

文章编号: 2095-4980(2019)03-0364-04

太赫兹倍频器研究进展

宋瑞良, 汪春霆

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 北京 100070)

摘要: 太赫兹 CMOS 电路具有小型化、与大规模硅基工艺兼容的特点, 非常适合未来太赫兹通信以及 5G 通信的应用。本文以太赫兹 CMOS 本振电路为切入点, 调研了国际和国内的最新 CMOS 倍频器电路结构, 在此基础上, 对推推(push-push)倍频器、注入锁定倍频器以及混频倍频器的电路结构和特点进行了详细介绍。通过对以上几种倍频器的分析对比, 总结了不同的倍频器在实际应用中的优缺点, 为太赫兹射频前端小型化实际应用奠定基础。

关键词: 太赫兹; 倍频器; 注入锁定

中图分类号: TN771

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0364

Research development of CMOS terahertz doublers

SONG Ruiliang, WANG Chunting

(The 54th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100070, China)

Abstract: Terahertz CMOS circuits are much proper for THz communication and 5G communications application because of its small-size and compatibility with large scale silicon technology. Starting from THz CMOS doublers circuits, the state of the art of CMOS frequency multiplier circuit structures are investigated. The features and structures of push-push, injection locking and mixing doublers are introduced in detail. Through the analysis and comparison of above frequency multipliers, the advantages and disadvantages of different frequency multipliers in practical applications are summarized, which would lay a foundation for the small-size THz RF front-end in the future.

Keywords: terahertz; doubler; injection locking

太赫兹频段(0.1~10 THz)通信和雷达电路中, 产生稳定太赫兹本振信号是电路设计的难点和重点之一^[1-2]。目前, 国际和国内常规采用的基于毫米波倍频链的模块技术已较为成熟, 但在实际应用中受限于体积和功耗, 尚未达到目前 Wi-Fi(Wireless-Fidelity)等室内小型化应用的要求^[1]。随着 CMOS 工艺的发展, 器件尺寸越来越小, 硅基 CMOS 工艺也逐渐显现出它在太赫兹频段的应用潜力。但随着频率提高, 电路器件的性能会急剧恶化。首先, 当有源器件的工作频率高于截止频率的一半甚至接近截止频率时, 器件的增益会急剧降低, 难以为振荡器提供足够的环路增益。其次, 有源器件的寄生效应在高频条件下无法忽略, 这些引入的寄生会恶化振荡器的性能并限制振荡器的工作频率。第三, 无源器件的品质因子等性能也会随着工作频率的提高迅速恶化, 为振荡器带来更大的损耗, 并限制振荡器的调节范围。上述这些问题都为太赫兹频段的本振信号电路的实现增加了难度。为了减轻本振信号设计的压力, 在太赫兹频段往往使用倍频技术, 将基频信号倍频, 最终可以实现接近或高于器件截止频率的本振信号输出, 使振荡器能够振荡在较低的频率, 实现更好的性能^[3]。本文将重点介绍 3 种 CMOS 倍频器的电路结构和特点。

1 推推(push-push)倍频器

1.1 推推(push-push)倍频器的基本原理

push-push 结构是倍频器常用的结构之一^[4-5], 该结构的压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)具有很好的相位噪声性能。文献[4]中采用 push-push 技术, 利用 0.13 μm CMOS 工艺实现了 192 GHz 的本振输

出，基本电路图如图 1 所示。图 1 中 M_1, M_2, L_1, L_2 、变容管等，构成了一个 LC 振荡器，其中交叉耦合对管 M_1, M_2 为电路提供负阻。振荡器产生基频为 96 GHz 的振荡信号。振荡信号从电感 L_1, L_2 的共模节点取出来，振荡信号中的 96 GHz 基频信号为差分信号，在共模节点处彼此抵消，二次谐波信号为同向信号，在共模节点处叠加，得到基频信号的二倍频输出信号。

