

文章编号: 2095-4980(2023)05-0632-07

一种 S 波段压控振荡器级联的注入锁定

瞿 强^{1,2}, 赵娅琦¹, 刘长军^{*1,2}

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 四川 宜宾 644000)

摘 要: 针对压控振荡器(VCO)阵列注入锁定电路复杂和规模受限问题, 提出一种 S 波段 VCO 阵列级联的新方法。通过在多个 VCO 之间加入耦合网络, 将传统的单级注入改进为级联注入锁定, 并通过网络级联方式实现级联级数的扩展。各级 VCO 之间通过耦合网络实现级联, 首级 VCO 通过信号源参考信号进行锁定, 次级 VCO 耦合前级 VCO 射频输出端信号进行锁定, 每级均通过 VCO 电压调谐端进行注入。注入信号可锁定 VCO 输出频率, 改善每级 VCO 输出相位噪声。通过级间耦合的形式, 实现了一个微波源锁定多个 VCO 的输出。设计加工了 2 种级联注入 VCO 阵列, VCO 的输出频率与注入信号频率相同, 各级 VCO 相噪保持一致, 当源相噪为 -107.28 dBc/Hz 时, 各级 VCO 的输出相噪保持一致, 为 -105 dBc/Hz。该注入锁定方式电路简洁且成本低, 未来有望应用在相控阵中。

关键词: 注入锁定; 级联; 压控振荡器; 相位噪声; 锁定带宽; 注入比

中图分类号: TN752

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022019

Cascading injection locking of S-band Voltage-Controlled Oscillators

QU Qiang^{1,2}, ZHAO Yaqi¹, LIU Changjun^{*1,2}

(1.School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;

2.Yibin Industrial Technology Research Institute of Sichuan University, Yibin Sichuan 644000, China)

Abstract: A cascading injection locked S-band Voltage-Controlled Oscillator(VCO) array is proposed in this paper. It facilitates the VCO array configuration and enhances its scale by using cascading injection-locked method instead of traditional single order injection method. All VCOs are cascaded by coupling network. At the same time, it is easy to increase the stage of cascaded circuits. A reference signal is injected into the first VCO. The second VCO is locked through the signal coupled from the output of the previous VCO. Each reference signal is injected into the VCO through its voltage tuning port. It locks the output frequency and decreases the phase noise. Multiple VCOs are locked by one signal through coupling in between. Two cascading injection-locked VCO arrays are designed, fabricated, and measured. The VCOs output identical frequencies with similar phase noises. The phase noise of each VCO is near to -105 dBc/Hz, when the phase noise of the source is -107.28 dBc/Hz. The injection-locking method is simple and low-cost, which has future applications in phased arrays.

Keywords: injection-locked; cascade; Voltage-Controlled Oscillator; phase noise; locked-bandwidth; injection ratio

注入锁定是在振荡电路中引入一个稳定的外部参考信号, 使振荡电路输出频率稳定的物理现象^[1]。当注入的参考信号功率足够, 参考信号频率与该振荡电路频率相等或互为次谐波、倍频时, 都会出现频率锁定现象^[2-5]。注入锁定电路简单, 在通信及大功率微波源应用中受到广泛关注^[6-11]。注入锁定原理可用于锁相环、倍频器、分频器及放大器等电路^[12-15], 也可用于相干功率合成、波束控制及相控阵等系统^[16-18]。注入锁定振荡器电路在注入锁定方式及对阵列天线进行馈电等方面得到广泛研究^[19-20]。注入锁定 VCO 可以在锁定输出频率后, 调节调谐电压, 控制输出相位。在相控阵中, 是一种简单的新型相控阵馈电方式。但在对阵列天线馈电时, 为一对一注入

收稿日期: 2022-01-12; 修回日期: 2022-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071316)

