

波导缝隙阵列天线设计

盛月月^{***} 高文军^{*} 雷 宏^{*} 史凤娟^{*}

^{*}(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^{**}(武警工程学院 西安 710086)

摘 要: 根据等效磁流片法对矩形波导宽边纵缝阵面进行分析设计, 采用拟牛顿法对阵面参数求解, 设计中考虑了波导内、外互耦的影响, 孤立缝的自导纳采用矩量法获得, 计算中考虑壁厚。阵列单元的结构与参数采用孤立缝的精确分析结果, 从而加快了迭代速度。以 S 波段 2×4 单元缝隙阵的阵面分析计算和设计制作为例, 测试与仿真的天线特性符合良好。

关键词: 缝隙阵列天线, 矩形波导, 矩量法, 互耦

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1342-03

The Design of the Longitudinal Slot Array of Waveguide's Wider Side

Sheng Yue-yue^{***} Gao Wen-jun^{*} Lei Hong^{*} Shi Feng-juan^{*}

^{*}(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Eng. College of the Chinese People Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

Abstract The longitudinal slot array of rectangular waveguide's wider side is analyzed and designed according to the equivalent magnetic current. The parameters of the array are obtained with the method of quasi-Newton, and the inner and external coupling coefficients are calculated and taken into account. Because the admittance of single slot is calculate with MOM, and the thickness of waveguide's wall is considered, the convergent rate is enhanced. As an example, an S-waveband slot array of 2×4 elements is designed, and the measured and simulated results are agreed well with each other.

Key words Slot array antenna, Rectangular waveguide, MOM, Coupling

1 引言

缝隙阵列天线由于其具有效率高、体积小、重量轻、结构紧凑, 且容易获得高增益、低副瓣等特点, 在雷达和微波通信系统中获得了广泛的应用。对于平面缝隙阵, 互耦影响是比较大的, 必须考虑内部、外部互耦效应。在实际天线应用中, 通过实验测量阵元间的互耦误差较大, 而且实验工作量很大, 因此, 长期以来人们采用 Elliott 提出的有源导纳设计方法^[1], 即裂缝在计入互耦时的导纳, 进行数值分析计算。缝隙阵列由具有一定几何关系的单元缝隙排列而成, 这就意味着阵列的性能与缝隙单元的特性有着重要关系, 因此要设计性能优良的波导缝隙阵列天线, 要以高精度的缝隙单元分析为基础。

本文根据等效磁流片法对波导宽边纵向缝隙阵列进行分析设计, 考虑波导内外互耦的影响^[2], 其中缝隙单元自导纳是根据等效原理, 采用矩量法求得的厚壁波导孤立缝的精确结果。根据要求的口面场分布, 采用拟牛顿法求解有源导

纳谐振的阵列中各缝隙的长度及其关于所在波导中心的偏置。用 C++ 语言编制了缝隙阵列分析设计软件和反算缝电压与匹配计算软件, 软件采用双精度浮点数, 计算精度高。设计了 S 波段 2×4 元波导缝隙阵列, 根据要求的阵列口面电场分布和线阵匹配导纳, 预算缝隙的导纳, 通过数值计算得到此导纳的孤立缝谐振缝长和偏置; 由前面给出的谐振缝长和偏置作为迭代的初值, 在不计互耦的情况下进行迭代计算, 得到一组收敛结果, 作为考虑互耦迭代计算的更合适初值, 达到容易收敛的目的。由于设计得到的缝隙为矩形缝隙, 为了便于加工, 按照等面积等效法将方头缝隙转换为圆头缝隙进行加工, 加工的样机测试结果与设计要求和仿真结果吻合良好。

2 理论模型

2.1 孤立缝导纳的计算

对于厚壁波导缝隙的分析, 根据场的等效原理, 可以分别用裂缝的上、下表面上带有磁流 ($\hat{n}' \times E'$) 和 ($\hat{n} \times E$) 的短路

片代替缝隙口径, 如图1。

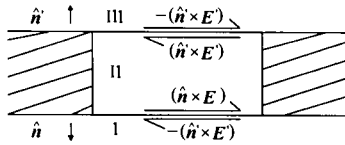


图1 缝腔横截面及磁流示意图

利用切向磁场连续的边界条件得到一对关于 $(\hat{n} \times E)$ 和 $(\hat{n}' \times E')$ 的联立积分方程:

$$\hat{n} \times H'_i(r) = j\omega\epsilon_0 \hat{n} \times \iint_S \{\bar{G}_1(r|r') + \bar{G}_2(r|r')\} \{\hat{n} \times E(r')\} dS_0 \\ + j\omega\epsilon_0 \hat{n} \times \iint_{S'} \{\bar{G}_2(r|r') \cdot \{\hat{n}' \times E'(r')\}\} dS_0, \quad r \text{ 在 } S \text{ 上} \quad (1)$$

$$0 = j\omega\epsilon_0 \hat{n}' \times \iint_{S'} \{\bar{G}_3(r|r') + \bar{G}_2(r|r')\} \{\hat{n}' \times E'(r')\} dS_0 \\ + j\omega\epsilon_0 \hat{n}' \times \iint_S \{\bar{G}_2(r|r') \cdot \{\hat{n} \times E(r')\}\} dS_0, \quad r \text{ 在 } S' \text{ 上} \quad (2)$$

