

波导 E 面金属膜片的分析及其在滤波器设计中的应用

刘 溢

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要 利用模式匹配法分析了波导 E 面金属膜片的不连续结构, 通过波导中不连续分界面切向场连续边界条件, 推导了该不连续结构的散射矩阵, 进而给出了相应的等效电路参数, 分析了膜片厚度、放置位置对 S 参数以及等效电路参数的影响, 给出了 ka 波段三腔体滤波器的算实例以说明这种影响。

关键词 模式匹配; E 面金属插片; 滤波器; 不连续性

中图分类号 TN713

1 引言

E 面波导滤波器是 1974 年 konishi^[1] 提出来后, 由于其结构简单、带内插损小、易于批量生产等优点, 因而在 ka, ku 等波段获得了广泛的应用。国外对于这种结构的计算较多地选用对称结构, 在分析方法上发展了变分法, 留数法和模式匹配法等。本文在此基础上采用模式匹配法分析了偏置结构和金属膜片厚度对滤波器性能的影响。模式匹配法是一种高精度的数值解法, 它通过考虑不连续性附近的高次模和金属膜片厚度对散射参数的影响, 从而能更准确分析波导不连续性结构。1982 年, 德国的 F.Arndt^[2] 为首的研究小组将这种高精度的模式匹配法等技术应用于波导无源器件的综合 CAD 中, 得

到的设计制造的波导滤波器的实际测量值与其 CAD 综合优化值相当吻合的优良结果。实际上, 由于模式匹配分析法需要相当大的计算量, 在早期并没有获得大的重视, 但是, 随着近年计算机技术的迅猛发展, 模式匹配法已被广泛的应用于要求高精度设计微波器件的领域当中。

2 基本理论

波导金属 E 面膜片的结构如图 1 所示。

由图可看出, 不连续性结构只发生在 x 方向上, 由于波导一般都是主模工作, 则 TE₁₀ 模在不连续性附近只能激励起 TE_{m0} 模, 不能激励起 TE_{mn} ($n \neq 0$) 模和 TM_{mn} 模。

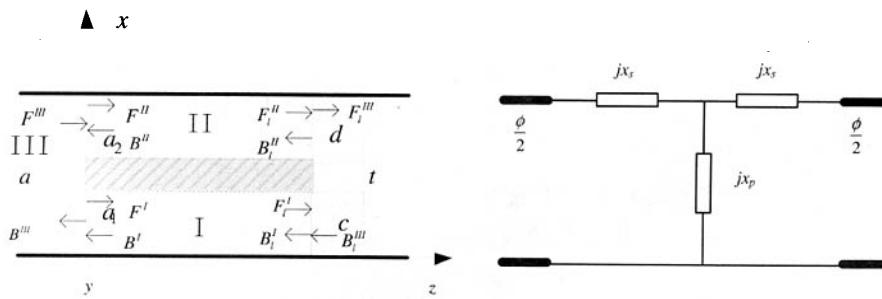


图 1 波导 E 面插入金属膜片结构及其等效电路

类似文^[3], 波导 I, II, III 区中沿 z 方向传输的总横向场按主模及高次模可以展开成下列形式:

$$E_y^\nu = \sum_{m=1}^{\infty} G_m^\nu \sin\left(\frac{m\pi}{a^\nu} f^\nu\right) (F_m^\nu e^{-jk_{zm}^\nu z} + B_m^\nu e^{+jk_{zm}^\nu z}) \quad (1)$$

$$H_x^\nu = -\sum_{m=1}^{\infty} G_m^\nu Y_m^\nu \sin\left(\frac{m\pi}{a^\nu} f^\nu\right) (F_m^\nu e^{-jk_{zm}^\nu z} - B_m^\nu e^{+jk_{zm}^\nu z}) \quad (\nu = I, II, III) \quad (2)$$

其中 $a^\nu = \begin{cases} a_1 & I \\ a - a_2 & II \\ a & III \end{cases}$ $f^\nu = \begin{cases} x & I \\ x - a_2 & II \\ x & III \end{cases}$ (3)

收稿日期: 2005-04-11

k_{zm}^v 为传播常数, k_{cm}^v 对应于 I, II, III 区的截止波数, k 为自由空间中的传播常数。

$$k_{zm}^v = \sqrt{k^2 - k_{cm}^v} \quad (4)$$

G_m^v 为归一化因子, 可由下面公式求得

$$G_m^v = 2 \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{a^v b k_{zm}^v}} \quad (5)$$