*通信作者: 刘长军 email:cjliu@scu.edu.cn

方式，即一个微波源和一个压控振荡器(VCO)对应，给阵列天线的扩展带来了极大的不便。

本文提出一种 VCO 级联注入锁定技术，首级 VCO 由外部注入信号锁定输出，其后每级 VCO 的输出信号通过耦合注入下一级 VCO 实现锁定。只需要一个外部信号可以实现多级 VCO 阵列的锁定。通过 VCO 的电压调谐端进行注入，无需环行器，简化了锁定电路。通过 2 级和 6 级 VCO 阵列的注入锁定实验研究，发现各级 VCO 输出相位噪声基本保持不变，电路具有良好的输出特性，有望在相控阵中得到应用。

1 振荡器注入锁定基础

1.1 注入锁定基础

振荡器注入锁定理论最早由 R Alder 在 1946 年提出^[21]。Alder 通过对注入锁定现象的研究，建立了早期振荡器注入锁定的理论模型，得到锁定带宽与振荡器参数关系。振荡器注入锁定带宽 $\Delta\omega_{\max}$ 可以表示为：

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{1}{Q_L} \sqrt{\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}} \omega_0 \quad (1)$$

式中： ω_0 和 P_{out} 分别为振荡器自由振荡频率和输出功率； ω 和 P_{in} 分别为注入信号频率和功率； $\Delta\omega = |\omega_0 - \omega|$ 为注入和自由振荡频率之差，即频率偏离量； Q_L 为振荡器有载品质因数。可见振荡器注入锁定范围与注入信号、振荡器输出功率之比(即注入比)以及振荡器品质因数 Q_L 有关。注入比越高，振荡器锁定频率范围越宽。

1.2 相位噪声

相位噪声是衡量压控振荡器性能的重要指标，是对振荡器输出不确定性的频域描述。振荡器自身及外界噪声都会影响振荡器的相位和幅度。VCO 的相位噪声量化表示为 1 Hz 内单边带噪声功率与载波功率的比值，单位为 dBc/Hz。1966 年，D B Leeson 提出一种经验噪声模型^[22]：

$$L\{\Delta\omega\} = 10\log \left\{ \frac{2FkT}{P_s} \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q_L\Delta\omega} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{\Delta\omega_1}{|\Delta\omega|} \right) \right\} \quad (2)$$

式中： F 为器件的额外噪声系数； k 为玻兹曼常数； T 为绝对温度； P_s 为电路平均功耗； $\Delta\omega$ 为频率偏移量； $\Delta\omega_1$ 为 $1/f^3$ 与 $1/f^2$ 两个区域间的拐点频率，是一个经验拟合值。Lesson 模型基于 LC 谐振电路的线性时不变特性建立，相位噪声与频偏的典型关系如图 1 所示。

在 Lesson 模型基础上，B Razavi 将振荡器看成一个线性负反馈系统，通过传递函数计算振荡器的相位噪声^[23]。1998 年，A Hajimiri 等提出一种线性时变模，能更准确地描述相位噪声^[24]。

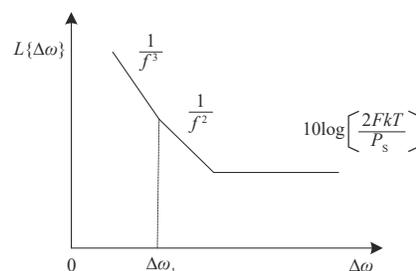


Fig.1 Typical relationship between phase noise and frequency shift

图 1 相位噪声与频率偏移的典型关系

2 VCO 级联注入锁定分析及设计

2.1 VCO 级联注入锁定分析与设计

传统的注入锁定电路通常使用环行器进行注入。如图 2(a)所示，参考信号经过环行器从 VCO 的输出端注入到振荡器中。参考信号也可通过 VCO 的频率调谐端注入，如图 2(b)所示^[19]。该方式相较于传统注入方式，避免引入环行器等外部元件，减少了插入损耗，降低了成本，易于工程应用。

