

谐波注入锁定振荡器的定性研究与实验验证

Qualitative Study and Experimental Verification of a Harmonic Injection-Locked Oscillator

作者：李家林、程一峰、王秉中，电子科技大学；
王建朋，南京理工大学；高山山，成都大学

注入锁定振荡器的优点在于高速（高工作频率）、拓扑简单、低功耗。研究表明：钟摆同步理论也适用于注入锁定谐波振荡器的工作机制，且能揭示这类振荡器的工作特性。本文采用基本振荡频率约为 $f_0=3\text{GHz}$ 的振荡器，将频率为 27GHz 也就是 nf_0 （其中 n 为整数）的信号注入（即谐波注入），对该理论进行了验证。

注入锁定的实质是一种同步现象，该现象广泛存在于自然界中。这种现象最早由匈牙利物理学家克里斯蒂安·惠更斯发现，当几个具有确定周期性关系的相似物理过程靠得足够近时最终会进入同步状态。这种现象也可从两个靠得很近的钟摆运动中观察到。而在谐波注入锁定振荡器中也存在类似的现象。

钟摆同步理论

当两个悬挂于墙上的相同钟摆相距较远时，其摆动情况相互独立，即一个钟摆的工作状态与另一个钟摆的工作状态无关。然而，当把两个钟摆得足够近时，一个钟摆的运动将会受到另一个钟摆的影响而跟随其摆动，进而最终实现同步运动。

图1所示为悬挂于墙A上的两个相距很近的钟摆，虚线表示了钟摆摆动的区域。该图存在两种可能的同步状态，一种是当钟摆 L_1 运动至左侧最高点 B_1 时，钟摆 L_2 运动至 B_2 ，相应地当 L_1 运动至 C_1 时 L_2 运动至 C_2 。另一种同步状态是当钟摆 L_1 运动至 C_1 时， L_2 运动至 B_2 ，相应地 L_1 运动至 B_1 时 L_2 运动至

C_2 ，这种同步状态称为反同步。我们使用第一种同步状态来分析系统从非同步状态转换到同步状态的过程。

假设系统工作在非同步状态，即 L_1 运动至 B_1 点时， L_2 还未运动至点 B_2 而是处于接近 B_2 的位置。此时， L_1 对 L_2 没有力的作用，而 L_2 将继续相对 A 向左侧运动，产生一个向左的力 (F_{left})。接下来当 L_1 开始向右运动时，其运动将受到 F_{left} 的阻碍导致 L_1 减速至接近 L_2 的运动速度。随着时间的推移，两个钟摆将达到相同的运动速度，即到达同步状态。

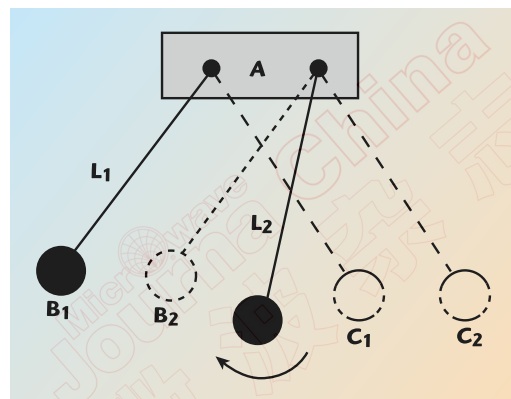


图1. 两个钟摆趋于同步。

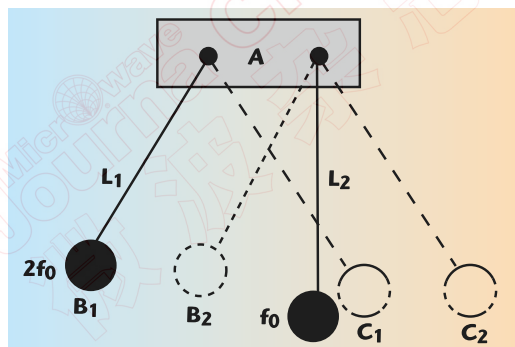


图 2. 不同频率钟摆的同步。

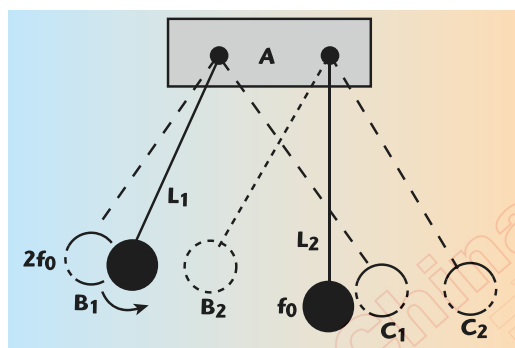


图 3. 不同的钟摆趋于同步。

我们称这种使两者同步的力为趋同力，反之，称阻碍两者同步的力为反同力。这两种力同时存在，但是趋同力的作用要远远大于反同力。一般来说，不同的非同步状态其趋同力与反同力的组成不同，越接近同步状态的非同步状态中趋同力的作用效果比反同力的作用效果优势越明显，从而进一步使系统更稳定。远离同步的系统是不稳定的，且其状态会随着时间缓慢变化，在该过程中，趋同力将逐渐占主导。一个不稳定的系统状态将