基于同样的原理，后续大量的工作实现了更好的性能。如文献[6]采用 65 nm CMOS 工艺，实现了 159.2~168.8 GHz 的压控振荡器，输出功率达到了 1 dBm。得益于 SiGe 工艺优秀的高频性能，文献[7]采用 130 nm SiGe BiCMOS 工艺，实现了 305~327 GHz 的压控振荡器，输出功率可以达到 0.2 dBm。

1.2 高阶 push 技术

为了获得更高的输出频率，同时也为了进一步缓解基频振荡器的工作频率要求带来的压力和设计难度，高阶 push 技术的研究也有所开展。

采用三级环形振荡器，可以得到 3 路相位差为 120°的基频振荡信号。如图 2 所示，3 路信号在电感的公共节点被提取出来，与 push-push 类似，三次谐波信号完成叠加，实现三倍频输出^[8]。SiGe BiCMOS 工艺也有类似原理的研究并得到了较为广泛的应用^[9]。同理，也可以获得四次、五次等更高次谐波的输出信号。

对于振荡器产生的振荡信号各次分量，一个正常工作的振荡器，它的主要工作频率是它的基频分量，即二次谐波、三次谐波甚至更高次谐波分量占总的输出功率的比例很小。根据上文中提到的 push-push 甚至高阶 push 振荡器的基本原理，占有最大比例的基频分量在共模节点上被抵消，最终取得的是振荡信号占比很小的高次谐波分量。因而，高阶 push 技术固然可以通过获取更高次谐波信号提高输出信号的幅度，但却是以降低振荡器工作效率、浪费振荡器电路功耗、减小信号的输出功率为代价换取的。随着提取谐波阶数的提高，得到的信号幅度将会越来越低^[10]。由于输出信号已经接近甚至高于器件的截止频率，对如此高频的输出信号进行进一步放大更加困难。因此，出于对输出功率的要求，更多使用的是 push-push 或三阶 push 的方法，对于更高阶数的 push 技术则不太常见。

2 注入锁定倍频器

注入锁定的基本原理在文献[11-12]中已经被详细论述。图 3(a)是一个 LC 振荡器的概念示意图，忽略掉所有寄生效应，谐振腔的谐振频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ ，理想的反向缓冲器为回路提供 360°的相移。

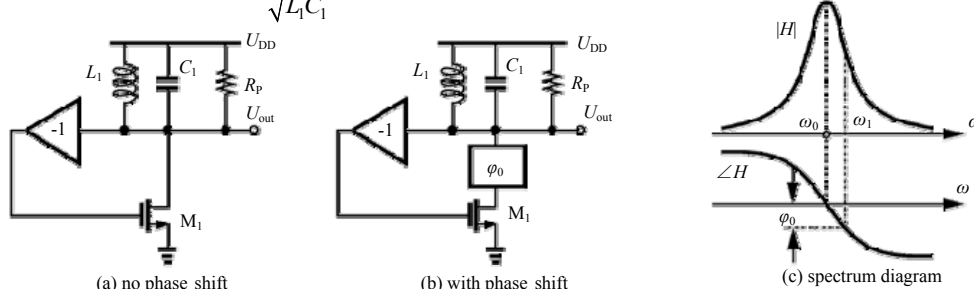


Fig.3 Fundamentals of injection-locking
图 3 注入锁定基本原理^[11]

