

基于 CRLH 反馈回路的高效率谐波调谐 功率振荡器设计

蔡 奇^{1,2}

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210023; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 211189)

摘要: 设计了一种高效率谐波调谐功率振荡器,并在反馈回路中引入互补左右手(Composite Right/Left Handed, CRLH)单元. 通过谐波负载牵引仿真得到晶体管的最佳基波和谐波阻抗. 通过反馈回路中的 CRLH 单元,实现反馈信号幅度和相位的控制,以及频率的选择. 此外,负载网络通过控制二次和三次谐波终端提高效率. 为了验证上述方法,采用 GaN 高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)在 3.5 GHz 设计了一个功率振荡器. 测试结果表明,功率振荡器在 3.49 GHz 的最大效率为 65.5%,对应的输出功率为 39.7 dBm,验证了本文提出的电路拓扑和设计方法的有效性. 同时,和其他高效率振荡器相比,本文设计的振荡器具有最小的电路尺寸.

关键词: 氮化镓高电子迁移率晶体管;谐波调谐;高效率;射频振荡器

基金项目: 国家自然科学基金(No.62001242);东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(No.K202321)

中图分类号: TN722;TN492

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)11-3877-09

电子学报 URL:http://www.ejournal.org.cn

DOI:10.12263/DZXB.20231202

High Efficiency Harmonic Tuned Power Oscillator with a CRLH Cell in Feedback Path

CAI Qi^{1,2}

(1. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: One high efficiency harmonic tuned RF (Radio-Frequency) oscillator with a composite right/left-handed (CRLH) cell in feedback path is presented. The optimum load impedances at fundamental and harmonic frequencies are obtained through harmonic load-pull simulation. A CRLH cell in the feedback path is employed to provide appropriate amplitude and phase signal, and to control the oscillation frequency. Besides, the load network is synthesized to control the second and third harmonic terminations to improve the efficiency. For demonstration, a RF oscillator using GaN high electron mobility transistor (HEMT) is designed and fabricated at 3.5 GHz. The measured results show that the power oscillator achieves a maximum efficiency of 65.5% with an output power of 39.7 dBm at 3.49 GHz, which proves the proposed circuit topology and the design method. Meanwhile, the proposed oscillator has the smallest circuit size compared with other reported high-efficiency oscillators.

Key words: GaN HEMT; harmonic tuned; high efficiency; RF oscillator

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62001242); Open Research Fund of State Key Laboratory of Millimeter Waves (No.K202321)

1 引言

随着无线通信的飞速发展,高效率射频功率振荡器在雷达、无线能量传输等系统中成为关键器件. 它将直流能量转换成射频能量,在很大程度上决定了整体系统的效率和热应力^[1-3]. 因此,高性能的射频功率振

荡器吸引了很多学者的研究^[4-10].

近些年来,很多研究致力于提升射频功率振荡器的效率、功率、工作频率等性能^[11-15]. 通过将有源器件工作在开关状态,再调节反馈回路在振荡频率的幅度和相位, E 类振荡器可以用简单的电路实现高效

率^[6,16-19]. 在文献[18]中,采用L-C-L的高通滤波器来调谐基波和谐波分量,在10.1 MHz实现了效率达到75%的E/F类振荡器. 但是,E类振荡器的工作频率受晶体管漏极电容和开关损耗的影响,在高频时会不可避免地出现功率和效率降低的问题^[20].

另一方面,和对应的功率放大器类似,谐波调谐型振荡器通过谐波控制网络,可以在高频实现高效率^[21-26]. 在文献[22]中,通过引入一个串联的L-C谐振单元,可以将负载网络和反馈网络单独设计,使得晶体管的电压电流在基频和谐波频率同时满足最佳状态. 在2.42 GHz,测试的效率达到80.2%,输出功率达到35.1 dBm. 在文献[26]中,通过在反馈回路中加入非对称的耦合谐振器,并在扼流电路设计中考虑二次谐波成分,实现了高功率高效率的固态振荡器. 在2.45 GHz测试功率达到210 W,效率为51%. 尽管如此,由于在反馈回路中大量使用分立器件增加了损耗,功率振荡器的效率性能有待提升. 2022年,文献[27]基于谐波控制逆F类功放、反馈网络和带通滤波器,使用分立器件晶体管和PCB工艺,在910 MHz设计了仿真效率达到66%,输出功率达到38.9 dBm的功率振荡器. 2024年,文献[28]基于内嵌套结构提出一种耦合波导实现锁频锁相的微波功率振荡器,在9.39 GHz仿真输出功率高达5.31 GW,效率为32.2%.

此外,基于先进半导体工艺实现高性能功率振荡器的研究近几年也多有报道. 2021年,文献[29]通过功率增益优化和二次谐波控制提升振荡器的基波功率和效率,在130 nm SiGe BiCMOS工艺实现工作频率高达160 GHz的功率振荡器,直流-射频转换效率达到13.4%. 不过受限于工艺器件性能,输出功率只有6.53 dBm. 同年,文献[30]在40 nm CMOS工艺上提出一种基于变压器匹配和电容阵列的设计方法,在2.79 GHz实现效率高达25.1%的功率振荡器,不过输出功率只有4.5 dBm. 2024年,文献[31]同样在40 nm CMOS工艺上,采用自偏置NMOS架构降低电源噪声,通过调整电容阵列实现了24 GHz的宽调谐振荡器. 目前来看,硅基器件存在功率容量低的问题,GaN器件则很好地弥补了这一缺陷,2021年,文献[32]基于60 nm GaN工艺在W波段实现了频率可调,效率达到16.8%的高效率大功率振荡器,输出功率达到22.5 dBm.

