

# 一种新型高性能微波振荡器——光电振荡器

潘时龙 张方正

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 江苏省 210016)

**摘要:** 文章主要介绍一种基于微波光子技术的新型微波振荡器——光电振荡器。光电振荡器采用低损耗的长光纤或高 Q 光谐振器作为储能单元, 可产生数 MHz 至上百 GHz 的微波或毫米波信号, 产生信号的相位噪声低至  $-163\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$ , 并具有光电两种输出, 是一种非常理想的高性能微波振荡器。文章阐述了光电振荡器的工作原理和特性, 评述并讨论了光电振荡器的发展现状及实用化的难点, 展望了光电振荡器可能的发展趋势。

**关键词:** 光电振荡器; 微波光子学; 相位噪声; 宽带调谐; 频率稳定性

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1006-3315(2015)04-003-003

## 一、引言

振荡器(Oscillator)是一种将连续的直流信号转换为周期性模拟信号(通常是正弦波或方波)的装置。光电振荡器是电子技术中应用非常广泛的器件之一, 已被应用于广播通讯、雷达、导航、电子测量、电子对抗等工业生产以及日常生活的方方面面, 例如振荡器可以为无线电发射机提供其工作频段的载波信号; 为超外差接收机提供本地振荡信号; 在高速数字通信系统和各种电子测量设备中作为频率(或时间)基准信号; 为分布式系统提供参考源等。

一般来说, 微波振荡器产生微波信号的质量决定于振荡腔的储能性能。要产生高质量的微波信号, 必须要有高 Q 值和低损耗的储能单元。当前的微波振荡器大多基于电子学(如电介质振荡器)和声学(如晶体振荡器)储能元件。这些元件在 GHz 以上频率工作时, 储能特性会急剧下降, 所产生高频微波的相位噪声与频谱纯度较差。1996 年, 加州理工喷气动力实验室的 X.S.Yao 和 L.Maleki 在利用光子学技术改进微波系统工作性能的过程中开发了一种基于光子学储能单元的微波振荡器, 这种振荡器被命名为光电振荡器(optoelectronic oscillator, OEO)<sup>[1]</sup>。与基于电子学和声学储能单元的微波振荡器相比, 光电振荡器可产生数 MHz 到数百 GHz 的高纯度微波或毫米波信号, 其储能元件的 Q 值高达  $10^{10}$ , 产生高频信号的相位噪声在频偏 10kHz 处低至  $-163\text{dBc}/\text{Hz}$ , 并具有光、电两种输出, 是一种非常理想的高性能微波振荡器, 有望在未来得到广泛的应用。

## 二、光电振荡器工作原理

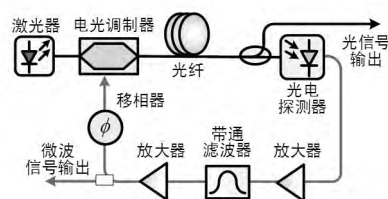


图 1 光电振荡器的基本结构

光电振荡器的基本结构如图 1 所示, 它是由激光器、电光调制器、高 Q 光储能单元(如一定长度的光纤)、光电探测器、带通滤波器、微波放大器、移相器和微波耦合器等组成的正反馈回路。振荡的能量来自于电光调制器前的注入光, 注入光经过电光调制器调制后变成载有特定频率的光信号, 这个光信号被光电探测器转化成电信号后放大, 再经过带通滤波器滤出特定频率, 一部分用于输出, 一部分反馈入电光调制的微波输入口, 完成一次循环。经过不断循环, 最终形成稳定的振荡。由于光电振荡器采用了低损耗的长

光纤等高 Q 光学储能单元, 输出信号具有极低的相位噪声。此外, 光纤等光学储能单元内损耗不随微波频率改变而变化, 因此理论上光电振荡器输出信号的性能不会随着频率升高而恶化。

