

文章编号: 2095-4980(2017)04-0630-04

## 一种 X 波段梳状线可调带通滤波器

何 放<sup>1</sup>, 王志刚<sup>2</sup>, 夏 雷<sup>2</sup>

(1.成都亚光电子股份有限公司 新技术研发中心, 四川 成都 610051;  
2.电子科技大学 极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731)

**摘 要:** 设计了一款 X 波段压控可调梳状线带通滤波器, 通过调整加载变容二极管的偏置电压改变电容值大小, 从而达到调整滤波器中心频率的目的。根据恒定带宽条件对滤波器耦合系数以及外部  $Q$  值的要求, 确定梳状线滤波器的尺寸参数, 并对其进行电磁仿真优化, 最终制作的 X 波段可调滤波器尺寸为  $16\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 21\text{ mm}$ , 控制电压  $7.6\sim 15.4\text{ V}$ , 实现滤波器中心频率  $8\sim 10\text{ GHz}$  连续可调。在调谐频率范围内, 滤波器通带宽度  $15\%$ , 回波损耗小于  $-10\text{ dB}$ , 矩形系数小于  $2.8$ 。

**关键词:** X 波段; 可调滤波器; 带通滤波器; 恒定带宽; 外部  $Q$  值

**中图分类号:** TN454

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201704.0630

## An X-band combline tunable bandpass filter

HE Fang<sup>1</sup>, WANG Zhigang<sup>2</sup>, XIA Lei<sup>2</sup>

(1.Research Center on New Technology, Chengdu Yaguang Electronics Co., Ltd, Chengdu Sichuan 610051, China; 2.Fundamental Science on EHF Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** An X-band combline tunable bandpass filter is proposed. Through adjusting the bias voltage of the loaded varactor, the central frequency of the filter is tuned. According to the constant bandwidth requirements on coupling coefficients and external  $Q$  factor, the initial dimension parameters of the combline filter are determined and then optimized with an electromagnetic field simulator. The completed X-band voltage controlled tunable filter is  $16\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 21\text{ mm}$  in size and has a controlled voltage range of  $7.6\sim 15.4\text{ V}$  by which the center frequency of the filter is tuned continuously within the range between  $8\text{ GHz}$  to  $10\text{ GHz}$ . The passband width of the filter is  $15\%$ , the return losses are below  $-10\text{ dB}$  and the rectangle coefficient is less than  $2.8$  within the tuning frequency range.

**Keywords:** X-band; tunable filter; band-pass filter; constant bandwidth; external  $Q$  factor

多频段、宽带无线通信和雷达系统要求接收机射频前端电路具有快速选频的能力, 若使用单个可调滤波器替代传统的滤波器组, 势必能够减小电路尺寸和复杂度<sup>[1-2]</sup>, 利于射频前端电路的小型化和集成化。另外, 可调滤波器可以更好地利用软件来控制, 因此很适合系统的自动化控制。研究设计小型化的可调滤波器是滤波器研究的热门领域<sup>[3-4]</sup>。由于梳状线滤波器具有紧凑的尺寸、很好的阻带抑制特性、低加工成本以及易于平面集成等优良特性, 非常适用于设计微波和毫米波移动通信系统以及宽带雷达的可调滤波器。这些应用往往要求滤波器有较高的  $Q$  值, 并且能在较宽的频率范围内快速调谐。其中最为苛刻的要求就是希望可调滤波器在调谐过程中保持恒定的带宽以及滤波特性不变<sup>[5]</sup>。目前对于恒定带宽可调滤波器, 在 L 和 S 波段的研究较多<sup>[6]</sup>, 而对于更高的频率, 例如 X 波段则报道较少。本文利用加载变容二极管梳状线带通滤波器, 设计了一款 X 波段的可调滤波器。该滤波器结构简单紧凑, 使用电压控制变容二极管, 便于控制调谐频率并且调谐速度快, 实现滤波器中心频率在  $8\sim 10\text{ GHz}$  的连续可调, 滤波器在调谐频率范围内具有较好的回波损耗和较宽的通带宽度。

### 1 梳状线可调带通滤波器设计原理

梳状线带通滤波器是一种经典的滤波结构, 能够获得较高的阻带抑制, 并且有体积小, 插损小等优点而被

广泛运用。其谐振器由一段一端短路，一端通过变容二极管接地的短截线构成。对变容二极管施加偏置电压，可改变加载电容值，从而达到控制滤波器谐振频率的目的。梳状线可调带通滤波器的具体结构如图 1 所示。

