

文章编号: 2095-4980(2020)01-0095-04

基于液晶材料的带宽可重构毫米波滤波器

傅子豪^{1a}, 王 振^{1b}, 刘宇鹏^{1b}, 李潇雨^{1b}, 蒋 迪^{1b,2}, 张天良^{1a}

(1.电子科技大学 a.航空航天学院; b.信息与通信工程学院, 四川 成都 611731;
2.东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 根据液晶材料在毫米波段良好的介电特性和调谐能力, 设计了一款基于液晶材料的毫米波带宽可重构宽带带通滤波器。滤波器使用一个高通滤波器和一个低通滤波器级联实现带通效果; 在低通部分加载液晶材料, 通过调谐液晶材料的等效介电常数改变低通滤波器的响应频率, 实现带宽的可重构。仿真结果表明, 当调谐液晶介电常数从 2.4 变化到 3.8 时, 滤波器的高频截止频率从 52 GHz 下降至 48 GHz, 相对带宽从 84.9%变为 78.3%。

关键词: 液晶调谐; 带宽可重构; 带通滤波器; 毫米波

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018355

Bandwidth reconfigurable millimeter wave filter based on liquid crystal

FU Zihao^{1a}, WANG Zhen^{1b}, LIU Yupeng^{1b}, LI Xiaoyu^{1b}, JIANG Di^{1b,2}, ZHANG Tianliang^{1a}

(1a.School of Aeronautics and Astronautics; 1b.School of Information and Communication Engineering,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China;
2.State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: A millimeter-wave bandwidth reconfigurable broadband pass filter based on Liquid Crystal(LC) material is designed according to LC's good dielectric properties and tuning ability in millimeter-wave band. The filter is composed of a high-pass filter and a low-pass filter to achieve the band-pass effect and loads liquid crystal materials in the low-pass part. Bandwidth reconfiguration is achieved by tuning the equivalent dielectric constant of liquid crystal materials to change the response frequency of low-pass filters. The simulation results show that when the dielectric constant of the tunable liquid crystal is from 2.4 to 3.8, the high cut-off frequency of the filter has decreased from 52 GHz to 48 GHz, the relative bandwidth has changed from 84.9% to 78.3%.

Keywords: Liquid Crystal; bandwidth reconfigurable; band-pass filter; millimeter-wave

随着无线通信系统的发展, 空间中的无线通信环境变得日趋复杂, 这就要求通信系统中的射频前端器件具有更强的适应性, 即器件的工作频率、带宽乃至其他指标应随用户需求可变。这样一方面节约了器件更替的成本, 另一方面使得整个前端系统具有更强的稳定性。自 20 世纪 60 年代可重构理论提出以来, 射频前端可重构器件一直是人们关注的前沿问题。作为射频前端的关键器件, 可重构滤波器一直被学者们广泛研究。

目前对于滤波器可重构技术的研究主要针对其频率响应^[1-5], 即调谐滤波器的工作频率或工作带宽。恒定带宽的频率可重构滤波器一直是研究的主流。但对于带宽可重构滤波器研究结果并不多。文献[6]通过 PIN 管控制平行耦合线和十字状谐振器之间的开路、短路, 改变谐振器之间的耦合系数, 从而改变带通滤波器的工作带宽; 文献[7]使用 PIN 管控制微带带线与开环谐振器的通断, 调谐谐振器之间耦合的强弱, 进而改变其带宽; 文献[8]使用变容二极管实现了半模基片集成波导滤波器的频率调谐; 文献[9]对波导频率和带宽可重构滤波器理论进行了研究。

现有报导中, 对于带宽可重构滤波器大都使用二极管开关作为调谐电路, 寄生效应较为明显且无法连续调谐。液晶作为一种可调谐各向异性媒质, 通过外部偏置电压可以改变液晶分子的极性偏转。由于液晶的各向异

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501091); 四川省科技支撑计划资助项目(2017GZ0312); 毫米波国家重点实验室开放课题(K201704)

作者简介: 傅子豪(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事射频微波可重构无源器件研究。email:13429777184@163.com

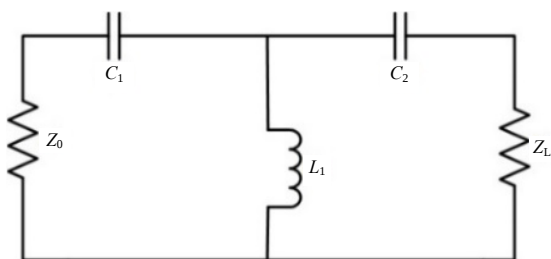
性特性,单一方向其等效介电常数会随外加偏置电压的改变而改变,在毫米波段具有良好的电特性。相较于各类开关器件,液晶不具有非线性特点^[10]。由于液晶材料具有液体的流动性,很容易添加在微波毫米波电路中,是一种新型可调媒质^[11]。因此,近年来基于液晶材料的可重构射频器件开始被国内外学者研究。目前基于液晶材料的可重构滤波器都针对于中心频率的调谐^[12-13],而对带宽的调谐却未曾报道。

