

基于悬置线双模谐振器谐波控制型滤波功放

方 升, 彭习文, 谢泽明

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510641)

摘 要: 为了实现高效率的射频滤波功率放大器 (filtering power amplifier), 将基于悬置线的截线加载谐振器 (stub-loaded resonator) 带通滤波器的输入阻抗直接匹配到射频功放管 CGH40010F 的最佳基波阻抗和谐波阻抗, 实现射频功率放大器与滤波器的联合设计, 使滤波器同时实现了滤波、阻抗匹配和谐波控制的功能, 避免了额外的输出匹配结构, 实现了结构紧凑、具有滤波功能的高效率谐波控制型射频功放. 实测结果表明在中心频率 2.45GHz 处, 其输出功率约为 40dBm, 最大电源附加效率 (power added efficiency) 为 76.9%, 同时具有良好的滤波特性.

关键词: 射频功率放大器; F 类功放; 滤波功放; 多模滤波器; 悬置带线; 电源附加效率; 负载阻抗; 谐波控制

中图分类号: TN722.7 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2020)09-1864-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.026

Harmonic Controlled Filtering Power Amplifiers Based on Suspended Strip-Line Dual Mode Resonators

FANG Sheng, PENG Xi-wen, XIE Ze-ming

(School of Electronics and Information, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: To implement a highly efficient radio frequency (RF) filtering power amplifier (FPA), a harmonic controlled power amplifier (PA) and a band pass filter are jointly designed. The filter uses a multi-mode stub-loaded resonator (SLR) based on suspended strip-lines. The input impedance of the filter matches to the optimal fundamental and harmonic impedances of the RF power transistor of the PA, CGH40010F. No extra matching network is needed. The filter implements the functions of filtering, output matching, and harmonic controlling simultaneously, resulting in a compact and efficient harmonic controlled FPA. Measurements show that the FPA is with a good filtering characteristic and is with a maximum output power of 40 dBm and a power added efficiency (PAE) of 76.9% at 2.45GHz.

Key words: RF power amplifiers; class F power amplifiers; filtering power amplifiers; multimode filters; suspended strip-lines; power added efficiency; load impedance; harmonic controlling

1 引言

传统上射频功放^[1,2]和滤波器^[3]是被独立设计的, 它们分别匹配到 50Ω 馈线然后相互通过馈线联接. 这样的设计存在一系列问题: 首先, 功放和滤波器各自需要匹配网络匹配到 50Ω, 增加了体积和损耗; 其次, 独立设计的功放在带外输出阻抗往往不是 50Ω, 与按照 50Ω 端口阻抗设计的滤波器直接相连使带外滤波特性变差, 同样, 滤波器在带外输入阻抗不再是 50Ω, 按照 50Ω 负载设计的 F 类高效率功放不再处于最佳谐波阻抗匹配, 带来效率的下降.

为了解决上述问题, 两者的联合设计 (滤波功放) 近年来引起关注^[4]. 在文献[5]中, 一种高 Q 值的消逝模式的腔体谐振器整合到功放管的输出端, 实现了窄带内 PAE 均大于 70%, 二次、三次谐波均小于 -70dBc. 在文献[6]中, 一个微带带通滤波器充当起 AB 型功放的输出匹配结构, 实现了整体 46.3% 的 PAE. 在文献[7]中, LTCC 低通滤波器通过整合功放管的输出匹配网络抑制谐波. 在文献[8]中, 一个紧凑的低通型微带谐振器嵌入到输出匹配单元来控制谐波, 从而实现一个高效率的 F 类功率放大器. 在文献[9]中, 高 Q 值的带通滤波器与功放管级联实现了系统良好的性能, 文

献详细介绍了利用耦合矩阵理论设计输入端口为复数阻抗的滤波器设计方法. 文献[10]采用一个三阶可调高 Q 值的滤波器实现了功放的最佳工作状态. 文献[11]利用一个高选择性的微带带通滤波器实现了 69.8% 的 PAE. 文献[12]利用一个高选择性的腔体-微带线混合型的滤波器实现了 70.9% 的 PAE. 文献[13]利用高选择性的高 Q 介质谐振器和微带谐波控制电路实现了 70.7% 的 PAE.