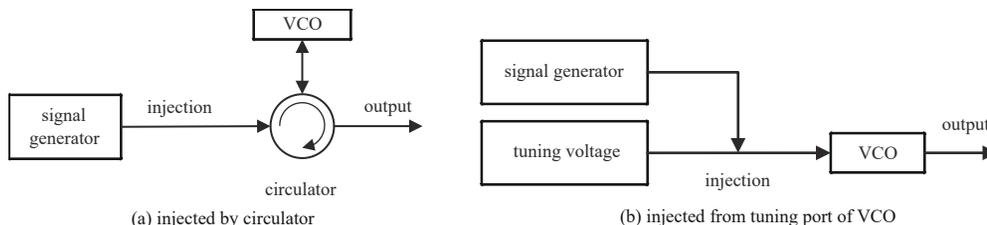


Fig.2 Two types of injection-locking

图 2 注入锁定的 2 种方式

注入锁定压控振荡器的输出频率与注入信号频率一致，两者的相位差可由调谐电压控制。如果将多个压控

振荡器级联, 首级通过外部信号进行注入锁定, 此后每级 VCO 的注入信号通过耦合前级 VCO 的输出信号获得, 可使每级振荡器输出频率一致。在锁定了每级 VCO 的输出频率后, 可调节每级 VCO 的调谐电压, 控制 VCO 的输出相位, 达到相位控制的目的。

VCO 间的耦合方式包括电阻耦合和微带线耦合。在电阻耦合网络中, 根据级联注入锁定注入比计算级间耦合度, 得到相应的 T 型或 π 型电阻网络, 将前级 VCO 输出注入到后级 VCO。在微带线耦合网络中, 使用微带定向耦合器实现对射频功率的分配, 根据耦合度设计耦合线的宽度和间距, 将前级 VCO 的一部分输出功率注入到后级 VCO 中。2 种网络的级间耦合度均由注入功率比确定。

2.2 VCO 级联注入的实现

本文设计了 2 级和 6 级的级联 VCO 阵列, 分别采用电阻耦合和微带线耦合 2 种方式, 进行性能分析和研究。

在 2 级 VCO 级联注入锁定研究中, 压控振荡器芯片为 MVE2400, 电源电压为 5 V, 工作频率为 2 430~2 470 MHz, 调谐灵敏度为 50 MHz/V, 调谐电压为 1.5~2.5 V。振荡器的 U_{CC} 端口及调谐端口分别加入 3 种不同数量级的滤波电容, 在调谐端口加入耦合电容, 级间采用耦合网络进行级联, 级联注入锁定电路原理图如图 3 所示。级联注入锁定电路级间 2 种耦合方式的级间耦合度均为 30 dB, 使用调谐端口的耦合电容实现注入, 第一级 VCO 的输出信号作为耦合网络的输入端, 耦合网络的耦合端输出信号作为下级 VCO 的注入信号, 通过调谐端口的耦合电容进行注入。基于电阻耦合网络和微带线耦合网络的 2 级级联注入锁定 VCO 电路分别如图 4(a)~(b) 所示。