波导纳项

$$Y_m^v = \frac{k_{zm}^v}{\omega \mu_0} \quad (6)$$

F_m^v 、 B_m^v 分别是未知本征模式前行和后行波的幅度, 在此是归一化的, 以保证每个模式所载功率是 1W。

在 $z=0$ 处, 横向电场和横向磁场要满足连续边界条件

$$E_y^{III} = \begin{cases} E_y^{II} & a_2 \leq x \leq a \\ 0 & a_1 < x < a_2 \\ E_y^I & 0 \leq x \leq a_1 \end{cases} \quad H_x^{III} = \begin{cases} H_x^{II} & a_2 < x < a \\ H_x^I & 0 < x < a_1 \end{cases}$$

F_m^v 、 B_m^v 可以通过两边乘以相应的正交函数然后做耦合积分得到, 从而可以得到三端口网络 A 的散射矩阵 $S_{z=0}$

$$\begin{pmatrix} B^{III} \\ F^{II} \\ F^I \end{pmatrix} = S_{z=0} \begin{pmatrix} F^{III} \\ B^{II} \\ B^I \end{pmatrix} \quad (7)$$

对于分叉波导, 由微波网络理论, 波导长为 l , 考虑其中的 N 种模式, 则其散射矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} 0 & D \\ D & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $D = \text{diag}\left\{e^{-jk_{zm}^v l}\right\}$

$z=l$ 处的不连续性可用类似的方法处理。整个单元的散射矩阵 S 可以通过级联 $ABCD$ 网络得到

$$\begin{bmatrix} B^{III} \\ F_l^{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S)_{11} & (S)_{12} \\ (S)_{21} & (S)_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^{III} \\ B_l^{III} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中^[4, 5]

$$(S)_{11} = (S)_{22} = \left\{ I + U - W(I+U)^{-1}W \right\}^{-1} \quad (10)$$

$$\left\{ I - U - W(I+U)^{-1}W \right\}$$

$$(S)_{12} = (S)_{21} = \left\{ I + U - W(I+U)^{-1}W \right\}^{-1} \quad (11)$$

$$W \left\{ U - (I+U)^{-1}(I-U) \right\}$$

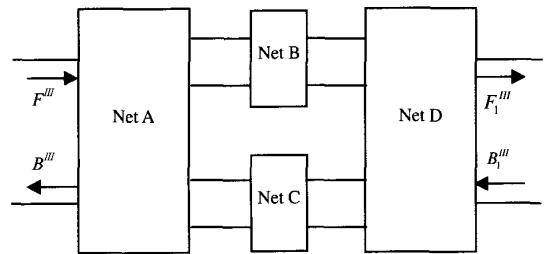


图 2 单元膜片的 S 参数

这里

$$I = \sum_{v=II}^{III} L_E^v \left\{ U + 2D^v \left(U - D^v D^v \right)^{-1} D^v \right\} L_H^v \quad (12)$$

$$W = \sum_{v=II}^{III} 2L_E^v D^v \left(U - D^v D^v \right)^{-1} L_H^v \quad (13)$$

其中 U —— 单位矩阵

D^v —— 第 v 个小波导的传输矩阵 (对角阵)

$$D_{(m,m)}^v = e^{-jk_{z(m)}^v l} \quad (14)$$

$$L_{E(m,n)}^v = 2 \sqrt{\frac{k_{z(m)}^{III}}{a(a-a_2)k_{z(n)}^{II}}} \int_{a_2}^a \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi(x-a_2)}{a-a_2}\right) dx \quad (15)$$

$$L_{E(m,n)}^v = 2 \sqrt{\frac{k_{z(m)}^{III}}{aa_1k_{n(n)}^I}} \int_0^{a_1} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{a_1}\right) dx \quad (16)$$

$$L_H^v = (L_E^v)^T \quad (T \text{ 表示转置}) \quad (17)$$

由得到的 E 面金属膜片的散射矩阵可由式 (18) 求出其 T-型等效电路的参数。

$$jx_s = \frac{1-s_{12}+s_{11}}{1-s_{11}+s_{12}} \quad (18)$$

$$jx_p = \frac{2s_{12}}{(1-s_{11})^2 - s_{12}^2}$$

相应的 K 阻抗变换器的为

$$\phi = -\tan^{-1}(2x_p + x_s) - \tan^{-1}(x_s) \quad (19)$$

$$K = \left| \tan\left(\frac{\phi}{2} + \tan^{-1}(x_s)\right) \right| \quad (20)$$