本文通过高、低通滤波器级联实现毫米波带通滤波器,使用液晶材料作为可调媒质加载于低通滤波器中。通过在射频端口添加偏置电压改变高频低通滤波器的响应频率,最终实现带通滤波器的相对带宽的调谐,使射频前端模块设计更灵活。

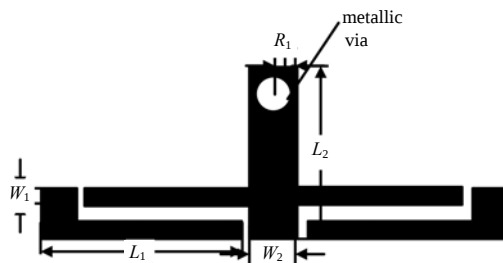
1 毫米波滤波器带宽可重构设计原理

带通滤波器的一种实现方案是使用高通滤波器与低通滤波器级联,通过级联一个响应频率较低的高通滤波器和一个响应频率较高的低通滤波器,可实现级联带通效果^[14]。当其中一个滤波器具有频率重构特性时,可实现滤波器总体的带宽可重构,其带宽重构示意图如图 1 所示。然而,由于可重构滤波器的级联匹配难以设计,使得高低通级联的带通滤波器在带宽重构时级联匹配变差,带内反射系数较差。

高通滤波器的电路原型如图 2(a)所示,可以看到高通效果由串联的电容和并联的电感组成。由于并联电感在微带工艺中常通过短路通孔实现,当设计液晶电路时,这种短路通孔会使偏置电路短路,无法调谐液晶,因此本文将低频响应的高通滤波器截止频率设计为定值。另一方面,本文将高通滤波器的串联电容设计为交指结构,可实现低通部分与高通部分的直流开路,从而避免短路通孔对低通部分的影响。最终高通部分的设计版图如图 2(b)所示。



(a) schematic



(b) layout

Fig.2 High-pass filter model

图 2 高通滤波器模型

如图 3 所示,通过全波仿真软件仿真,频率响应具有较好的高通特性。本文为简化设计采用一阶高通滤波器实现,高通滤波器的选频特性可随着滤波器的级数的增加而提升。低频截止频率为 21 GHz($S_{21} < -3$ dB)。

文献[15]提出了一种微带椭圆函数低通滤波器,该滤波器具有良好的低频选择特性,并且由于其低通原型的并联电感与地间级联了电容,如图 4(a)所示,所以结构不存在直接的并联接地短路,而接地电容可通过低阻贴片实现。因此该低通滤波器不需要短路通孔的引入,其版图实现如图 4(b)所示。

综上所述,由于高通部分具有短路通孔,难以实现液晶调谐,因此将高通部分的截止频率设计为定值,而低通部分采用的滤波电路不需要引入短路通孔,可以作为液晶可重构滤波器使用。并且由于高通部分与低通部分间存在交指电容,直流偏压可以很好地隔离。当偏置电压从低通部分端口加入时,低通滤波器的截止频率会实现重构,而高通滤波器的截

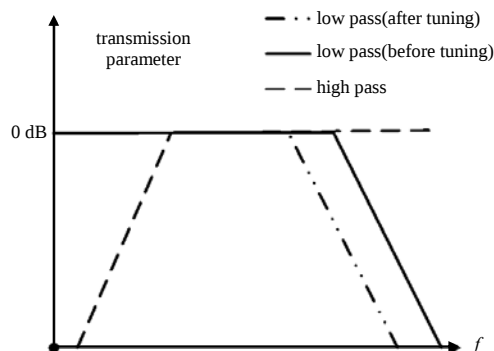


Fig.1 Principle of high-low-pass cascaded bandwidth reconfigurable filter

图 1 高低通级联带宽可重构滤波器原理

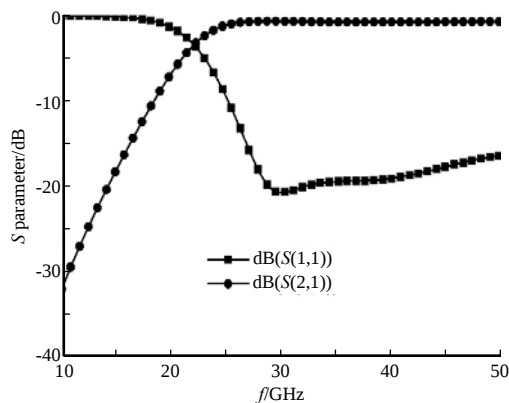
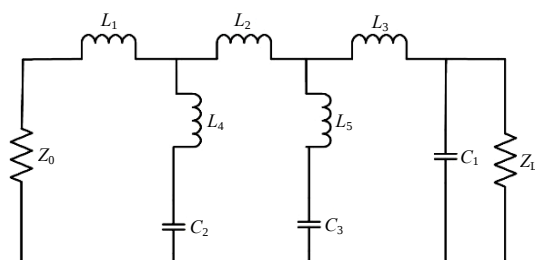