本文设计了一种采用谐波调谐的高效率功率振荡器. 通过负载网络控制晶体管输出端的二次和三次谐波,提升电路效率. 同时,在反馈回路中引入CRLH单元为振荡频率提供合适的反馈幅度和相位. 由此实现了结构简单、电路尺寸紧凑的高效率的功率振荡器. 测试结果表明,所设计的振荡器在3.49 GHz实现了39.7 dBm的输出功率和65.5%的效率. 和其他工作相

比,本文提出的方法因为简单的结构和紧凑的尺寸,也很适合在高频集成电路设计中应用.

2 谐波调谐功率振荡器电路分析

如图1所示,功率振荡器的基本结构包括一个放大电路和一个反馈网络,在振荡状态下的幅度和相位条件要满足巴克豪森准则.

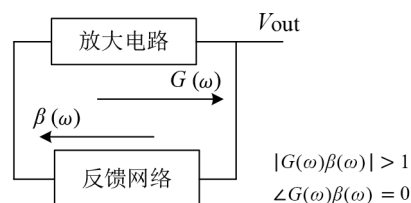


图1 基于巴克豪森准则的振荡器基本结构

图2展示了本文提出的谐波调谐功率振荡器原理图,它包含以下三个部分:晶体管、负载网络、源网络. 这三部分共同组成了一个高效率功率放大器;再由反馈电路决定最终的振荡频率. 负载网络为晶体管提供最佳输出基频和谐波阻抗,源网络为晶体管提供输入基频阻抗,从而实现高效率性能. 而反馈电路的设计尽量减小晶体管的输出功率损耗和阻抗变换,同时要满足图1所示的振荡条件. 在本设计中,选用了分立器件CGH40010 GaN HEMT作为有源晶体管,而振荡器的工作频率选在针对无线应用的3.5 GHz.

2.1 高效率功率放大器

功率放大器作为振荡回路的一部分,它的功率和效率决定了振荡器的性能. 因此,首先要设计一个高效率放大器. 通过谐波负载牵引可以找出晶体管在3.5 GHz的最佳基频和谐波阻抗.

图3展示了负载牵引仿真下晶体管基频和谐波频率的效率曲线,晶体管工作点设置为 $V_{ds}=28\text{ V}$, $I_{ds}=200\text{ mA}$. 由图3可知,只考虑基频阻抗,负载牵引的最大效率为70.6%,通过引入二次和三次谐波阻抗,效率分别可以达到74.8%和77%. 因此在设计中,负载网络考虑到三次谐波以提升最终电路的效率.

负载网络结构如图2(b)所示,谐波控制单元由两条高低阻抗的传输线组成,在A点产生二次和三次谐波短路,从而通过调谐线 TL_1 来控制两个谐波频率的阻抗,谐波控制单元的设计参数可以由下式获得:

$$\theta_{HT1} = \theta_{HT2} = \frac{\pi}{1+m} \quad (1)$$

$$\frac{Z_{HT1}}{Z_{HT2}} = \tan(\theta_{HT1}) \tan(\theta_{HT2}) \quad (2)$$

其中, m 表示频率比,这里设置为1.5;从而得到 $\theta_{HT1} = \theta_{HT2} = 2\pi/5$; $Z_{HT1} = 9.4Z_{HT2}$. 因此,低阻抗线的特征阻抗 Z_{HT2} 选取为16 Ω ,高阻抗线的特征阻抗 Z_{HT1} 可以计算

