

# 神经网络在毫米波 E 面滤波器设计中应用研究

吴 文, 李兴国, 蒋金水

(南京理工大学毫米波/光波近感技术研究所, 南京 210094)

**摘 要:** 本文采用神经网络对 E 面膜片进行建模, 并将该模型替代滤波器设计过程中的分析程序. 由于神经网络模型具有精度高、实时调用速度快等优点, 因此本文所发展的 E 面滤波器设计方法具有设计精度高和速度快等优点. 最后采用该方法设计了一个 8mm E 面滤波器, 设计和实验结果表明该方法比较有效.

**关键词:** 神经网络; BP 算法; E 面膜片; E 面滤波器

**中图分类号:** TN752      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2000)06-0076-02

## Research on the Application of the Neural Network to the Design Method of the Millimeter Waves E Plane Filter

WU Wen, LI Xing guo, JIANG Jin shui

(Institute of Millimeter Wave and Optical Wave Near Sensing Technique, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The neural network model of E plane septum is established and is used to take the place of the analysis program of design procedure of the E plane filter. Since the neural network model has good precision and effectiveness, the design method developed by this paper is fast and accurate. An 8mm E plane filter is designed by the developed method and the experimental results are obtained to demonstrate the effectiveness of the developed method.

**Key words:** neural network; BP algorithm; E plane septum; E plane filter

### 1 引言

毫米波滤波器通常采用简单综合和精确分析相结合的方法进行设计, 即先根据所要设计滤波器的频率响应综合出滤波器的集总参数元件值, 再根据集总参数元件值, 采用严格场论方法推导出分布参数元件的结构尺寸. 在滤波器设计过程中, 以场论为基础的精确分析不仅可以加速滤波器的设计进程, 而且可以准确预计滤波器的频率响应.

毫米波 E 面滤波器是采用 E 面膜片和半波长传输线相结合来实现滤波器的集总参数元件. 因此在毫米波 E 面滤波器的设计过程中, 对 E 面膜片的分析是非常重要的. 目前通常采用有限元法、模式匹配法、有限时域差分法等电磁场数值分析方法对 E 面膜片进行分析, 这些分析方法的精度均较高, 但比较费时. 在毫米波 E 面膜片滤波器分析和设计软件中, 通常需要多次调用 E 面膜片的分析程序, 因此毫米波 E 面膜片滤波器分析和设计软件的运行速度主要取决于 E 面膜片分析程序的速度.

大家知道, E 面膜片的 S 参数或等效电路参数决定于膜片的结构尺寸和频率, 它们构成非线性映射关系. 而多层感知器神经网络可以对非线性映射进行精确逼近, 故可以采用多层感知器对 E 面膜片进行建模. 由于神经网络的训练过程虽然需要花费一定时间, 但其模拟过程的速度非常快<sup>[1]</sup>. 因此如

果采用 E 面膜片的神经网络模型替代滤波器设计软件中的分析程序, 将会大大提高滤波器的设计速度.

本文将 E 面膜片的结构尺寸和频率进行取样, 作为多层感知器的输入样本, 这些样本所对应的等效电路参量采用模式匹配法分析得到, 作为多层感知器的输出样本, 采用 BP(反向传播)算法对多层感知器进行训练. 当多层感知器训练完成时, 在学习范围内, 输入 E 面膜片的任意结构尺寸和频率到多层感知器, 就可以迅速地从其输出端得到准确的等效电路参量. 然后利用 E 面膜片的神经网络模型替代滤波器设计过程中的电磁场分析程序, 对滤波器的传统设计方法进行改进, 从而不仅可以保证滤波器的设计精度, 而且可以大大提高滤波器的设计速度. 最后利用改进方法设计了一个 8mm E 面滤波器, 并给出设计和实验结果.