可调带通滤波器通常要求具有一定的频率调谐范围，并同时希望在整个调谐过程中，滤波器的响应形状和绝对带宽保持不变。通过对可调带通滤波器的一般等效电路(如图 2 所示)进行分析，可得到滤波器保持恒定带宽的条件。

图 2 中  $R_A$  及  $R_B$  分别为带通滤波器的源和负载阻抗， $X_n(\omega)$  为各谐振器的电抗，各谐振器通过阻抗变换器  $K_{n,n+1}$  耦合构成带通滤波器。滤波器两终端的外部  $Q$  值  $(Q_c)_A, (Q_c)_B$  以及谐振器间的耦合系数  $k_{j,j+1}$  可通过以下关系式进行计算<sup>[7]</sup>：

$$(Q_c)_A = \frac{x_1}{K_{01}^2 / R_A} = \frac{g_0 g_1}{W} = \frac{g_0 g_1 f_0}{\Delta f} \quad (1)$$

$$(Q_c)_B = \frac{x_n}{K_{n,n+1}^2 / R_B} = \frac{g_n g_{n+1}}{W} = \frac{g_n g_{n+1} f_0}{\Delta f} \quad (2)$$

$$k_{j,j+1} \Big|_{j=1 \text{ to } n-1} = \frac{K_{j,j+1}}{\sqrt{x_j x_{j+1}}} = \frac{W}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} = \frac{\Delta f}{f_0 \sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (3)$$

式中： $W$  为滤波器相对带宽； $f_0$  为调谐频率； $\Delta f$  为绝对带宽； $g_j (j=1 \text{ to } n+1)$  为切比雪夫低通原型值； $K_{j,j+1}$  为第  $j$  与第  $j+1$  个谐振器间的耦合阻抗； $x_j$  为第  $j$  个谐振器的电抗斜率参数。

根据式(1)可知，在整个调谐频率范围内要保持滤波器的响应形状和绝对带宽  $\Delta f$  不变，外部  $Q$  值必须与调谐频率  $f_0$  成正比变化，而耦合系数必须与调谐频率  $f_0$  成反比变化<sup>[7]</sup>。从滤波器结构实现上来说，可以通过解析法计算出满足恒定带宽条件的外部  $Q$  值以及耦合系数<sup>[8]</sup>，并按照所需的外部  $Q$  值及耦合系数综合出滤波器的尺寸参数，然后利用电路和电磁仿真手段，对其进行优化，得到满足设计要求的最终结构。

变容二极管是可调滤波器中十分重要的调谐元件，它的性能直接影响到滤波器的性能。滤波器的谐振器等效电路如图 3 所示。图 3 中  $Z_{in}$  为该谐振器的输入阻抗， $Z_s$  为微带线阻抗， $R_s, L_s, R_p, C_p$  以及  $C_s$  分别为变容二极管的等效串联电阻(Equivalent Series Resistance, ESR)、串联电感、并联电阻、封装寄生电容和等效串联电容。从图 3 可以得到谐振器的输入阻抗的实部为：

$$\text{Re}(Z_{in}(\omega)) = R_s + \frac{R_p(1 - \omega^2 L_s C_s)}{(1 - \omega^2 L_s C_s) + \omega^2 R_p^2 C_s^2} \quad (4)$$

变容二极管串联谐振频率为  $\omega_s \cdot \omega_0$  ( $\omega_0$  为谐振器谐振频率)，故式(4)可简化为：

$$\text{Re}(Z_{in}(\omega)) \cong R_s + \frac{1}{\omega_s^2 R_p C_s^2} \quad (5)$$

式(5)右边第 2 项远比等效串联电阻小，故带通滤波器损耗以及品质因素主要和变容二极管的 ESR 相关。滤波器中心频率和谐振器长度及加载电容值关系<sup>[9]</sup>为：

$$\frac{2\pi f_0 C_s \cdot \tan \theta}{Y_a} = 1 \quad (6)$$

式中： $Y_a$  为谐振器特征导纳； $\theta$  为谐振器电长度； $f$  为中心频率。根据式(6)，若固定谐振器的电长度值和特征导纳，可知谐振频率和加载电容值呈反比关系。当二极管的反向偏压增加时，电容  $C_s$  和串联电阻都将减小，一方面会导致谐振频率变大，另一方面滤波器的带内插损会随调谐频率增大而减小。除 ESR 之外，二极管的串联电感、自谐振频率以及变容比也是选择变容管时不可忽略的因素。

