

X 频段连续波 100 kW 吸收式谐波滤波器研制

刘海旭 侯满宏 李新胜

Research and development of continuous wave 100 kW absorption harmonic filter in X-band

Liu Hai-Xu Hou Man-Hong Li Xin-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 198401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180577

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180577>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于分数阶最大相关熵算法的混沌时间序列预测](#)

Prediction of chaotic time series based on the fractional-order maximum correntropy criterion algorithm

物理学报.2018, 67(1): 018401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.20171803>

[逼近积分点数下限的五阶容积卡尔曼滤波定轨算法](#)

A novel algorithm of fifth-degree cubature Kalman filter for orbit determination at the lower bound approaching to the number of cubature points

物理学报.2017, 66(15): 158401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.158401>

[基于 Huber 的高阶容积卡尔曼跟踪算法](#)

Huber-based high-degree cubature Kalman tracking algorithm

物理学报.2016, 65(8): 088401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.088401>

[基于广义 M 估计的鲁棒容积卡尔曼滤波目标跟踪算法](#)

Robust cubature Kalman filter target tracking algorithm based on generalized M-estimation

物理学报.2015, 64(21): 218401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.218401>

[微波低通高阻复合材料构件的设计与性能验证](#)

Design and verification of microwave low frequency band-pass and high frequency band-stop composite structure

物理学报.2015, 64(18): 188401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.188401>

X 频段连续波 100 kW 吸收式谐波滤波器研制*

刘海旭[†] 侯满宏 李新胜

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

(2018 年 3 月 30 日收到; 2018 年 6 月 26 日收到修改稿)

为了抑制深空探测大功率发射机谐波能量对接收机的干扰, 提出了一种基于渐变漏壁式波导加载吸收负载结构的超大功率谐波滤波器. 分析了该结构滤波器衰减损耗特性, 并结合电磁场仿真软件, 对滤波器整体结构进行了仿真, 依据仿真尺寸对滤波器进行了结构设计和样件加工, 经过对样件测试, 滤波器通带最大插入损耗小于 0.3 dB, 二次、三次及四次谐波抑制度分别大于 75, 50, 35 dB, 测试结果与仿真结果基本一致. 对滤波器样件进行了大功率实验, 在外加液冷条件下, 连续波功率容量可达 100 kW 以上, 成功研制出了一种 X 频段吸收式超大功率谐波滤波器, 并已经应用于某型号大功率地面发射机, 指标性能良好.

关键词: X 频段, 连续波, 吸收式谐波滤波器, 100 kW

PACS: 84.30.Vn, 41.20.-q, 84.30.Jc

DOI: 10.7498/aps.67.20180577

1 引言

远距离通信、雷达、电子对抗等微波大功率设备对发射机的峰值功率和平均功率电平有着越来越高的要求, 但大功率的发射机往往伴有相对较高功率电平的谐波能量, 当谐波能量随发射机辐射到空间, 其能量可能达到甚至超过临近电子通信设备的工作功率, 会严重干扰甚至烧毁电子通信设备. 同时, 考虑到如果采用反射式滤波器来抑制谐波能量输出, 谐波能量势必在反射式滤波器处反射, 从而给发射机的放大器工作的稳定性及可靠性带来很多问题. 另外, 由于反射式谐波滤波器功率容量能力有限, 考虑到以上问题, 许多场合需要采用吸收式波导谐波滤波器吸收其高次谐波能量, 比如深空探测、新一代气象雷达等高功率应用领域都对谐波能量提出了严格的要求, 此时必须采用吸收式大功率谐波滤波器^[1-3].

2 国内外发展现状

根据目前掌握的资料, 欧空局 (ESA) 已经完成

连续波 (CW) X 频段 25 kW 深空探测上行设备的研制工作^[4,5], 而作为目前深空探测最高水平的美国宇航局 (NASA), 在深空探测领域已经突破 CW 100 kW 上行设备有关超大功率滤波器的多项关键技术^[6-8]. 图 1 是美国 X 频段 100 kW 深空站谐波及接收带内大功率微波滤波网络原理框图. 应用于该系统的高功率滤波器组件分为四个部分, 包括吸收式谐波滤波器、带阻滤波器、反射式谐波滤波器和带通滤波器. 其中第一级滤波器为吸收式谐波滤波器, 功率容量可达 100 kW 以上, 它与多种反射式滤波器针对二、三、四次谐波总共提供 60—100 dB 的抑制度, 针对接收带可提供 110 dB 以上的抑制度.