出于集成化、小型化和低成本的需求,滤波功放中滤波器和放大器需要能一体加工. 基于腔体滤波器的滤波功放不易满足这个要求,而基于微带线的滤波功放插损大,总体效率较低.

为了解决这个问题,本文提出一种采用悬置线滤波器结构实现滤波功放的方案. 悬置线结构具有平面电路的小型化和易加工性的特点,可与有源电路一体加工,又比微带线的损耗小. 同时,本文采用 SLR 多模谐振器以减少体积,同时利用滤波器的端耦合结构中实现传输零点以提高选择性,以达到体积小、易加工、损耗低的目的. 论文对提出的方案进行了仿真和实测验证.

2 滤波功放设计

本文提出的滤波功放由输入匹配网络、功放管、悬置线滤波器和偏置电路组成,如图 1 所示. 图 2 为悬置线输出滤波器结构. 滤波器同时作为功放的输出匹配网络和谐波控制网络,在滤波同时把功放管的最佳基波阻抗和谐波阻抗变换到 50Ω ,输入匹配加入了 RC 网络($R_1 = 12\Omega, C_2 = 10\text{pF}$)以实现电路的稳定性. 功放管采用 CREE 公司的法兰安装的 CGH40010F GaN HEMT 功放管,其工作频率 DC ~ 6GHz,典型输出 10W,最大输出 13W.

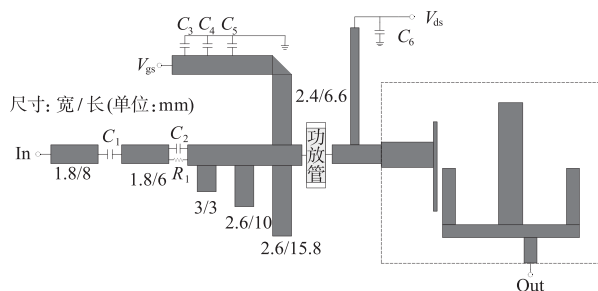


图1 滤波功放电路

本设计采用谐波控制类功放方案,功放管工作在近 F 类状态. 晶体管静态工作点采用: $V_{ds} = 28\text{V}, V_{gs} = -2.9\text{V}, I_d = 110\text{mA}$. 对于中心频率 $f_0 = 2.45\text{GHz}$, 用 ADS 对 CGH40010F 进行负载牵引和源牵引,得出在输出 40dBm 时的最佳源阻抗为 $(7.641 + j2.202)\Omega$, 最佳负载阻抗为 $(14.2 + j14.036)\Omega$, 对应最佳负载反射系

数为 $0.59 \angle 146^\circ$, 其二次谐波和三次谐波的最佳的反射系数分别为 $1 \angle (0^\circ \sim 160^\circ)$ 和 $1 \angle (-20^\circ \sim 180^\circ)$.

输出滤波器如图 2 所示. 其中图 2(a) 中虚线框部分是悬置线双模 SLR 结构^[14], 图 2(b) 是悬置线结构. 利用 SLR 的奇模和偶模实现二阶滤波特性. SLR 的基模和偶模谐振波长满足^[14]:

$$\lambda_{g0}^o = 2(L_7 + L_8 + 2L_9 + W_5) \quad (1)$$

$$\lambda_{g0}^e = 2(L_{10} + L_9) + L_7 + L_8 + W_5 + W_4 \quad (2)$$

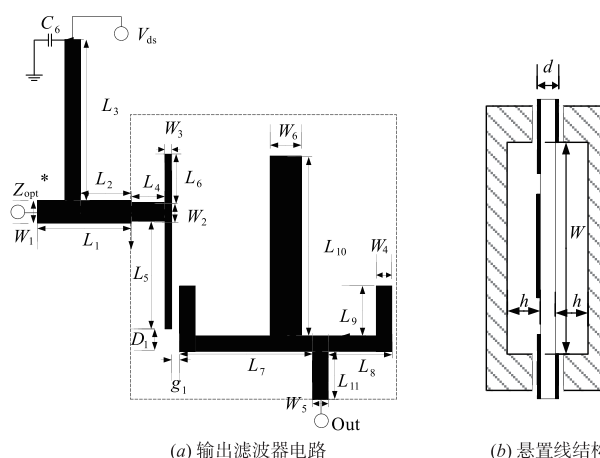


图2 悬置线输出滤波器

短截线 L_{10} 在频率满足 $L_{10} = \lambda_g/4$ 时引入一个传输零点, 输出端采用直接耦合结构, 在频率满足 $L_8 + L_9 = \lambda_g/4$ 时引入另一个传输零点, 这两个传输零点分别为图 3 中的 f_{z1} 和 f_{z2} . 这两个传输零点可改善滤波器通带的矩形度, 提高选择性. 输入端耦合采用缝隙 s_1 耦合, 省去了输出隔直电容, 同时利用分支线 L_6, L_5 和 s_1 实现输入端最佳耦合.

滤波器通过 L_1 和 $L_3 \approx \lambda_g^{\text{func}}/4$ 段组成的源极馈电网络与功放管联接.

在二次谐波, $L_3 \approx \lambda_g^{\text{sec}}/4$ 段在 L_1 段引入短路点, 其到输入端的位置可以控制二次谐波相位:

$$\varphi_{\text{sec}} = 2\pi(L_1 - L_2 - W_1/2)/\lambda_g^{\text{sec}} \quad (3)$$

$L_{10} \approx 3\lambda_g/4$ 时会在接近三次谐波处引入一个传输零点, 保证对三次谐波的抑制.

滤波器和功放电路采用厚度 $d = 0.8\text{mm}$ 的 Rogers4003 板材为基板, 其介电常数为 3.55, 损耗正切角值为 0.0027, 悬置线的悬置高度 $h = 2\text{mm}$, 退耦电容选择 $C_6 = 10\text{pF}$.

输出滤波器设计:

首先按照式(4)选择馈电线 L_3 段的接入位置, 使二次谐波相位为 90° , 从而处于高效率区.

$$L_1 - L_2 - W_1/2 \approx \lambda_g^{\text{sec}}/8 \quad (4)$$

然后, 选择一个 L_2 段长度, 并根据功放管最佳的基波阻抗、三次谐波相位高效区利用传输线理论计算滤

波器输入端所要求的最佳的基波阻抗 Z_{in}^{opt} 和三次谐波相位高效区。

接着,利用多模滤波器理论设计图 2 虚框内的滤波器,输出端口阻抗设置为 50Ω 、输入端口阻抗设置为 Z_{in}^{opt} 。如果三次谐波相位不在高效率区,调整 L_2 重新设计。

对于中心频率 2.45GHz、带宽 300MHz 的滤波功放,得到的参数如表 1 所示。

表 1 输出滤波器结构参数(单位:mm)

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
W_1	1.8	W_6	4.4	L_5	15.5	L_{10}	30.5
W_2	2.2	L_1	8	L_6	9.3	L_{11}	8
W_3	0.8	L_2	3.5	L_7	16.5	D_1	1
W_4	2.2	L_3	20.4	L_8	9.3	s_1	1.4
W_5	2.2	L_4	4	L_9	10.7		

对图 2 的输出滤波器在输出接 50Ω 负载时用 HF-SS 仿真了输入反射系数(以 50Ω 为参考阻抗),基波(2.45GHz)、二次谐波(4.9GHz)和三次谐波(7.35GHz)的结果在表 2 中和负载牵引的结果进行了对比。

表 2 输出滤波器仿真结果和 CGH40010F 负载牵引结果对比

f (GHz)	仿真 Γ_{in}	最佳 Γ_{in}
2.45	$0.644 \angle 135^\circ$	$0.59 \angle 146^\circ$
4.90	$0.985 \angle 81^\circ$	$1 \angle (0^\circ \sim 160^\circ)$
7.35	$0.965 \angle 48^\circ$	$1 \angle (-20^\circ \sim 180^\circ)$

由表 2 可见,基波、二次和三次谐波阻抗处于高效率区,满足了高效率谐波控制类功放的负载阻抗要求。

输入匹配采用 3 枝节线匹配电路,把 50Ω 阻抗变换到最佳源阻抗 $(7.641 + j2.202)\Omega$ 。其中 C_1 为隔直电容,输入匹配网络具体尺寸在图 1 中注明,三枝节前后及之间的间隔分别为 1.2/0.8/4.7/1.5mm。