## 2 基于梳状线的可调带通滤波器设计

本文设计了一款 X 波段的宽频带可调带通滤波器，中心频率在 8~10 GHz 连续可调。为了实现在调谐频率范围内，滤波器的绝对带宽保持不变，在较低的工作频率可以使用集总电感作为输入输出端的阻抗变换器，以

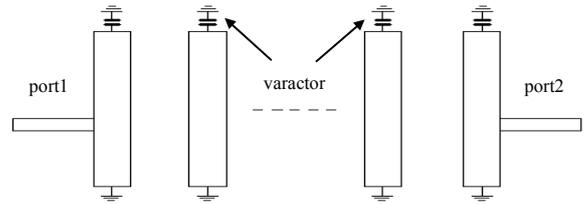


Fig.1 Structure of combline tunable bandpass filter  
图 1 梳状线可调带通滤波器结构

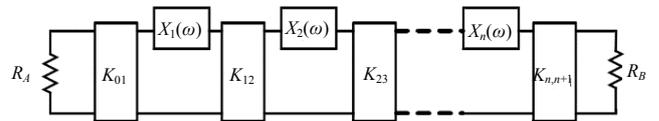


Fig.2 Equivalent circuit of combline bandpass filter  
图 2 梳状线带通滤波器的一般等效电路

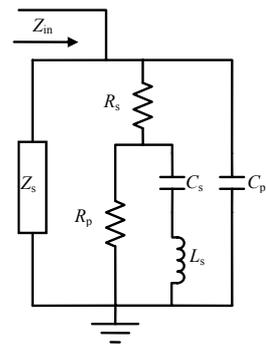


Fig.3 Equivalent circuit of combline bandpass filter resonator  
图 3 梳状线带通滤波器谐振器等效电路

满足恒定带宽要求<sup>[8]</sup>。由于本设计的协调频率较高,故采用渐变抽头微带线输入和输出信号,对渐变线的接入位置加以特别设计,以使外部  $Q$  值随调谐频率  $f_0$  成正比变化。

在梳状线滤波器的设计中,谐振器的电长度  $\theta$  一般选为  $\pi/4$ ,耦合微带线的阻抗一般选择  $70\ \Omega$ 。滤波器采用  $0.254\ \text{mm}$  厚,介电常数  $2.2$  的 Rogers-5880 基板设计,由此计算出梳状线约  $0.44\ \text{mm}$  宽、 $2.77\ \text{mm}$  长。然后根据调谐频率以及式(6)估算出加载电容的初值。根据调谐过程中由式(1)约束的恒定频率响应条件,计算所需的耦合系数以及外部  $Q$  值,并由此计算耦合线间距、抽头的阻抗以及接入位置等。在获得这些结构的初始尺寸后,采用 ADS 软件建立电路与版图模型,进行谐振器优化设计,结果如图 4 所示。终端加载电容值在  $150\ \text{fF}$  到  $285\ \text{fF}$  变化时,谐振频率从  $10\ \text{GHz}$  变化到  $8\ \text{GHz}$ ,滤波器带宽均大于  $20\%$ 。根据仿真结果提取的滤波器外部  $Q$  值以及由恒定调谐带宽条件得到的理论计算值如图 5 所示。可见设计的梳状线带通滤波器外部  $Q$  值基本满足恒定带宽条件。

为进一步验证设计结果,采用电磁场仿真软件 HFSS 对梳状线滤波器进行建模仿真, HFSS 仿真的结果如图 6 所示。从仿真结果可以看出,使用 HFSS 和 ADS 仿真结果基本一致,滤波器带宽约  $25\%$ ,且在整个调谐过程中,绝对带宽基本保持一致,带内插损小于  $1.8\ \text{dB}$ 。

