
上海交通大学

SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：被动锁模激光器和高稳定振荡器的互锁定技术研究

学生姓名：刘飞扬

学生学号：5120309136

专 业：电子科学与技术

指导教师：邹卫文

学院(系)：电子信息与电气工程学院

被动锁模激光器和高稳定振荡器的互锁定技术研究

摘要

被动锁模光纤激光器有着重复频率高、脉冲超短、光频谱宽等优点，因此被视为高速光纤通信与光信号处理等系统的理想光源。但是，在实际工作环境中，被动锁模光纤激光器存在着重复频率，时钟抖动等关键参数受温度，湿度等因素影响的问题，这就需要将被动锁模光纤激光器锁定至外部参考源以稳定其性能。另一方面，由于被动锁模光纤激光器具有低抖动和低相位噪声的特点，在某些对信号质量要求较高的应用中，也通常需要将信号源锁定至作为参考源的被动锁模光纤激光器以提高信号质量。综上所述，微波光子学系统中信源的相参性对被动锁模光纤激光器与射频振荡源之间互锁定的方法提出了要求。

被动锁模光纤激光器与射频振荡源的互锁定的研究重点与核心技术在于光电鉴相和锁相装置的实现方法。在相关领域多年的研究中，目前已经提出基于 Sagnac 环干涉、光子倍频鉴相、射频混频器等多种光电鉴相方法，并基于这些鉴相方法形成了多种光电锁定系统。在实际应用中，这些系统均能够有效提高锁相环路中受控信号的频率稳定性，降低锁相环路中的相位噪声并实现受控信号与参考信号之间的高精度同步。本毕业设计以光电鉴相锁相技术的物理机理为依据，提出了一种新型的光电鉴相锁相技术，并基于该技术构建了新型光电鉴相器，进而实现了被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源之间的相互锁定。新型的光电鉴相锁相技术具有鉴相系数大、噪声水平低、稳定性高等优良特性并具有易于实现硅基光子集成化的天然优势，在相关领域内具有极大的潜在应用价值。

关键词：被动锁模光纤激光器，光电锁定系统，鉴相器，时钟同步，相位噪声

RESEARCH OF SYNCHRONIZATION OF PASSIVE MODE-LOCKED LASER AND HIGHLY STABLE OSCILLATOR

ABSTRACT

Passive mode-locked fiber laser has many advantages, such as high repetition rate, ultrashort pulse duration and broad spectral range, making it an ideal laser source in high-speed photonics communication and signal processing systems. However, the state parameters of passive mode-locked fiber laser, such as pulse repetition rate and time jitter, is quite unstable under the fluctuations of environmental factors, such as temperature, humidity, etc. In order to avoid the influence of environmental factors, we should lock the mode-locked laser to an external reference source whose performance is highly stable. On the other hand, since the passively mode-locked fiber laser has low time jitter and low phase noise, in some application we need to lock the signal source to it to improve signal quality. In all, the effective methods which can make passive mode-locked fiber laser and RF oscillator lock to each other are required by microwave photonic systems.

To find such methods, we should pay attention to the optoelectronic phase detection and lock devices. After years of research, several types of optoelectronic phase detection methods, such as Sagnac ring, Second harmony generation phase detection, RF mixer, etc, have been present. Some types of optoelectronic lock systems have been developed based on these phase detection methods. In real application, these optoelectronic lock systems are able to improve the stability of controlled source, reducing its phase noise and realizing highly accuracy synchronization. This design proposed a new phase detection and lock method, which is based on the physical theory of phase detection and lock technology. Then we realized a new type of optoelectronic phase detector based on this method. Finally, we used the phase detector to fulfill the lock between passive mode-locked fiber laser and highly stable oscillator. The new phase detection and lock method have several advantages: high phase detection sensitivity, low phase noise, high stability, easy to integration, etc. It has good application potential in relative area.

Key words: Passive mode-locked fiber laser, Optic-electro lock system, Phase detector, Synchronization, Phase noise

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 被动锁模光纤激光器技术简介.....	1
1.3 锁相环技术简介.....	3
1.3.1 锁相环的基本原理.....	3
1.3.2 鉴相器的基本原理.....	4
1.4 本文的主要内容.....	6
第二章 光电锁定系统中的鉴相锁相技术.....	8
2.1 基于光学非线性效应的光电鉴相锁相技术.....	8
2.1.1 光学非线性效应简介.....	8
2.1.2 基于 SHG 效应的光子鉴相器及应用.....	9
2.1.3 基于和频效应的光子鉴相器及应用.....	10
2.2 基于微波光子器件的光电鉴相锁相技术.....	11
2.2.1 基于射频混频器的光电鉴相器及应用.....	11
2.2.2 基于 Sagnac 环的光电鉴相器及应用.....	12
2.2.3 基于集成微波光子器件的新型光电鉴相器及应用.....	15
2.3 光电锁定系统的相位噪声.....	15
2.3.1 时间抖动与相位噪声.....	16
2.3.2 相位噪声的测量方法.....	17
2.4 本章小结.....	18
第三章 被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的锁定.....	19
3.1 基于射频混频器的锁定系统.....	19
3.2 基于新型光电鉴相器的锁定系统.....	22
3.2.1 系统结构及原理.....	22
3.2.2 实验总结.....	25
3.3 锁定系统的优化.....	25
3.3.1 系统各有源器件的相位噪声分析.....	25
3.3.2 鉴相系数对相位噪声的影响.....	27
3.3.3 优化结果.....	28
3.4 本章小结.....	29



第四章 高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器的锁定	30
4.1 基于 PZT 的频率可变被动锁模光纤激光器	30
4.2 基于射频混频器的锁定系统	32
4.3 基于新型光电鉴相器的锁定系统	34
4.4 本章小结	35
第五章 总结与展望	37
参考文献	38
致谢	40

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

激光的发展使人类发现新的物理现象和规律、探索未知领域的梦想逐渐成为现实^[1]。许多受以往的测量手段限制而无法被人类认知的现象，如分子中电子的运动、化学键的断裂与形成等，都随着飞秒脉冲激光器的发展与应用而揭开了神秘的面纱。近些年来科学界的荣誉桂冠诺贝尔奖也屡屡授予超快科学领域的科学家：1999年美国科学家 Ahmed Zewail 因在利用超快脉冲分析化学键断键与成键过程所作出了突出贡献而获得了该年度的诺贝尔化学奖；2005年的诺贝尔物理学奖授予了美国科学家 J. L. Hall 和德国科学家 T. W. Hansh 以表彰他们在光学频率梳技术上的突出贡献。不仅如此，超快激光的发展还带动了其他学科的进步。随着激光器输出功率的日益增大，超短脉冲聚焦后的能量已经远大于原子内的电场强度，人们对物质中电子运动的精确控制已经变成可能，这使得强场物理学正在诞生，从而极大的扩展了物理学的研究范围^[2]。

锁模光纤激光器能够稳定的输出超短激光脉冲序列，是很多光子学通信与信号采集处理系统的核心部件。锁模光纤激光器的性能直接影响整个应用系统的性能，进而成为这些系统性能的首要限制因素，如在光模数转换系统中，光时钟的时钟抖动直接决定了模数转换的量化精度。在微波光子学系统中，锁模光纤激光器提供的高质量光时钟可以作为系统各个模块的参考信号源，这就提出了将系统中的其他射频振荡源锁定至锁模光纤激光器的需求。另一方面，锁模光纤激光器的性能还有很多需要改善的地方，比如输出脉冲的相位噪声不够低、重复频率不够高、频谱宽度不够宽、工作状态受环境影响较为严重等。在这些缺点中，频率稳定性与相位噪声对锁模光纤激光器的影响尤为突出。虽然锁模光纤激光器输出信号的相位噪声可以达到十几飞秒^[3]，优于一般的频率源，但是距离固体激光器的亚飞秒量级抖动还有一定的差距^[4]。此外，被动锁模光纤激光器输出信号的频率受温度、湿度、空气流动等环境因素影响较大，这也限制了它适用的工作环境。因此，为进一步提高锁模光纤激光器的性能，我们同样需要将激光器锁定至外部参考源。