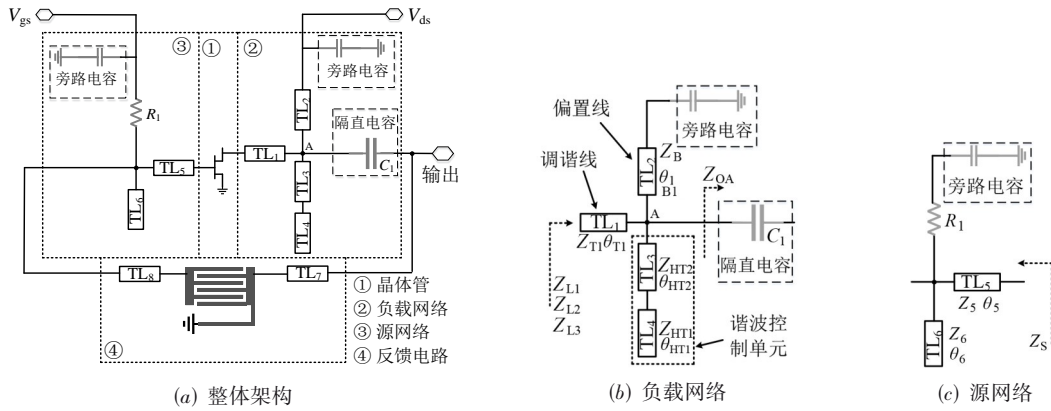


图2 谐波调谐功率振荡器原理图

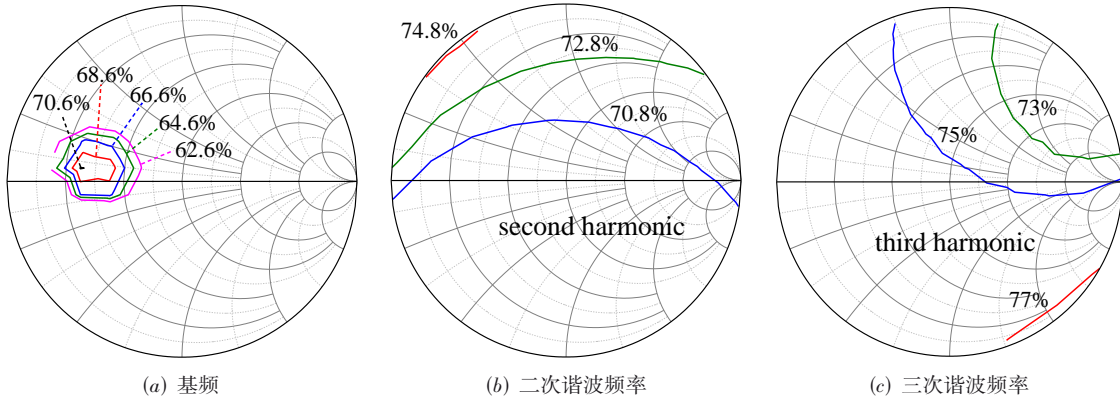


图3 负载牵引仿真结果

为 150.4Ω , 当采用相对介电常数为 2.2、厚度为 30 mil 的 Arlon dicald880 介电基板, 则该高阻抗线对应的实际传输线宽度为 0.2 mm.

图 4 展示了谐波调谐单元的 S 参数和输入阻抗仿真结果, 可以看出在两个谐波频率, 输入阻抗接近 0, 实现短路状态. 因此就可以将谐波调谐和基频匹配电路单独设计. 之后通过串联的调谐线、并联的偏置线和谐波控制单元, 就可以将基频阻抗匹配到合适的位置, 其表达式如下:

$$Z_{L1} = Z_{T1} \frac{Z'_{OA} + jZ_{T1} \tan \theta_{T1}}{Z_{T1} + jZ'_{OA} \tan \theta_{T1}} \quad (3)$$

$$Z_{L2} = jZ_{T1} \tan 2\theta_{T1} \quad (4)$$

$$Z_{L3} = jZ_{T1} \tan 3\theta_{T1} \quad (5)$$

$$Z'_{OA} = \frac{1}{B_1 + B_2 + 1/Z_{OA}} \quad (6)$$

$$B_1 = \frac{1}{jZ_{B1} \tan \theta_{B1}} \quad (7)$$

$$B_2 = \frac{j(Z_{HT1} \tan \theta_{HT1} + Z_{HT2} \tan \theta_{HT2})}{Z_{HT2}(Z_{HT1} - Z_{HT2} \tan \theta_{HT1} \tan \theta_{HT2})} \quad (8)$$

二次和三次谐波是晶体管输出端主要的谐波成

分, 由于它们已经被负载网络的谐波控制单元短路, 不会随着反馈回路来到输入端. 因此在反馈回路中就不需要像文献 [22] 那样加入额外的 LC 谐振器, 或像文献 [23] 那样加入阶跃阻抗谐振器. 这样可以减少反馈网络的损耗, 并减小电路尺寸.

源网络的原理图如图 2(c) 所示, 栅极偏置采用一个电阻, 阻值为 $R_1 = 1000 \Omega$, 传输线 TL_5 和 TL_6 用来实现基频的源阻抗变换. 由于晶体管输入端没有信号源, 因此源网络不需要隔直电容.

2.2 反馈网络

传统 π 型和 T 型反馈及 LC 谐振网络如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 由于使用集总参数元件会降低实际电路 Q 值, 增加电路损耗, 因此需要将集总参数元件转换为分布参数元件, 这会占用较大的电路尺寸, 因此传统的 LC 反馈振荡器电路尺寸都比较大. 此外, 传统 LC 网络加工时无法和振荡电路一体化集成. 对于图 5(a) 的 π 型网络, 源网络端需要引入额外的隔直电容; 对于图 5(b) 的 T 型网络, 串联电容 C_{T1} 无法直接用分布参数电路替换, 电路板也需要焊接分立电容, 其寄生效应和损耗随着电路工作频率升高无法简单忽略. 因此, 本工作提出

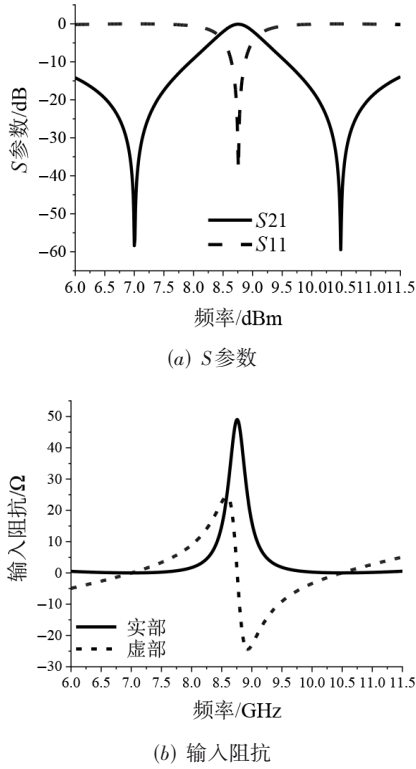


图4 谐波控制单元的仿真结果

了如图5(c)所示的基于CRLH单元的反馈回路,包括一个CRLH单元和两端的传输线 TL_7 和 TL_8 . CRLH单元包括一个交指电容和一段并联传输线电感,该结构在滤波器小型化设计中具有低损耗特性,通过将CRLH单元用于振荡器反馈回路设计,可以减少反馈回路的损耗,并大幅减小电路尺寸,并且与传统的LC反馈网络