式中 $\bar{G}_{1,2,3}$ 分别为区域 I, II 和 III 中的并矢格林函数^[3]。这里指定波导内腔为区域 I, 缝隙内腔为区域 II, 缝隙的半辐射空间为区域 III。

对上述积分方程采用矩量法分析, 基函数采用正弦函数:

$$f_l(\zeta) = \sin[\pi(\zeta + l)/(2l)] \quad (3)$$

并选择检验函数与基函数相同。式(3)中 l 表示缝隙半长度。

这一过程把积分方程变成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} A & C \\ D & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中各矩阵元素详见文献[3]。

解矩阵方程即可确定所讨论缝隙的切向电场, 因入射场已知, 则可得到反射系数。对于纵向缝隙有

$$S_{11} = \frac{A_0 \pi}{j\sqrt{2}a} \left\{ \sin \left[\frac{\pi(x+w/2)}{a} \right] - \sin \left[\frac{\pi(x-w/2)}{a} \right] \right\} \\ \times \sum_{l=1}^N \left[a_l \frac{2l\pi l}{(\pi^2 - 4\beta^2 l^2)} \times [(-1)^l e^{j\beta l} - e^{-j\beta l}] \right] \quad (5)$$

式中 a 为矩形波导宽边长度, A_0 为入射场幅度, w 为缝隙的宽度, β 为矩形波导波数。

这样由 $Y/Y_0 = -2S_{11}/(1+S_{11})$ 便可得到所需要的缝隙自导纳。

2.2 阵面参数设计模型

这里采用 Elliott 给出的等效磁流片方法进行阵面参数的设计^[4]。基本设计公式如下:

式(6)中 $m=1, 2, \dots, M$; $n=1, 2, \dots, N$; C_m 为常数, 其余符号的含义详见文献[4]。

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_0} = K_l f_{mn}(X_{mn}, L_{mn}) \frac{V_{mn}^s}{V_{mn}} \quad (6a)$$

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_0} = \frac{2f_{mn}^2(X_{mn}, L_{mn})}{\frac{2f_{mn}^2(X_{mn}, L_{mn})}{Y_{mn}/G_0} + MC_{mn}} \quad (6b)$$

$$\sum_n Y_{mn}^a/G_0 = C_m \quad (6c)$$

为了满足口面的同相位分布, 每个缝隙的有源导纳应是谐振的, 即上述均为实数方程, 对于同一分支波导上的每个缝隙其模电压大小相等, 上述基本设计方程可以变形如下^[5,6]:

$$\frac{\text{Re} \left[\frac{2f_{mp}^2(X_{mp}, L_{mp})}{Y_{mp}/G_0} + MC_{mp} \right]}{\text{Re} \left[\frac{2f_{mn}^2(X_{mn}, L_{mn})}{Y_{mn}/G_0} + MC_{mn} \right]} = \frac{f_{mp}(X_{mp}, L_{mp})}{f_{mn}(X_{mn}, L_{mn})} \cdot \frac{V_{mn}^s}{V_{mp}^s} \quad (7a)$$

$$\text{Im} \left[\frac{2f_{mn}^2(X_{mn}, L_{mn})}{Y_{mn}/G_0} + MC_{mn} \right] = 0 \quad (7b)$$

$$\sum_n \frac{2f_{mn}^2(X_{mn}, L_{mn})}{\text{Re} \left[\frac{2f_{mn}^2(X_{mn}, L_{mn})}{Y_{mn}/G_0} + MC_{mn} \right]} = C_m \quad (7c)$$

式中 $p=N/2$ 。

根据上述设计公式, 编制了缝隙阵面设计软件, 首先根据阵列口面分布的要求估计缝隙的导纳值, 根据对孤立缝隙导纳特性的分析结果, 得到一组该导纳下的谐振缝长和偏置。然后根据预先要求的缝电压分布, 在不计互耦的情况下迭代出一组更合适的缝隙尺寸作为非线性方程组的初值, 然后用拟牛顿法迭代求出阵中各缝隙的参数, 即为满足要求的阵面缝隙的分布状况和几何尺寸。计算结果中同时给出按照得到的缝隙参数组成的阵列所能产生的口面场分布和匹配导纳等。