为了实现锁模激光器与外部射频源之间的互锁定，光电鉴相锁相技术逐渐发展起来。与传统的射频锁相技术相似，光电锁定系统可以将受控信号与参考信号的频率与相位锁定，使得它们的频率与相位保持固定的关系。根据光电锁定系统中鉴相器的不同机理，受控信号与参考信号既可以是光信号，也可以是电信号。通过光电锁定系统，可以使得受控信号与参考信号高度相参，彼此之间具有相同的相位噪声特性，进而在提高了系统的稳定性的同时也降低了系统的相位噪声。这对于提升光子雷达和相参通信等需要高相参性的微波光子学系统的性能，具有十分关键的作用^{[5][6]}。

1.2 被动锁模光纤激光器技术简介

锁模光纤激光器根据工作时谐振腔内脉冲的个数，可以分为基频锁模与谐波锁模两类。基频锁模光纤激光器在工作时腔内只存在一个脉冲，谐波锁模光纤激光器在工作时腔内存在多个脉冲。基频锁模光纤激光器根据锁模方式又分为三类：主动锁模、被动锁模与混合锁模。

被动锁模光纤激光器是指在谐振腔中没有任何的有源器件（如调制器等），并能够自发的输出超短脉冲序列的锁模光纤激光器。被动锁模光纤激光器的原理是利用谐振腔内各个器件及光纤的光学非线性效应，使腔内各纵模之间相位锁定，进而输出飞秒量级的超短脉

冲序列。

受限于腔内光纤的长度，被动锁模光纤激光器无法做到很高的重复频率，但是被动锁模光纤激光器具有以下优点：1、被动锁模光纤激光器不需要在谐振腔中加入有源器件，并能够在没有外部信号触发的情况下自启，因此腔体结构简单，实现成本低。2、被动锁模光纤激光器实现锁模的各种光学非线性效应的响应时间快，能够很容易的产生飞秒量级的超短脉冲。3、被动锁模光纤激光器能够采用全光纤结构，这种结构下输出的脉冲序列稳定。

根据激光器谐振腔中增益光纤种类的不同，被动锁模光纤激光器可以分为掺饵、掺镱、掺铥等种类，不同种类之间的区别是输出光脉冲的中心波长不同。使用掺饵光纤作为增益光纤的被动锁模光纤激光器的输出光脉冲的中心波长在 1550nm 左右，可以广泛应用于光子学通信与信号采集处理系统中。根据锁模的实现方式，被动锁模光纤激光器又可以分为四种：基于可饱和吸收体锁模、基于光纤环路反射镜锁模、基于非线性偏振旋转（NPR, nonlinear polarization rotation）锁模和基于新型的可饱和吸收体材料锁模。下面对其中较为常用的基于 NPR 锁模的被动锁模光纤激光器和基于可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器进行简要介绍。

A. 基于 NPR 锁模的被动锁模光纤激光器

基于 NPR 锁模的被动锁模光纤激光器基本结构如图 1-1 所示。

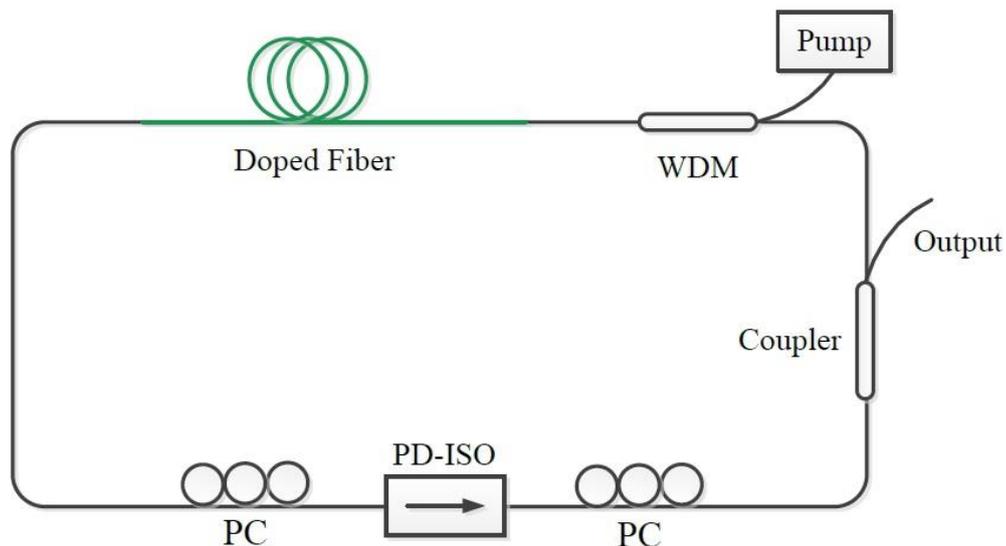


图 1-1 NPR 被动锁模光纤激光器结构示意图。

在这种结构中，泵浦光源的光首先经过波分复用器（WDM, wavelength division multiplexing）传入到谐振腔中。泵浦光经过增益光纤后，被增益光纤的吸收，并激发出 1550nm 波长的激光。激光在谐振腔中循环传播时，偏振相关光隔离器（PD-ISO, polarization dependent isolator）既保证激光在腔内单向传播，又使激光在离开 PD-ISO 之后是线偏振的。从 PD-ISO 离开的激光经过偏振控制器（PC, polarization controller）后，偏振态由线偏振变为椭圆偏振。光纤中的非线性相移同时作用在椭圆偏振激光的两个线偏振分量上，使得这两束线偏振激光的偏振态发生非线性旋转。这种非线性的旋转是强度相关的，由于光脉冲中央受到的增益大，边沿受到的增益小，因此光脉冲中央的偏振态旋转大于边沿。通过调节另一个 PC 来控制光脉冲中央边沿的偏振态，使得光脉冲的中央能够通过 PD-ISO，前后沿部分不能完全通过 PD-ISO。这样，每在谐振腔中循环一次，光脉冲就会窄化一次，经过多次循环后，被动锁模光纤激光器就可以输出稳定的超短光脉冲序列。基于 NPR 锁模的被动锁模光纤激光器的优点是输出光脉冲比较稳定、光谱较宽、脉冲较窄。缺点是难以自启。

