

采用双缝结构展宽裂缝天线的研究

邱景辉 李 岩

哈尔滨工业大学电子与通信工程系 150001

[摘要] 平板裂缝阵列天线近年来在机载雷达上获得广泛应用，但是它的不足之处是频带比较窄。本文提出了一种新的展宽频带的方法。该方法在结构上用脊形波导代替了矩形波导，并采用双缝结构，利用非线性寻优算法来寻找最佳的双缝位置。通过理论分析及实验，证明了该方法的有效性。

关键词： 裂缝阵天线、双缝结构、脊形波导、寻优算法

1 引言

平面波导槽天线虽然具有许多优点，并得到了广泛应用，但是随着电子技术的发展，如扩频、跳频技术的应用，要求天线具有更宽的带宽。一般平面波导纵槽天线带宽较窄，如天线的槽缝数为 N ，则带宽约为 $1/N*50\%$ ，一般的平面波导纵槽天线带宽只有 0.5%，其缺点是随着工作频带的加宽，每个裂缝的阻抗特性发生变化，导致口面幅相分布偏离设计值，从而造成天线输出电压驻波比发生变化，增大的驻波比严重地降低了平板天线的性能^[1]。即使采用一些展宽频带技术（目前常规解决办法分区馈电）其带宽只有 3% 以下，难满足现代通信、制导武器等系统的要求。本文将采用一种全新的结构来展宽带宽，即在结构上用脊形波导代替了矩形波导，并采用双缝结构。本文利用传输线理论人为理论模型，提出了利用非线性寻优算法来寻找最佳的双缝位置的方法，针对二种不同结构（单缝阵、双缝阵）的线阵波导阵进行理论分析及实验，以对双缝的展宽频带进行分析。通过对模型的仿真，及实验验证，证明了该方法的有效性。

2 问题描述与理论分析

首先，我们对传统的单缝结构进行分析。现在我们设计一个在波导宽边上开十二个并联纵缝的线阵：工作频率 $f=15GHz$ ，天线主波束垂直于阵面。由于脊形波导具有相当大的单模工作带宽，而且脊形波导的向内凸脊相当于矩形波导的一种电容加载，这使同样的外形尺寸下，脊形波导比矩形波导有较小的截面尺寸，这样有利于小型化。所以我们采用脊形波导^[2]。

由于脊形波导具有复杂边界形状的截面，因而截止波长的计算相当复杂，下式为近似计算公式：

$$\frac{\lambda_c}{2a} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)\left(1 - \frac{d}{a}\right)\left(\frac{d}{c} + \frac{2C_d}{\varepsilon}\right)} \quad (1)$$

$$\text{其中: } C_d = \frac{\epsilon}{\pi} \left[\frac{x^2 + 1}{x} \operatorname{ch}^{-1} \left(\frac{1+x^2}{1-x^2} \right) - 2 \ln \frac{4x}{1-x^2} \right] \text{ 又 } x = \frac{c}{b} \quad (2)$$

由于 $f_0 = 15\text{GHz}$, $\lambda_0 = 20\text{mm}$, 我们选用二公分波导, 即 $a \times b = 15.8\text{mm} \times 7.9\text{mm}$, 取 $c = 0.4b$ 、 $d = 3.3\text{mm}$ 。将上述数据代入公式 (1)、(2) 中, 计算得 $\lambda_c = 42.84\text{mm}$ 。

在阵列形式上我们选用谐振阵。为了使辐射波导与自由空间很好的匹配, 应使辐射波导的总电导值为 1, 即 $\sum_{j=1}^n G_j = 1$ 。下式为波导宽壁半波波谐振纵缝的归一化等效电导^[3]

$$G_j = 2.09 \frac{b}{a} \frac{\lambda_g}{\lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi j}{2\lambda_g} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right) \quad (3)$$

这时 $G_n = 1/12$, 将其带入公式 (3) 求得: $x = 4.15\text{mm}$, 即缝隙中心距波导中心线为 4.15mm , 交叉位于波导中心线两侧。

当工作频率偏离中心频率, 并联谐振辐射缝的电纳和电抗将不为零, 其值可由下式估算^[4]。

$$Y_i(\Delta f) = G_i [1 - K'(\frac{\Delta f}{f})^2] - jB_i(\frac{\Delta f}{f}) \quad (4)$$

式中 G_i — 裂缝处于中心频率处电导; Δf — 偏离中心频率的频偏值; k' — 表示频率变化的常数; B_i — 与裂缝有关的电纳值。

由传输线理论波导纵缝等效于传输线上的并联导纳, 现分析在不同频率下, 驻波的变化情况。当频率偏离中心频率, 谐振辐射缝的电纳和电抗将不为零, 并且由式 (5) 可知导波长 λ_g 也将变化。

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2} \quad (5)$$

式中 λ 为工作波长。由式 (7) 可求出由输入端看向终端的导纳

$$Y = Y_0 \frac{(G_i + jB_i) + Y_0 j \tan \beta d}{Y_0 + (G_i + jB_i) j \tan \beta d} \quad (6)$$