经过近二十年的不断探索, 对光电振荡器的研究已取得飞速发展, 在美国, 光电振荡器作为高质量本振源已成功应用于无人机等尖端技术领域。尽管如此, 光电振荡器要想得到更广泛的应用, 还需要在性能与稳定性等方面不断完善。目前对光电振荡器的研究主要集中在相位噪声降低、边模抑制比提高、频率稳定性提升、输出频率拓展、频率调谐性能提升、小型化与多频振荡等方面, 具体如下:

### 1. 相位噪声

光电振荡器输出信号的相位噪声主要来源于激光器、光电探测器以及放大器等有源器件的热噪声、散射噪声、相对强度噪声。可以通过优化微波光子链路的结构和器件的工作方式来降低相位噪声。在 D.Eliyahu 等产生极低相位噪声( $-163\text{dBc}/\text{Hz}@6\text{kHz}$ )信号的实验中, 采用了相对强度噪声低的高功率 Nd:YAG 激光器和低相位噪声的阵列放大器<sup>[2]</sup>。P.S.Devgan 等利用低偏置的马赫曾德调制器和光放大器实现了全光增益的光电振荡器, 与采用电放大器的光电振荡器相比, 该方案的相位噪声有 10dB 改善<sup>[3]</sup>。此外, 采用高功率的光电探测器能有效降低白噪声, 而采用光电探测器阵列接收信号则能有效降低闪烁噪声的影响<sup>[4]</sup>。文献<sup>[4]</sup>中还实验验证了系统中有源器件的饱和状态能够抑制相位噪声。

### 2. 边模抑制

要获得低相位噪声的微波输出, 光电振荡器的谐振腔必须具有极高的 Q 值( $Q=2\pi f\tau$ ,  $f$  为中心频率,  $\tau$  为能量衰减时间), 即需要极大的能量衰减时间。通过增加光纤长度可以获得较大的  $\tau$ , 但随着光纤长度增加, 光电振荡器腔内纵模间距( $\Delta f=1/\tau$ )不断减小(可低至几十 kHz), 要有效抑制非振荡模式并选择出单一振荡频率, 需要相当窄的微波带通滤波器。

一种抑制边模的方法是采用双环路光电振荡器。在光电振荡器腔内构成两个不同长度的光纤环路, 只有同时满足两个环路选模条件的模式, 才有可能起振。分别选取适当的环路长度, 能够最终实现单模起振<sup>[5-8]</sup>。双环路光电振荡器方案可分为电域耦合的光电混合双环路结构<sup>[5]</sup>和光域耦合双环路结构<sup>[6-8]</sup>。本课题组提出了基于偏振调制和偏分复用的双环路光电振荡器<sup>[7]</sup>。其中的偏振分束器不仅实现了偏振调制到强度调制的转换, 还实现了将入射光波分成偏振态正交的两路形成双环路。本方案产生的 10GHz 信号的边模抑制比达到了 78dB。相比于电域耦合双环路方案, 光域耦合方案仅需一个光电探测器。光域耦合双环路方案也可以利用波分复用

技术实现<sup>[8]</sup>。另一种抑制边模的方法是利用耦合式光电振荡器(coupled optoelectronic oscillator, COEO)<sup>[9,10]</sup>。耦合式光电振荡器包括主动锁模激光器环路和光电反馈环路两个部分,其中主动锁模光纤激光器环路能够有效提高振荡器的Q值,因此,采用较短的光纤长度即可获得较低的相位噪声。本课题组利用非泵浦掺铒光纤实现了10.7GHz稳定输出的耦合式光电振荡器,其相位噪声低于-120dBc/Hz@10kHz<sup>[10]</sup>。

### 3. 频率稳定性

影响光电振荡器频率稳定性的因素主要为两个方面:一是系统中的高Q元件(包括长光纤和窄带电滤波器)易受环境的影响发生变化,使起振模式发生改变造成输出频率不稳定,特别是光纤受温度等环境因素的影响而引起等效腔长的改变;二是由于光电振荡器中使用的滤波器通常具有比较大的通带范围,所以在环路的增益带宽内会出现很多边模。这些边模中的一个可能会在腔长的变化过程中获得足够的增益而代替原有的起振频率,造成起振频率不稳定。此外,常用的电光调制器存在的偏置点漂移问题,也会影响输出频率的稳定性。