### 2 E 面膜片的神经网络模型

#### 2.1 多层感知器及 BP 算法

多层感知器通常由输入层、输出层和若干隐层组成, 如图 1 所示. 每一层包括若干神经元, 第  $k$  层第  $j$  个神经元的输入输出关系为:

$$y_j^{(k)} = f_j^{(k)} \left( \sum_{i=1}^{N_j^{(k-1)}} \omega_{ij}^{(k-1)} y_i^{(k-1)} - \theta_j^{(k)} \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, N_k, k = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

上式中的  $\omega_{ij}^{(k-1)}$  是第  $k-1$  层第  $i$  个神经元到第  $k$  层第  $j$  个神经元的连接强度 (权值),  $\theta_j^{(k)}$  为对应神经元的阈值,  $f_j^{(k)}$  为神经元的传递函数, 本文采用 Sigmoid 函数

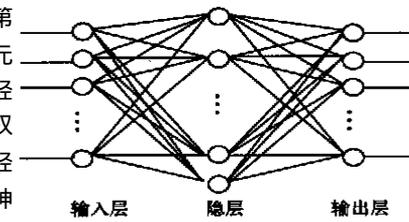


图 1 多层感知器

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (2)$$

$N_k$  为第  $k$  层神经元数目,  $M$  表示总层数, 利用式(1)可以求出网络的总输入  $y_1^{(0)}, y_2^{(0)}, \dots, y_{N_0}^{(0)}$  与输出  $y_1^{(M)}, y_2^{(M)}, \dots, y_{N_m}^{(M)}$  之间的关系式. 实际上, 代表输入输出之间变换关系的有关信息主要分布在神经元之间的权值上, 不同的权值反映着不同的输入输出关系, 因此该神经网络具有分布存储信息的特点.

所谓训练学习, 即不断调整权值和阈值, 使多层感知器的实际输出值与样本值之间的误差越来越小. 本文采用 BP 算法对多层感知器进行训练学习<sup>[3]</sup>, 该算法的学习过程由正向传播过程和反向传播过程组成. 在正向传播过程中, 输入信息从输入层经隐层逐层处理, 并传向输出层, 每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态. 如果输出层不能得到期望值, 则转向反向传播过程, 将误差信号沿原来通路返回, 通过修正各层的权值, 使得误差信号最小.

2.2 模拟结果

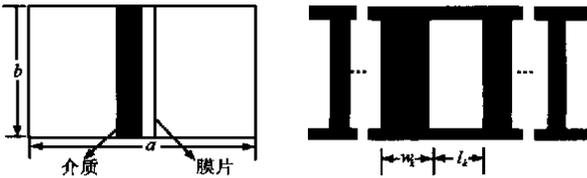
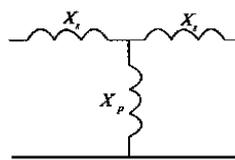


图 2 E 面膜片滤波器结构

E 面膜片的结构如图 2 所示, 膜片的等效电路如图 3 所示. 本文采用三层感知器对 E 面膜片进行建模, 将频率和膜片的宽度作为三层感知器的输入样本,  $X_s, X_p$  (由模式匹配法<sup>[4]</sup>



分析得到) 作为输出样本, 采用 BP 算法对 E 面膜片的等效电路法对三层感知器进行训练. 将三层感知器输出结果和模式匹配法分析结果进行比较, 如图 4 所示, 两种计算结果十分吻合 (在学习范围两端的个别点处, 二者的相对误差小于 5%, 其它地方的相对误差均小于 1%).

3 设计举例及实验研究

本文采用简单综合和 E 面膜片神经网络模型相结合的方法来设计毫米波 E 面滤波器. 首先根据毫米波带通滤波器的插入衰减特性, 用频率变换函数把带通滤波器的输入衰减特性曲线转换成低通原型的插入衰减曲线, 并用网络综合方法确定元件的参数值. 然后用带有阻抗倒置变换器的原型滤波器代替原型滤波器. 再根据阻抗倒置变换器的特性阻抗值,

由 E 面膜片的神经网络模型和对分法来确定 E 面膜片的宽度和谐振腔的长度.