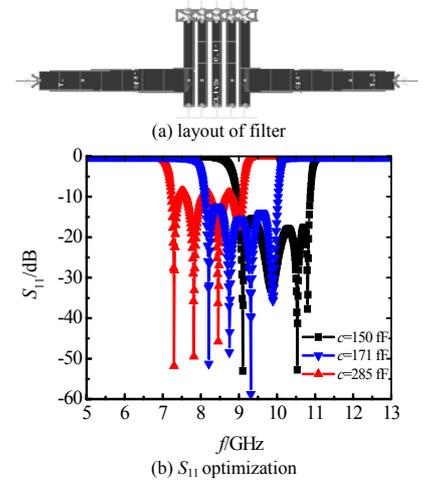


Fig.4 ADS simulation  
图 4 ADS 仿真结果

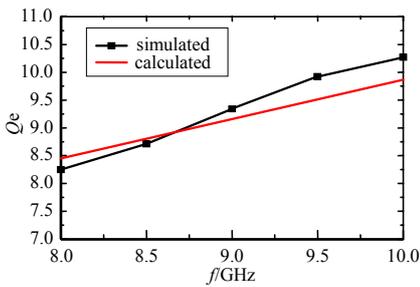


Fig.5 Computing results of external  $Q$  with constant bandwidth  
图 5 满足恒定带宽的外部  $Q$  值计算结果

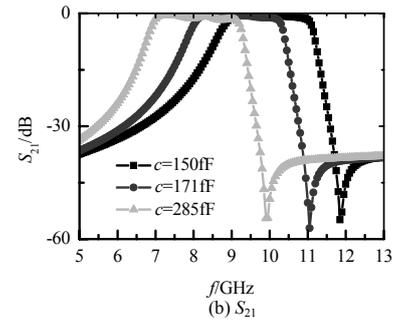
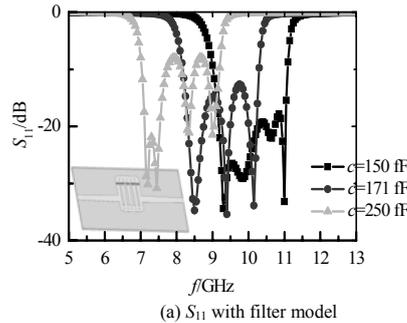


Fig.6 HFSS simulation  
图 6 HFSS 仿真结果

### 3 可调滤波器制作和测试

根据仿真计算结果,变容二极管选取 MACOM 公司的 MAVR-000120-1411,该二极管在  $0\sim 15\ \text{V}$  电压变化时,电容值从  $0.15\ \text{pF}$  到  $1\ \text{pF}$ ,满足设计要求。根据仿真优化结果,梳状线宽  $0.44\ \text{mm}$ ,谐振器 1,2 间距  $0.2\ \text{mm}$ ,谐振器 2,3 间距  $0.51\ \text{mm}$ ,为对称结构,加工的实物图如图 7 所示。从图中可以看出滤波器尺寸很小,变容管的电容值也较小,为了减小焊锡可能带来的寄生影响,变容二极管通过导电胶贴在  $0.254\ \text{mm}$  厚的 Rogers-5880 软基片上,并使用金丝来馈电偏置。最终装配完毕的滤波器尺寸非常紧凑,如图 8(a)所示,成品大小只有  $16\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}\times 21\ \text{mm}$ 。装配好后使用矢量网络分析仪对该滤波器进行测试,测试时使用稳压电源给二极管施加反向电压,电压变化范围  $7.6\sim 15.4\ \text{V}$ 。测试结果如图 8(b)、图 8(c)所示。

从测试结果可见,滤波器实现了中心频率在  $8\sim 10\ \text{GHz}$  连续可调。在调谐频率范围内,滤波器通带宽度小于  $15\%$ ,带内插损小于  $14\ \text{dB}$ ,回波损耗除个别频点外均小于  $-10\ \text{dB}$ ,矩形系数小于  $2.8$ 。由图 8 可以看出,带内插损随偏置电压变大而减小,这与前述理论分析结果一致。但带内插损大于仿真分析结果,且滤波器带宽有随调谐频率变高而变宽的趋势。经过分析,变容二极管的等效串联电阻导致了较大的损耗。为了进一步验证变容二极管是否是影响了插损,将变容二极管取下进行测试,结果插损有了明显的降低,最低至  $2.9\ \text{dB}$ 。由此可见,变容二极管是造成插损的主要原因。另外导体、介质以及辐射损耗也导致了一定的插损。将变容管的模型代入电路模型一起仿真,可有效提高设计精确度。然而要建立变容二极管的非线性模型,需要进行非线性电阻、非线性电容等各个元件参数的提取。由于厂家并没有提供二极管相关数据与模型,故而在仿真设计时,采



Fig.7 Picture of filter substrate  
图 7 梳状线可调带通滤波器加工实物照片滤波器基片

用的是理想电容值，导致了仿真与实际测量结果出现偏差。据此可以看出，加载变容二极管的可调滤波器设计必须要对二极管建立精确的非线性模型，并将其运用到滤波器的设计中才能保证设计的可靠性。