将光电振荡器与环境隔离或者利用温度控制装置,可以降低环境变化对系统的影响,例如在X.S.Yao等的实验中,光电振荡器被放置于一个填充泡沫的盒子里,以隔绝振动带来的影响<sup>[5]</sup>。采用主动锁相电路控制,将光电振荡器的振荡信号锁定到外部参考源上,也可以有效改善光电振荡器的频率稳定性<sup>[11]</sup>。

### 4. 工作频率

理论上光电振荡器可产生数MHz至上百GHz的信号,并且相位噪声与频率无关,但高频毫米波光电振荡器却难以实现。这主要是因为光电振荡器中要使用光电调制器、微波耦合器、微波移相器、微波放大器和微波传输线等微波器件,其工作频率受到电子瓶颈的限制。虽然近期已有研制出高频微波或毫米波器件的报道,但这些器件一般成本高昂、功耗较大,性能并不理想。

针对以上问题,M.Shin等利用LiNbO<sub>3</sub>马赫曾德调制器半波电压与波长的正比关系实现了10GHz基频和20GHz倍频信号的同时产生<sup>[12]</sup>。本课题组等提出了一种基于偏振调制器的倍频光电振荡器<sup>[13]</sup>。在该系统中,偏振调制器后面级联两个检偏器的结构等效为一个双输出强度调制器。通过分别调节两路检偏器前的偏振控制器,其中一路等效偏置于线性点并反馈至偏振调制器,实现基频振荡,另一路等效偏置在最小传输点,实现倍频信号的输出。本课题组还基于单个偏振调制器和级联偏振调制器分别实现了四倍频的光电振荡器<sup>[14,15]</sup>,使得光电振荡器工作范围扩展到原来的四倍。

### 5. 可调谐性

为产生宽带可调的微波信号,光电振荡器需使用宽带可调的高Q滤波器,该滤波器可以为可调谐电滤波器,光滤波器或微波光子滤波器<sup>[24,25]</sup>。受限于电子瓶颈,采用可调电滤波器的光电振荡器输出信号的调谐范围有限<sup>[16]</sup>。基于微波光子滤波器的光电振荡器通常具有较大的调谐范围。本课题组提出利用外部光注入的F-P激光器实现宽带频率可调的微波光子滤波器,通过改变注入光波波长或改变温度,使光电振荡器的频率调谐范围达到6.41GHz至10.85GHz<sup>[17]</sup>。本课题组还提出基于偏振调制器和啁啾光纤光栅的可调谐光电振荡器,实现了5.8-11.8GHz的频率调谐范围<sup>[18]</sup>。此系统利用偏振调制对色散的控制实现可调微波光子滤波器,通过改变在偏振调制器后面的光信号的偏振态来改变环路中的滤波响应,从而实现可调频率信号的输出。

### 6. 小型化研究

光电振荡器通常包括激光源、强度调制器、长光纤延时线、光电探测器、电放大器、电相移器、电带通滤波器和其他电的或光的器件。这些分立电学和光学元件使光电振荡器体积大,同时也导致

较大的功率损耗。通过采用高Q光谱振荡器(如回音壁模式谐振器)替代长达数千米的光纤,可以显著减小光电振荡器储能单元的体积<sup>[19]</sup>。本课题组提出并实现了一种基于电吸收调制激光器的小型化光电振荡器,本方案中仅用一个电吸收调制激光器即代替了传统光电振荡器中激光器、强度调制器及光电探测器三个器件,可节省两个器件和相应的驱动电路<sup>[20]</sup>。