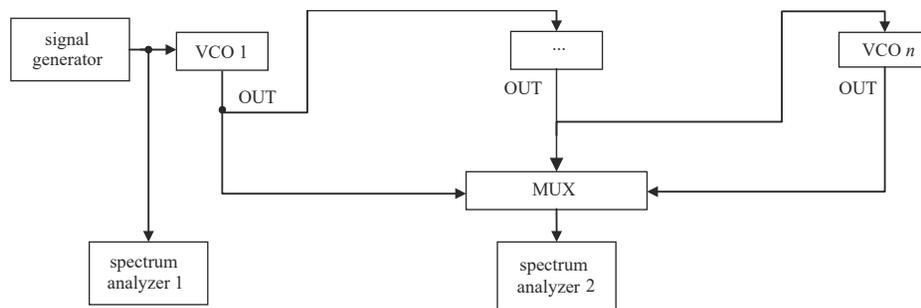


Fig.3 Schematic of cascading injection-locked circuit
图 3 级联注入锁定电路框图

在 6 级 VCO 级联注入锁定研究中, 采取微带耦合网络进行 VCO 级联。6 级级联 VCO 与 2 级级联 VCO 结构相同, 同时为了提高多级 VCO 注入锁定电路的电压调节精确度, 电压调节端接有电阻分压网络。提高微带耦合器的耦合度至 15 dB, 以拓展锁定带宽。6 级注入锁定电路如图 4(c) 所示。每级 VCO 的供电 U_{CC} 都单独控制, 可研究级联数对性能的影响。

3 级联 VCO 注入锁定实验及结果分析

3.1 级联 VCO 测试

在级联测试时, 外部注入信号(Agilent E8267C)通过首级 VCO 调谐端口注入, 首级 VCO 输出信号耦合到次级 VCO 的电压调谐端口。直流源提供 5 V 工作电压及调谐电压, 使用频谱仪(ROHDE&SCHWARZ FSV-40)采集每级 VCO 输出特性, 根据频谱仪自带的直接计算相位噪声功能得到不同频率偏移量处、不同注入功率时的相位噪声。6 级 VCO 级联注入锁定的测试框图如图 5 所示。

3.2 级联测试结果分析

VCO 自由振荡时, 调节调谐电压至 VCO 输出中心频率, 为 2.45 GHz, 单级、2 级和 6 级 VCO 输出分别在 2.45 GHz \pm 0.1 MHz、2.45 GHz \pm 0.15 MHz 和 2.45 GHz \pm 0.4 MHz 范围内抖动。由于频率抖动明显, 不能获得相位噪声。当注入频率为 2.45 GHz 高质量微波信号时, 各级 VCO 的输出频率锁定在 2.45 GHz, 可以获得相位噪声。如表 1 所示, 当耦合网络耦合度为 30 dB 时, 锁定带宽为 0.9 MHz; 耦合度为 15 dB 时, 锁定带宽为 3.7 MHz。随着注入信号频率的变化, 在锁定带宽内, 各级 VCO 输出频率随注入信号频率变化而变化, 改变调谐电压, 不改变 VCO 输出频率。