毫米波 E 面滤波器的给定技术指标如下: 中心频率为 35GHz, 带宽为 1GHz, 带内波纹为 0.1dB, 带外衰减为 20dB (在 36GHz 处), 响应函数为切比雪夫函数. 采用本文所发展的方法对该滤波器进行设计, 其设计参数如下:  $a = 7.112\text{mm}$ ,  $b = 3.556\text{mm}$ , 基片的厚度为 0.254mm, 基片的介电常数为 2.22, 膜

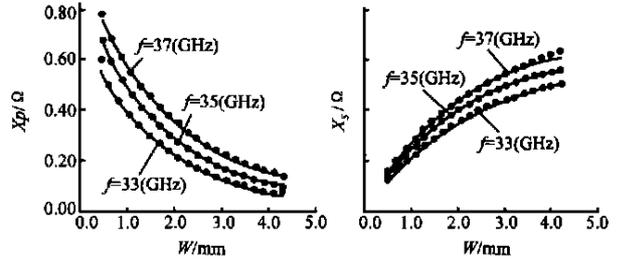


图 4 E 面膜片等效电路参量 (实线为神经网络输出结果, 点为模式匹配法算出结果)

片的宽度和谐振器的长度分别如表 1 和表 2 所示.

滤波器频率响应的计算结果和测量结果如图 5 所示, 由图上可以看出, 计算值满足设计要求, 说明本文所介绍的设计方法的精度比较高. 但测量值和计算值有点偏差, 这是由于加工误差和设计分析时未考虑基片损耗所造成. 本文研制的滤波器带内插损小于 1.5dB.

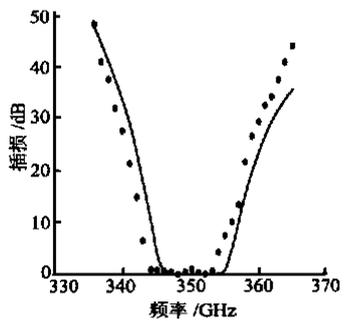


图 5 滤波器的频率特性 (实线为计算结果, 点为测量结果)

表 1 各节膜片宽度

|            |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $k$        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $w_k$ (mm) | 1.557 | 4.510 | 4.985 | 4.510 | 1.557 |

表 2 各节谐振器长度

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $k$   | 1     | 2     | 3     | 4     |
| $l_k$ | 3.197 | 3.179 | 3.179 | 3.197 |

4 结束语

本文采用多层感知器神经网络对 E 面膜片进行建模, 并利用该模型对毫米波 E 面滤波器的设计方法进行改进. 设计和实验结果表明本文提出的改进方法具有设计精度高和速度快等优点.

与本文思想类似, 神经网络还可以推广应用于谐波平衡法、实频技术等微波分析和设计方法中, 从而可以提高微波非线性电路和宽带匹配网络的 CAD 软件的运行功能.

参考文献

[ 1 ] 李嗣范. 微波元件原理与设计. 人民邮电出版社, 1982, 2  
 [ 2 ] J. Uher. Waveguide components for antenna feed systems: theory and CAD, Artech House, 1993  
 [ 3 ] H. Leung and S. Haykin. The complex back propagation algorithm. IEEE Trans., 1991, SP-39(9): 2101~ 2104

(下转第 81 页)

线非常有利. 图 7 绘出了  $d/\lambda_0$  的变化对泄漏常数的影响. 该图说明  $d$  越小(也就是说结构偏离矩形越严重), 泄漏常数就越大. 当  $d/\lambda_0=0.2$  时, 结构为一标准的 NRD 波导, 此时电磁场都被束缚在介质附近, 没有能量泄漏. 从该图中, 我们还可以看出  $d$  对泄漏常数的影响是很大的, 当  $d/\lambda_0 < 0.12$  时, 随着  $d$  的减小, 泄漏常数几乎是线性地增加. 本文中给出的曲线对设计该类漏波天线以及确定 NRD 导波结构的加工公差有着重要的指导意义.