在国内, X 频段大功率吸收式谐波滤波器已成功应用于由我国中国电科 27 所自行研制的深空测控系统 X 频段 CW 10 kW 速调管高功放系统中^[9-12], 且性能稳定、可靠, 并成功执行了“嫦娥三号”等航天测控任务. 但有关 CW 百千瓦级大功率滤波器技术在国内尚未见到任何相关报道, 这一技术已成为制约我国未来超高功率微波深空探测技术进一步发展的瓶颈, 亟待解决.

* 国防预研基金 (批准号: 9140A24070815DZ37376) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liuhaixu05@163.com

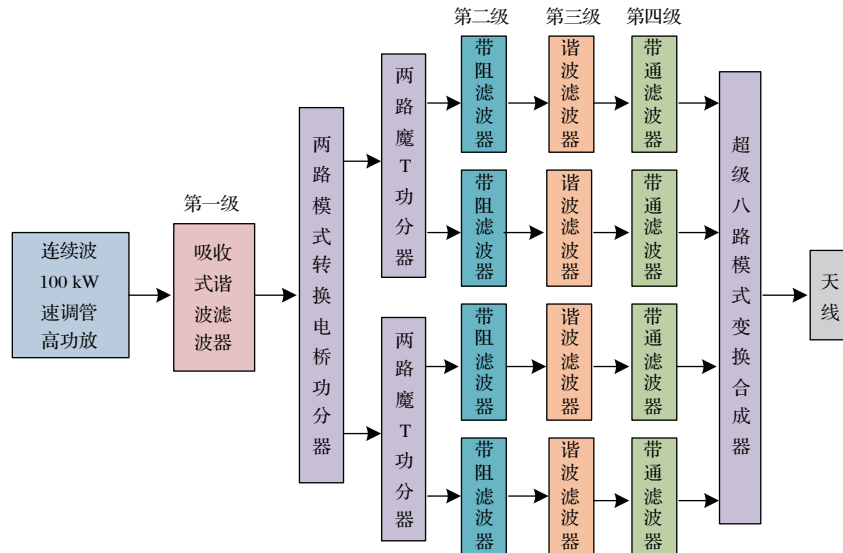


图1 NASA X频段100 kW高功放滤波网络原理框图

Fig. 1. The principle diagram of NASA 100 kW HPA filter network in X-band.

3 滤波器原理分析

吸收式谐波滤波器的结构复杂, 理论设计难度较大, 目前所见的相关参考文献, 仅有过一些近似的分析^[13-17], 但是计算结果均误差较大. 针对加载副波导漏壁式谐波滤波器, 副波导对谐波的吸收或抑制能力, 不仅与每种副波导和主波导匹配情况、副波导的数量有关, 还和各次谐波在主波导内部存在的模式有关, 各次谐波在主波导内都以不同的高次模的形式存在, 因此副波导的安放位置对不同谐波吸收能力会有很大影响. 本文针对二、三及四次谐波, 考虑结构实现简单化、主频损耗最小化以及系统的具体指标要求, 没有单纯追求三、四次谐波高抑制度, 每个面都采用了单排副波导结构, 滤波器局部结构示意图见图2.

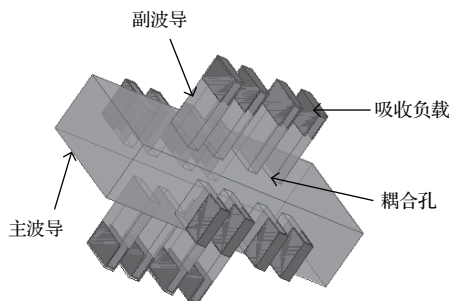


图2 吸收式波导谐波滤波器结构示意图

Fig. 2. The structure diagram of absorption harmonic filter.

由图2可知, 沿垂直于主波导传输方向同一截面上, 分布四个副波导, 在主波导的两个H面、两个

E面上分别有一个副波导, 副波导与主波导连接处开有耦合孔. 主波导通过这些耦合孔与四列相互独立的副波导相连, 每个副波导内都安装了吸收负载. 在基波频段, 耦合孔近似闭合, 副波导为截止波导^[18], 副波导内基本无耦合功率, 主波导内传输损耗很小; 在谐波频段, 耦合孔耦合部分主波导功率进入副波导, 并在其中传播到负载后被吸收. 合理设计耦合孔的尺寸和数量可得到一定的谐波衰减, 从而实现了在不影响通带功率大小及容量的情况下, 达到谐波抑制的目的.