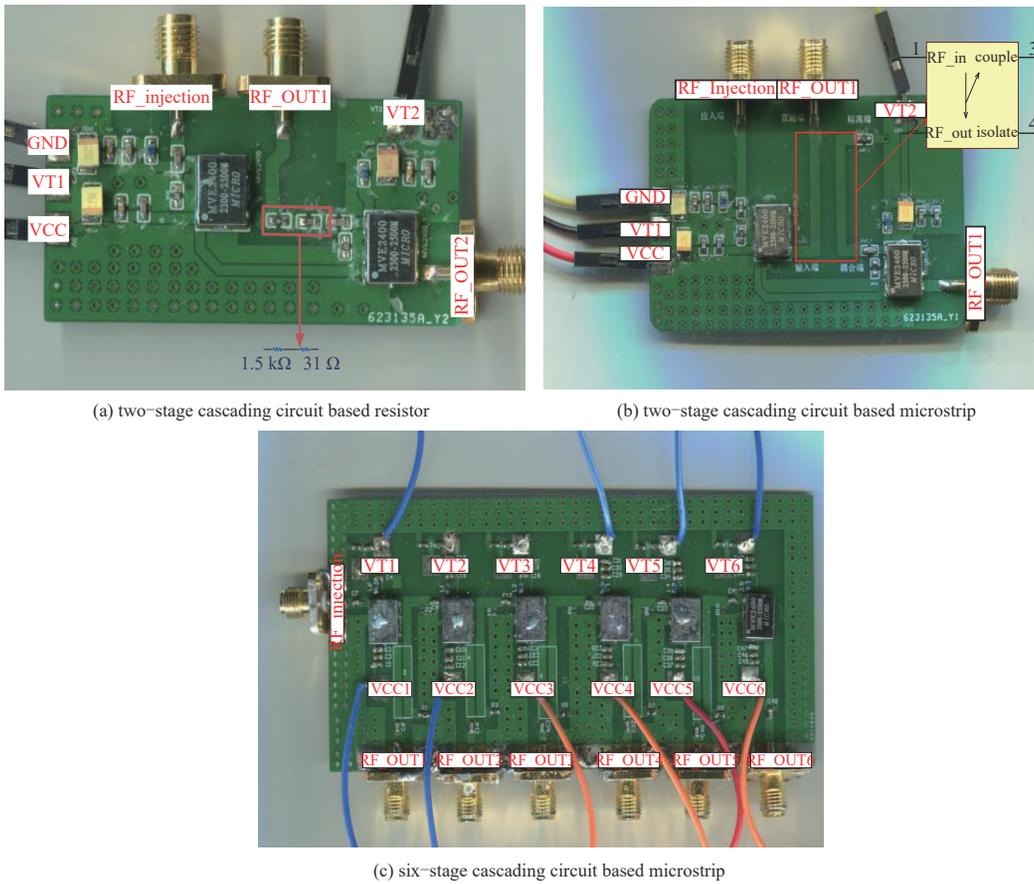


Fig.4 Injection locking of two and six cascading VCOs
图4 2级和6级VCO级联注入锁定

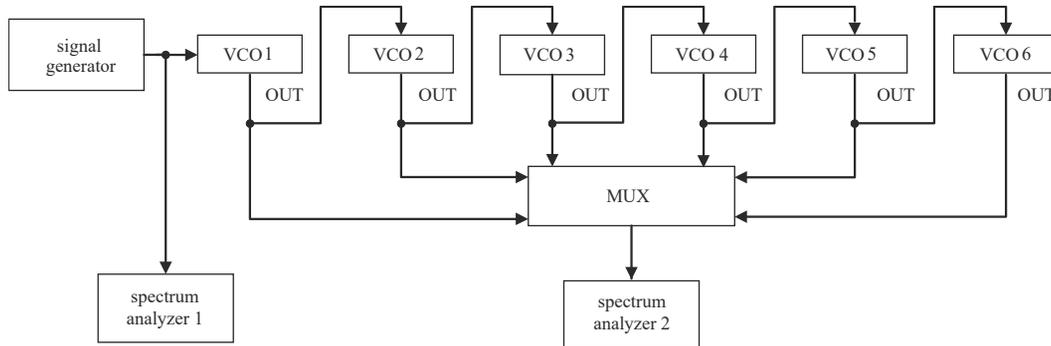


Fig.5 The measurement diagram of cascaded VCOs
图5 级联VCO测试框图

表 1 VCO 锁定特性随注入功率的变化

Table1 Changes in VCO locking characteristics with injection power

injection power of first stage/dBm	coupling/dB			
	30		15	
	the amplitude of tuning voltage/mV	locking bandwidth/MHz	the amplitude of tuning voltage/mV	locking bandwidth/MHz
-10	34	0.7	45	3.1
-5	47	0.8	67	3.4
0	59	0.9	73	3.7

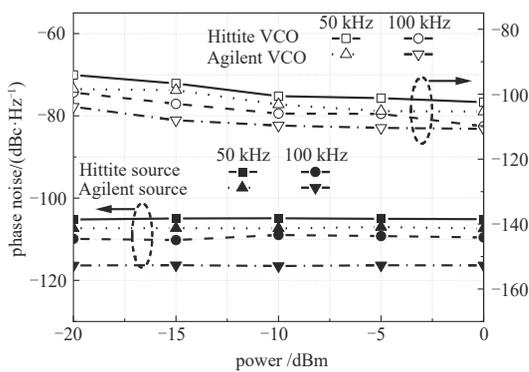
为比较不同质量的信号源对注入锁定 VCO 输出相噪的影响，测试了 2 种不同型号微波源的相噪。如图 6(a) 所示，微波源 Hittite HMC-T2220 在 50 kHz 和 100 kHz 的频率偏移下相噪分别为 -105.16 dBc/Hz 和 -109.70 dBc/Hz，Agilent E8267C 相噪为 -107.28 dBc/Hz 和 -116.32 dBc/Hz。可见 Agilent 微波源的相噪优于 Hittite 微波源的相噪。在相同的注入功率下，不同相位噪声的源对同样的 VCO 电路进行注入锁定时，如表 2 所示，锁定 VCO 的输出相噪都会高于信号源的相噪。如果信号源相噪降低，锁定 VCO 的输出信号相噪也降低。VCO 单级注入锁定，如图 6