阻抗变换器的电长度可以并入单个谐振腔的电长度, 所以半波长的谐振腔的实际电长度为

$$l_k = \frac{\lambda_{g0}}{2\pi} \left[\pi - \frac{1}{2}(\phi_k + \phi_{k+1}) \right] \quad (21)$$

3 数值结果与讨论

首先,考虑膜片对称放置的情况,由于其对称性,在 III 区只能激励奇次模,从而将 III 区中的计算模式数目减少一半。表 1 是对称膜片到等效电路参数的转化。使用 WR28 波导 ($a \times b = 7.112 \times 3.556 \text{ mm}^2$), 膜片长 $l = 3 \text{ mm}$, 计算 15 个模式。

应用 WR28 标准波导计算了 E 面三腔体滤波

器,尺寸为: $l_1 = l_7 = 1.009 \text{ mm}$, $l_3 = l_5 = 3.870 \text{ mm}$, $l_2 = l_6 = 4.778 \text{ mm}$, $l_4 = 4.790 \text{ mm}$ 。图 4 是膜片对称放置,厚度分别是 $t = 0.2 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$ 时的计算结果。

从图 4 中可以看出,金属膜片的厚度对滤波器的性能影响是巨大的。随着膜片厚度的增加,滤波器通带发生漂移,带宽减小,插损增大。然而,膜

表 1 对称位置不同厚度金属插片的等效参数

厚度 t (mm)	33GHz		35GHz		37GHz	
	x_p	x_s	x_p	x_s	x_p	x_s
0.2	0.0919	0.3750	0.1225	0.4231	0.1668	0.4733
0.5	0.0551	0.2990	0.0718	0.3370	0.0950	0.3765
1	0.0261	0.2176	0.0332	0.2448	0.0426	0.2730
2	0.0053	0.1073	0.0065	0.1202	0.0080	0.1336

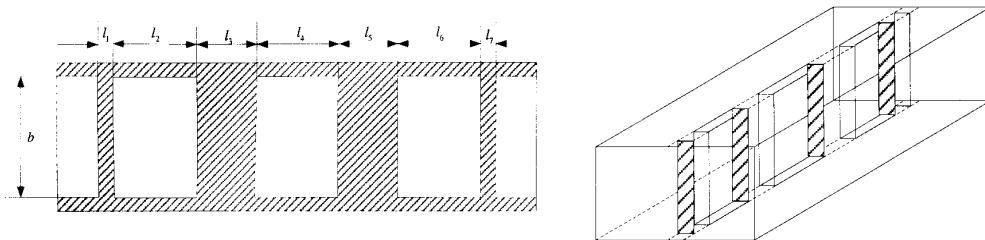


图 3 三腔 E 面金属膜片滤波器结构

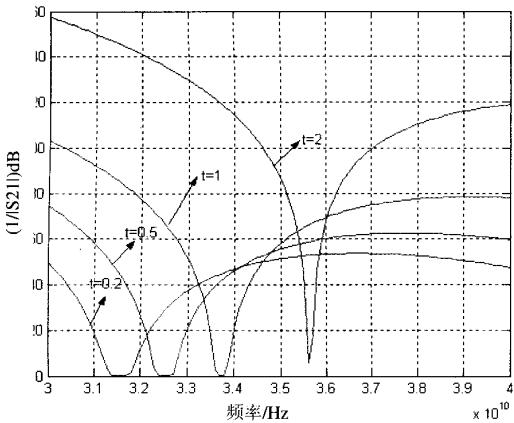


图 4 不同厚度膜片滤波器的响应曲线

片厚度越薄,放置不对称的可能性也就越大,而且较薄的膜片对加工工艺提出较为严格的要求。薄膜片的机械强度相对较差的特性也限制了这类滤波器在移动设备中的应用。文献^[6]对偏置金属膜片作了计算和分析,发现相对于对称结构,一定的偏置可以达到较宽的频带。对于不对称的结构,在 III