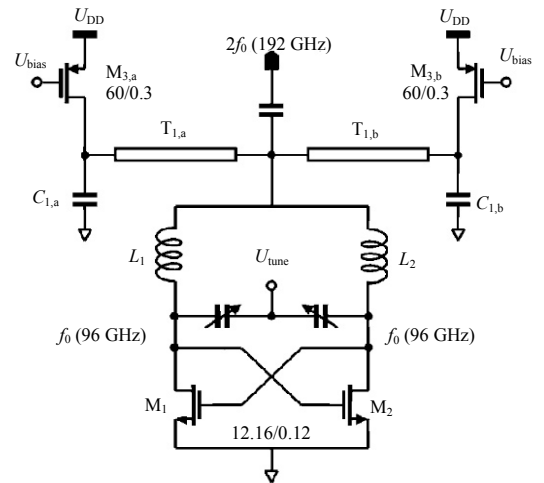


Fig.1 Schematic of 192 GHz push-push VCO based on 0.13 μm CMOS
图 1 基于 0.13 μm CMOS 工艺的 192 GHz 推推压控振荡器^[4]

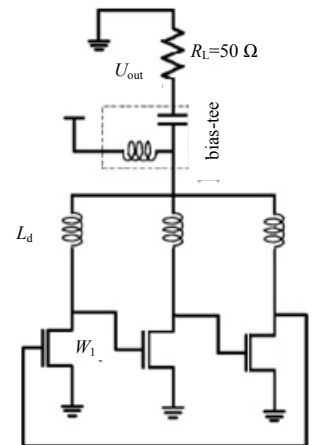


Fig.2 Circuit schematic of third order push oscillator
图 2 三阶 push 振荡器的电路原理图

此时如果给电路增加一个额外的相移 φ_0 ，如图 3(b)所示，额外的相移会使原来的振荡器在 ω_0 的频率下，环路相移不再是 360° ，因此无法在 ω_0 的频率下起振。为了达到新的平衡，使环路重新回到 360° 的相移条件，谐振腔要贡献出 $-\varphi_0$ 的相移，此时振荡器的振荡频率则变为了 ω_1 。

在 M_1 的漏端添加一个正弦电流 I_{inj} ，电流的振荡频率为 ω_{inj} ，如果这个电流的幅度和频率选择一个合适的值，这个频率就会给原来的振荡器增加一个 φ_0 的相移，那么振荡器就会在 ω_{inj} 频率振荡而不是自由振荡频率 ω_0 ，即发生了注入锁定。与 push-push 倍频器不同，注入锁定技术只在输出振荡器自由振荡频率附近才能够发生注入锁定现象，因此这类倍频器的设计过程中所要关注的一个重要指标就是注入锁定范围。可以通过提高注入效率、降低输出振荡器谐振腔的 Q 值等方式增加注入锁定范围。

基于上述原理，可以通过注入锁定的方式，使振荡器能够输出高频信号，并且具有较大的输出功率和噪声性能。在毫米波频段内，注入锁定倍频器技术可用于产生三倍频正交差分信号，设计难度较大，但是优秀的电路性能使其在毫米波段得到一定的应用和报道^[13]。根据注入锁定的原理，想要产生一个三倍频的输出信号，需要设计一个能够在输出频率附近工作的振荡器。这在太赫兹波段仍是一个很大的挑战，因此该项技术暂时还没有超过 100 GHz 的应用报道。但是，III-V 族工艺的高频性能已经能使器件的截止频率提高到太赫兹频段，并且随着 CMOS 工艺的不断发展，更先进的 CMOS 器件或可满足设计的要求，因此，采用注入锁定实现倍频功能，且可以得到高匹配性的正交信号，或将在太赫兹频段得到应用。

3 混频倍频器

混频器具有将信号频率求和输出的上混频功能，若混频器的 2 路输入信号均为振荡器的振荡信号，则混频器可以实现振荡信号的二倍频功能^[14-15]。图 4 为采用 130 nm SiGe BiCMOS 工艺实现的基于吉尔伯特单元的倍频器。差分输入信号分别从基尔伯特单元的 $T_2 \sim T_3$ 、 $T_4 \sim T_7$ 注入，吉尔伯特单元相当于一个四象限乘法器，其中 2 个输入由共同的信号源驱动。输出信号可以实现输入信号二倍频的功能。