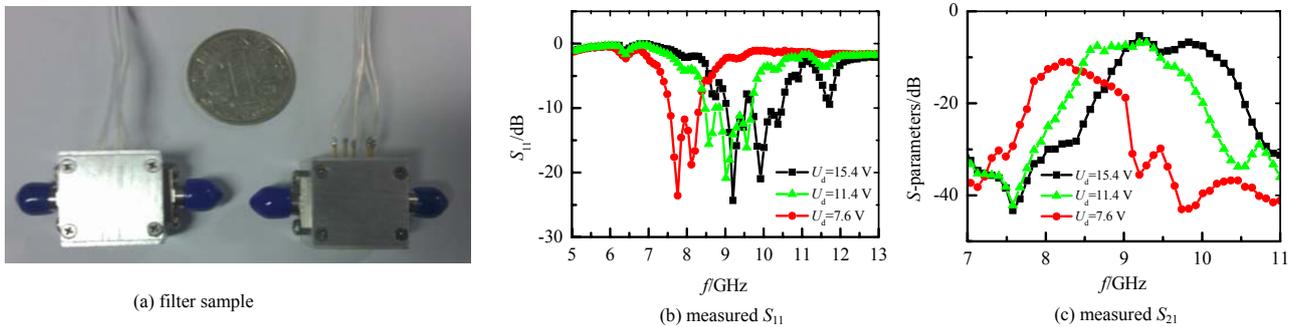


Fig.8 Filter sample(a), measured  $S_{11}$  (b) and measured  $S_{21}$ (c) (bias voltage varying from 7.6 V to 15.4 V)

图8 滤波器实物(a)、实测  $S_{11}$ (b)和实测  $S_{21}$ (c)(偏置电压从 7.6 V 变化到 15.4 V)

#### 4 结论

本文设计了一种紧凑型的 X 波段梳状线可调带通滤波器。该滤波器采用梳状线带通滤波器结构加载变容二极管构成，通过反向偏置电压控制变容二极管的电容值，从而改变带通滤波器的中心频率。加工的滤波器结构紧凑，整体尺寸仅有 16 mm×20 mm×21 mm，实现了滤波器中心频率在 8~10 GHz 的连续可调。在调谐频率范围内，滤波器通带宽度小于 15%，带内插损小于 14 dB，回波损耗除个别频点外均小于 -10 dB，矩形系数小于 2.8。通过对比分析该滤波器的计算及实测结果，总结了 X 波段梳状线可调带通滤波器的设计要点。

#### 参考文献：

- [1] BROWN A R, REBEIZ G M. A varactor-tuned RF filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000,48(7):1157-1160.
- [2] 姚兰,洪伟,吴柯. 可调微带矩形环带通滤波器[J]. 微波学报, 2011,27(4):57-60. (YAO Lan, HONG Wei, WU Ke. Tunable microstrip rectangular ring bandpass filter[J]. Journal of Microwaves, 2011,27(4):57-60.)
- [3] MAO J R, CHOI W W, TAM K W, et al. Tunable bandpass filter design based on external quality factor tuning and multiple mode resonators for wideband applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013,61(7):2574-2584.
- [4] ZHU H, ABBOSH A. Compact tunable bandpass filter with wide tuning range using ring resonator and short-ended coupled lines[J]. Electronics Letters, 2015,51(7):568-570.
- [5] XIANG Q, FENG Q, HUANG X, et al. Electrical tunable microstrip LC bandpass filters with constant bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013,61(3):1124-1130.
- [6] CHI P L, YANG T, TSAI T Y. A fully tunable two-pole bandpass filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015,25(5):292-294.
- [7] MATTHAEI G L, YOUNG L, JONES E M T. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures[M]. Norwood, MA: Artech House, 1980.
- [8] KIM B W, YUN S W. Varactor-tuned combline bandpass filter using step-impedance microstrip lines[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(4):1279-1283.
- [9] TORREGROSA-PENALVA G, LÓPEZ-RISUENO G, ALONSO J I. A simple method to design wide-band electronically tunable combline filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(1):172-177.

#### 作者简介：



何放(1962-), 男, 重庆市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波半导体二极管、微波混合集成电路、微波单片集成电路。  
email: hf@chinayaguang.com.

王志刚(1978-), 男, 河南省洛阳市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。

夏雷(1976-), 男, 天津市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微波毫米波固态电路与太赫兹技术。