3 设计实例

下面给出工作在 S 波段, 缝宽为 5 mm, 壁厚为 2 mm, 均匀分布的 2×4 单元谐振阵的设计实例。取 $C_m=1.0$, 缝隙阵列的几何结构如图 2 所示。

该阵列的馈电形式为端馈, 加工采用圆头缝, 这里按照等面积等效法将缝长修正为如下形式:

$$l' = l + \frac{1}{2}w(1 - \frac{\pi}{4}) \quad (8)$$

按照修正后的缝长和计算的偏置加工了 2×4 元面阵, 图 3 为实测电压驻波比曲线, VSWR<1.5 时的带宽为 4.7%。

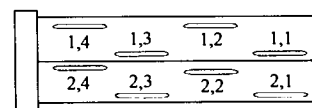


图2 2×4 单元谐振阵

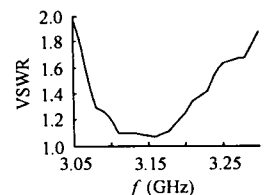


图3 实测电压驻波比曲线

表 1 给出了实测与仿真方向图的对比, 图 4 为方向图的实测结果与仿真结果的对比。

表 1 实测与仿真方向图对比

	E 面 3dB 主瓣宽度	E 面 副瓣电平	H 面 3dB 主瓣宽度	H 面 副瓣电平
仿真	30°	- 6.9 dB	18°	- 13.34 dB
测试	29°	- 7.0 dB	19°	- 13.15 dB

从表 1 和图 4 可以看出仿真和实测方向图符合良好, 其中在大于 150° 时, 二者 H 面方向图相差稍大, 这主要是由于实验中馈电和功分器部分结构的影响造成的, 仿真中未考虑这部分结构。另外, E 面方向图的副瓣电平较高, 这是由于实验阵面在该方向上的宽度就是两个 BJ-32 波导宽边的宽度, 没有采取任何措施降低副瓣电平。

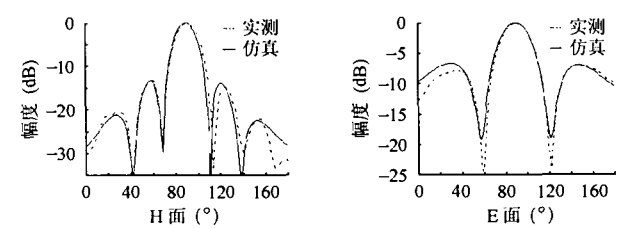


图 4 实测与仿真方向图

4 结束语

根据等效磁流片法对矩形波导宽边纵缝阵列进行了理论分析设计, 其中孤立缝的自导纳是根据场的等效原理, 采用矩量法计算的, 考虑波导壁厚。采用拟牛顿法对缝隙的几何参数求解, 通过数值计算得到迭代的初值, 迭代过程中考虑了缝隙内外互耦的影响。用 C++语言编制了宽边纵缝阵列的设计软件, 软件中的数据类型为双精度浮点型, 设计精度

很高, 设计了 S 波段 2×4 元阵列, 并加工实物, 理论与实测结果吻合良好, 可为其他设计者提供参考。通过对孤立缝的分析计算, 有利于找出阵列设计合适的初值, 这样场分析法与等效磁流片法相结合, 达到容易收敛的目的, 又能提高设计精度。另外, 对已有的 X 波段匹配导纳为 2.0 的 8×8 元泰勒分布阵列进行设计, 设计结果与现有阵列参数吻合, 各缝隙参数满足加工要求, 证明该软件的有效性和精确性。

参 考 文 献

[1] Elliot R S. Antenna Theory and Design. US: Prentice-Hall Inc. 1981: 408 - 410.

[2] Elliot R S, Loughlin W R O. The design of slot arrays including internal mutual coupling. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1986, 34(9): 1149 - 1154.

[3] Lyon R W, Sangster A J. Efficient moment method analysis of radiating slots in a thick-walled rectangular waveguide. *IEE Proc.-H*, 1981, 128(4): 197 - 205.

[4] Elliot R S. An improved design procedure for small array of shunt slots. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1983, 31(1): 48 - 53.

[5] 王伟, 方一, 吕善伟. 平面波导缝隙阵列阵面参数设计中的收敛问题. *系统工程与电子技术*, 1993, (9): 12 - 20.

[6] 王伟. 高速高强度飞行器天线罩的研究与实践. [博士论文], 北京: 北京航空航天大学, 2002 年 2 月.

盛月月: 女, 1980 年生, 硕士, 从事缝隙阵列的设计工作。

高文军: 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 从事天线及馈线方面研究工作。

雷 宏: 男, 1963 年生, 研究员, 从事合成孔径雷达系统及天线方面研究工作。

史凤娟: 女, 1979 年生, 工程师, 从事高频器件的仿真设计工作。