为了实现倍频器的最大输出功率，输入信号功率会提高，但随着驱动倍频器的本振信号源输出功率逐渐增加，倍频器的性能会偏离小信号模型，倍频效果会有所变化。基于这种大信号操作，吉尔伯特单元在其负输出和正输出之间会出现幅度失配。吉尔伯特单元输出端的共基极放大器，除了提供信号放大功能外，也能部分弥补如上所述的幅度失配现象。文献[16]也采用了自混频的方式实现倍频功能，如图 5 所示。从图中可以看到，振荡器产生的振荡信号从电感的共模节点取出，push-push 产生的二次谐波与振荡器的基频信号通过混频器进行上混频操作，混频器输出为 2 路信号的和频信号，即对基频信号实现了三倍频输出。

振荡器可以通过调整交叉耦合对管的偏置电压，调整振荡器工作在 C 类状态，以得到更大比例的二次谐波信号，提高混频器 IF 端输入的信号幅度。为了实现好的噪声性能，这里的混频器采用无源混频器实现。

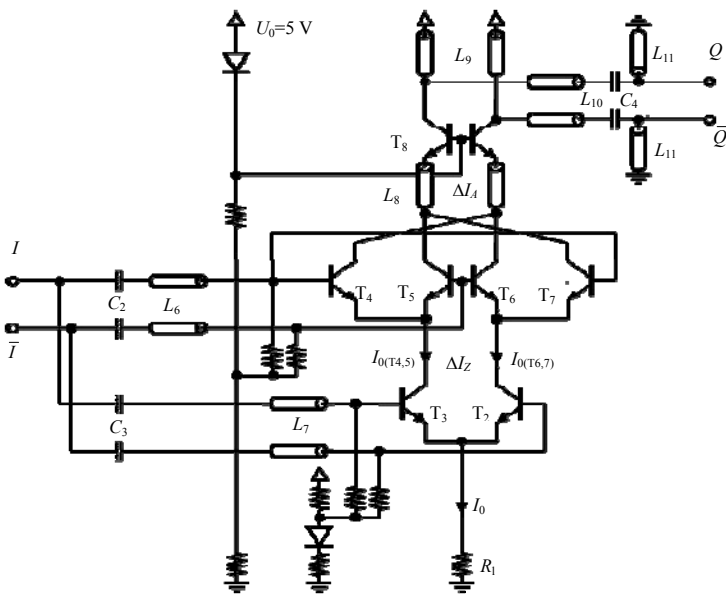


Fig.4 Mixing frequency multiplier based on Gilbert unit
图 4 基于吉尔伯特单元的混频倍频器^[15]

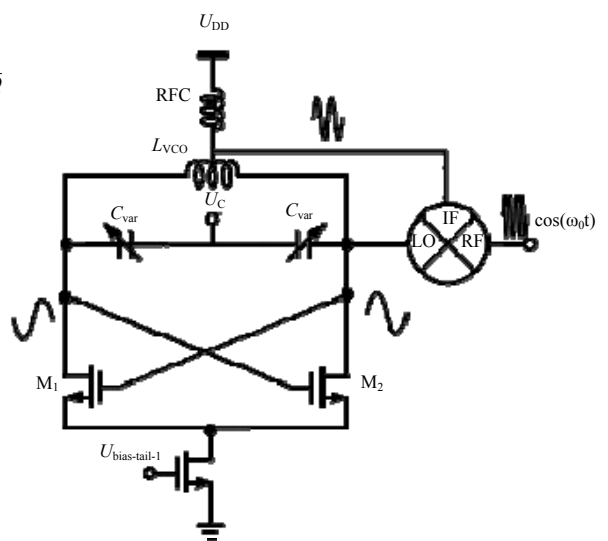


Fig.5 Multiplier realized by push-push and self-mixing
图 5 采用 push-push 与自混频实现的倍频器^[16]