目前虽然可以借助多种高频场仿真软件分析, 但直接使用软件对滤波器进行整体的仿真, 不仅耗时, 而且计算精度也不高. 比较简便的方法是用对称性原理简化成周期性加载的T分支^[19,20], 根据传输线原理, 再用等效电路法求出ET分支的等效电路, 结合HFSS软件计算得到的散射参数, 提取滤波器中的单个耦合孔阻抗值, 进而利用单个耦合孔有源阻抗和滤波器特性的关系式求出滤波器的衰减和反射损耗特性. 这种方法将简化滤波器的仿真计算, 提高工程设计的精度, 同时, 可大大缩短设计的周期. 该吸收式波导谐波滤波器电路模型等效电路图如图3所示.

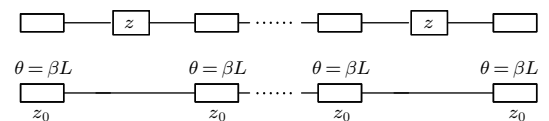


图3 吸收式谐波滤波器的等效电路图

Fig. 3. The equivalent circuit diagram of absorption harmonic filter.

每个耦合孔等效为一个串联的阻抗 z , 耦合孔中心的间距为 L , 吸收式波导传输常数为 β . 对于每个耦合孔单元, 归一化矩阵 \mathbf{A}_i 为

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta L & j \sin \beta L \\ j \sin \beta L & \cos \beta L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta L & j \sin \beta L \\ j \sin \beta L & \cos \beta L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{(1 - S_{22})(1 + S_{11}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} & \frac{(1 + S_{22})(1 + S_{11}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \\ \frac{(1 - S_{22})(1 - S_{11}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} & \frac{(1 + S_{22})(1 - S_{11}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos \beta L & j \sin \beta L \\ j \sin \beta L & \cos \beta L \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2)$$

根据级联网络的传递乘积原理, 可得滤波器等效电路模型总的归一化 \mathbf{A} 矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta L & j \sin \beta L \\ j \sin \beta L & \cos \beta L \end{bmatrix} \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_N. \quad (3)$$

进一步推导可得到滤波器插入损耗 (IL) 和反射损耗 (RL) 特性的计算公式反射:

$$IL(\text{dB}) = 10 \lg \left\{ \frac{1}{||S_{21}||^2} \right\} \\ = 10 \lg \left\{ \frac{|A(z) + B(z) + C(z) + D(z)|^2}{4} \right\}, \quad (4) \\ RL(\text{dB}) = 10 \lg \left| \frac{A(z) + B(z) - C(z) - D(z)}{A(z) + B(z) + C(z) + D(z)} \right|^2. \quad (5)$$

通过 HFSS 软件计算单个耦合孔仿真模型得到的 S 参数代入 (2) 式, 就可以得到单个耦合孔的等效阻抗 Z . 由 (4) 和 (5) 式可以看出, 只要求得单个耦合孔的等效阻抗 Z , 就可以求出滤波器整体衰

减特性.

4 滤波器结构建模及电磁场仿真

4.1 滤波器结构建模

针对每次谐波, 结合以上原理分析, 通过 HFSS 进行仿真, 可以确定如图 2 所示的相应副波导及对应吸收负载的初始尺寸, 然后根据上述理论分析, 通过滤波器具体指标在确定各次谐波副波导的初始数目, 对滤波器整体结构进行建模仿真. 吸收式多次谐波滤波器整体结构示意图见图 4, 其中二次谐波副波导数目为 $4a$ 个, 三次谐波副波导数目为 $4b$ 个, N 次谐波副波导数目为 $4n$ 个. 该吸收式谐波滤波器可同时实现二到 N 次谐波的滤波功能. 另外, 为实现高次谐波宽带抑制要求, 针对抑制每次谐波的副波导不一定采用同一结构, 可采用渐变结构形式.

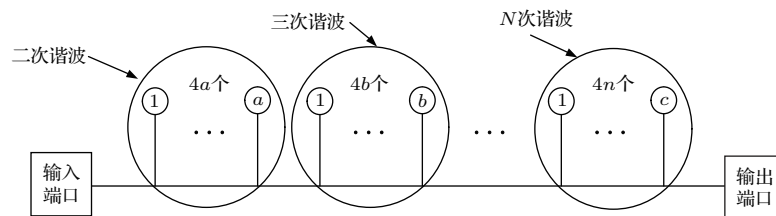


图 4 多次谐波滤波器整体结构示意图

Fig. 4. The structure diagram of absorption multiple harmonics filter.