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p} + \frac{j\omega C_s}{1 - \omega^2 L_s C_s} & \frac{-j\omega C_s}{1 - \omega^2 L_s C_s} \\ \frac{-j\omega C_s}{1 - \omega^2 L_s C_s} & j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p} + \frac{j\omega C_s}{1 - \omega^2 L_s C_s} \end{bmatrix} \quad (16)$$

图6展示反馈幅度、输出损耗以及振荡频率随CRLH单元不同参数变化的仿真结果. 从图6(a)~(c)和图6(e)中可以看出,随着交指电容的栅指长度、宽度、对数增加,以及随着传输线电感的长度增加,反馈回路的反馈幅度以及输出损耗都在增加,而振荡频率随着这4个参数增加而降低. 另外,从图6(d)和图6(f)中,随着交指电容的栅指间距和传输线电感的线宽增加,反馈幅度和输出损耗都在减小. 而振荡频率几乎不受栅指间距的影响,但随着传输线电感的线宽增加而增加. 以上的反馈幅度指的是从放大器输出端到反馈输出端的幅度,而输出损耗是从放大器的输出端到振荡器的输出端的损耗.

因此,为了实现高效率,根据放大器的特性,将反

相比,减少了集总元件封装寄生参数的影响. 振荡器的振荡状态主要由反馈网络的幅度和相位决定. 由于在2.1节中设计的高效率功率放大器在3.5 GHz的增益为18 dB,并且在5 dB压缩点时有较好的效率性能,因此反馈网络的幅度在这个频率应该设置为-13 dB^[26].

反馈网络的幅度则由CRLH单元控制,其等效电路如图5(d)所示^[33,34]. 根据经验公式,其交指电容的等效电容值以及并联传输线的等效电感可以由下式计算:

$$C_s = (\epsilon_r + 1) l_c \left[(2N_p - 3) A_1 + A_2 \right] \quad (9)$$

$$A_1 = 4.409 \tanh \left[0.55 \left(\frac{h}{w_c} \right) \right] \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$A_2 = 9.92 \tanh \left[0.52 \left(\frac{h}{w_c} \right) \right] \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$L_p = 2 \times 10^{-4} l_l \left[\ln \left(\frac{l_l}{w_l + t} \right) + 1.193 + \frac{w_l + t}{3l_l} \right] K_g \quad (12)$$

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln \left(\frac{w}{h} \right) \quad (13)$$

其中, ϵ_r 和 h 分别表示介质基板的介电常数和厚度, t 表示金属层的厚度; w_l 和 l_l 分别为传输线的宽度和长度; l_c 、 w_c 和 N_p 分别为交指电容的栅指长度、宽度和对数.

此外,等效电路中的 C_p 和 N_p 的计算式如下:

$$C_p = \epsilon_r \epsilon_0 S_{\text{metal}} / 2h \quad (14)$$

$$L_s = 2\tau \times 10^{-4} l_l \left[\ln \left(\frac{l_l}{w_l + t} \right) + 1.193 + \frac{w_l + t}{3l_l} \right] K_g \quad (15)$$

其中, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, S_{metal} 是上层金属的面积, L_s 和 L_p 之间有正比关系,系数 $0 < \tau < 1$.

除了经验公式,CRLH单元的等效电路还可以通过如下Y矩阵法计算:

反馈回路的幅度选为-13 dB,CRLH单元的设计参数: $w_c = 0.2$ mm, $l_c = 3.7$ mm, $s_c = 0.2$ mm, $N_p = 3$ 、 $w_l = 0.3$ mm、 $l_l = 4.3$ mm.

反馈网络的相位由两条相位线 TL_7 和 TL_8 调整,同时,它们也作为源网络、CRLH单元和负载网络之间的连接线. 两条传输线的特征阻抗都是50 Ω ,同时,它们的电长度 θ_{FB1} 和 θ_{FB2} 用来补偿CRLH单元的相位偏移,使得整个振荡回路的相位在3.5 GHz为 2π 的整数倍,从而使得振荡器可以自由振荡. 由于 TL_7 和 TL_8 同时也作为整体电路的连接线,为了电路尺寸尽可能紧凑,它们也尽可能选择小的电长度,也就是使得整体回路的相位为 2π .