最终收敛于一个稳定的系统状态，这是一个普遍规律。

接下来，假设两个钟摆中摆动周期（频率）为 $n \cdot f_0$ （其中 n 为整数）的钟摆是稳定的，其工作状态不随周围环境变化而变化，而另一个摆动频率为 f_0 的钟摆处于自由摆动状态，即该钟摆的摆动状态会受到该钟摆系统中的趋同力和反同力的影响。

以 $n=2$ 为例（如图 2 所示）， L_1 摆动频率是稳定的 $2f_0$ ，而 L_2 处于自由摆动状态，摆动频率约为 f_0 ，当 L_1 摆动两个周期正好对应 L_2 摆动一个周期时，该双摆系统则进入同步状态。假设 L_2 到达其最低点并开始向左摆动，在 L_1 摆动一个周期后， L_1 运动至 C_1 点而 L_2 运动至 B_2 点。而 L_1 再摆动两个周期后， L_2 运动至 C_2 。这意味着两个钟摆同时达到各自最高点（ L_1 的 B_1 或 C_1 以及 L_2 的 B_2 或 C_2 ）。一般情况下，不同的钟摆在趋同力作用下都能达到同步状态。

取如图 3 所示的状态进行分析，其中钟摆 L_1 是稳定摆动的。 L_1 已经通过 B_1 并向右摆动，而 L_2 则刚位于最低点并向右运动，即 L_2 的摆动频

率略低于 f_0 。由于钟摆 L_1 是稳定摆动的，存在向右的趋同力（ F_{right} ）使 L_2 的摆动速度加快，使得 L_2 的摆动频率趋近并最后等于 f_0 。

处于同步状态的系统具有一定的抗干扰能力。在图 2 中所达到的稳定状态基础上，假设通过改变促成 L_2 摆动的内力来加快 L_2 的摆动，即给 L_2 一个微小的力 ΔF ，则会产生相应的频率变化 Δf ，而由于趋同力的作用，系统将进入一种新的同步状态。但是，当 Δf 增大到一定程度后，即趋同力不足以克服促使两个钟摆摆动的内力而达到同步时，系统就会脱离同步状态。使系统尚未脱离同步状态的最大 Δf 称为同步带宽。

钟摆同步的机制也适用于振荡频率和注入频率分别为 f_0 和 $n f_0$ 的谐波注入锁定振荡器中，此时假设注入信号频率 $n f_0$ 为稳定的，而振荡器自由振荡频率为 f_0 。处于自由振荡状态的射频振荡器的工作状态对内部和外部影响因素很敏感，例如电路非线性、直流偏置的变化、振动和环境温度波动的影响等。当给该系统输入一个频率为 $n f_0$ 的稳定信号时，外部因素的影响将减弱。我们也可以将其分为趋同力和反同力。

与钟摆工作原理一致，在谐波注入锁定后的振荡器中，当系统引入了一个微小频率变化 Δf 时，输出频率同样会成比例地改变，最大的 Δf 称为系统的锁定带宽。影响锁定带宽的因素有注入信号功率以及自由振荡频率与锁定频率之间的关系等。