B. 基于可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器

基于可饱和吸收体锁模的被动锁模光纤激光器基本结构如图 1-2 所示

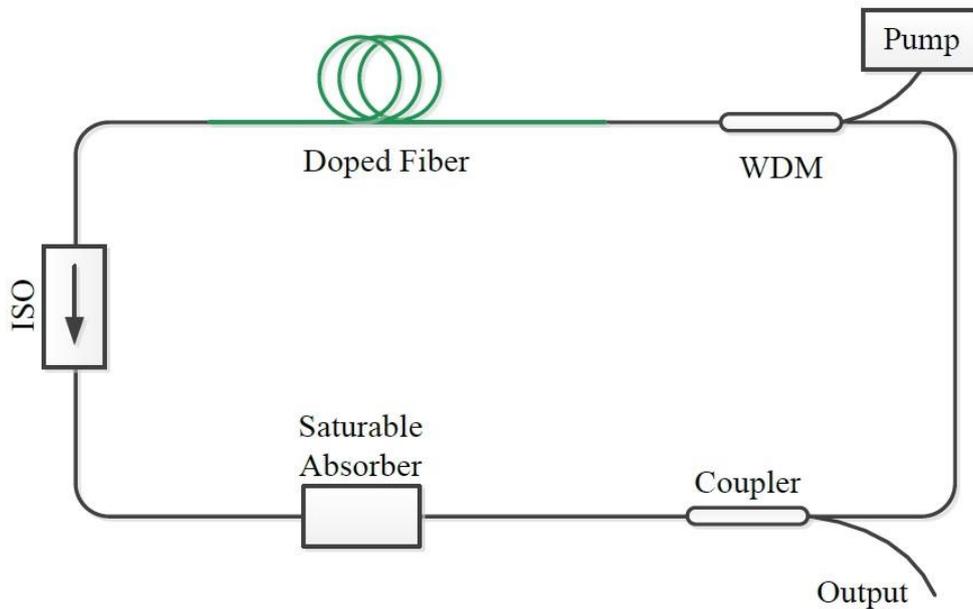


图 1-2 基于可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器结构示意图。

在这种结构中，1550nm 波长的激光产生后，可饱和吸收体对光脉冲不同部分的吸收率不同，光强大的部分吸收少透射多，光强小的部分吸收多透射少。当光脉冲通过增益光纤时，边沿的增益小于中央的增益，因此当光脉冲进入可饱和吸收体时，边沿的光被可饱和吸收体吸收，中央的光被透过，光脉冲就会窄化。经过多次循环后，被动锁模光纤激光器就可以输出稳定的超短光脉冲序列。基于可饱和吸收体的被动锁模光纤激光器的优点是易于自启、输出光脉冲比较稳定、相位噪声低。缺点是输出光脉冲的宽度比较宽，一般在 100fs ($1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$) 以上。

1.3 锁相环技术简介

锁相环能够将受控信号的频率和相位与参考信号保持锁定。锁相环的同步机制是将受控振荡源的相位与参考信号的相位进行比较，并通过两者的相位差来调整受控振荡源输出信号的频率与相位。因此，锁相环电路实际上是一个以相位差为控制方式，以受控振荡源为控制对象的反馈控制系统。

1.3.1 锁相环的基本原理

锁相环主要由受控信号源、鉴相器、环路滤波器和参考信号源组成，基本结构图如下图 1-3 所示。

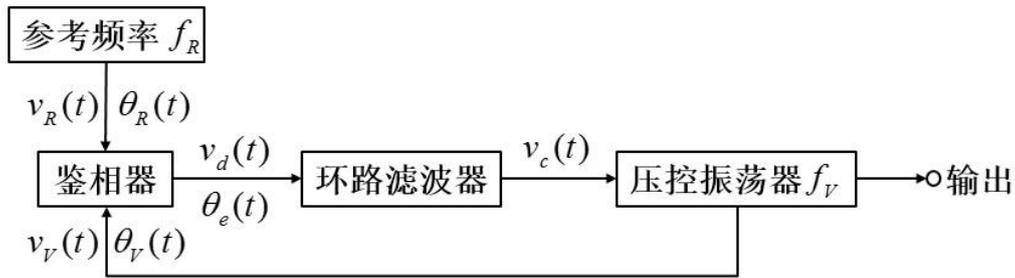


图 1-3 锁相环的结构图

在图 1-3 中，鉴相器通过比较参考信号与受控信号的相位差，输出一个与相位差成比例的电压，该电压通过环路滤波器滤去高频成分后，加载到受控信号源的受控元件上。下面推导锁相环的锁定机理。

瞬时相位与瞬时角频率的关系如下式(1-1)、(1-2)所示，其中 θ_0 是初始相位。

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-1)$$

$$\theta(t) = \int \omega(t)dt + \theta_0 \quad (1-2)$$

在锁相环中，假设鉴相器上的受控信号和参考信号分别如式(1-3)、(1-4)所示，其中 ω_V 为受控信号的角频率， θ_V 是相角， V_{Vm} 是幅度； ω_R 为参考信号的角频率， θ_R 是相角， V_{Rm} 是幅度。

$$v_V(t) = V_{Vm} \cos(\omega_V t + \theta_V) \quad (1-3)$$

$$v_R(t) = V_{Rm} \sin(\omega_R t + \theta_R) \quad (1-4)$$

加载到鉴相器上的两个信号的角频率差为

$$\Delta\omega(t) = \omega_R - \omega_V \quad (1-5)$$

由式(1-2)可知，瞬时相差为

$$\theta_e(t) = \int \Delta\omega(t)dt + \theta_0 \quad (1-6)$$

如果 $\omega_V = \omega_R$ ，那么 $\Delta\omega(t) = 0$ ，由式(1-2)有

$$\theta_e(t) = \int \Delta\omega(t)dt + \theta_0 = 0 \quad (1-7)$$

因此，当两个信号的频率相同时，它们存在一个稳定的相位差。

如果 $\theta_e(t) = \theta_0$ ，由式(1-1)可知

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\theta_e(t)}{dt} = 0 \rightarrow \omega_R = \omega_V \quad (1-8)$$

因此，当两个信号存在一个稳定相位差时，两者的频率相同。

由上述推导可知，当锁相环路锁定后，参考信号与受控信号的频率相等，相位差恒定。如果受控信号的角频率 ω_V 发生变化，两个信号之间的相位差不再是恒定值，鉴相器的输出电压随相位差的变化而变化，进而受控信号的频率不断变化，直到两个信号的频率相同。

1.3.2 鉴相器的基本原理

鉴相器是锁相环路中的关键器件，在电锁相环中，它一般由一个正弦波相位检波器或射频混频器充当，其基本原理图如图 1-4 所示。

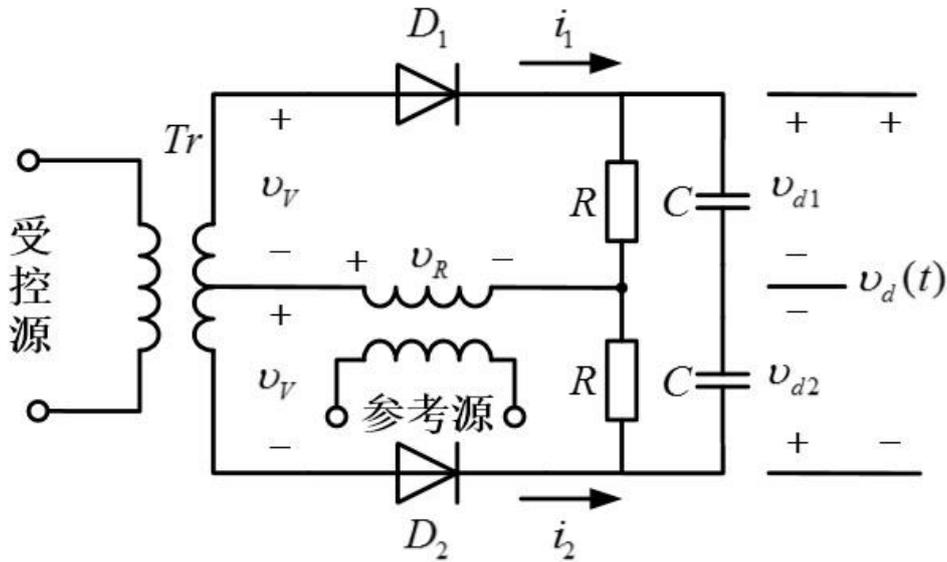


图 1-4 鉴相器基本原理图

图中，受控信号源由压控振荡器（VCO，voltage controlled oscillator）充当，它的输出信号与参考信号的表达式如式(1-3)、(1-4)所示。假设二极管 D_1 与 D_2 的伏安特性特性相同，都能够用二次多项式来近似，即 v_V

$$i = b_0 + b_1 v + b_2 v^2 \quad (1-9)$$

由图 1-4 知，作用于二极管 D_1 的电压为 $v_R + v_V$ ，作用于二极管 D_2 的电压为 $v_R - v_V$ ，代入式 (1-9) 得

$$\begin{aligned} i_1 &= b_0 + b_1(v_R + v_V) + b_2(v_R + v_V)^2 \\ i_2 &= b_0 + b_1(v_R - v_V) + b_2(v_R - v_V)^2 \end{aligned} \quad (1-10)$$