图7展示了振荡频率随 θ_{FB1} 和 θ_{FB2} 变化的仿真结

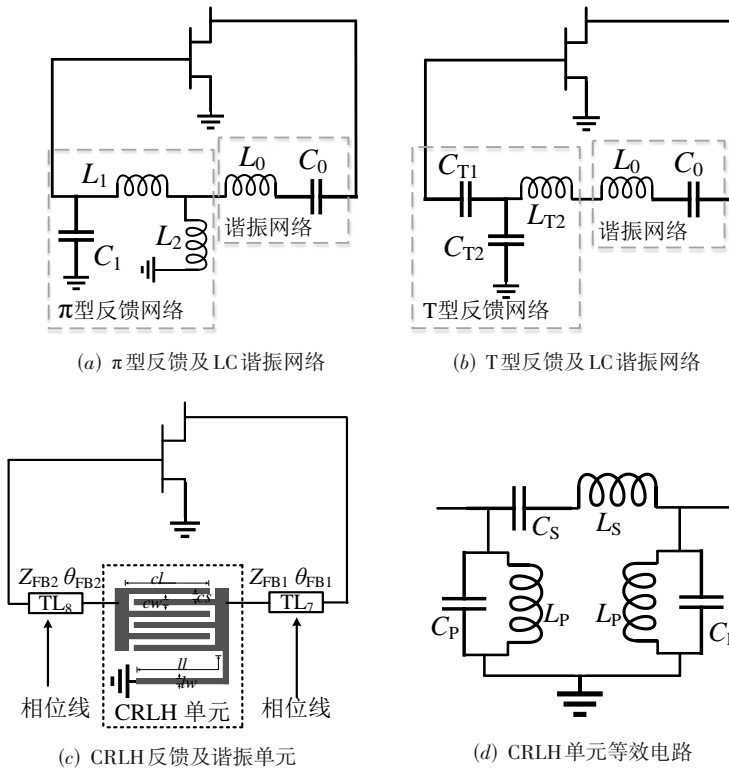


图5 不同的反馈网络原理图

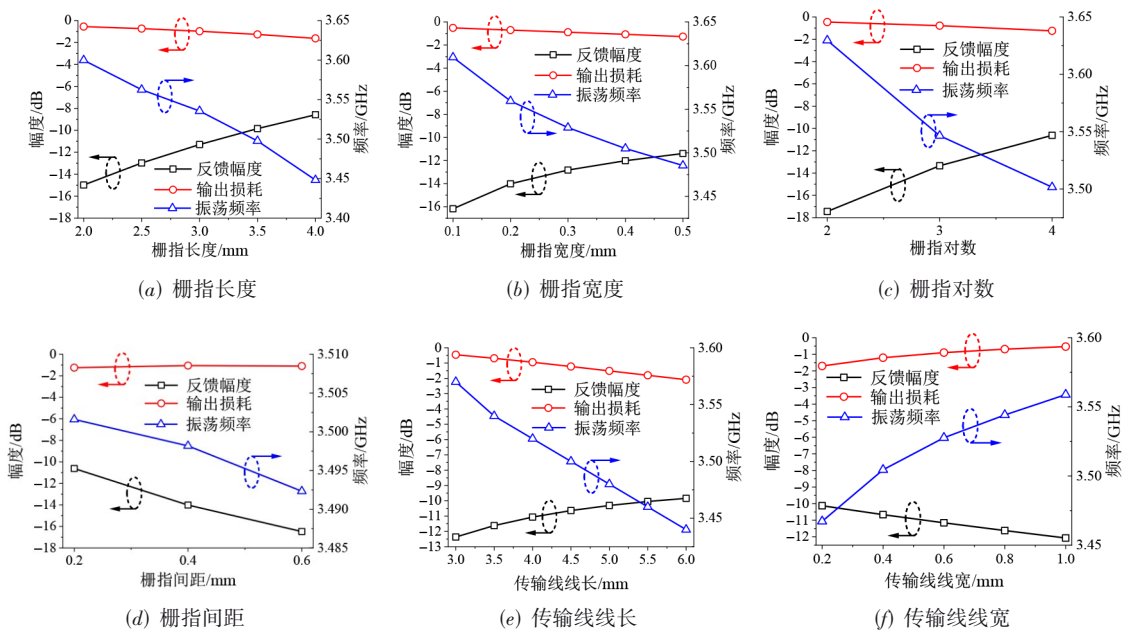


图6 反馈幅度、输出损耗和振荡频率随交指电容变化的仿真结果

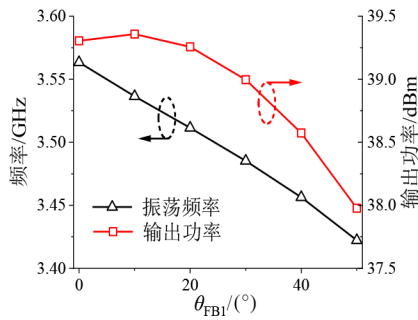
果. 可以看出,相位线的电长度会影响振荡频率和输出功率. 为了在 3.5 GHz 实现高功率,两条相位线的电长度分别为 21° 和 26° .

图 8 为振荡器的环路增益在 3.4~3.6 GHz 范围的仿真结果. 从图上可以看出,环路的幅度和相位条件满足

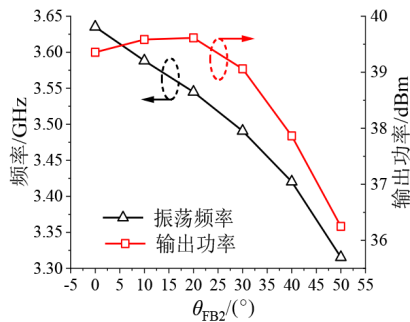
巴克豪森准则,振荡器可以起振.

3 电路仿真

根据上述分析,高效率谐波调谐振荡器的设计过程如下. 首先采用晶体管 CGH40010 在 3.5 GHz 设计出



(a) S 参数



(b) 输入阻抗

图7 振荡频率和输出功率随反馈网络中相位线变化的仿真结果

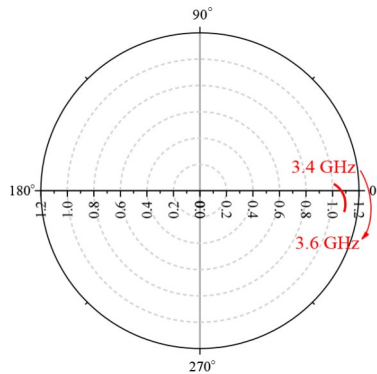


图8 振荡器环路增益在 3.4~3.6 GHz 范围的仿真结果

谐波调谐功率放大器,图9展示了其输出功率、效率和增益随输入功率变化的仿真结果,在 5 dB 压缩时,输出功率达到 40 dBm,效率达到 76%.