本文所研制的吸收式滤波器需要实现二、三及四次谐波抑制要求, 即 $N = 4$, 为实现谐波应用指标要求, 耦合孔及等高副波导尺寸采用渐变结构, 共采用 6 种副波导结构, 每两种副波导对应

同一次谐波, 针对每次谐波指标要求, 取初始值 $a = b = n = 24$, 二、三及四次谐波副波导数目都为 4×24 个, 副波导总数共 288 个, 每种副波导对应着相应的耦合孔及吸收负载. 根据以上分析, 建立滤

波器初始仿真模型, 如图 5 所示.

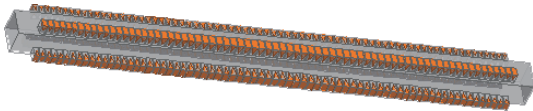


图 5 滤波器仿真模型

Fig. 5. The simulation mode of the filter.

4.2 电磁场仿真

由于谐波滤波器的整体结构异常复杂, 很难用 HFSS 验证整个滤波器的特性. 根据对称性原理及 HFSS 有限元分析特点, 在横截面内分成四部分, 用 HFSS 分析其第一象限的二、三及四次谐波衰减. 主波导采用标准 BI70 矩形波导, 在主波导每个波导面中间位置加载一排副波导, 由于副波导高度不影响谐波抑制度, 又考虑结构实现难易程度, 因此, 针对各次谐波, 采用等高副波导. 经过多次对结构调节及仿真, 得到滤波器总长度为 750 mm, 每两组

副波导对应同次谐波, 各次谐波滤波器副波导、耦合孔及间隔主要尺寸列于表 1.

通过仿真, 二次谐波衰减达 70 dB 以上. 三次谐波衰减达 50 dB 以上, 四次谐波衰减达 35 dB 以上. 仿真结果见图 6 所示, 设计完全达到预期.

表 1 针对各次谐波滤波器副波导主要尺寸 (单位 mm)

Table 1. The deputy waveguide main dimensions to different harmonic (units: mm).

谐波次数	副波导端口尺寸/mm ²	耦合孔开口尺寸/mm ²	副波导间距/mm	副波导高度/mm
二次	15.65 × 9.82	13.55 × 8.42	3	22
	13.78 × 8.83	12.18 × 7.33	3	22
三次	11.35 × 7.12	1.33 × 6.73	2	22
	1.28 × 6.55	9.28 × 6.55	2	22
四次	8.80 × 5.14	7.90 × 4.02	1.5	22
	7.72 × 4.06	6.42 × 3.02	1.5	22