区激励起的模式包括奇模和偶模,相对于对称结构,计算复杂度有所增加。

表 2 不同偏置同一金属膜片的等效参数

($t=0.2 \text{ mm}$, $w=0.1 \text{ mm}$, $a=7.112 \text{ mm}$, $b=3.556 \text{ mm}$, $f=27.915 \text{ GHz}$, 取 15 个模)

c(mm)	d(mm)	x_s	x_s [文 献 6]	x_p	x_p [文 献 6]
3.556	3.556	0.0186	0.0186	1.0497	1.0606
3.456	3.456	0.0174	0.0174	0.5736	0.5665
3.256	3.656	0.0174	0.0174	0.6014	0.5850
3.056	3.856	0.0174	0.0174	0.6133	0.5929
2.856	4.056	0.0175	0.0175	0.6976	0.6043
2.656	4.256	0.0176	0.0176	0.7234	0.6853

由表 2 中的数据可以看出膜片的偏置对串联电感几乎没有什么影响,而对并联电感的影响则比较大。这对于设计宽带滤波器是比较有利的。图 4 显示了同样厚度的膜片对称放置和偏置的滤波性能

曲线。由图可以看出滤波器的带宽相对于对称结构有所改善。相对对称膜片，此法避免了随着带宽增加，薄金属膜片在机械加工和机械强度上差的缺点。拓宽了此类滤波器的应用范围。在实际工程设计中可以综合考虑滤波性能的具体要求和计算复杂度灵活采取对称或非对称结构。

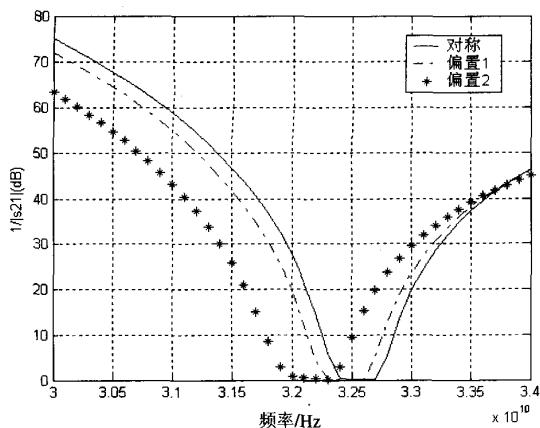


图 5 同厚度不同偏置下膜片滤波器的响应曲线

(偏置 1: $c=3.401\text{mm}$, $d=3.201\text{mm}$,
偏置 2: $c=3.501\text{mm}$, $d=3.101\text{mm}$)

4 结束语

本文利用模式匹配法分析了波导中 E 面金属膜片，针对在滤波器中的应用，分析了各个参数对滤

波性能的影响，提出了改进带宽的方法，并运用开发的 E 面金属膜片的计算程序计算了 ka 波段三腔体滤波器。计算结果验证了改进方法的可行性。

参考文献

- 1 Yoshihiro K, Katsuaki U. The Design of a Bandpass Filter with Inductive Strip-Planar Circuit Mounted in Waveguide. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol 22, Oct, 1974.
- 2 Hartmut P, Fritz A. Double-Plane Steps in Rectangular Waveguides and Their Application for Transformers, Irises, and Filters. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol 30, May, 1982.
- 3 王家礼, 吴万春. 毫米波集成电路的设计及其应用. 西安电子科技大学出版社, 1989, 231~253.
- 4 Rudiger V, Jens B, Fritz A. et al, Optimized Waveguide E-Plane Metal Insert Filters for Millimeter-Wave Applications. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol 31, Jan, 1983.
- 5 Fritz A, Jens B, Rudiger V. et al, E-Plane Integrated Circuit Filters with Improved Stopband Attenuation. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol 32, Oct, 1984.
- 6 刘发林. 波导 E 面偏置金属插片宽带滤波器. 微波学报, 1998, 10.

作者简介

刘渝 (1979—)，男，西安电子科技大学电子工程学院硕士研究生。研究方向：模式匹配在微波器件设计中的应用。

Analysis of Metal E-Plane in Waveguide and its Application to the Design of Filters

Liu Yu

(School of Electronic and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The discontinuous structure of Metal E-plane in waveguide is analyzed by Mode-Matching Method(MMM) in this paper. On the basis of the discontinuities of the waveguide by matching the tangible field, this paper yields the scattering matrix and then derives the equivalent circuit parameters. Finally, a three-resonator filter is analyzed in order to show the effect of the thickness and position on the S parameter and the equivalent circuit parameters.

Keywords Mode-Matching Method(MMM); Metal E-plane; filter; discontinuities

微波滤波器设计培训——视频课程

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，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、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。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>