图10展示了负载网络在 Smith 圆图的阻抗轨迹仿真结果,前三次谐波阻抗用不同的空心图案做了标记,负载牵引仿真得到的最佳阻抗区域也在圆图上用不同的颜色做了标记.可以看出,所设计的负载网络使得晶体管的基频和二次、三次谐波阻抗都工作在最佳效率区域.因此,谐波调谐的方法是有效果的,整体电路的效率得以提升.

之后根据 2.2 节,在放大器输入输出端加上反馈网络,通过 CRLH 单元调整反馈幅度,通过相位线调整环

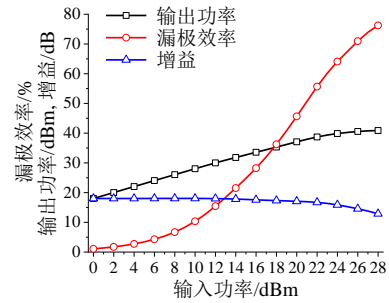


图9 放大器在 3.5 GHz 的大信号仿真结果

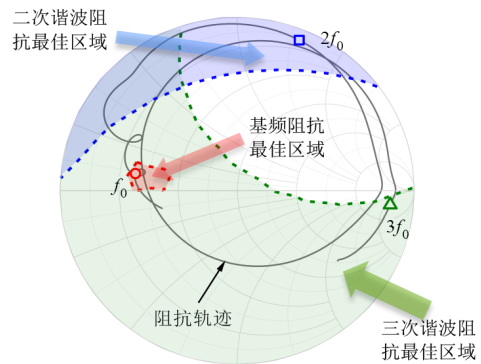


图10 负载网络在 Smith 圆图的阻抗轨迹仿真结果

路的相位.图11展示了振荡器输出功率谱的仿真结果,自由振荡频率为 3.505 GHz,输出功率和效率分别为 40 dBm 和 69%.从图11也可以看出,输出端的谐波成分被抑制了,远小于基频信号.

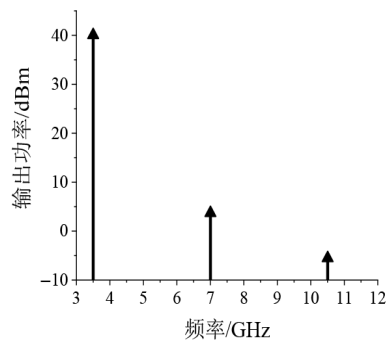


图11 振荡器输出功率谱的仿真结果

4 电路加工和测试

为了验证本文提出的方法,对上述设计的振荡器进行了加工和测试,图12为加工的振荡器实物,其核心电路尺寸为 31.3 mm × 33.9 mm.选用的介质基板为 Arlon dicald880,相对介电常数为 2.2,厚度为 30 mil.所有的集总元件电容都是隔直电容和旁路电容,栅极和漏极偏置线上的电解电容用于抑制低频振荡.

图13(a)展示了在漏极电压固定为 28 V 时,输出功率、效率和振荡频率随不同栅极电压变化的测试结果.

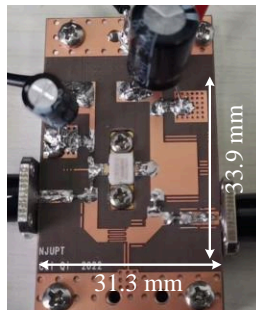
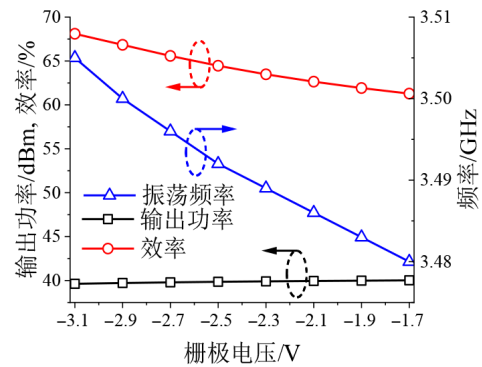


图 12 加工的振荡器实物图

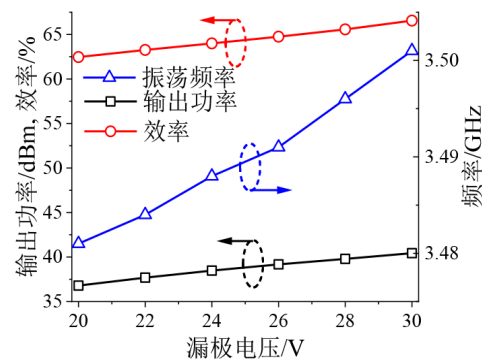
可以看出,随着栅极电压降低,振荡器的效率有 6% 的提升,振荡频率也增加了 0.02 GHz,而输出功率基本不变. 图 13(b)展示了在栅极电压固定为-2.7 V 时,输出功率、效率和振荡频率随不同漏极电压变化的测试结果. 可以看出,随着漏极电压升高,效率、输出功率和振荡频率分别有 4%、4 dB 和 0.02 GHz 的提升.

图 14 展示了输出功率谱的测试结果. 在振荡器自由振荡时,输出功率为 39.7 dBm,效率为 65.5%,振荡频率为 3.49 GHz. 从图上可以看出,振荡器的输出谐波成分被抑制了,二次谐波和三次谐波功率分别比基频功率低 39 dB 和 33 dB.