鉴相器的输出电压为

$$v_d(t) = v_{d1} - v_{d2} \propto (i_1 - i_2) \quad (1-11)$$

将使(1-3)、(1-4)代入式(1-11)得

$$\begin{aligned} v_d(t) &\propto 2b_1 v_V + 4b_2 v_R v_V \propto 2b_1 V_{Vm} \cos(\omega_V t + \theta_V) \\ &\quad + 2b_2 V_{Rm} V_{Vm} \sin[(\omega_V + \omega_R)t + \theta_V + \theta_R] \\ &\quad + 2b_2 V_{Vm} V_{Rm} \sin[(\omega_V - \omega_R)t + \theta_V - \theta_R] \end{aligned} \quad (1-12)$$

考虑到电容 C 的滤波作用，鉴相器输出的高频成分都被滤掉，即

$$v_d(t) = 2b_2 V_{Vm} V_{Rm} R \sin[\Delta\omega t + (\theta_V - \theta_R)] \quad (1-13)$$

式中， $\Delta\omega = \omega_V - \omega_R$ 。因此，未锁定时，鉴相器的输出是一个频率为参考信号与受控信号的频率差的正弦信号。

如果 $\omega_R = \omega_V$ ，则锁相环路处于锁定状态，则

$$v_d(t) = K_d \sin(\theta_V - \theta_R) = K_d \sin \theta_e \quad (1-14)$$

式中， $K_d = 2b_2 R V_{Vm} V_{Rm}$ ，称为鉴相器的鉴相系数（ K_d ）， $\theta_e = \theta_V - \theta_R$ ，是两个信号之间的相位差。由此得到鉴相器的鉴相特性曲线，如图 1-5 所示。

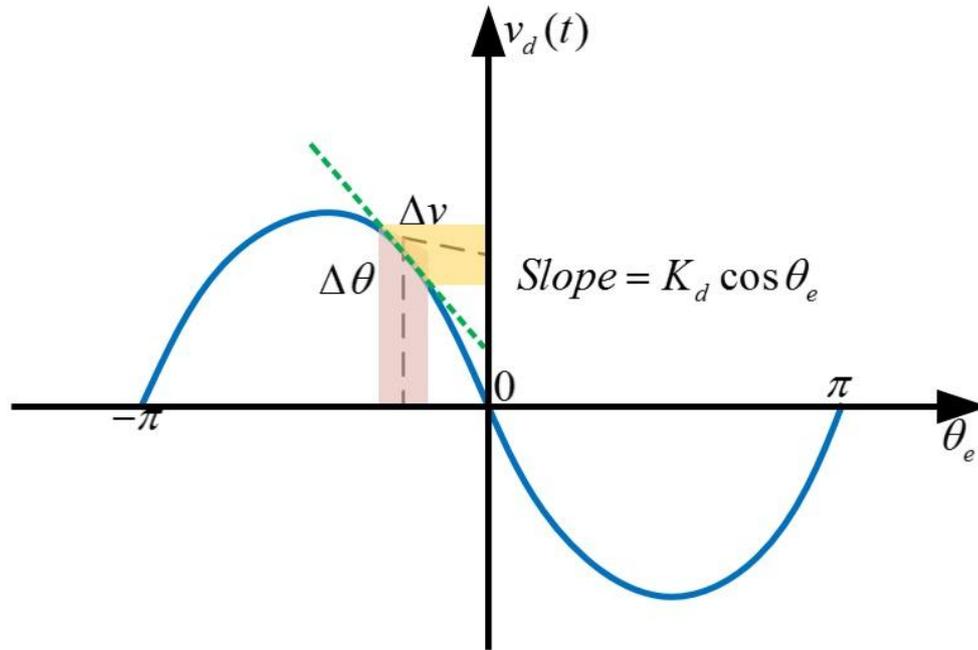


图 1-5 鉴相器鉴相特性

当 $\theta_e < 30^\circ$ 时，式(1-14)可以近似为

$$v_d(t) \approx K_d(\theta_V - \theta_R) = K_d\theta_e \quad (1-15)$$

此时鉴相器可以当作线性器件来处理。当 $\theta_e > 30^\circ$ 时，鉴相器为非线性器件。在实际电路中，由于二极管 D_1 与 D_2 的伏安特性特性不可能完全相同，因此 $v_d(t)$ 会含有一些高频成分与纹波成分，这些成分对锁相环路的稳定性有影响，因此在鉴相器后通常要加入低通滤波器来滤去高频成分，由于该低通滤波器在锁相环路内，因此称为环路滤波器。

1.4 本文的主要内容

电锁相环经过几十年的发展，理论研究比较完善，实践成果也十分丰富。研究被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的互锁定方法，可以借鉴电锁相环的研究方法与研究思路。近些年来光电锁定系统逐渐成为了光学领域研究的新热点，相关成果被屡屡报道^{[7][8][9]}。这些成果中的光电锁定系统在基本结构上与电锁相环相同，只是在光电鉴相锁相技术中取得了创新，提出了新型的光电鉴相器。可见，从电锁相环的研究出发，探索新型的光电鉴相器是当前光电锁定系统研究的核心。

基于对以上背景的分析，本文主要做了以下工作：

第一，调研现有的光电鉴相锁相技术，选出了几种具有代表性的光电鉴相器进行深入分析，了解它们的鉴相原理，总结它们的优点与不足。本文中选取的几种光电鉴相器包括基于光子倍频效应的光电鉴相器^[7]、基于和频晶体的光电鉴相器^[7]、基于 Sagnac 环的光电鉴相器^{[6][10]}与基于射频混频器的光电鉴相器^[8]。

第二，基于对上述光电鉴相器的分析与总结，提出了一种新型的基于集成微波光子器件的光电鉴相器，并分析了该光电鉴相器的原理与优点。

第三，相位噪声是衡量信号源频率稳定性的主要指标，也是衡量锁定系统锁定效果的重要指标。本文介绍了相位噪声的概念以及时间抖动与相位噪声的关系，并介绍了一些常用的相位噪声的测量与计算方法。

第四，本文使用了新型光电鉴相器实现了以被动锁模光纤激光器为参考信号源，以振荡源为受控信号源的光电锁定系统，分析了该系统的性能，总结了该系统的优缺点。为了降低锁定系统的相位噪声，本文采取了多种优化手段，将系统的相位噪声降低到了 1fs 以下，提高了振荡源输出信号的频率稳定性。

第五，本文使用了新型光电鉴相器实现了以高稳定振荡源为参考信号源，以被动锁模光纤激光器为受控信号源的光电锁定系统，提高了被动锁模光纤激光器输出信号的频率稳定性。

最后，本文总结了工作中一些成果和不足，并提出了一些新的光电鉴相锁相研究思路，作为对未来进一步研究的铺垫和建议。

第二章 光电锁定系统中的鉴相锁相技术

与传统的电锁相环的工作原理相同，光电锁定系统通过探测参考信号与受控信号的相位差，输出与之成比例的误差信号，通过环路滤波后，反馈给受控信号。与电锁相环不同的是，光电锁定系统中的参考信号和受控信号可以是光信号，鉴相锁相技术与电信号相位的检测方法不同。因此研究新的鉴相锁相技术，开发新型光电鉴相器，是光电锁定系统目前研究的重点。

本章将对几种现有的光电鉴相器和基于这些光电鉴相器的光电锁定系统进行介绍，同时提出了一种基于集成微波光子技术的新型光电鉴相器。这种新型的光电鉴相器结构简单，易于集成化。在本章的最后，介绍了相位噪声的概念与测量方法。