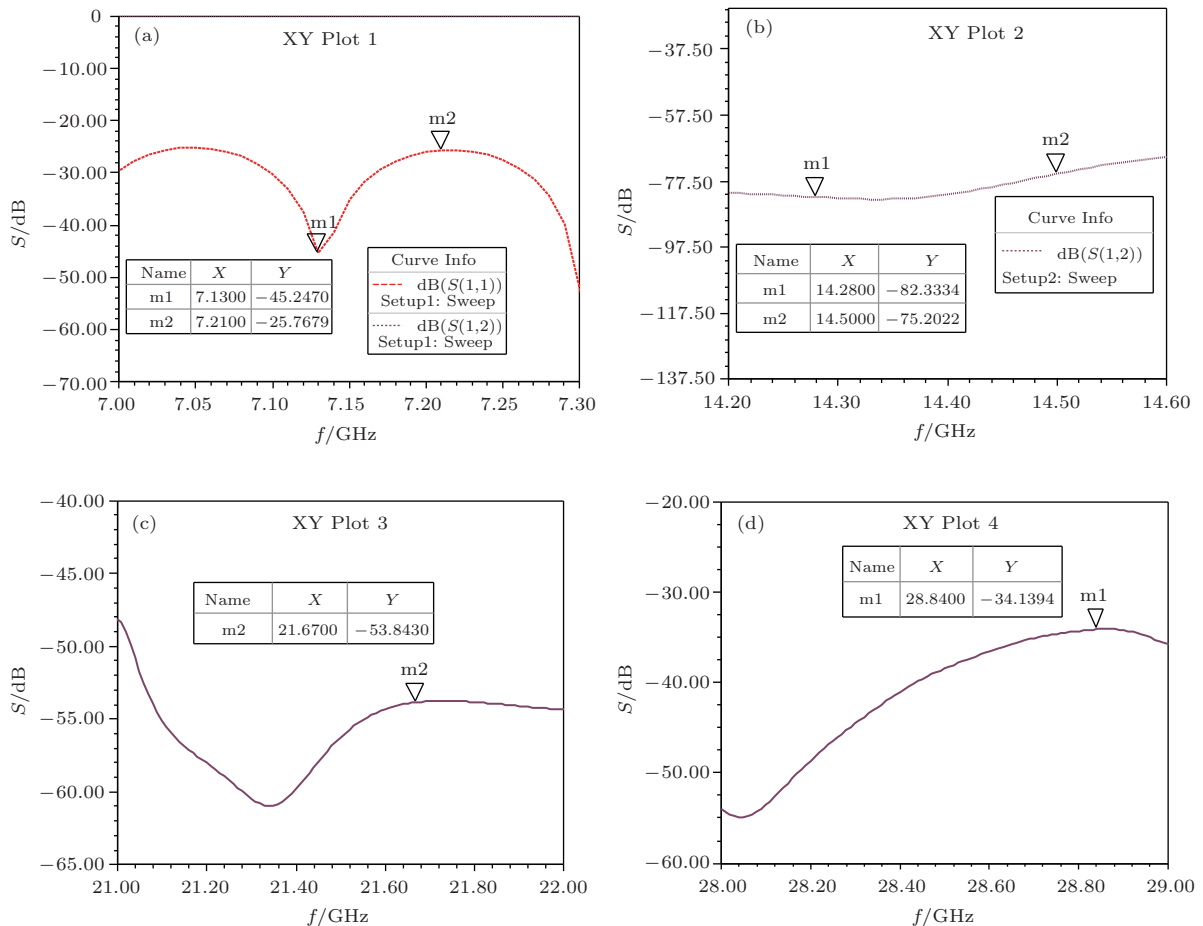


图 6 滤波器 S 参数仿真结果 (a) 通带损耗; (b) 二次谐波抑制度; (c) 三次谐波抑制度; (d) 四次谐波抑制度

Fig. 6. The S parameters simulation results of filter: (a) The loss of pass-band; (b) the suppression of second harmonic; (c) the suppression of third harmonic; (d) the suppression of fourth harmonic.

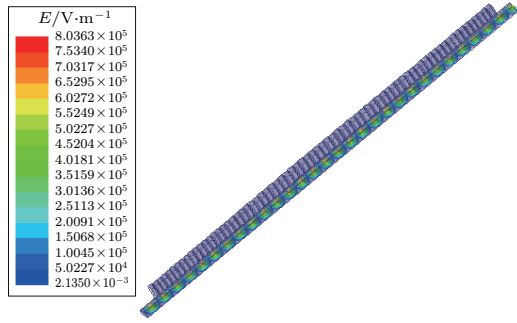


图7 100 kW 电场强度分布图

Fig. 7. The distribution diagram of E under 100 kW.

在滤波器输入 CW 100 kW 功率时, 由图7 电磁场分布仿真结果可以看出, 滤波器的最大电场强度明显小于常压条件下空气击穿场强 2.96×10^6 V/M, 功率容量仿真结果满足指标设计要求.

5 结构设计及加工焊接

考虑到副波导数目较多且深度较深, 又考虑到目前的机械加工水平, 为保证整体加工精度及安装方便, 滤波器分成盖板1、盖板2、副波导管1、副波导管2、主波导管1、主波导管2 及负载七部分进行

加工, 其中负载部分包括6种共288个结构单元, 分别装在两个盖板上, 如图11所示. 考虑材料强度及滤波器的较小损耗和导热特性, 滤波器主体结构加工材料选择紫铜, 表面镀金处理. 考虑到滤波器结构的复杂性及加工难度较大, 特别是副波导深度较大, 在加工时将滤波器分成多个部件进行加工. 通过仿真发现, 温度变化带来的微小形变, 对功率容量影响很大. 为保证功率容量, 部件之间不能用螺钉紧固安装, 需要进行真空钎焊. 由于功率容量较高, 对加工精度要求也较高, 各部件加工精度要求控制在 ± 0.02 mm, 保证安装过程中滤波器内部腔体无污染. 加工、焊接组装后实物照片见图8所示, 滤波器工艺流程框图见图9所示.



