

文章编号: 2095-4980(2022)03-0273-04

基于空间映射的 Ka 频段带通滤波器设计

熊 阳

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘 要: 基于单端口群时仿真的空间映射法设计了一款六级 Ka 频段的毫米波带通滤波器, 该滤波器被加工在氧化铝陶瓷基片上, 基片的尺寸为 $8\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \times 0.254\text{ mm}$ 。测试结果显示, 滤波器的中心频率位于 30.68 GHz , 3 dB 相对带宽为 11.5% , 带内最小插入损耗约为 1.75 dB 。

关键词: 单端口群时延; 毫米波; 空间映射; 薄膜滤波器

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020083

Design of Ka-band bandpass filter based on space mapping method

XIONG Yang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: A sixth order Ka band filter is presented based on the method of space mapping of single port group delay simulation. The filter is fabricated on aluminum oxide ceramic substrate, and the chip size occupies $8\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \times 0.254\text{ mm}$. The measurement results show that the center frequency of Ka-band filter is located at 30.68 GHz with 3-dB Fractional BandWidth(FBW) of 11.5% , and the minimum insertion loss within the passband is about 1.75 dB .

Keywords: single-port group delay; millimeter wave; space mapping; thin film filter

随着人工智能、虚拟现实和大数据等新兴宽带业务的出现, 传统的窄带无线通信系统已无法适应这些应用场景的实际需求。为了满足高传输速率、高传输容量的通信要求, 迫切需要开发更高频的毫米波频段资源。而随着 5G 时代的到来, 毫米波更是受到了工业界和学术界的广泛关注。

作为毫米波 T/R 组件的核心器件之一, 毫米波带通滤波器在抑制各种杂谐波、滤除镜频干扰方面发挥着关键作用。传统的毫米波滤波器设计方法耗时费力^[1-3], 尤其是当滤波器级数较大时, 电磁仿真需要消耗更多的资源, 因而大大降低了设计效率。在传统的滤波器设计中, 通过重复性的参数扫描方式不断逼近设计指标具有一定的盲目性和冗余性, 很难得到最优的参数配置。而基于电磁仿真软件自带的优化算法, 在进行多个变量同时优化时, 其效率十分低下。因此, 如何快速有效地设计出满足技术指标的毫米波带通滤波器具有重要的工程意义。空间映射单端口群时延仿真作为一种成熟的设计方法, 它为带通滤波器^[4]和多工器^[5-8]提供了一种快速而有效的方法。

本文基于单端口群时仿真的空间映射法设计了一款六级 Ka 频段的宽带毫米波带通滤波器。采用薄膜制造工艺对滤波器进行加工。实测结果表明, 滤波器的中心频率位于 30.68 GHz , 相对带宽为 11.5% , 带内最小插损仅为 1.75 dB 。测试结果与电磁仿真结果非常吻合, 有效地验证了该方法的分析和设计方法。

1 Ka 带通滤波器设计

图 1(a)给出了 Ka 频段宽带滤波器的设计版图。可以看到, 滤波器是由 6 个 $1/2$ 波长谐振器相互耦合形成, 其中包含了一个级联四角元件(Cascaded Quadruplet, CQ)结构。滤波器的技术指标: a) 通带范围为 $28.8\sim 32.2\text{ GHz}$; b) 级数为 6 级; c) 带内纹波: 0.022 dB ; d) 带外抑制: $DC\sim 28.1\text{ GHz} \geq 35\text{ dB}$; $32.9\sim 40\text{ GHz} \geq 35\text{ dB}$ 。

从技术指标可以看出, 该滤波器在偏离带外 700 MHz 具有很高的抑制要求, 而级联 6 级的耦合形式很难满足如此高的抑制要求, 因此采用图 1(b)的耦合拓扑形式。基于滤波器综合方法, 该滤波器的耦合矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1.0556 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0556 & 0 & 0.8847 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8847 & 0 & 0.5976 & 0 & -0.15529 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5976 & 0 & 0.716 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.716 & 0 & 0.5976 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.15529 & 0 & 0.5976 & 0 & 0.8847 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8847 & 0 & 1.0556 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0556 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