滤波功放的仿真 S 参数如图 3 所示,其中 1 端口为输入端口。可以看到设计的滤波功放在基波附近有良好的滤波特性,3dB 带宽达到 300MHz,通带内增益为 17dB。而且在通带两侧各引入的一个传输零点 f_{z1} f_{z2} ,有效地改善了功放的滤波特性。另外的传输零点 f_{z3} 是由输入网络产生的。

图 4 给出了大功率时仿真的输出功率和效率,输入功率为 28dBm。在频率 2.33~2.57GHz 时,输出功率达到 40dBm,且 PAE 均大于 65%。其 PAE 大于 65% 的带宽达到了 240MHz。最大 PAE 达到了 78%。

3 功放实测结果

为了验证方案,对制作的滤波功放进行了实测,测试时晶体管静态工作点采用: $V_{ds} = 28V$, $V_{gs} = -2.8V$, $I_{d0} = 100mA$ 。

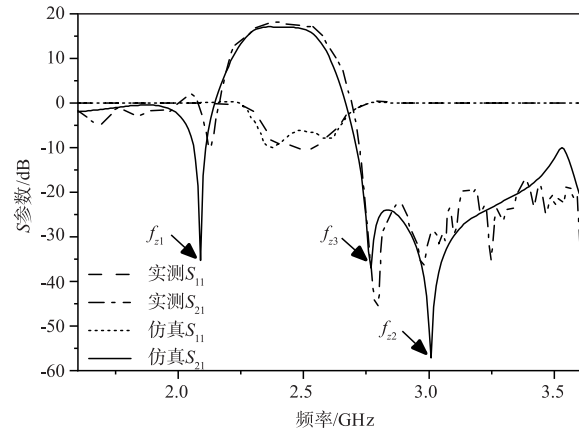


图 3 滤波功放的小信号 S 参数的仿真和实测结果

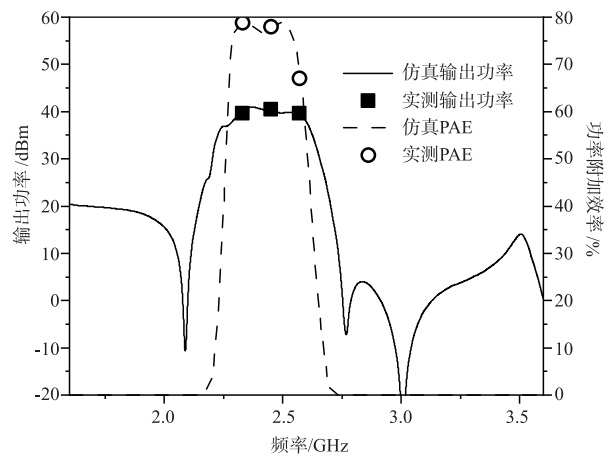


图 4 大信号下输出功率和效率

用网络分析仪测量的小信号 S 参数在图 3 中与仿真结果进行了对比,测试结果与仿真结果的吻合良好。

在中心频率(2.45GHz)以及通带边沿的(2.33GHz 和 2.57GHz),实测的连续波输出功率和 PAE 在图 4 中标出。1dB 压缩点输出功率分别为 40dBm、40dBm、39.7dBm,而在饱和情况下(输入功率 28dBm)输出功率大于 40dBm。PAE 分别为 76.9%、76.5% 和 68%。在输出饱和(40dBm)时,仿真的二次谐波和三次谐波抑制分别为 50dBc 和 61dBc,而实测值分别为 40dBc 和 44dBc,表明输出滤波器在滤波的同时提供了最佳的基波和谐波阻抗的匹配。测试结果说明功放和滤波联合设计可实现高效率输出。

4 结论

本文采用基于悬置带线 SLR 双模谐振器与功率放大器联合设计的方法,实现了一个中心频率 2.45GHz、带宽 240MHz 的近 F 类射频滤波功率放大器(谐波控制功放)。通带内 1dB 压缩点输出功率约为 40dBm,在 240MHz 频带内 PAE 大于 68%,最大 PAE 为 77.7%。设计滤波功放具有加工方便、结构紧凑、效率高、滤波特性

好的优点.表 3 给出了与文献结果的对比.