图8 滤波器实物照片

Fig. 8. The picture of the filter.

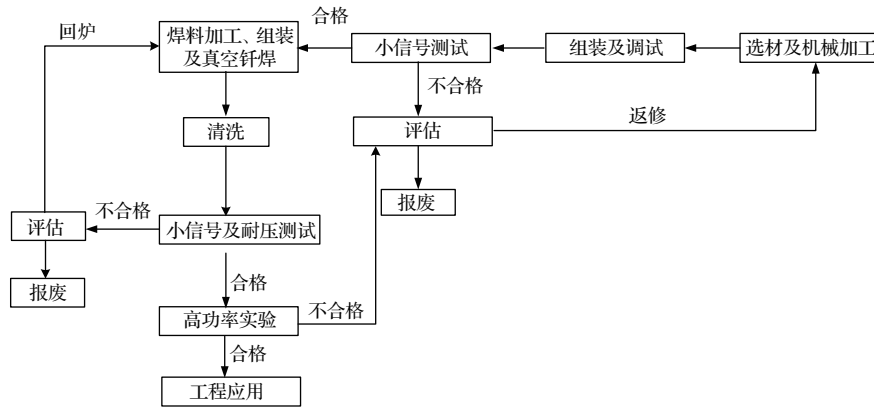


图9 工艺流程框图

Fig. 9. The process flow diagram of the filter.

6 测试

6.1 小信号测试

小信号条件下, 主要对滤波器通带损耗及各次谐波进行测试. 针对通带损耗测试, 只需要外加波导同轴装换, 在通带条件下校准仪器, 直接进行测

试. 针对谐波测试, 则需要根据每次谐波频率, 外加相应过度波导及波导同轴转换, 然后在相应频率下校准仪器, 分别进行测试. 图10为滤波器样件通带损耗及各次谐波的测试结果. 从测试结果可以看出, 滤波器通带最大插入损耗小于0.3 dB, 二次、三次及四次谐波抑制度分别大于75, 50, 35 dB. 与仿真结果比较基本一致, 完全达到预期设计目标.