(b)所示,随着注入功率的增加,级联VCO的相噪降低。相同的源注入VCO电路时,随着注入功率的增加,VCO的输出相噪降低。图6(b)还对比了电阻耦合网络和平行耦合微带线耦合2种方式,对注入锁定VCO相位噪声基本没有影响。

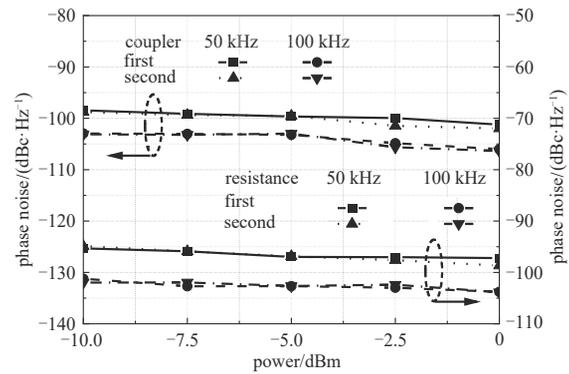
表2 VCO输出相噪

Table2 Output phase noise of VCO

power/dBm	phase noise/(dBc·Hz ⁻¹)			
	Hittite		Agilent	
	@50 kHz	@100 kHz	@50 kHz	@100 kHz
-10	-100.61	-105.97	-103.16	-109.65
-5	-101.21	-106.05	-105.21	-110.37
0	-102.47	-109.91	-105.35	-110.68



(a) the phase noise of source and injected circuit



(b) the phase noise of cascading circuit

Fig 6 The output phase noise

图6 输出相位噪声

在级联VCO的注入锁频中,从2级到6级注入锁频VCO的输出相噪均趋于一致,如图7所示。实验表明随着级联VCO级数的增加,VCO的相噪恶化不明显。

4 结论

本文提出了一种压控振荡器级联注入锁定的技术。通过2级和6级的注入锁定VCO实验,得出结论如下。

1) 该VCO电路在未注入之前中心频率抖动,无法测试出准确的相位噪声,在进行注入锁定后,VCO输出稳定,输出信号频率随注入信号频率变化。随着注入功率的增加,VCO相噪逐渐降低,输出相噪逐渐逼近源的相噪。

2) 级联注入锁定时,各级级联VCO输出频率保持一致,调节VCO电路的级间耦合度可以改变级间的注入比,增大了调谐电压动态范围,增大了级联VCO的锁定带宽。级联注入锁定简化了电路结构,更易于实现。随着级联VCO数量的增加,VCO的相噪恶化不明显,有望在大规模VCO阵列中得到应用。

参考文献:

- [1] RAZAVI B. A study of injection locking and pulling in oscillators[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004,39(9):1415-1424. doi:10.1109/JSSC.2004.831608.
- [2] 宋瑞良,汪春霆. 太赫兹倍频器研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):364-367. (SONG Ruiliang,WANG Chunting. Research development of CMOS terahertz doublers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):364-367.) doi: 10.11805/TKYDA201903.0364.)
- [3] 程一峰,李家林,王秉中. 一种宽带次谐波注入锁定振荡器的研究[C]// 2013年全国微波毫米波会议. 重庆,中国:中国电子学会微波分会, 2013:1338-1341. (CHENG Yifeng,LI Jialin,WANG Bingzhong. A study of a wideband sub-harmonic injection-locked oscillator[C]// 2013 National Microwave Millimeter Wave Conference Proceedings. Chongqing,China: Microwave Branch