2.1 基于光学非线性效应的光电鉴相锁相技术

激光被发现之前，许多光学现象因为光源强度低而表现出线性的特点。激光出现之后，强光源下光学中的非线性现象开始浮现并被人所关注。激光具有强度高、相干性好等优点，为人们研究各种光学非线性效应提供了必需的光源。对非线性现象的研究让人们研制出了多种非线性光学晶体，这些晶体有的可以用来进行激光的频率转换，有的可以对激光脉冲的强度、相位进行调制，还有的可以实现对激光信号的全息存储，应用十分广泛^[11]。在这些晶体中，具有倍频效应（SHG, second harmony generation）和和频效应的晶体在光学相位检测中有很大的应用前景^[7]。

2.1.1 光学非线性效应简介

从二十世纪六十年代人们第一次发现光学二次谐波效应以来，非线性光学到如今已经发展超过半个世纪。在这半个多世纪的时间里，人们对各种光学非线性效应的认识日趋成熟，也取得了许多研究成果。如今，对光学非线性效应的研究已经是从以二阶非线性效应的研究为主深入到了三阶、五阶等高阶非线性的研究^[12]；从纳秒、皮秒时间尺度的光学非线性现象的研究深入到了飞秒、亚飞秒时间尺度的光学非线性现象研究^[13]；从固体材料中的光学非线性现象的研究深入到了液体、气体以至液晶材料中的光学非线性现象的研究^[14]。下面对光学介质中非线性现象的原理进行推导。

对非磁性的绝缘的光学介质，麦克斯韦方程组为

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E &= -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot D &= 0\end{aligned}\quad (2-1)$$

其中电位移矢量 D 可以表示为

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2-2)$$

代入到式(2-1)中的第一项中，并两端对时间求导，有

$$\nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2-3)$$

对式(2-1)中第三项的两端求旋度，有

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu_0 \nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2-4)$$

将式(2-4)代入式(2-3)中并进行矢量变换得

$$\nabla^2 E = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2-5)$$

式(2-5)表明,当介质的电极化强度 P 对时间的二阶导数不为 0 时,介质中将产生新的光波,新光波的光矢量由式(2-5)与 P 的表达式决定。当入射到介质上的光场强度不强时, P 与入射光矢量可以近似为线性关系;当入射到介质上的光场强度很强时, P 与入射光矢量为非线性关系。这就是许多光学非线性效应需要在激光下才能观测到的原因。

目前,人们已经对多种光学非线性效应有了较为充分的研究,并逐渐将这些效应应用到激光信号的产生、处理与测量上。例如,利用具有光学参量振荡效应的材料能够实现激光强度、相位的调制^[15];利用具有倍频效应、混频效应的晶体能够产生激光的高次谐波、和频、差频等^[16],从而实现激光频率的转换;利用输出光束的位相共轭效应进行光学信息处理,能够改善激光光束质量和激光成像质量^[17]。基于光学非线性效应的光电鉴相锁相技术是光学非线性效应在光电锁定领域的应用,具有良好的应用前景与研究价值。

2.1.2 基于 SHG 效应的光子鉴相器及应用

SHG 效应是指激光射入一些二阶非线性材料上之后,除了入射光外会产生二倍频的倍频光的现象。倍频光产生的强度与入射光的相位有关, Δk 为相位失配因子。当 $\Delta k = 0$ 时,为相位匹配的状态,此时的倍频效率最大。当 Δk 较大时,为相位失配状态,此时不产生倍频。只有当特定偏振态的光波入射时,才会实现相位匹配,产生倍频光波。光学测量中常用的自相关仪和超短脉冲测量仪就是 SHG 效应的具体应用^[18]。近年来,基于这种的效应的光电鉴相锁相技术也开始逐渐出现。

在长距离的有线通信系统中,光纤传输系统因为稳定性高、不易受干扰而成为人们的第一选择。但在光信号的传输过程中,难免会引入热噪声与声学噪声^[19]。这些噪声的引入会引起接收端的信号相位偏移,提高接收端解调的误码率,因此在接收端应该引入相位锁定机制以消除传输过程中噪声带来的相位偏移。相位锁定的难点在于锁定系统应该能够精确的测量出传输系统中的相位偏移量,且应该具很高的稳定性与抗干扰能力。在传统的方式中,相位锁定系统的实现的方式是在接收端使用光电探测器(PD, photo detector)将信号的基频转换为电信号,然后采用电鉴相器对收发端信号的相位偏移进行测量并反馈。这种方式的性能受到鉴相器平衡度与 PD 的噪声的限制。为了克服传统光通信系统的相位锁定方式的缺点,可以使用具有 SHG 效应的晶体构成的光子鉴相器来测量收发端信号间的相位偏移并进行反馈^[7]。这种基于 SHG 效应的锁定系统的原理如图 2-1 所示。

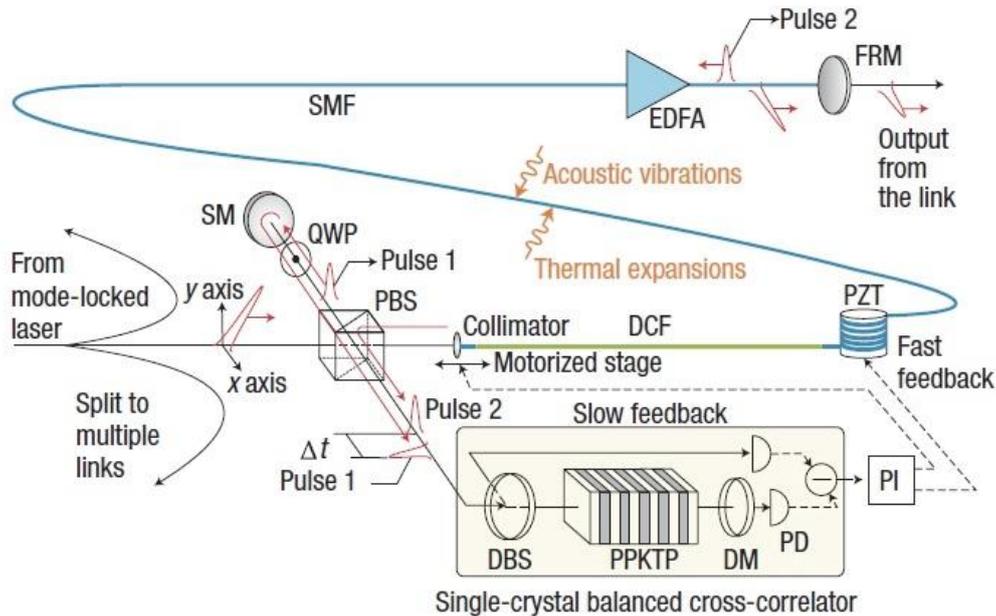


图 2-1 基于 SHG 效应的相位锁定系统^[6]。SM: 镀银反射镜; QWP: 四分之一波片; PBS: 偏振分束器; DBS: 双束分离器; DM: 分光镜; PPKTP: 倍频晶体; DCF: 色散补偿光纤; EDFA: 光纤放大器; FRM: 法拉第旋转镜

在原理图中, 黑色方框部分是基于 SHG 效应的光子鉴相器, 它由双束分离器、倍频晶体、分光镜和光电探测器 (PD, photo detector) 构成。在鉴相器中, 参考信号和受控信号经过分光镜后被分离, 当两束光分别通过倍频晶体时, 因为两束光之间的相位有偏移, 因此合成光的偏振与相位不满足相位匹配的方向, 因此不产生倍频光信号, 此时 PD 处检测不到光功率, 因此反馈到比例积分控制器 (PI, proportion integral) 上的电压最小, 当两束光同时经过倍频晶体时, 此时相位没有偏移, 产生的倍频光功率最大, 经过 PD 后输入到 PI 上的电压也最大。