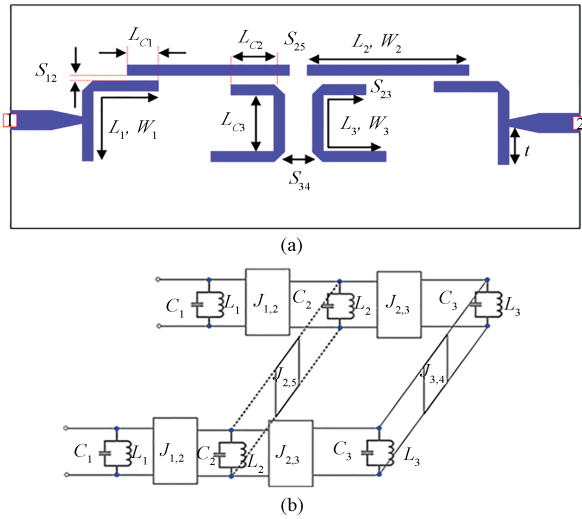


Fig.1 (a) layout of the Ka-band filter; (b) equivalent circuit of the filter

图 1 (a) 滤波器设计版图; (b) 等效电路图

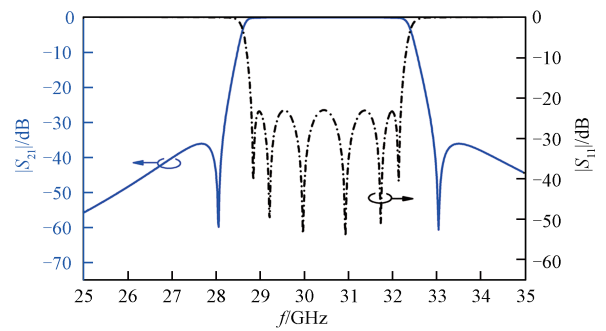


Fig.2 Filter synthesis results

图 2 滤波器综合结果

图 2 给出了满足技术指标的滤波器综合结果。根据传输线理论，可得到 1/2 波长谐振器的主谐振频率为：

$$f = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{re}}L} \quad (2)$$

式中： c 为真空的光速； ϵ_{re} 为等效介电常数。当确定所选用的基板材料及其厚度时，根据式(2)可以估算出谐振器的初始长度。

根据文献[9]中介绍的方法，可以抽取出谐振器之间的耦合系数：

$$M_{ij} = \frac{f_j^2 - f_i^2}{f_j^2 + f_i^2} \quad (3)$$

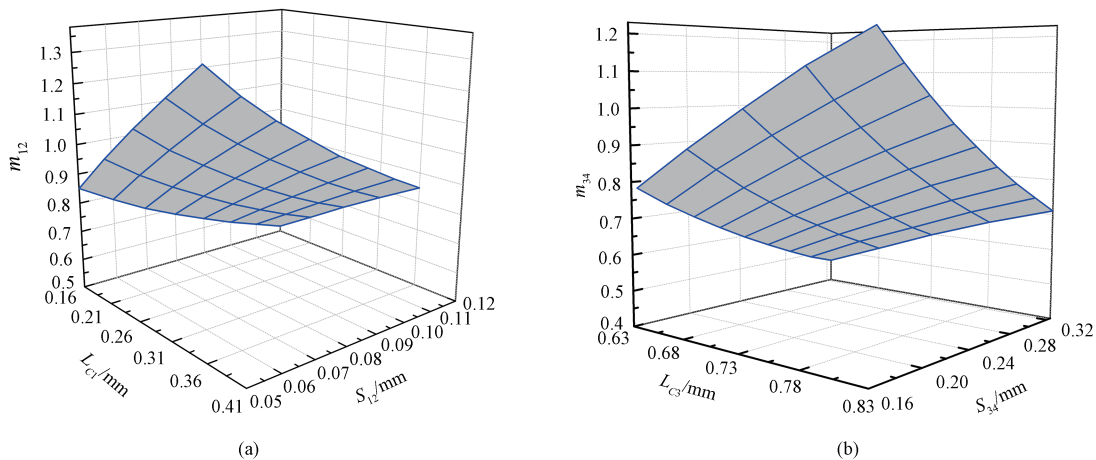


Fig.3 (a) coupling coefficient m_{12} versus varied L_{C1} and S_{12} ; (b) coupling coefficient m_{34} versus varied L_{C3} and S_{34}

图 3 (a) 耦合系数 m_{12} 随 L_{C1} 和 S_{12} 变化; (b) 耦合系数 m_{34} 随 L_{C3} 和 S_{34} 变化

归一化的耦合系数为：

$$m_{ij} = \frac{M_{ij}}{FBW} \quad (4)$$

式中 $FBW = \frac{BW}{f_0}$, BW 为带宽, f_0 为中心频率。