表 3 本文的滤波功放与其它文献结果的对比

文献	输出滤波器	最大效率	传输零点	PAE 大于 60% 带宽
[5]	SIW	71%	无	70MHz
[6]	微带	46.3%	无	-
[10]	腔体	67%	无	54MHz
[11]	微带	69.8%	2	-
[12]	微带-腔体	70.9%	2	130MHz
本文	悬置带线	76.9%	2	310MHz

参考文献

- [1] 冷永清,张立军,曾云等.基于 GaN HEMT 的 1.5 ~ 3.5 GHz 宽带平衡功率放大器设计[J].电子学报,2013,41(4):815-820.
LENG Yong-qing, ZHANG Li-jun, ZENG Yun, et al. Design of a 1.5 ~ 3.5GHz octave bandwidth balanced power amplifier in GaN HEMT technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(4):815-820. (in Chinese)
- [2] 余旭明,洪伟,王维波. Ku 波段宽带氮化镓功率放大器 MMIC[J]. 电子学报,2015,43(9):1859-1863.
YU Xu-ming, HONG Wei, WANG Wei-Bo. Ku band power amplifier MMIC based on GaN HEMT technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(9):1859-1863. (in Chinese)
- [3] 褚庆昕,叶亮华,陈付昌.小型双频带通滤波器的设计[J].华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(6):7-10.
CHU Qing-xin, YE Liang-hua, CHEN Fu-chang. Design of compact dual-band bandpass filter[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2010, 38(6):7-10.
- [4] MILAD E, MOHSEN H, FARZIN S. A compact lowpass filter with ultra-high figure-of-merit for integrating with class-F/ F^{-1} power amplifiers[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2019, 99(3):655-667.
- [5] CHEN K L, LIU X G, CHAPPELL W J, et al. Co-design of power amplifier and narrowband filter using high- Q evanescent-mode cavity resonator as the output matching network [A]. 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium [C]. Piscataway, NJ 08854 USA; IEEE Press, 2011. 1-4.
- [6] LI Y C, WU K C, XUE Q. Power amplifier integrated with bandpass filter for long term evolution application [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(8):424-426.
- [7] RAGHAVAN A, HEO D, MAENG M, et al. A 2.4 GHz high efficiency SiGe HBT power amplifier with high- Q LTCC harmonic suppression filter [A]. 2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. NJ 08854 USA; IEEE Press, 2002. 1019-1022.
- [8] CHEN S C, XUE Q. A class-F power amplifier with CMRC [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,

2011, 21(1):31-33.

- [9] CHEN K L, LEE J, CHAPPELL W J, et al. Co-design of highly efficient power amplifier and high- Q output bandpass filter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(11):3940-3950.
- [10] CHEN K L, LEE T C, PEROULIS D. Co-design of multi-band high-efficiency power amplifier and three-pole high- Q tunable filter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(12):647-649.
- [11] GAO L, ZHANG X Y, CHEN S C, et al. Compact power amplifier with bandpass response and high efficiency [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(10):707-709.
- [12] GUO Q Y, ZHANG X Y, XU J X, et al. Bandpass class-F power amplifier based on multifunction hybrid cavity microstrip filter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(7):742-746.
- [13] XU J X, ZHANG X Y, SONG X Q. High-efficiency filter-integrated class-F power amplifier based on dielectric resonator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(9):827-829.
- [14] ZHANG X Y, CHEN J X, XUE Q, et al. Dual-band bandpass filters using stub-loaded resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(8):583-585.

作者简介



方升 男,1994年6月出生于江西丰城,本科毕业于合肥工业大学,硕士就读于华南理工大学,研究方向为射频电路、功率放大器等.
E-mail:450555211@qq.com



彭习文 男,1994年1月出生于江西九江,本科毕业于江西师范大学,硕士就读于华南理工大学,研究方向为射频电路、功率放大器等.
Email:1511611956@qq.com



谢泽明(通信作者) 男,1963年8月出生于广州市.现为华南理工大学教授、博士生导师.主要研究方向为射频电路与天线技术.
E-mail:eezmxie@scut.edu.cn