在图 2-1 的相位锁定系统中, 输入光信号通过偏振分束器后被分为两束, Pulse 1 经过 SM 的反射后作为参考信号进入光子鉴相器。Pulse 2 进入光纤传输线, 在末端被法拉第旋转镜大部分反射后, 作为受控信号进入光子鉴相器。当光信号在传输线中因为噪声干扰使相位偏移时, 光子鉴相器就会检测出相位的偏移量并通过负反馈的方式反馈到压电陶瓷 (PZT, piezoelectric ceramic transducer) 上, 通过改变光纤长度使相位偏移保持为 0。这就是基于 SHG 效应的光子鉴相器和光传输系统相位锁定方案的原理。

基于 SHG 效应的光子鉴相器适用于光学信号的相位检测。该鉴相器的优点是原理简单, 系统自身的噪声低。该鉴相器的缺点是系统使用了较多的光学镜片, 稳定性较差。此外该系统的结构较为复杂, 难以集成化。

2.1.3 基于和频效应的光子鉴相器及应用

光学非线性效应中的和频效应是指两束频率不同的激光射入一些二阶非线性材料上之后, 除了入射的两种频率的光外会产生两者频率之和的光的现象。用于和频的非线性光学晶体需要有比较大的非线性系数, 且对频率变换过程中的三种频率的光吸收要小。基于和频晶体的光子鉴相器与光电锁定系统的原理框图如图 2-2 所示^[7]。

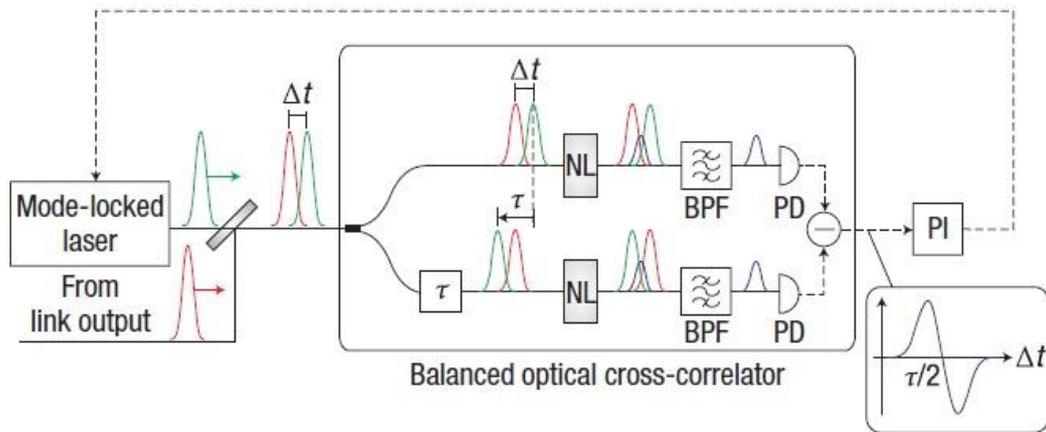


图 2-2 基于和频晶体的光电锁定系统原理框图^[6]。BPF：带通滤波器；NL：和频晶体

在原理图中，黑色方框部分是基于和频效应的光子鉴相器。在鉴相器中，参考信号和受控信号可以由不同工作波长的锁模激光器产生，两者的合成信号分两路进入到和频晶体中，其中一路在进入晶体前加入了相位偏移（可以通过控制光纤的长度来控制相位偏移，且不同频率的光脉冲的相位偏移量不同），除此之外，两路的构成没有区别。在和频晶体中，产生了频率为两个频率之和的信号，通过带通滤波器后，参考信号与受控信号被滤去。和频信号经过平衡 PD 后，PD 的输出与参考信号和受控信号间的相位偏移量有关，并通过 PI 反馈到受控锁模激光器中的受控器件（一般为 PZT）上。当参考锁模激光器和受控锁模激光器处于锁定状态时，此时控制鉴相器中两路光纤的长度，使得反馈电压的值为 0。当参考锁模激光器和受控锁模激光器未锁定时，此时两者的输出脉冲的重复频率不同，因此反馈到受控锁模激光器上的电压发生改变，受控锁模激光器输出信号的重复频率随着反馈电压改变，直到与参考锁模激光器的输出信号重复频率相同。

基于和频晶体的光子鉴相器适用于光信号与光信号之间的锁定，并能够将不同波长的光信号进行锁定。该鉴相器的优点是采用了全光纤结构，系统的稳定性高。此外，该鉴相器采用了平衡结构，有效消除了通道失衡引入的噪声。但该鉴相器也有一些缺点，如系统结构复杂，难以集成化。同时，非线性晶体的性能和稳定性受环境影响大，使系统的适用环境受到限制。

2.2 基于微波光子器件的光电鉴相锁相技术

随着激光器、集成光学、高速光电调制器、微波单片集成电路等微波与光电技术的发展，出现了一门综合微波技术与光学技术两者优点的交叉学科——微波光子学。该学科将光学技术应用与微波系统中，利用光学系统的高带宽、低损耗、抗干扰能力强等优势进行微波信号的处理、产生与传输^[20]。在这种背景下，基于微波光子器件的光电鉴相器成为当前研究的热点。

2.2.1 基于射频混频器的光电鉴相器及应用

对光信号进行相位检测与锁定，最直接的方法是将光信号转换为电信号，然后使用电锁相环进行鉴相锁相。在这种方法中，只需要射频混频器的前级加上 PD，就设计出了一种基于射频混频器的光电鉴相器。这种光电鉴相器可以广泛应用在光电锁定系统中^[8]，原理框图如图 2-3 所示。

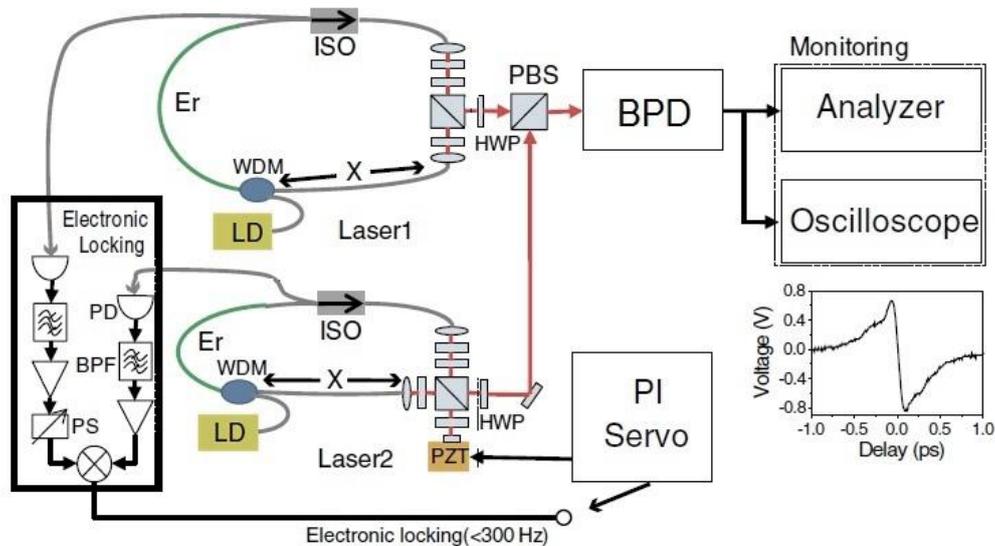


图 2-3 基于射频混频器的两个被动锁模光纤激光器的锁定系统^[8]。PS: 移相器; HWP: 半波玻片; LD: 激光二极管

在原理图中, 黑色方框部分是基于射频混频器的光电鉴相器。在鉴相器中, 参考信号和受控信号分别通过 PD 后转换为电信号, 两者的基频十分接近。通过低噪声放大器后, 参考信号与受控信号进入到混频器中。当两个被动锁模光纤激光器处于锁定状态时, 混频器输出是一个直流信号, 反映了两个信号间的相位差; 当两个被动锁模光纤激光器没有锁定时, 混频器输出一个低频的信号, 频率是参考信号与受控信号间的差值。