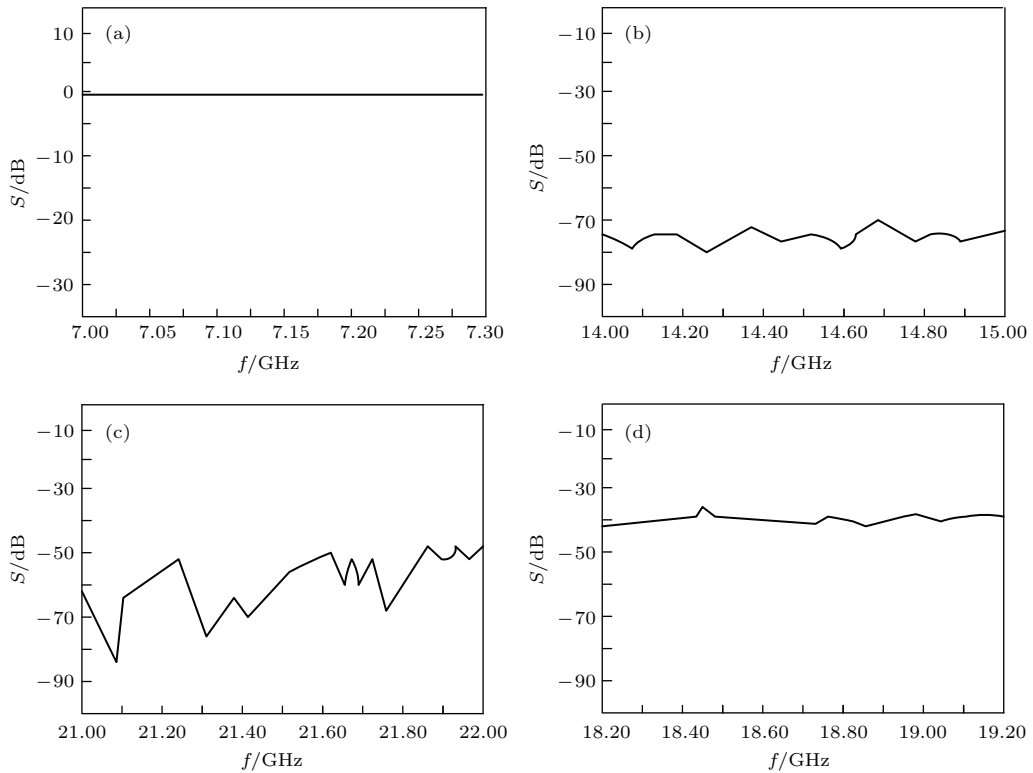


图10 滤波器 S 参数测试结果 (a) 通带损耗; (b) 二次谐波抑制制度; (c) 三次谐波抑制制度; (d) 四次谐波抑制制度
 Fig. 10. The S parameters test results of filter: (a) The loss of pass-band; (b) the suppression of second harmonic; (c) the suppression of third harmonic; (d) the suppression of fourth harmonic.

6.2 耐功率实验

在外加水冷条件下,对滤波器进行CW高功率耐功率实验.在滤波器周围加装散热冷板,液冷系统出水温度设置为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,在滤波器输入端口附近放置温度传感器,通过光纤连接到电脑,用来检测滤波器温度变化情况.在功率输出达 100 kW 以上,观察滤波器的温度变化.图11为连续工作 12 h 温度变化曲线.持续加功率 20 min 左右,滤波器温度

曲线基本保持稳定,在之后的 12 h 高功率条件下连续工作,温度曲线稳定在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,无跳变,表明滤波器在 100 kW CW 状态下,工作性能稳定.

7 结 论

超大功率吸收式谐波滤波器是高功率深空探测等应用领域的一项关键技术,其结构复杂,理论设计难度较大.本文根据等效电路法,简单分析了谐波滤波器的损耗特性,并结合电磁场仿真软件,对滤波器整体结构进行了仿真,成功设计出了一种X频段CW 100 kW 吸收式超大功率谐波滤波器.对滤波器进行了样件加工,经过小信号测试和高功率实验,各项指标性能良好.美国NASA速调管高功放在 100 kW 时,多级滤波器串联对二、三及四次谐波的抑制制度为 $60\text{--}100\text{ dB}$,而文中单个吸收式滤波器二、三及四指标分别大于 $75, 50, 35\text{ dB}$.因此,设计水平达到甚至超过了目前国际(美国)最高设计水平,为我国更遥远的外太空探测技术发展解决了一项技术瓶颈,同时,该滤波器的成功研发也为我国其他频段吸收式高功率滤波器的应用研发提

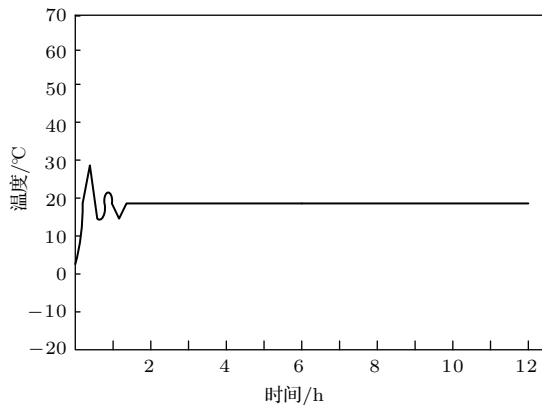


图11 12 h 温度变化曲线
 Fig. 11. The temperature variation curve within 12 h .

供了设计参考.