图 3(a) 为耦合系数 m_{12} 随 L_{C1} 和 S_{12} 同时变化的三维关系图。可以看到, 当固定 S_{12} 时, m_{12} 随 L_{C1} 的增加而增加; 当固定 L_{C1} 时, m_{12} 随 S_{12} 的增加而减小。根据耦合矩阵给出的 $m_{12} = 0.8847$, 可以在图 3(a) 中选择一组 (L_{C1}, S_{12}) 值作为初始值。由图 1(a) 可以看出, m_{23} 跟 m_{12} 具有相似的耦合形式, 因此可以直接借鉴图 3(a) 给出 (L_{C2}, S_{23}) 的初始值。图 3(b) 为耦合系数 m_{34} 随 L_{C3} 和 S_{34} 同时变化的三维关系图。可以看到, 当固定 S_{34} 时, m_{34} 随 L_{C3} 的增加而增加; 当固定 L_{C3} 时, m_{34} 随 S_{34} 的增加而减小。根据耦合矩阵给出的 $m_{34} = 0.716$, 可以在图 3(b) 中选择一组 (L_{C3}, S_{34}) 值作为初始值。

图 4 为外部品质因数 Q_e 随抽头位置 t 的变化关系。可以看到, 当 $t < (L/2)$ 增大时, 耦合强度随之减小。当 $t \approx 0.6 \text{ mm}$ 时, 对应的 Q_e 值满足设计所需的耦合强度。

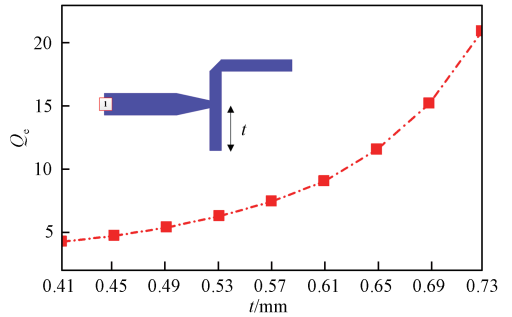


Fig.4 Relationship between external quality Q_e and t
图 4 外部品质因数 Q_e 随抽头位置 t 的变化关系

2 Ka 滤波器单端口群时延仿真

根据空间映射原理, 理论模型中参数可以跟电磁仿真器中的物理结构参数 t (抽头位置)、 L (谐振器长度) 和 S (谐振器间距) 建立一种映射关系。基于这种映射关系, 可以通过单端口群时延法快速设计出满足技术指标的滤波器。