在图 2-3 的系统中, 被动锁模光纤激光器 Laser1 的输出为参考信号, Laser2 的输出为受控信号, 控制它们的谐振腔长使两个激光器输出脉冲的基频相差 300Hz 以内。当两个激光器没有锁定时, 鉴相器有一个低频输出, 该输出通过 PI 放大后通过加载到 PZT 上, 改变 Laser2 的谐振腔长, 进而改变 Laser2 输出脉冲的基频大小, 直到两个脉冲的基频重新相等。这就是基于射频混频器的两个被动锁模光纤激光器间的锁定系统的原理。

基于射频混频器的鉴相器适用于光信号与电信号的锁定以及光信号之间的锁定。该鉴相器的优点是原理简单, 实现成本低。该鉴相器的缺点是受射频混频器的带宽限制, 无法应用在高频、高带宽的系统中。此外, 该鉴相器由于混频器通道失衡、交调干扰、PD 热噪声、PD 供电电源纹波等缺点, 导致系统噪声较大。

2.2.2 基于 Sagnac 环的光电鉴相器及应用

为了避免鉴相器中通道非平衡带来的噪声, 目前人们开始研究一些自平衡的光电鉴相器, 这之中, 基于 Sagnac 环的光电鉴相器受到了众多关注^{[6][9][10]}。Sagnac 环是一种环状结构的自平衡干涉仪^[21], 基本结构如图 2-4 所示。

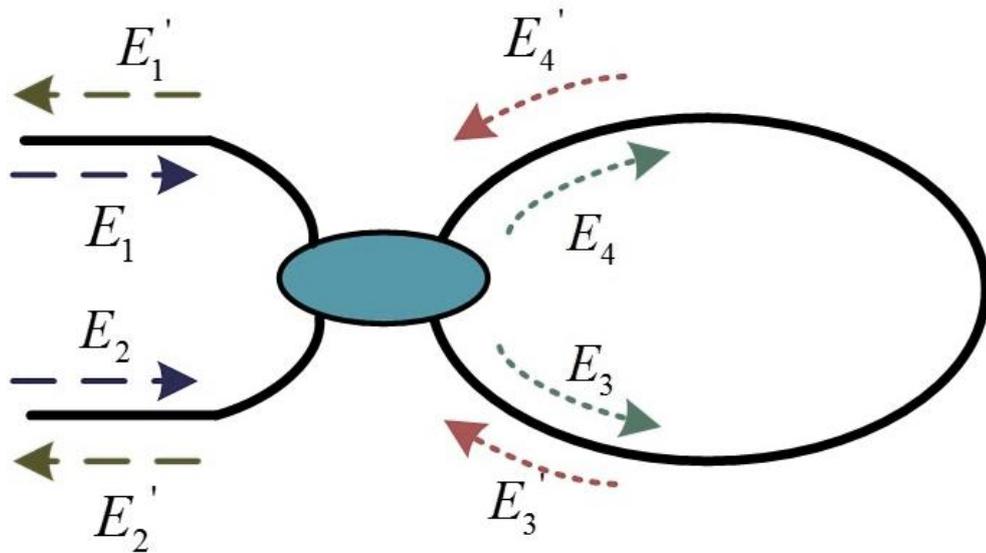


图 2-4 Sagnac 环的基本结构

由图 2-4 可见，Sagnac 环由一个 2×2 的耦合器组成，设耦合器的耦合比为 ρ ，输入到 Sagnac 环中的光强度为 E_1 ，输出的光强度分别为 E_1' 和 E_2' ，则有

$$\begin{pmatrix} E_4 \\ E_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

耦合输出为

$$\begin{pmatrix} E_1' \\ E_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho} & i\sqrt{1-\rho} \\ i\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_4 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

基于 Sagnac 环的光电鉴相器结构如图 2-5 所示。

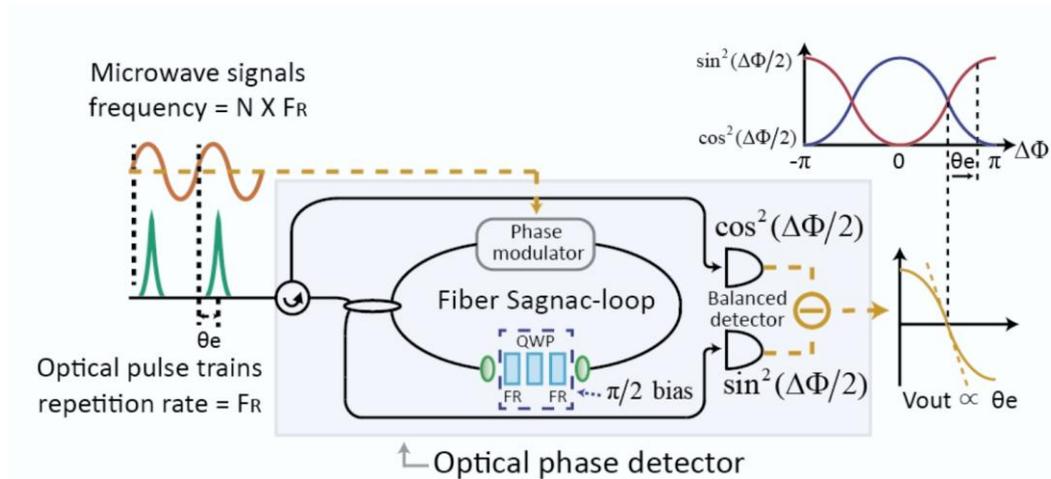


图 2-5 基于 Sagnac 环的光电鉴相器结构^[7]。QWP：四分之一波片；FR：法拉第旋转镜

在该结构中，被动锁模光纤激光器输出的光信号作为参考信号，经过环形器后进入 Sagnac 环，微波源输出的电信号作为受控信号在 Sagnac 环腔内经过相位调制器加载到参考信号上。下面根据图 2-4 中的标注，对图 2-5 中的光电鉴相器的鉴相原理进行分析。

参考信号 E_1 进入 Sagnac 环后, E_3 、 E_4 在 Sagnac 环的另一侧耦合出来。根据被动锁模光纤激光器的锁模原理, 可以将参考信号的方程近似为

$$E_1(t) = A_c \sum_{N=1}^{\infty} \cos(N\omega_c t + \varphi_c) \quad (2-8)$$

即输出脉冲可以近似为由角频率为 ω_c 、 $2\omega_c$ 、 $3\omega_c$ 、.....的等幅等初始相位的单频信号合成。该参考信号输入到相位调制器后, 调制器的输出为

$$E(t) = A_c J_0(m) \sum_{N=1}^{\infty} \cos(N\omega_c t + \varphi_c) + A_c \sum_{N=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m) [\cos(N\omega_c + n\omega_m)t + \varphi_c + (-1)^n \cos(N\omega_c - n\omega_m)t] \quad (2-9)$$

其中, m 为调制系数, ω_m 为受控信号的频率, $J_n(m)$ 为 n 阶贝塞尔函数。当 $m=1$ 时, 对 $N\omega_c$ 这一单频信号进行调制时, 调制器输出的信号是由载频与载频两边对称的无限个边频组成, 各边频的间隔为 ω_m , 如图 2-6 所示。