式中 β 、 G 、 B 为 f 的函数。经过每一段的求取, 最后求得输入端的总导纳 Y_i 。由输入端看进去的反射系数 Γ

$$\Gamma_{in} = (Y_0 - Y_i) / (Y_0 + Y_i) \quad (7)$$

由反射系数 Γ_{in} , 根据公式 (8) 求得驻波 ρ

$$\rho = (1 + |\Gamma_{in}|) / (1 - |\Gamma_{in}|) \quad (8)$$

当频率从 14.5GHz 到 15.5GHz 变化时, ρ 也将随之变化, 可以画出 ρ 和 f 的变化曲线, 如图 1 虚线所示。

接着, 我们采用双缝结构来设计天线阵。同样我们仍采用脊形波导, 阵面选用双缝结构, 使一个缝谐振于 14.75Hz , 另一个缝谐振于 15.25Hz , 这样就可在较宽的频带上保持匹配。

同样, 为了使辐射波导与自由空间很好的匹配, 应使辐射波导的总电导值为 $\sum_{j=1}^n G_j = 1$ 。由于各对缝的结构相同, 所以 $G_n = 1/12$, 即 $G_{i1} + G_{i2} = 1/12$ 。当工作频率偏离中心频率, 并联谐振辐射缝的电纳和电抗也将不为零。

$$Y_{in} = Y_{i1} + Y_{i2} \quad (9)$$

Y_{11} 和 Y_{12} 可由式 (4) 求得, Y_{11} 对应 $f_1 = 14.75\text{Hz}$, Y_{12} 对应 $f_2 = 15.25\text{Hz}$, 由式 (3) 可知, G_{11} 、 G_{12} 是缝隙中心距波导中心线距离 x_{n1} 、 x_{n2} 的函数。和单缝同样道理, 当频率从 14GHz 到 15.9GHz 变化时, 驻波 ρ 将是 x_{n1} 、 x_{n2} 和 f 的函数, 换言之, 随着 x_{n1} 、 x_{n2} 的取值变化, 将会有不同的 ρ 、 f 关系曲线。这应需要我们采用最优算法, 在一系列曲线族中找到带宽最宽的那一第曲线, 来寻找最佳的 x_{n1} 、 x_{n2} 组合。对于这个问题属于组合优化问题, 可以用遗传算法来进行寻优。函数关系如下:

$$\rho = f(f, x_{n1}, x_{n2}) \quad (10)$$

当频率从 14GHz 到 15.9GHz 变化时, x_{n1} 、 x_{n2} 取值不同, ρ 的曲线也不同。因此, 寻优的目的就是找到使工作带宽 ($\rho/2$ 的频率范围) 最宽的 x_{n1} 、 x_{n2} 的组合。目标函数为 $J(x) = f(f, x_{n1}, x_{n2}) - 2$, 设定相应的初始值, 求得 $\max\{f_1 - f_2\}$ 的 x_{n1} 、 x_{n2} 的值。其中 $f(f, x_{n1}, x_{n2}) - 2 = 0$ 时的解。因此求取 f_1, f_2 是关键。这里我们采用单纯形法求其解^[5]。

求得最优的 $x_{n1} = 4.4\text{mm}$ 、 $x_{n2} = 1.4\text{mm}$ 。我们画出当 $x_{n1} = 4.4\text{mm}$ 、 $x_{n2} = 1.4\text{mm}$ 时, ρ 和 f 关系曲线。如图 1 实线所示。由曲线中我们看出, 由于双缝的存在, 在驻波比小于 2 的条件下, 将天线的带宽由原来单缝的 3% 展宽到 8.7%。

3 实验

我们可以通过实验来进一步验证, 图 1 虚线所示为上述设计方法的单缝结构的实验结果。从中可以看出, 单缝的带宽比较窄, 只有 2.3%。

图 2 虚线所示为上述设计方法设计的双缝结构实验结果。从中可以看出, 由于双缝的存在, 在驻波比小于 2 的条件下, 将天线的带宽由原来单缝的 2.3% 展宽到 7.7%。由于加工精度和测量误差等原因, 理论值和试验值略有差别, 也表明了该方法的有效性。

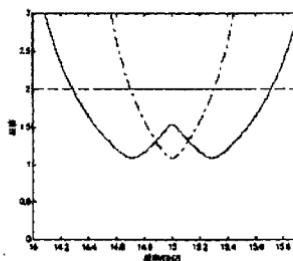


图 1 理论上单缝与双缝 ρ 和 f 关系, 曲线

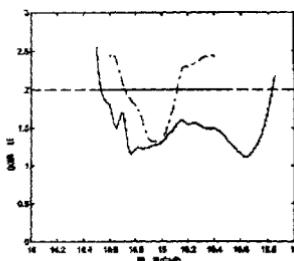


图 2 实验所得单缝与双缝 ρ 和 f 关系曲线

4 结束语

本文采用一种全新的结构——用脊形波导代替了矩形波导, 并采用双缝结构来展宽平板裂缝天线, 并将非线性最优算法应用于双缝的结构优化。通过对双缝结构的理论分析和实验测试, 表明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] Phillips, Richardson and Hung Yuet Yee. "Design and Analysis of Slotted Waveguide Antenna Arrays " *Microwave* , June , 1988 IEEE Ap, pp: 641-650
- [2] 宁平治、闵德芬《微波信息传输技术》“脊形波导” pp: 103-107
- [3] R. J. Stevenson, "Theory of Slots in Rectangular Waveguides, " *J. App. Physics*, Vol. 19 1948
- [4] Johnson and Jasik, *The Antenna Engineering Handbook*, McGrawHill Inc , 1984, Chapter9.
- [5] 符曦 《系统最优化及控制》 单纯形法 pp.336-339

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)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)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),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>