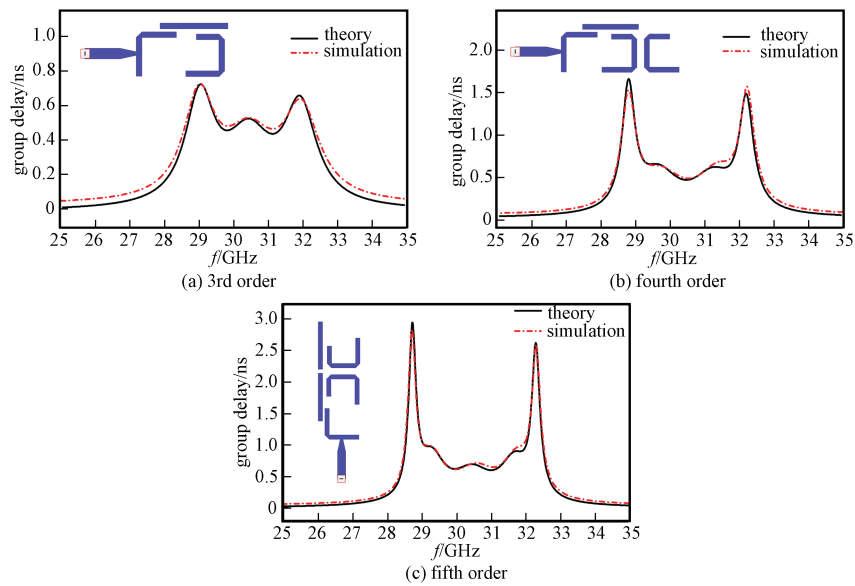


Fig.5 Group delay of simulation and theory
图 5 群时延的仿真和理论结果

图 5 分别给出了三级、四级和五级单端口群时延电磁仿真结果。由于滤波器结构的对称性, 当进行完第五级群时延仿真后, 可以直接将左侧图形沿对称轴翻折过去, 得到最终的电路版图。图 6 给出了电路翻折之后的电磁仿真结果。可以看到, 电磁仿真结果满足技术指标的要求。

3 滤波器的制作与测试

为了验证本设计的分析及方法, 对滤波器进行了加工和测试。基板材料为 99.6% 的氧化铝陶瓷基板, 介电常数为 9.9, 厚度为 0.254 mm, 基片的尺寸为 8 mm × 2.5 mm, 屏蔽腔的高度为 2 mm。采用典型的薄膜制造工艺 (包括溅射、掩模、光刻、电镀、刻蚀和切割等), 滤波器被加工在氧化铝陶瓷基片上。滤波器的详细电路尺寸参数见表 1。借助矢量网络分析仪, 对滤波器进行了 S 参数测

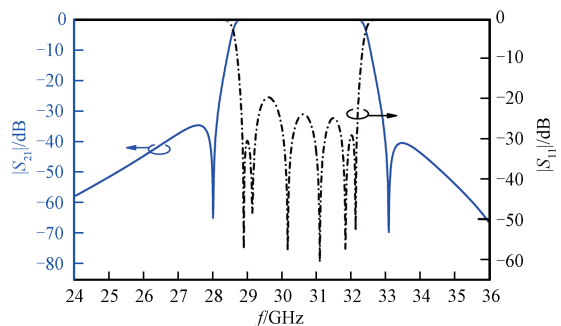


Fig.6 Simulation results of the Ka-band filter
图 6 滤波器电磁仿真结果

试, 测试结果见图 7。测试结果表明, 滤波器的中心频率为 30.68 GHz, 3 dB 相对带宽为 11.5%, 通带插入损耗最小为 1.75 dB。可看到, DC~28.31 GHz 的抑制水平大于 30 dB, 33.28~40 GHz 的抑制水平大于 40 dB。滤波器实测结果与电磁仿真结果十分吻合。

4 结论

本文基于群时延优化的空间映射法设计了一款六级 Ka 频段的毫米波带通滤波器。该滤波器被加工在氧化铝陶瓷基片上, 基片的尺寸为 8 mm×2.5 mm×0.254 mm。测试结果显示, 滤波器的中心频率位于 30.68 GHz, 相对带宽为 11.5%, 通带插入损耗最小仅为 1.75 dB。测试结果与电磁仿真结果非常吻合, 有效地验证了该方法的分析和设计方法。

参考文献:

- [1] 成彦. Ka 频段薄膜滤波器设计[J]. 电讯技术, 2012,52(7):1164–1168. (CHENG Yan. Design of Ka-band thin film filter[J]. Telecommunication Engineering, 2012,52(7):1164–1168.)
- [2] 李倩, 杨志, 胡小东. MEMS 毫米波滤波器的设计与制作[J]. 微纳电子技术, 2010,47(3):170–173. (LI Qian, YANG Zhi, HU Xiaodong. Design and fabrication of MEMS millimeter-wave filters[J]. Micronanoelectronic Technology, 2010,47(3):170–173.)
- [3] 王文才, 陈昌明, 杨刚. 一种毫米波微带带通滤波器的设计[J]. 电子器件, 2014,37(5):855–858. (WANG Wencai, CHEN Changming, YANG Gang. Design of millimeter-wave microstrip bandpass filter[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(5):855–858.)
- [4] 吴萌, 张旭, 王荔田, 等. 自均衡相位特性的超导滤波器小型化设计[J]. 低温与超导, 2017,45(7):32–37. (WU Meng, ZHANG Xu, WANG Litian, et al. Design of a compact superconducting filter with group delay equalization[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2017,45(7):32–37.)
- [5] 陈国强, 何明, 肖玉花. 信道数目可扩展的新型微带多工器设计[J]. 电子元件与材料, 2017,36(4):85–90. (CHEN Guoqiang, HE Ming, XIAO Yuhua. Design of a novel microstrip multiplexer with extendable channel[J]. Electronic Components & Materials, 2017,36(4):85–90.)
- [6] 葛德永, 张旭, 何明, 等. 基于单端口群时延优化的高温超导滤波器和四工器设计[J]. 电子学报, 2013,41(11):2216–2222. (GE Deyong, ZHANG Xu, HE Ming, et al. The design of high temperature superconducting filter and quadruplexer using the group delay of the reflection coefficient based optimization method[J]. Acta Electronica Sinica, 2013,41(11):2216–2222.)
- [7] WANG L T, HE M, XIONG Y, et al. Design of high selectivity narrowband eight-order high temperature superconducting sextaplexer[J]. Superconductor Science and Technology, 2020,33(11):115016.
- [8] 张伟, 熊阳, 何明, 等. 基于 SIR 结构的高温超导八工器设计[J]. 低温与超导, 2017,45(6):37–40. (ZHANG Wei, XIONG Yang, HE Ming, et al. Design of HTS 8-channel multiplexer using stepped impedance resonators[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2017,45(6):37–40.)
- [9] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave applications[M]. New York, USA: Wiley, 2001.

作者简介:

熊 阳(1990–), 男, 湖南省怀化市人, 工程师, 博士, 研究方向为太赫兹电路及系统设计. email: xiongyang0291@163.com.

表 1 滤波器尺寸参数(单位: mm)

Table 1 Circuit dimensions of the filter(unit: mm)

L_1	L_2	L_3	L_{c1}	L_{c2}	L_{c3}	t
1.766	1.780	1.722	0.264	0.370	0.680	0.632
W_1	W_2	W_3	S_{12}	S_{23}	S_{34}	S_{25}
0.150	0.150	0.150	0.080	0.130	0.240	0.188

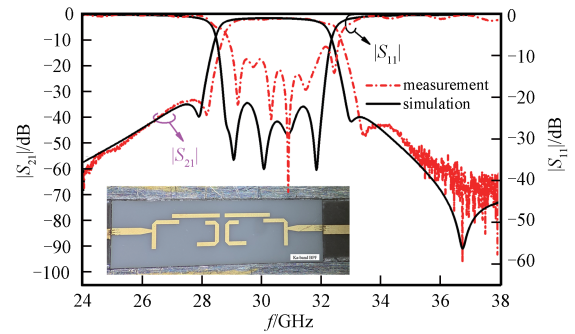


Fig.7 Measurement results of Ka-band filter

图 7 滤波器测试结果