### 7. 多频振荡

光电振荡器通常只产生一个纯净的单频信号。而在宽带信道化接收机与多频段雷达等应用场合,需要多个频率的信号。2012年,F.Kong等利用相移布拉格光栅的双折射特性实现了一种双频光电振荡器<sup>[21]</sup>。该方案的不足之处是仅能产生两个频率的信号,并且系统对环境非常敏感。本课题组提出并实现了基于单个相位调制器的多频光电振荡器<sup>[22]</sup>。此方案采用了多波长光源,在每个光载波上分别形成了一个单通带的可调谐微波光子滤波器。实验中同时获得了频率为10GHz和40GHz的信号,通过增加光载波数目,将很容易获得更多路的不同频率信号输出。

### 三、结论和展望

光电振荡器具有工作频率范围广、相位噪声低、频谱纯度高和调谐范围大等优点,是一种较为理想的高性能微波振荡器,具有广阔的应用前景。目前国内在光电振荡器上主要是以学术探索为主,其稳定性和小型化问题尚未得到有效解决,因此迫切需要开展相关研究,以推动光电振荡器的实用化。相信随着光子集成芯片等相关技术的发展,光电振荡器可以被制作成一个集成化的紧凑器件,从而在经济建设和科技发展中得到广泛的应用。

### 参考文献:

- [1] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. JOSA B, 1996, 13(8):1725-1735
- [2] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. Phase noise of a high performance OEO and an ultra low noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system [C]//Frequency Control Symposium, 2008 IEEE International. IEEE, 2008: 811-814
- [3] Devgan P S, Urlick V J, Diehl J F, et al. Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonic gain [J] Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3189-3193
- [4] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J] Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2008, 56(2): 449-456
- [5] Yao X S, Maleki L. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2000, 36(1): 79-84
- [6] Yang J, Jin-Long Y, Yao-Tian W, et al. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2007, 19(11): 807-809
- [7] Cai S, Pan S, Zhu D, et al. Coupled frequency-doubling optoelectronic oscillator based on polarization modulation and polarization multiplexing [J] Optics Communications, 2012, 285(6): 1140-1143
- [8] Shumakher E, Eisenstein G. A novel multiloop

- optoelectronic oscillator [J]Photronics Technology Letters, IEEE,2008, 20(22): 1881-1883
- [9]Yao X S, Davis L, Maleki L. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses [J]Journal of lightwave technology, 2000, 18(1): 73
- [10]Cai S, Pan S, Zhu D, et al. Stabilize the coupled optoelectronic oscillator by an unpumped erbium-doped fiber [C]//Communications and Photonics Conference (ACP), 2012 Asia. IEEE, 2012: 1-3
- [11]Eliyahu D, Sariri K, Kamran A, et al. Improving short and long term frequency stability of the opto-electronic oscillator [C]//Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002. IEEE International. IEEE, 2002: 580-583
- [12]Shin M, Grigoryan V S, Kumar P. Frequency-doubling optoelectronic oscillator for generating high-frequency microwave signals with low phase noise [J]Electronics Letters, 2007, 43(4): 242-244
- [13]Pan S,Yao J.A frequency-doubling optoelectronic oscillator using a polarization modulator [J]Photronics Technology Letters, IEEE, 2009, 21(13): 929-931
- [14]Zhu D,Pan S,Ben D.Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator [J]Photronics Technology Letters, IEEE, 2012, 24(3): 194-196
- [15]Zhu D,Liu S,Ben D,et al. Frequency-Quadrupling optoelectronic oscillator for multichannel upconversion [J]IEEE Photonics Technology Letters, 2013,25:426-429
- [16]Eliyahu D, Maleki L. Tunable, ultra-low phase noise YIG based opto-electronic oscillator [C]//Microwave Symposium Digest,2003 IEEE MTT-S International. IEEE,2003,3:2185-2187
- [17]Pan S,Yao J.Wideband and frequency-tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry-Perot laser diode with external optical injection [J]Optics letters, 2010,35(11):1911-1913
- [18]Tang Z,Pan S,Zhu D,et al.Tunable optoelectronic oscillator based on a polarization modulator and a chirped FBG [J]Photronics Technology Letters,IEEE, 2012,24(17):1487-1489
- [19]Matsko A B, Maleki L,Savchenkov A A,et al. Whispering gallery mode based optoelectronic microwave oscillator [J]Journal of Modern Optics, 2003,50(15-17):2523-2542
- [20]Zhou P,Pan S,Zhu D,et al.A Compact Optoelectronic Oscillator Based on an Electroabsorption Modulated Laser [J] 2014
- [21]Kong F,Li W,Yao J. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator [J]Optics letters, 2013,38(14):2611-2613
- [22]Zhou P,Zhang F and Pan S.A Multi-frequency Optoelectronic Oscillator based on a Single Phase-Modulator [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2015),May 10-15,2015,San Jose,CA, USA
- 基金资助:江苏省自然科学基金(BK2012031),国家重点基础研究发展计划(973计划,2012CB315705),国家自然科学基金项目(61422108,61401201)。