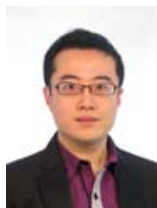
4 结论

通过上述比较与分析,不同类型的 CMOS 倍频器具有不同的特点,对于太赫兹应用应充分考虑电路性能指标、设计复杂度、工艺类型以及成本,才能获得最优化的设计方案。

参考文献:

- [1] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming,YU Jianjun. Terahertz communication system:present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931-937.)
- [2] 何月,黄昆,缪丽,等. 250 GHz 太赫兹谐波混频器设计[J]. 微波学报, 2015(s1):69-72. (HE Yue,HUANG Kun,MIAO Li, et al. Design of 250 GHz sub-harmonic mixer[J]. Journal of Microwave, 2015(s1):69-72.)
- [3] 张勇,卢秋全,刘伟,等. 基于肖特基势垒二极管三维电磁模型的 220 GHz 三倍频器[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(4):405-411. (ZHANG Yong,LU Qiuquan,LIU Wei,et al. Design of a 220 GHz frequency tripler based on EM model of Schottky diodes[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014,33(4):405-411.)
- [4] CAO C,SEOK E,O KENNETH K. 192 GHz push-push VCO in 0.13 μm CMOS[J]. Electronics Letters, 2006,42(4):208-210.
- [5] HUANG P C,LIU R C,CHANG H Y,et al. A 131 GHz push-push VCO in 90-nm CMOS technology[C]// 2005 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits(RFIC) Symposium. Long Beach,CA,USA:IEEE, 2005:613-616.
- [6] KHAMAISI B,SOCHER E. A 159-169 GHz frequency source with 1.26 mW peak output power in 65 nm CMOS[C]// 2013 European Microwave Conference. Nuremberg,Germany:IEEE, 2013:1507-1510.
- [7] AHMED F,FURQAN M,HEINEMANN B,et al. 0.3-THz SiGe-based high-efficiency push-push VCOs with >1-mW peak output power employing common-mode impedance enhancement[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(3):1384-1398.
- [8] MOMENI O,AFSHARI E. High power terahertz and millimeter-wave oscillator design: a systematic approach[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011,46(3):583-597.
- [9] GRZYB J,HEINEMANN B,PFEIFFER U R. Solid-state terahertz superresolution imaging device in 130-nm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(11):4357-4372.
- [10] HUANG D,LAROCCA T R,CHANG M C F,et al. Terahertz CMOS frequency generator using linear superposition technique[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008,43(12):2730-2738.
- [11] RAZAVI B. A study of injection locking and pulling in oscillators[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004,39(9): 1415-1424.
- [12] CHEN M C,WU C Y. Design and analysis of CMOS subharmonic injection-locked frequency triplers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008,56(8):1869-1878.
- [13] CHAN W L,LONG J R. A 56-65 GHz injection-locked frequency tripler with quadrature outputs in 90-nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008,43(12):2739-2746.
- [14] FORSTNER H P,STARZER F,HAIDER G,et al. Frequency quadruplers for a 77 GHz subharmonically pumped automotive radar transceiver in SiGe[C]// 2009 European Microwave Integrated Circuits Conference. Rome,Italy:IEEE, 2009:188-191.
- [15] BREDENDIEK C,POHL N,AUFINGER K,et al. Differential signal source chips at 150 GHz and 220 GHz in SiGe bipolar technologies based on Gilbert-cell frequency doublers[C]// IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. Portland,OR,USA:IEEE, 2012:1-4.
- [16] SHIRAZI A H M,NIKPAIK A,MOLAVI R,et al. On the design of mm-wave self-mixing-VCO architecture for high tuning-range and low phase noise[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016,51(5):1210-1222.

作者简介:



宋瑞良(1980-),男,天津市人,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,email:songruiliang@hotmail.com.

汪春霆(1965-),男,江西省进贤县人,博士,研究员,主要研究方向为通信卫星及太赫兹通信.