实验验证

本文所设计的演

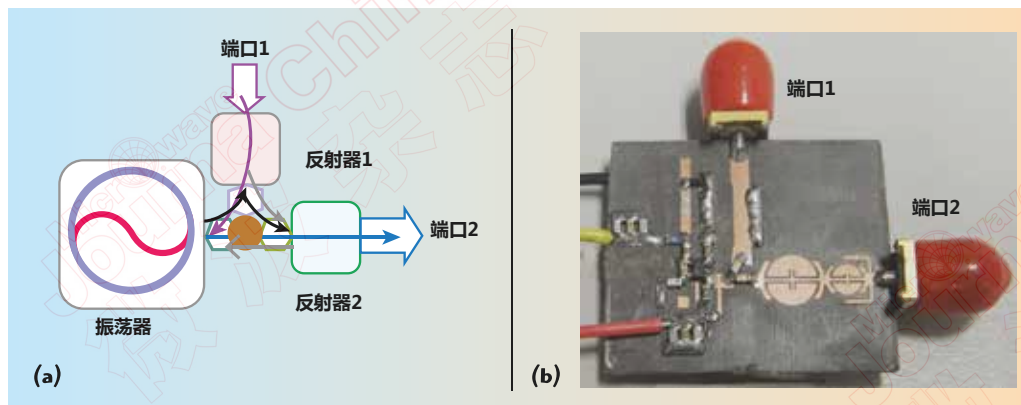


图 4. 注入锁定振荡器原理图和实物照片。

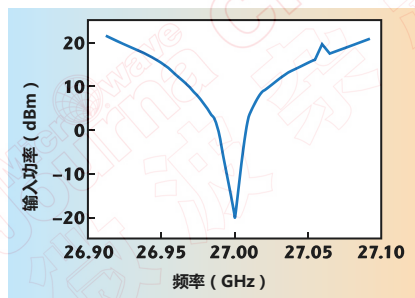


图 5. 实验结果 (注入系数 $n=9$)

示系统为一个二端口网络, 端口 1 为输入, 端口 2 为输出 (如图 4a 所示), 其中引入了两个反射器以改善性能。反射器 1 用于抑制振荡器输出频谱中的 n 次谐波分量, 而反射器 2 则用于输入信号与谐波分量的隔离。图 4b 为振荡器演示电路的实物图, 所设计的振荡器自由振荡频率为 3GHz, 而注入信号频率为 $f_{in} = 27\text{GHz}$ (对应 $n = 9$), 功率为 $P_{in} = -20\text{dBm}$ 。

研究发现在一定频率范围内输出信号可以稳定地锁定, 即输出频率会随着系数为 n 的输入信号频率的变化而动态变化。同时, 系统存在一个截止频率以确定锁定状态的边界。注入信号的功率是影响锁定状态的重要因

素, 在一定条件下, 输入功率越大, 锁定状态也越稳定。谐波阶数 n 也是影响锁定状态的重要因素, 谐波阶数不同, 锁定范围也不同。

与钟摆同步理论类似, 维持谐波注入锁定振荡器的锁定状态也是趋同力和反同力相互作用的结果。对于一个已经处于注入锁定状态的系统而言, 趋同力起主导作用, 然而, 主导状态并不是固定的。影响趋同力作用效果的两个重要因素为: 注入信号的频率以及自由振荡频率与锁定频率之间的关系。输入功率影响锁定效果, 功率越大收敛力越强, 越容易锁定, 然而输入功率过强会破坏锁定状态。另一方面, 谐波阶数 n 与电路非线性度有关, 这个内部因素与外部因素如输入功率等相互作用, 最终将获得不同的结果。

结论

在钟摆的同步工作原理基础上, 本文讨论了注入锁定谐波振荡器, 并从实验角度进行了论证。实验结果显

示了影响注入锁定效果的两个因素: 一是输入信号的功率, 在一定范围内, 输入功率越大, 系统的锁定效果越好; 二是输入信号与自由振荡信号之间的频率关系, 不同的系数 n 对应不同的锁定范围。■

致谢

本文工作得到以下项目的资助: 2012 年度电子科技大学本科创新基金、国家自然科学基金 (61271025)、总装预研基金 (9140C070403150C07003) 以及教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-12-0094)。

参考文献

1. B. Razavi, "A Study of Injection Pulling and Locking in Oscillators," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 39, No. 9, September 2004, pp. 1415-1424.
2. H. S. Lee, W. S. Yoon, S. M. Han, D. M. In, S. Pyo and Y. S. Kim, "A Third-Order Subharmonic Injection Locked Oscillator with Wide Locking Range and Low Phase Noise," Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, December 2010, pp.504-507

RF Synthesizers 信号源

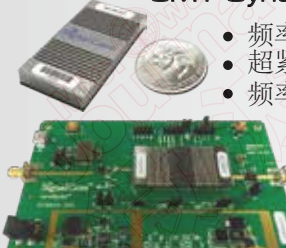


- 频率高达 20 GHz
- USB、SPI、RS-232、PXIe 接口
- 提供完整的使用指南和 GUI

nanoSynth™ 合成器模块

SMT Synthesizer Module

- 频率 25 MHz 至 6 GHz
- 超紧凑 2 x 1 英寸占位面积
- 频率列表模式



高性能
低相位噪声
成本效益
RF 解决方案

Frequency Converters 变频器



- 频率高达 X 波段
- 1Hz 调谐分辨率
- USB、SPI、RS-232、PXIe 接口

IQ Transceiver Set 收发器集



- 频率高达 6 GHz
- DC 至 160 MHz 基带
- 紧凑的尺寸



www.signalcore.com sales@signalcore.com

See us at EDI CON China 419