表 1 为所设计的振荡器和其他报道的高效率振荡器的性能对比. 所设计的振荡器的测试效率低于文献 [22~25] 的结果,但这些采用谐波调谐的高效率振荡器,工作频率分别为 2.4 GHz [22,23,25] 和 1 GHz [24],都低于本设计的功率振荡器. 同时,它们的输出功率也都低于本设计的功率振荡器. 而和文献 [16,26] 相比,所设计的功率振荡器比 E 类振荡器效率更高. 与工作频率更高的文献 [15,17,35,36] 相比,本设计具有更高的效率和输出功率. 不仅如此,和表 1 中列出的其他基于 PCB 的工作相比,本设计的振荡器具有最小的电路尺寸(文献 [17,36] 是基于半导体工艺的芯片设计,而文献 [15] 为基于自封装悬置线工艺的三维电路结构). 其



(a) 漏极电压固定为 28 V,栅极电压从-3.1 V 变化到-1.7 V



(b) 栅极电压固定为-2.7 V,漏极电压从 20 V 变化到 30 V

图 13 输出功率、效率和振荡频率随不同电压的测试结果

原因在于,在晶体管漏极添加了谐波调谐电路,省去了在振荡回路中的 SIR 滤波器或者 LC 谐振器,减小了电路尺寸.

5 总结

本文提出了一种基于 CRLH 反馈回路的谐波调谐功率振荡器的设计方法. 通过负载网络抑制晶体管输出端的谐波成分,从而简化反馈回路的设计. 在反馈回路中,采用一个 CRLH 单元和相位线控制反馈的幅度和

表 1 本工作的振荡器和其他高效率振荡器的结果对比

对比文献	频率/GHz	输出功率/dBm	效率/%	尺寸($\lambda \times \lambda$)	技术
文献[15]	4.16	4.75	17.6	0.15 × 0.24	扇形谐振器
文献[16]	2.5	24.8	53	—	Class E
文献[17]	24	21	19	1 mm × 1 mm	谐波抑制
文献[22]	2.42	35.1	80.2	1.153 × 0.578	谐波调谐
文献[23]	2.45	37.8	83	0.697 × 1.277	谐波调谐
文献[24]	0.98	38.1	73	—	谐波调谐
文献[25]	2.4	36	73	—	谐波调谐
文献[26]	2.4	53.3	51	0.836 × 0.836	谐波调谐
文献[35]	5.71	38.1	58	1.252 × 1.225	谐波调谐
文献[36]	7.26	1.06	10	2 mm × 1 mm	反馈
本文工作	3.49	39.7	65.5	0.511 × 0.552	谐波调谐

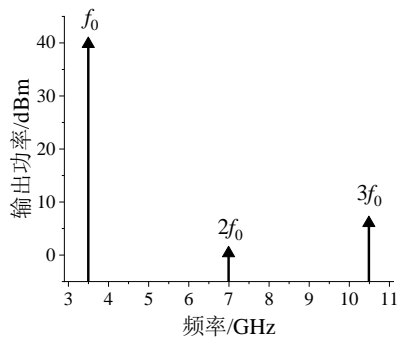


图14 输出功率谱的测试结果

相位. 同时,由于本文提出的方法结构简单,电路尺寸小,在集成电路设计以及高频、高效率应用中很有潜力. 测试结果表明,所设计的功率振荡器在3.49 GHz可以实现39.7 dBm的输出功率和65.5%的效率.

参考文献

- [1] MCSPADDEN J O, MANKINS J C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2002, 3(4): 46-57.
- [2] MCSPADDEN J O, FAN L, CHANG K. High-efficiency ku-band oscillators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1998, 46(10): 1566-1571.
- [3] LEE M Q, YI S J, NAM S, et al. High-efficiency harmonic loaded oscillator with low bias using a nonlinear design approach[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(9): 1670-1679.
- [4] 曹宇, 刘长军, 郑位春, 等. 一种S波段高效谐波调谐功率振荡器设计[J]. *应用科技*, 2023, 50(4): 53-58.
CAO Y, LIU C J, ZHENG W C, et al. Design of an S-band high-efficiency harmonic-tuned power oscillator[J]. *Applied Science and Technology*, 2023, 50(4): 53-58. (in Chinese)
- [5] 曾文谊, 杨浩, 戴志伟. X波段负阻振荡器设计[J]. *电子技术应用*, 2016, 42(8): 60-62, 66.
ZENG W Y, YANG H, DAI Z W. Design of a X-band negative-resistance oscillator[J]. *Application of Electronic Technique*, 2016, 42(8): 60-62, 66. (in Chinese)
- [6] BRYERTON E W, SHIROMA W A, POPOVIC Z B. A 5-GHz high-efficiency class-E oscillator[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1996, 6(12): 441-443.
- [7] JEON S, SUAREZ A, RUTLEDGE D B. Nonlinear design technique for high-power switching-mode oscillators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(10): 3630-3640.
- [8] 程知群, 蔡勇, 刘杰, 等. 新型复合沟道 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 低相位噪声微波单片集成压控振荡器[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(4): 241-245.
CHENG Z Q, CAI Y, LIU J, et al. Novel composite-channel $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$ hemt mmic vco with low phase noise[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4): 241-245. (in Chinese)
- [9] WANG K D, GHIOTTO A, KE W. Harmonic feedback-loop oscillator for pulling effect reduction and improved phase noise[C]//2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014). Piscataway: IEEE, 2014: 1-4.
- [10] PELAEZ-PEREZ A M, WOODINGTON S, FERNANDEZ-BARCIELA M, et al. Large-signal oscillator design procedure utilizing analytical X-parameters closed-form expressions[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(10): 3126-3136.
- [11] LI Z P, ZENG R, LI Z R, et al. Design of low phase noise feedback-type harmonic oscillator using SIW-CMSRR diplexer[C]//2017 47th European Microwave Conference (EuMC). Piscataway: IEEE, 2017: 759-762.
- [12] LEE S H, JUNG K, KIM H S, et al. Frequency-locked RF power oscillator with 43-dBm output power and 58% efficiency[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2021, 29(4): 739-746.
- [13] KIM J S, WU W, LIN J, et al. High-efficiency GaN/Al-GaN HEMT oscillator operating at L-band[C]//2006 Asia-Pacific Microwave Conference. Piscataway: IEEE, 2006: 631-634.
- [14] WANG K D, GHIOTTO A, ZHU F, et al. Large-signal modeling and experimental design automation of self-isolated harmonic oscillator for pulling effect reduction[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(4): 1566-1587.
- [15] ZOU P, MA K X, MOU S X. A low phase noise VCO based on substrate-integrated suspended line technology[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(8): 727-729.
- [16] CHANG H Y, LIN C H, LIU Y C, et al. A 2.5 GHz high efficiency high power low phase noise monolithic microwave power oscillator[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(11): 730-732.
- [17] CHANG H Y, LIN C H, LIU Y C, et al. A K-band high efficiency high power monolithic GaAs power oscillator using class-E network[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(1): 55-57.
- [18] APPERLEY T, NIELSEN J, OKONIEWSKI M. A class E/fodd power oscillator incorporating a distributed active transformer[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(6): 2409-2418.

