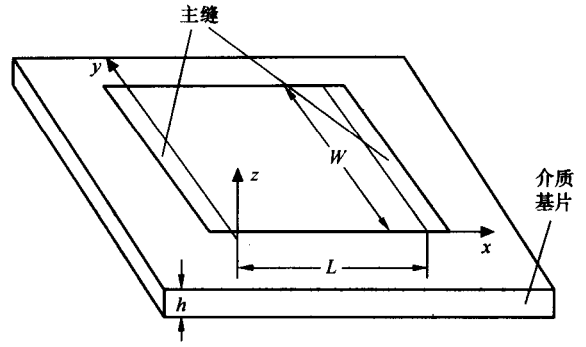


图 2.1 传输线法物理模型

由以上两条基本假设可以看出, 当  $L = \lambda_g/2$  时, 二缝上切向电场均为  $x$  方向, 且等幅同相。它们等效为磁流, 由于金属底板的作用, 相当于有二倍磁流向上半空间辐射。缝上等效磁流密度为

$$M_s = -2V/h$$

式中,  $V$  为传输线开口端电压。

由于缝已放平, 在计算上半空间辐射场时, 就可按自由空间处理, 这是这种方法的方便之处。

### 2.1.2 辐射元方向图

微带辐射元的方向图可由其等效磁流元的辐射场得出。

由图 2.1 可见, 微带天线的辐射等效为二元缝阵的辐射, 并且缝上等效磁流是均匀的。可求出天线的辐射场为 [3]

$$E_\theta = A \cos\varphi \cos\left(\frac{K_0 L}{2} \sin\theta \cos\varphi\right) \cdot F_1(\theta, \varphi) \cdot F_2(\theta, \varphi)$$

式中

$$F_1(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{K_0 W}{2} \sin\theta \sin\varphi\right)}{\frac{K_0 W}{2} \sin\theta \sin\varphi}$$

$$F_2(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{K_0 h}{2} \sin\theta \cos\varphi\right)}{\frac{K_0 h}{2} \sin\theta \cos\varphi}$$

$$A = j \frac{2VW}{\lambda r'} e^{-jk_0 r'}, \quad r' \text{ 是微带片中心到场点的距离。}$$

由于  $h \ll \lambda$ , 故  $F_2(\theta, \varphi) \approx 1$

$$E_\varphi = A \cos\theta \sin\varphi \cos\left(\frac{K_0 L}{2} \sin\theta \cos\varphi\right) \cdot F_1(\theta, \varphi) \cdot F_2(\theta, \varphi)$$

由上两式可见, 若  $\varphi = 0$ , 则在此平面上仅有  $E_\theta$  分量, 故此平面为  $E$  面, 这是包含准 TEM 波传播方向及  $z$  轴的平面。而在  $\varphi = 90^\circ$  平面,  $E_\theta = 0$ , 仅有  $E_\varphi$  分量, 故为  $H$  面, 这是与波传播方向垂直的平面, 因此, 可以控制波传播方向取得不同的极化状态。最大辐射方向

在  $\theta = 0$  即  $z$  轴, 这是同相激励二元阵的特点。由于微带元尺寸一般较小, 即  $W, L < \lambda_0/2$ ,  $\lambda_0$  为自由空间波长, 所以方向性较弱。

由此, 当  $\varphi = 0^\circ$  时, 即  $E$  面的归一化方向图为

$$f_E(\theta) = \cos\left(k_0 \frac{L}{2} \sin\theta\right)$$

当  $\varphi = 90^\circ$  时, 即  $H$  面的归一化方向图为

$$f_H(\theta) = \frac{\sin\left(k_0 \frac{W}{2} \sin\theta\right) \cos\theta}{k_0 \frac{W}{2} \sin\theta}$$

其辐射功率

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \oint_S E \times H^* \cdot \hat{r} ds \\ &= \frac{1}{240\pi} \oint_S [ |E_\theta|^2 + |E_\varphi|^2 ] ds \end{aligned}$$

由于微带天线有金属底板, 理论上反向半空间辐射, 此时  $S$  取上半球面, 即

$$P = \frac{1}{240\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} [ |E_\theta|^2 + |E_\varphi|^2 ] r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$$

## 2.2 微带阵列

微带天线单元的增益一般只有  $6 \sim 8\text{dB}$ 。为获得更大增益, 或为了实现特定的方向性要求, 常采用由微带辐射元组成的微带阵列天线。最简单的排阵方式是直线阵。其馈电结构一般采用串馈或并馈。

### 2.2.1 线阵辐射特性

由相同而且取向一致的辐射元组成的阵列方向图是其辐射元方向图和阵因子方向图的乘积 (方向图乘积定理)。阵因子方向图就是将实际辐射元用无方向性的点源来代替 (具有原来的激励振幅和相位) 而形成的阵方向图。微带辐射元的方向图可由其等效磁流元的辐射场得出。这样可方便地求得微带线阵的辐射特性。

如图 2.2 所示的  $N$  个相同的微带天线元所组成的线阵, 阵元沿  $y$  轴均匀排列, 相邻阵元之间的距离为  $d$ , 第  $n$  个阵元的激励电流为  $I_n e^{-j\varphi_n}$ , 则阵在远区的辐射总电场为 [4]