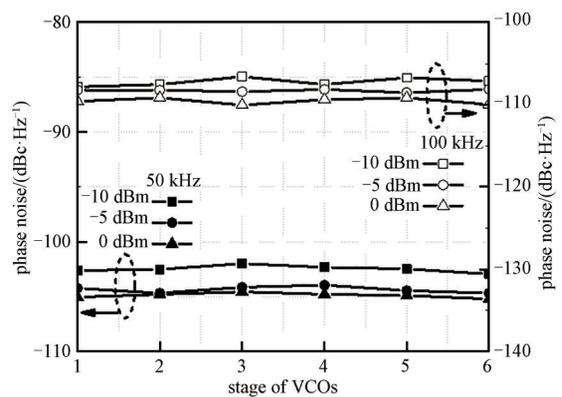


Fig.7 The phase noise of six-cascaded VCO

图7 6级VCO输出相噪

- of the Chinese Electronics Society, 2013:1338–1341.)
- [4] RATEGH H R, LEE T H. Superharmonic injection locked oscillators as low power frequency dividers[C]// Symposium on VLSI Circuits. Honolulu, USA: IEEE, 1998:132–135. doi:10.1109/VLSIC.1998.688031.
- [5] 刘长军, 黄卡玛, 朱铎丞. 射频通信电路设计[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2017:101–104. (LIU Changjun, HUANG Kama, ZHU Huacheng. Radio frequency communication circuit design[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017:101–104.)
- [6] 刘征宇, 霍飞向, 银振宇, 等. S波段15 kW连续波磁控管注入锁频实验研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(3):458–461. (LIU Zhengyu, HUO Feixiang, YIN Zhenyu, et al. Experimental study on the phase-locking of an S band 15 kW continuous wave magnetron[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(3):458–461.) doi:10.11805/TKYDA201503.0458.
- [7] 李济海, 高中杰, 朱铎丞, 等. 基于注入锁频理论的扫频磁控管的理论与仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(4):688–691. (LI Jihai, GAO Zhongjie, ZHU Huacheng, et al. Theoretical and simulation study on sweep frequency magnetron based on injection-locked theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(4):688–691.) doi:10.11805/TKYDA201804.0688.
- [8] 杨梦琳, 刘臻龙, 刘长军. 一种S波段基于注入锁定技术高效的MOSFET大功率微波源[J]. 真空电子技术, 2018(1):42–44, 51. (YANG Menglin, LIU Zhenlong, LIU Changjun. An S-band high power microwave source based on high efficiency injection-locked MOSFET[J]. Vacuum Electronics, 2018(1):42–44, 51.) doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2018.01.08.
- [9] 廖崇蔚, 陈潇杰, 余泽, 等. S波段大功率注入锁频磁控管的输出特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(4):688–691, 696. (LIAO Chongwei, CHEN Xiaojie, YU Ze, et al. Injection frequency locking technology of S-band high power magnetron[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(4):688–691, 696.) doi:10.11805/TKYDA2019512.
- [10] 位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 等. 两路15 kW连续波微波磁控管相干功率合成技术[J]. 应用科技, 2018, 45(2):34–37. (WEI Yu, CHEN Xiaojie, LIU Zhenlong, et al. Synthesis of coherent power of microwave magnetrons based on two-way 15 kW continuous wave[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(2):34–37.) doi:10.11991/yykj.201705005.
- [11] 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. doi:10.1109/TMTT.2018.2836393.
- [12] 刘露, 刘长军. 一种2.45 GHz谐波抑制有源集成天线设计[J]. 应用科技, 2020, 47(4):37–41. (LIU Lu, LIU Changjun. A 2.45 GHz harmonic suppression active integrated antenna[J]. Applied Science and Technology, 2020, 47(4):37–41.) doi:10.11991/yykj.201911008.
- [13] 廉琛. 基于注入锁定技术的锁相环、倍频器和分频器的研究与设计[D]. 上海: 复旦大学, 2012:9–10. (LIAN Chen. Research of PLL, frequency doubler and frequency divider based on injection locking technique[D]. Shanghai, China: Fudan University, 2012:9–10.)
- [14] 刘琨. W波段注入锁定放大器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010:33–60. (LIU Kun. Research on W-band injection locking amplifier[D]. Chengdu, Sichuan, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2010:33–60.)