(上接第 12 页)仿写的心理活动是模仿,通过模仿,使阅读和写作互动起来。模仿是指仿效一定的文章原型而引起与之类似行为模式的一种心理活动,也是基本的写作学习手段。在掌握书面语言的过程中,学生的模仿加速了从理解到使用的过渡,模仿使理解到表达的转化过程大大缩短。根据汪潮的实验和研究,仿写水平可以划分为四级:

#### 1.句型仿写

对范文的句子进行仿写,能把句子写完整。

#### 2.结构仿写

从课文中寻找相应的写作方式,表达一定的人、事、景物,多数是记叙文结构仿写。

#### 3.综合型仿写

开始从几篇范文中进行综合性模仿,突出描写特征的训练。

#### 4.初创型仿写

在借鉴范文的基础上,具有初步的创造性,仿范文之形,写出自己的真情实感。

学生仿写水平提高的一般趋势是:从形式的模仿到内容的模仿,从外部特征的模仿到内部实质性的模仿,从机械性模仿到创造性模仿。七年级学生仿写水平处于 1,2 级,八、九年级学生仿写水平处于 3,4 级。

中学语文教学中常用的仿写方式有:

##### (一)一般仿写和重点仿写

一般仿写就是选用典型课文,指导学生构思,从而掌握立意、布局、谋篇的一般规律,学习炼字、炼句的基本方法。重点仿写是根

据需要模仿某些片段,如开头、结尾、剪裁、布局、描写、对话、修辞等。

##### (二)单样仿写和多样仿写

单样仿写是采用一篇文章给学生模仿。多样仿写是提供几篇范文仿写。

##### (三)抱、扶、放式仿写

“抱”式仿写是给出范文,并加以详细的指导和启发,使学生仿写时不太费力。这种方式一般适用于初学某一文体时使用。“扶”式仿写是提供一些可以参考的范文,教师只作适当的指点,不作详细的分析,由学生自己从中得到启发。这一般在初步掌握了写作规律后使用。“放”式仿写是只提要求,学生根据要求,自选范文仿写,必要时,教师进行指导。这一般在写作技能较熟练的情况下使用。

#### 四、结束语

没有阅读做基础的写作,肯定是无米之炊。那些文章写得好的学生,无一不是有大量的阅读做基础的。我们的语文教学常常忽略了阅读和写作的互动,没有引导学生养成读过就要动笔写,写过就应该回过头来阅读的习惯。“播种习惯,收获性格;播种性格,收获命运。”

#### 参考文献:

- [1]叶圣陶.怎样写作[M]中华书局 2007
- [2]朱晓斌.写作教学心理学[M]浙江大学出版社 2007
- [3]潘新和.新课程语文教学论[M]人民教育出版社 2005
- [4]管建刚.我的作文教学革命[M]福建教育出版社 2010
- [5]邵龙霞.儿童也能写作——读写互动的探索与实践[M]2011