参考文献

- [1] Jason C, Crusan D, Craig N B 2017 *IEEE Aerospace Conference Big Sky*, USA, March 4–11, 2017 p1012
- [2] Rojina A, John N, Lei C 2017 *IEEE Global Communication Conference Singapore*, Dec 4–8, 2017 p22
- [3] Chai L, Xu X L 2010 *Telecommun. Engineer.* **50** 6 (in Chinese) [柴霖, 许秀玲 2010 电讯技术 **50** 6]
- [4] Dong G L, Li G M, Lei L 2016 *China Deep Space Network: System Design and Key Technologies-S/X-band Deep Space TT&C System* (Vol. 1) (Beijing: Tsinghua University Press) pp211–225 (in Chinese) [董光亮, 李国民, 雷厉等 2016 中国深空网: 系统设计与关键技术-S/X双频段深空测控通信系统(上) (北京: 清华大学出版社) 第211—225页]
- [5] Dainelli V, Serrno F, Tomasi L 2009 *International Vacuum Electronics Conference Rome*, Italy, April 28–30, 2009 p350
- [6] Rolf M, Manfred W 2004 *IEEE Aerospace Conference Proceedings Big Sky*, USA, March 6–13, 2004 p1124
- [7] David L, Yakov V, Bruce C 2001 *IEEE Aerospace Conference Proceedings Big Sky*, USA, March 10–17, 2001 p1526
- [8] Daniel J H, Behrouz K, John B S 2010 *Antennas & Propagation Society International Symposium Toronto*, Canada, July 11–17, 2010 p578
- [9] Hou M H, Guo Z K 2015 *Electron. Sci. Tech.* **28** 116 (in Chinese) [侯满宏, 郭忠凯 2015 电子科技 **28** 116]
- [10] Guo Z K, Hou M H 2015 *Electron. Sci. Tech.* **28** 185 (in Chinese) [郭忠凯, 侯满宏 2015 电子科技 **28** 185]
- [11] Zhang H W, Liu M, Li X S 2014 *J. Aircraft Measur. Control* **33** 31 (in Chinese) [张宏伟, 刘敏, 李新胜 2014 飞行器测控学报 **33** 31]
- [12] Han L H, Yu H 2016 *Fire Control Radar Technology* **45** 56 (in Chinese) [韩来辉, 余海 2016 火控雷达技术 **45** 56]
- [13] Gan B B, Wu W C 1973 *The Structure and Design of Modern Microwave Filter (II)* (Beijing: Science and Technology Press) pp312–319 (in Chinese) [甘本祯, 吴万春 1973 现代微波滤波器的结构与设计中册) (北京: 科学出版社) 第312—319页]
- [14] Xu J 2014 *Commun. Countermeas.* **33** 61 (in Chinese) [徐健 2014 通信对抗 **33** 61]
- [15] Li F J, Du L M 2012 *Shipboard Electronic Countermeasure* **35** 78 (in Chinese) [李福剑, 杜仑铭 2012 舰船电子对抗 **35** 78]
- [16] Dai X W, Qian J 2017 *J. Microwaves* **33** 54 (in Chinese) [戴小伟, 钱捷 2017 微波学报 **33** 54]
- [17] Zhao P 2015 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (in Chinese) [赵鹏 2015 硕士学位论文(成都: 电子科技大学)]
- [18] Guo L Q, Jiao Y C, Tang J M 2004 *Chin. J. Sci. Instrum.* **25** 30 (in Chinese) [郭利强, 焦永昌, 唐家明 2004 仪器仪表学报 **25** 30]
- [19] Cristal E G 1963 *IEEE Trans. MTT* **11** 186
- [20] Zhang Y J, Wang X L, Li L 2007 *Radar Sci. Technol.* **5** 394 (in Chinese) [张轶江, 王小陆, 李磊 2007 雷达科学与技术 **5** 394]

Research and development of continuous wave 100 kW absorption harmonic filter in X-band*

Liu Hai-Xu[†] Hou Man-Hong Li Xin-Sheng

(The 27th Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

(Received 30 March 2018; revised manuscript received 26 June 2018)

Abstract

A gradient leaky-wall waveguide loaded absorbing load filter structure is proposed, which is designed for harmonic suppression in super-high power transmitter of deep-space probe. The attenuation loss characteristics of the filter is analyzed according to the equivalent circuit method, and the massive structure is simulated by the electromagnetic field simulation software. The filter sample which includes one main waveguide, 288 deputy waveguides and 288 absorb loads is processed following the simulating and designing sizes. In order to prevent microwave from leaking and keep good air tightness under the condition of high power, all the components of the filter will be welded together by means of vacuum welding, and then the sample is cleaned ultrasonically. Finally, the filter sample is tested under small signal and large signal separately. According to our test results, the pass band max insertion loss of the filter is 0.3 dB, the min suppression of second harmonic is 75 dB, the min suppression of third harmonic is 50 dB, and the min suppression of fourth harmonic is 35 dB. The measured results show that they are almost the same as the simulation results, and consistent completely with the anticipated. We further conduct the high power experiment on the filter under a large signal of 100 kW, showing that the continuous wave power capacity of the filter can reach up to 100 kW through the power resistance test with the liquid-cooled system. All the test data show that the study and development are very successful. At present, the filter has been applied to a type of ground high power transmitter, and its performances and indicators behave well.

Keywords: X-band, continuous wave, absorption harmonic filter, 100 kW

PACS: 84.30.Vn, 41.20.-q, 84.30.Jc

DOI: 10.7498/aps.67.20180577

* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. 9140A24070815DZ37376).

[†] Corresponding author. E-mail: liuhaixu05@163.com