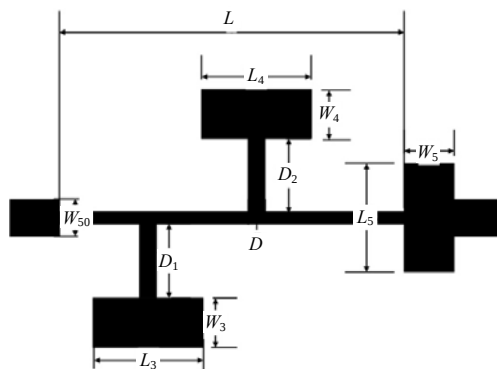
Fig.3 Simulation results of high pass part

图 3 高通仿真结果

止频率保持不变, 进而实现带通滤波器的带宽重构。低通滤波器模型如图 4 所示, 仿真结果如图 5 所示。



(a) equivalent principle



(b) layout

Fig.4 Low-pass filter model

图 4 低通滤波器模型

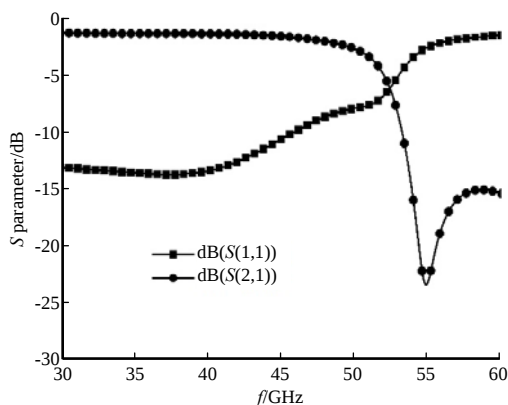


Fig.5 Simulation results of low-pass part

图 5 低通滤波器仿真结果

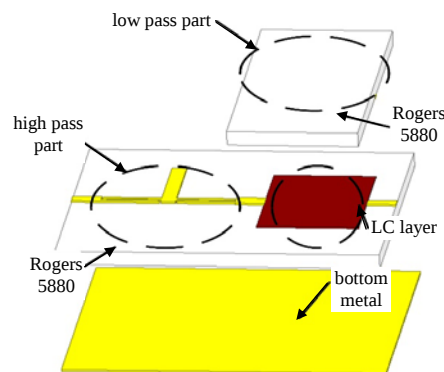


Fig.6 Circuit structure of bandwidth reconfigurable millimeter wave filter with high-low-pass cascade

图 6 高低通级联液晶带宽可重构毫米波滤波器电路结构

2 结果与仿真验证

为了保证液晶的有效调谐, 液晶层应设计得尽量薄。根据传统微带工艺, 介质基板的厚度受限。本文使用厚度为 0.254 mm 的 Rogers 5880 介质基板($\epsilon=2.2$, $\tan\delta=0.0009$)作为微带介质层, 该介质基板的介电常数与液晶类似, 对液晶滤波器的匹配影响较小。如图 6 所示, 滤波器分为高通、低通两部分, 高通部分采用传统微带电路实现, 而低通部分则使用倒置微带, 将低通电路刻蚀在另一块介质基板上, 倒置放于液晶层表面。

根据上述理论, 滤波器尺寸最终设定为: $L_1=1.2$ mm, $W_1=0.06$ mm, $L_2=1.32$ mm, $W_L=0.2$ mm, $R_1=0.05$ mm, $L_3=0.66$ mm, $W_3=0.3$ mm, $D=0.036$ mm, $D_1=0.074$ mm, $L_4=0.66$ mm, $W_4=0.18$ mm, $D_2=0.184$ mm, $L_5=0.66$ mm, $W_5=0.3$ mm, $L=0.961$ mm, $W_{50}=0.18$ mm。