- [15] 刘帮安. 基于注入锁定的高频倍频器设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014. (LIU Bang'an. Design of high frequency injection-locked frequency multiplier[D]. Hefei, Anhui, China: University of Science and Technology of China, 2014.)
- [16] YANG B, MITANI T, SHINOHARA N. Injection-locked CW magnetron for a wirelessly-powered TV[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan, Korea(South):[s.n.], 2019:1–2. doi:10.1109/IVEC.2019.8745010.
- [17] LO Y T, KIANG J F. Comparison of injection-locked and coupled oscillator arrays for beamforming[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(4):1353–1360. doi:10.1109/TMTT.2015.2403847.
- [18] EBRAHIMI N, BAGHERI M, WU P. An E-band, scalable 2 × 2 phased-array transceiver using high isolation injection locked oscillators in 90 nm SiGe BiCMOS[C]// 2016 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). San Francisco, USA: IEEE, 2016:178–181. doi:10.1109/RFIC.2016.7508280.
- [19] 赵娅琦, 刘长军. 一种VCO电路新型注入锁定方式研究[J]. 应用科技, 2021, 48(3):46–50. (ZHAO Yaqi, LIU Changjun. Study on a novel injection locking method of VCO circuit[J]. Applied Science and Technology, 2021, 48(3):46–50.)
- [20] HAO Y, WANG L C, DU Q L, et al. Phased array based on injection-locking technology[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(602–605):3060–3063. doi:10.4028/AMM.602–605.3060.
- [21] ADLER R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. Proceedings of the IRE, 1946, 34(6): 351–357. doi:10.1109/JRPROC.1946.229930.
- [22] LEESON D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2):329–330.
- [23] RAZAVI B. Analysis, modeling, and simulation of phase noise in monolithic voltage-controlled oscillators[C]// Proceedings of the IEEE 1995 Custom Integrated Circuits Conference. Santa Clara, CA, USA: IEEE, 1995: 323–326. doi:10.1109/CICC.

1995.518195.

- [24] HAJIMIRI A,LIMOTYRAKIS S,LEE T H. Phase noise in multi-gigahertz CMOS ring oscillators[C]// Proceedings of the IEEE 1998 Custom Integrated Circuits Conference. Santa Clara,CA,USA:IEEE, 1998:49–52. doi:10.1109/CICC. 1998.694905.

作者简介:

瞿 强(1995–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为注入锁频 .email:quqiang@stu.scu.edu.cn.

刘长军(1973–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波系统.

赵娅琦(1995–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为注入锁频.

(上接第612页)

- [7] PAN W,PEI T, LIU Y. BDS/GPS fast satellite selection algorithm[C]// Chinese Automation Congress(CAC). Jinan,China:IEEE, 2017:3875–3890. doi:10.1109/CAC.2017.8243456.
- [8] PORTILLO D I,CAMERON B G,CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019(159):123–135.

作者简介:

郭志恒(1997–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信 .email:guozhh7@mail2.sysu.edu.cn.

宋瑞良(1980–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹通信系统及射频链路.

刘 允(1983–), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 5G 及 5G 非地面网络通信技术.

陈 翔(1980–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线与移动通信、卫星通信、物联网.

聂俊楠(1993–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信.