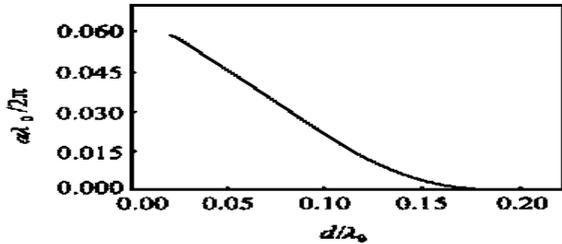


图 7 变形矩形结构漏波天线泄漏常数的随  $d/\lambda_0$  的变换特性

#### 参考文献

- [1] T. Yoneyama and S. Nishida. Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits. IEEE MTT Nov. 1981, MTF 29: 1188 ~ 1192
- [2] A. Sanchez and A. A. Oliner, A new leaky waveguide for millimeter waves using nonradiative dielectric (NRD) waveguide part I: accurate theory. IEEE MTT, Aug. 1987, MTF 35: 737~ 747
- [3] A. A. Oliner, S. T. Peng and K. M. Sherg. Leakage from a gap in NRD guide. IEEE MTT S Int. Microwave Symp. Dig. 1985: 619~ 622
- [4] T. Yoneyama, T. Kuwahara and S. Nishida. Experimental study of nonradiative dielectric waveguide leaky wave antenna. Proc. 1985 Intl. Symp. Antennas Propagate., Kyoto, Japan, August 1985

- [5] F. Schweging and A. A. Oliner. Millimeter Wave Antennas. (Chapter 17, vol. 3, Antennas Handbook, edited by Y. T. Lo and S. W. Lee, New York, 1993)
- [6] S. J. Xu, X. Y. Zeng, K. Wu and K. M. Luk. Characteristics and design consideration of leaky wave NRD guides for use as millimeter wave antenna. IEEE MTT Dec. 1998, MTF 46: 2450~ 2456
- [7] S. J. Xu, X. Z. Wu and T. Yoneyama, Scattering properties of discontinuities in NRD guide. IEE Proc. Microwave Antenna Propag. June 1994, 141(3): 204~ 210
- [8] S. J. Xu, J. H. Min, S. T. Peng and F. K. Schweging. A millimeter wave omnidirectional circular dielectric rod grating antenna. IEEE AP, July 1991, AP 39: 883~ 891
- [9] A. A. Oliner, S. T. Peng, T. I. Hsu and A. Sanchez, Guidance and leakage properties of a class of open dielectric waveguides, part II: New physical effects. IEEE MTT, Sep. 1981, MTF 29: 855~ 869



徐善驾 中国科技大学教授, 博士生导师, 校学术委员会副主任, IEEE 高级会员, 中国微波学会副主任, IEEE 微波和导波快报次副主编, 通信学报常务编委及 IEEE 微波理论与技术汇刊等杂志编委. 长期从事微波、毫米波和光波理论和技术方面的教学和科研工作. 曾获中科院自然科学一等奖、光华科技基金一等奖、中科院重大科研成果二、三等奖, 在国内外发表论文 280 余篇.

曾祥银 1996 年获中国科技大学电子工程与信息科学系学士学位, 现为该校研究生. 主要研究兴趣有复杂媒质中的波现象, 电磁理论及计算方法, 天线理论与设计等.

(上接第 77 页)

- [4] 吴 斌. E 面膜片的理论分析及应用研究. 东南大学硕士论文, 1988, 2
- [5] 吴 文, 杨诠让等. 微带不连续性的神经网络模型. 电子学报, 1996, 24(11): 85~ 87



吴 文 1968 年 10 月出生, 1997 年获东南大学电磁场与微波技术专业博士学位, 现为南京理工大学电光院副教授. 主要研究方向为毫米波天线及电路, 毫米波近程探测系统等.



李兴国 1940 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会微波分会副主任委员, 毫米波亚毫米波专业委员会委员, 在近十个全国学术组织及专家组兼职, 主要研究方向为毫米波亚毫米波近程探测技术, 毫米波成像及目标识别技术等.