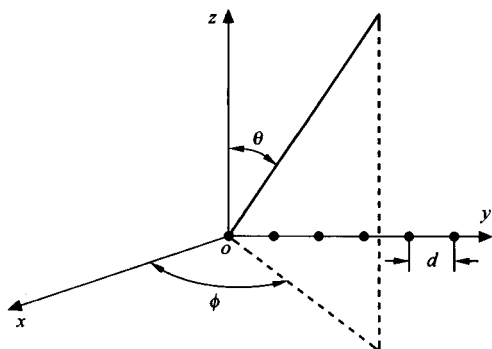


图 2.2  $N$  元线阵

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f_n(\theta, \varphi) I_n \exp[j(nkd \sin\theta \sin\varphi - \varphi_n)] \quad (2.1)$$

式中,  $f_n(\theta, \varphi)$  为阵中各元的单元方向性函数, 在忽略阵中各元间的互耦影响时,  $f_n(\theta, \varphi)$  就是孤立微带天线元的方向性函数。当阵元相同时,  $f_n(\theta, \varphi)$  可以提到求和符号之外, 则有

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \cdot S(\theta, \varphi) \quad (2.2)$$

这就是方向性乘积定理, 其中

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N I_n \exp[j(nk d \sin\theta \sin\varphi - \varphi_n)] \quad (2.3)$$

称为阵因子或阵的方向性函数。当  $f_n(\theta, \varphi) = 1$  时, 它就代表阵的总场方向性函数。当阵元数目足够多时, 阵的主瓣很窄, 而一般阵元的波束相对而言又很宽, 因此, 阵因子主要决定了阵的总场方向图的主瓣和最靠近主瓣的少数几个旁瓣。因此, 研究阵因子的方向性是很有实际意义的。考虑到阵方向性函数相对于  $y$  轴是旋转对称的, 所以只须研究  $y$  轴任一平面内的方向性函数。例如, 选择  $yoz$  平面 (即  $\varphi = \pi/2$ ), 此平面方向围绕  $y$  轴旋转就得整个空间的阵方向性函数图形。在  $yoz$  平面内, 阵方向性函数为

$$S(\theta, \frac{\pi}{2}) = \sum_{n=1}^N I_n \exp[j(nk d \sin\theta \sin\varphi - \varphi_n)] \quad (2.4)$$

设阵中各元的激励相位  $\varphi_n = n\psi_0$ , 即各元相位按线性相位规律分布, 则由式 (2.4) 看出, 当

$$k d \sin\theta_{mi} - \psi_0 = 2i\pi \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.5)$$

时, 阵因子得最大值。 $i = 0$ , 对应波束的第一个最大值称为主瓣, 其波束指向记为  $\theta_{m0}$ 。此时, 相邻两个阵元间的激励电流的相位差  $\psi_0$  与  $\theta_{m0}$  的关系由式 (2.5) 得

$$\psi_0 = k d \sin\theta_{m0} \quad (2.6a)$$

或

$$\theta_{m0} = \arcsin\left(\frac{\psi_0}{k d}\right) \quad (2.6b)$$

由式 (2.6b) 可知, 当  $\psi_0$  变化时, 主瓣指向  $\theta_{m0}$  也改变, 这就是相控线阵的扫描原理 [5]。

如果  $\psi_0 = 0$ , 即各元同相激励,  $\theta_{m0} = 0$ , 这就是固定波束的边射阵的情况。当  $\psi_0 = k d$ ,  $\theta_{m0} = \pi/2$ , 这是固定波束的端射阵的情况。可见, 固定波束线阵可以作为扫描线阵的特例。

当主瓣最大值指向  $\theta_{m0}$ , 将由式 (2.6a) 所确定的  $\psi_0$  代入式 (2.5), 可得

$$\sin\theta_{mi} = \sin\theta_{m0} + i\lambda/d \quad (i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.7)$$

由式 (2.7) 所确定的  $\theta_{mi}$  同样可使阵因子最大。对应  $\theta_{mi} (i \neq 0)$  的波瓣称为栅瓣。当主瓣指向  $\theta_{mi} = 0$  时, 各栅瓣指向

$$\sin\theta_{mi} = i\lambda/d \quad (2.8)$$

由式 (2.8) 可见,  $|i|$  愈大, 栅瓣角  $|\theta_{mi}|$  愈大。所以,  $i = \pm 1$  的栅瓣是最靠近主瓣的栅瓣。当  $\theta_{m0} = 0$  时, 这两个栅瓣相对于  $\theta_{m0} = 0$  对称地出现,  $i = +1$ ,  $\theta_{m1} > 0$ ;  $i = -1$ ,  $\theta_{m,-1} < 0$ 。由式 (2.8) 还可看出, 出现栅瓣的角度还与  $\lambda/d$  有关。 $d = \lambda$ ,  $\theta_{m,\pm 1} = \pm \pi/2$ ;  $d > \lambda$ ,  $|\theta_{m,\pm 1}| < \pi/2$ ;  $d < \lambda$ ,  $|\sin\theta_{m,\pm 1}| > 1$ ,  $\theta_{m,\pm 1}$  无实数解, 这意味着在实空间无栅瓣存在。因此, 对于同相激励的边射阵, 选择  $d < \lambda$  是避免栅瓣出现的条件。

下面以  $d < \lambda$  的线阵为例, 来说明栅瓣随主瓣扫描时的变化规律。当主瓣指向  $\theta_{m0} > 0$  时, 由式 (2.7) 知, 此时对应  $i = 1$  的栅瓣在实空间不再出现; 而  $i = -1$  的栅瓣角  $\theta_{m,-1}$  向边射方向移动, 这意味着  $i = -1$  的栅瓣有可能在实空间出现。这要看  $\theta_{m0}$  和  $\lambda/d$  的具体值