- [19] LIN C H, LI W P, CHANG H Y. A fully integrated 2.4-GHz 0.5-W high efficiency class-E voltage controlled oscillator in 0.15- μm PHEMT process[C]//Asia-Pacific Microwave Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 864-867.
- [20] WANG Z C. Envelope Tracking Power Amplifiers for Wireless Communications[M]. Norwood: Artech House, 2014.
- [21] SHIN S W, CHOI J J. Frequency-tunable 150 W harmonic-tuned power oscillator[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(6): 1459-1462.
- [22] LEE S, JEON S, JEONG J. Harmonic-tuned high efficiency RF oscillator using GaN HEMTs[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(6): 318-320.
- [23] JEONG J, JANG D. Design technique for harmonic-tuned RF power oscillators for high-efficiency operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 221-228.
- [24] HWANG W J, SHIN S W, CHOI G W, et al. High-efficiency power oscillator using harmonic-tuned matching network[C]//2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Piscataway: IEEE, 2009: 1505-1508.
- [25] REED R, LOHRABI POUR F, HA D S. Design of a multi-tone wireless power transmitter using second harmonic extraction of a voltage-controlled oscillator[C]//2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Piscataway: IEEE, 2021: 894-898.
- [26] IKEDA H, ITOH Y. 2.4-GHz-band high-power and high-efficiency solid-state injection-locked oscillator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(7): 3315-3322.
- [27] 罗敬原, 林亮. 基于谐波控制的高效率反馈振荡器[J]. 无线通信技术, 2022, 31(4): 34-38, 44.
LUO J Y, LIN L. High efficiency feedback oscillator based on harmonic-control[J]. Wireless Communication Technology, 2022, 31(4): 34-38, 44. (in Chinese)
- [28] 李家文, 葛行军, 党方超, 等. 一种基于嵌套结构的锁频锁相功率微波振荡器仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(3): 230344.
LI J W, GE X J, DANG F C, et al. Simulation of high power microwave oscillator with locked frequency and phase based on nested structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(3): 230344. (in Chinese)
- [29] LI X C, CHEN W H, WANG Y F, et al. A 160 GHz high output power and high efficiency power amplifier in a 130-nm SiGe BiCMOS technology[C]//2020 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). Piscataway: IEEE, 2020: 199-202.
- [30] SHU Y Y, CHEN W, QIAN H J, et al. Low-phase-noise high-efficiency power oscillator with digitally controlled output power[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(5): 477-480.
- [31] 张和平, 陈磊. 24 GHz频段高性能压控振荡器的设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32(6): 191-195.
ZHANG H P, CHEN L. Design of high performance voltage-controlled oscillator in 24 GHz frequency band[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(6): 191-195. (in Chinese)
- [32] KIM D, JEON S. W- and G-band GaN voltage-controlled oscillators with high output power and high efficiency[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8): 3908-3916.
- [33] 胡钧铭, 戴强, 刘军, 等. MEMS 电容型器件边缘效应研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 76-82.
HU J M, DAI Q, LIU J, et al. Research on fringing effect of MEMS capacitive devices[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 76-82. (in Chinese)
- [34] 张薇, 吴永乐, 王卫民, 等. 一种新型基于交指电容和微带电感的单层低成本宽带带通滤波器[J]. 电子学报, 2023, 51(6): 1413-1420.
ZHANG W, WU Y L, WANG W M, et al. A novel single-layer low-cost broadband bandpass filter based on interdigital capacitors and microstrip inductors[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(6): 1413-1420. (in Chinese)
- [35] YI Y, JEONG J. C-band high power and high efficiency harmonic-tuned oscillator[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(9): 2281-2285.
- [36] JANG S L, CHANG Y H, LAI W C. A feedback GaN HEMT oscillator[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE, 2018: 1-3.

作者简介



蔡 奇 男, 1991 年出生, 江苏南京人. 现为南京邮电大学通信与信息工程学院讲师. 主要研究方向为射频功率放大器理论与设计、微波毫米波单片集成电路与系统设计.

E-mail: caiqi19910618@njupt.edu.cn