使用全波仿真软件 HFSS 对电路进行仿真验证, 如图 7 所示, 滤波器工作在毫米波段。液晶材料的最大调谐范围与液晶的型号、液晶层厚度以及频率有关, 而液晶调谐范围直接影响到高频截止频率的调谐范围。本文仿真使用 XXXXX($\epsilon_{||}=3.8$, $\epsilon_{\perp}=2.4$)型号液晶作为仿真材料, 通过调谐液晶等效介电常数, 滤波器的高频截止频率从 52 GHz 下降至 48 GHz, 相对带宽从 84.9%变为 78.3%。调谐过程中带内 S_{11} 小于 -7 dB。

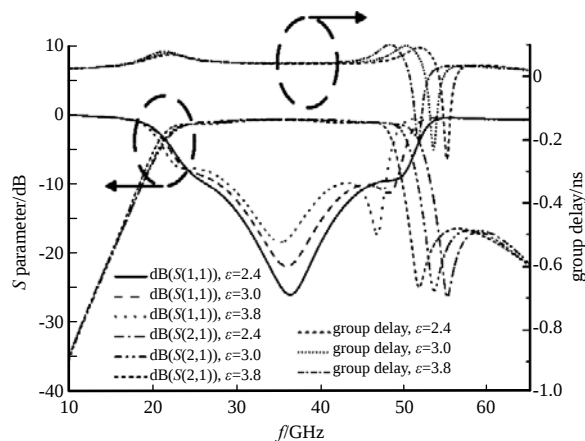


Fig.7 Simulation results of the proposed filter

图 7 本文所提滤波器仿真结果

3 结论

本文根据液晶材料在高频毫米波段良好的介电特性和调谐能力,提出一种新型宽带带宽可重构毫米波滤波器。滤波器通过一个截止频率较低的高通滤波器和一个截止频率较高的低通滤波器级联而成。将液晶材料加载于低通滤波器中,通过外加偏置电压调谐液晶材料的等效介电常数以改变低通滤波器的截止频率,从而使滤波器的通带带宽重构。使用 HFSS17.0 验证,滤波器的低频截止频率为 21 GHz,高频截止频率在液晶调谐前为 52 GHz,调谐后变为 48 GHz。相对带宽从 84.9%变为 78.3%,带内插入损耗小于 2 dB。

参考文献:

- [1] CHUN Y H, HONG J S. Electronically reconfigurable dual-mode microstrip open-loop resonator filter[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2008, 18(7): 449–451.
- [2] NAGLICH E J, LEE J, PEROULIS D, et al. A tunable bandpass-to-bandstop reconfigurable filter with independent bandwidths and tunable response shape[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(12): 3770–3779.
- [3] PENG W W, HUNTER I C. Electronically reconfigurable microwave bandpass filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2009, 57(12): 3070–3079.
- [4] DENG Y, WU K. Compact bandpass filter with tunable center frequency and reconfigurable bandwidth[C]// 2013 European Microwave Conference. Nuremberg, Germany: IEEE, 2013.
- [5] ANAND A, LIU X. Substrate-integrated coaxial-cavity filter with tunable center frequency and reconfigurable bandwidth[C]// Wireless & Microwave Technology Conference. Tampa, FL, USA: IEEE, 2014.
- [6] LUGO C, PAPAPOLYMEROU J. Single switch reconfigurable bandpass filter with variable bandwidth using a dual-mode triangular patch resonator[C]// 2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2005.
- [7] TU W H. Compact low-loss reconfigurable bandpass filter with switchable bandwidth[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2010, 20(4): 208–210.
- [8] YOU B, LU S, CHEN L, et al. A half-mode substrate-integrated filter with tunable center frequency and reconfigurable bandwidth[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2016, 26(3): 189–191.
- [9] ARNOLD C, PARLEBAS J, ZWICK T. Reconfigurable waveguide filter with variable bandwidth and center frequency[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62(8): 1663–1670.
- [10] LOVEJOY J L J. Electrically tunable liquid crystal millimeter wave devices[D]. Colorado Springs, USA: University of Colorado at Colorado Springs, 2012.
- [11] BELYAEV B A, LEKSIKOV A A, SERZHANTOV A M, et al. Controllable liquid-crystal microwave phase shifter[J]. Technical Physics Letters, 2008, 34(6): 463–466.
- [12] YAZDANPANAHI M, MIRSHEKARSYAHKAL D. Millimeter-wave liquid-crystal-based tunable bandpass filter[C]// 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. Santa Clara, CA, USA: IEEE, 2012.
- [13] YAGHMAEE P, KARABEY O H, BATES B, et al. Electrically tuned microwave devices using liquid crystal technology[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013(2013): 824214.
- [14] HAO Z C, HONG J S. UWB bandpass filter using cascaded miniature high-pass and low-pass filters with multilayer liquid crystal polymer technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(4): 941–948.
- [15] CHANG K. Microstrip filters for RF/microwave applications[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 2001.