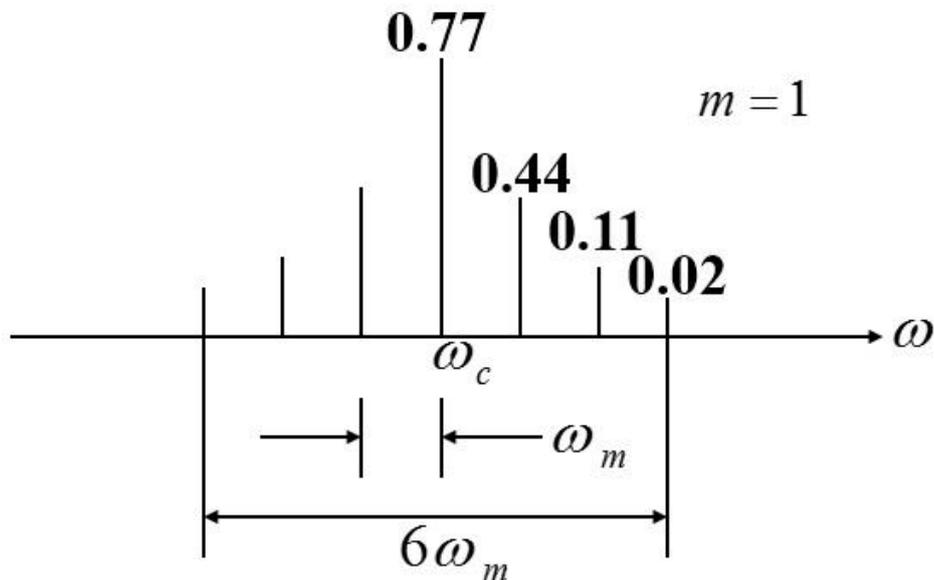


图 2-6 单频信号下调制器输出的频谱

由式(2-9)和图 2-6 可知, 当参考信号的频率接近 $N\omega_c$ 时, 将高频成分滤去后, 相位调制器的输出是一个低频信号, 频率大小为受控信号与参考信号中的 N 次谐波的频率差。根据 Sagnac 环的传输函数, 此时 Sagnac 环的输出为

$$E'_1 = E_1 \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (2-10)$$

$$E'_2 = E_1 \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right)$$

其中 $\Delta\Phi$ 为 Sagnac 环中 E_3 与 E_4 两路光信号的相位差。之后, Sagnac 环的两路输出信号 E'_1 与

E'_2 分别输入到平衡 PD 的两臂中, 将它们的强度做差。当受控信号与参考信号中的 N 次谐

波处于锁定状态时, 由于在 Sagnac 环内加入了 $\frac{\pi}{2}$ 的相移, 因此 $\Delta\Phi = \frac{\pi}{2}$, 此时平衡 PD 的

输出为 0。当受控信号与参考信号中的 N 次谐波未锁定时，两者的相位差不是一个恒定的数值，平衡 PD 会有一个正比与两者相位差的电压，该电压通过负反馈的形式接到受控信号源的控制电压上，从而将受控信号与参考信号重新锁定。

基于 Sagnac 环的光电鉴相器适用于光信号与电信号之间的锁定。该鉴相器采用了平衡结构，有效消除了通道失衡带来的噪声。此外，由于相位调制器的工作频率与工作带宽较宽，该鉴相器可以应用在一些宽带、高频信号的同步系统中。该鉴相器的缺点是结构相对复杂，系统的调整、维护成本较高，且难以集成化。

2.2.3 基于集成微波光子器件的新型光电鉴相器及应用

为了克服光电鉴相器中混频器通道失衡、电信号交调干扰、PD 会引入热噪声、PD 供电有电源纹波等缺点，扩展光电混频器的应用范围与应用环境，同时使光电锁相环能够集成化，我们将目光转向了集成微波光子器件，提出了一种基于集成光电混频器的新型光电鉴相器。这种光电鉴相器的结构如图 2-7 所示。

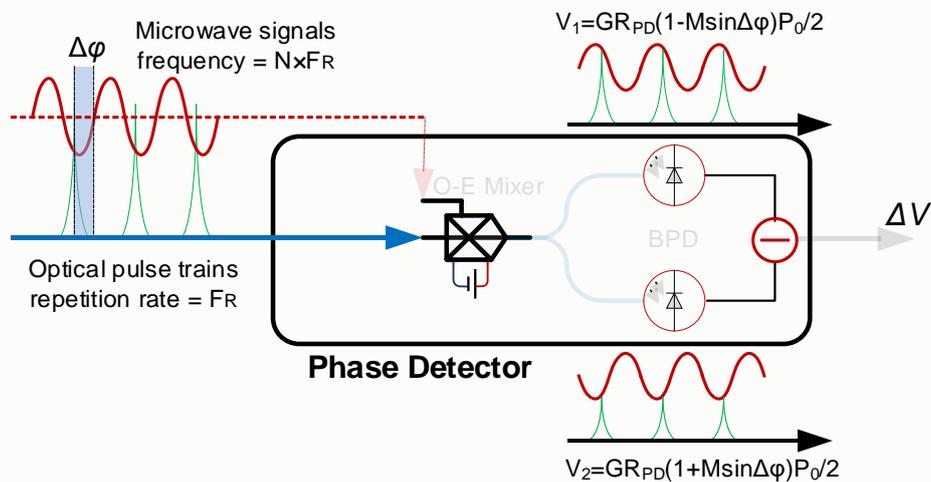


图 2-7 基于集成光电混频器的新型光电鉴相器的结构。O-E Mixer: 集成光电混频器。BPD: 平衡光电探测器

在该结构图中，黑色方框部分是基于集成光电混频器的光电鉴相器。在该结构中，被动锁模光纤激光器输出的光信号作为参考信号，微波源输出的电信号作为受控信号，两个信号分别进入集成光电混频器的光输入通道与电输入通道中，进行光电混频后集成光电混频器输出两路光信号，信号的表达式如图 2-7 所示。两路光信号通过平衡 PD 后，输出一个与两者相位差成比例的电压。当受控信号与参考信号中的 N 次谐波处于锁定状态时，此时平衡 PD 的输出为定值。当受控信号与参考信号中的 N 次谐波未锁定时，两者的相位差不是一个恒定的数值，平衡 PD 会有一个正比与两者相位差的电压，该电压通过负反馈的形式接到受控信号源的控制电压上，从而将受控信号与参考信号重新锁定。

基于集成微波光子器件的新型光电鉴相器优点是结构与原理简单，实现成本比较低，易于集成化。同时，由于集成光电混频器的工作频率与带宽较高，因此该光电鉴相器适用于高频率、宽带宽的应用场合。该鉴相器的缺点是 PD 热噪声与集成光电混频器的偏置电压的纹波会引入噪声，后续的章节中介绍如何通过优化将这些噪声降低到最低。

2.3 光电锁定系统的相位噪声

相位噪声是衡量信号频率稳定度的重要指标，也是光电锁定、光信号传输与处理、光模数转换等系统的性能的主要限制因素。如在通信系统中，相位噪声会引起信号信噪比下降，导致误码率增加；在模数转换系统中，有效比特位与同步时钟的相位噪声密不可分，相位噪声越低有效比特位越高^[22]。

频率稳定性是在一段时间内振荡源的振荡频率的相同程度，包括长期稳定性和短期稳定性。长期稳定性是指由于系统中器件的老化、环境温度的变化、供电电压的纹波等原因引起的有规律的固定的频率漂移，一般可以通过一些措施加以补偿和消除。短期频率稳定性是指由系统中的随机噪声（如热噪声、散粒噪声等）引起的频率起伏或相位起伏，一般无法用技术手段加以消除，且频率的短期稳定性对系统的影响更加显著^[23]。相位噪声是指信号源输出信号的相位的随机变化，是衡量频率短期稳定性的重要指标。

2.3.1 时间抖动与相位噪声

在相位噪声的表征中，单边带相位噪声是最常用的方法^[24]，因为它可以被频谱分析仪直接测量。理想的信号源输出信号的频谱应该是冲击函数，没有任何边带，但实际上，由于相位噪声的存在，使得信号的频谱在时钟频率上下两侧有着无限宽的边带，这些边带的相对与时钟频率的幅度反映了相位噪声的大小。相位噪声谱 $L(f)$ 的定义为频率 f 处的信号功率谱密度 $S_c(f)$ 与时钟频率 f_c 处的功率谱密度 $S_c(f_c)$ 之差，如图 2-8 所示。

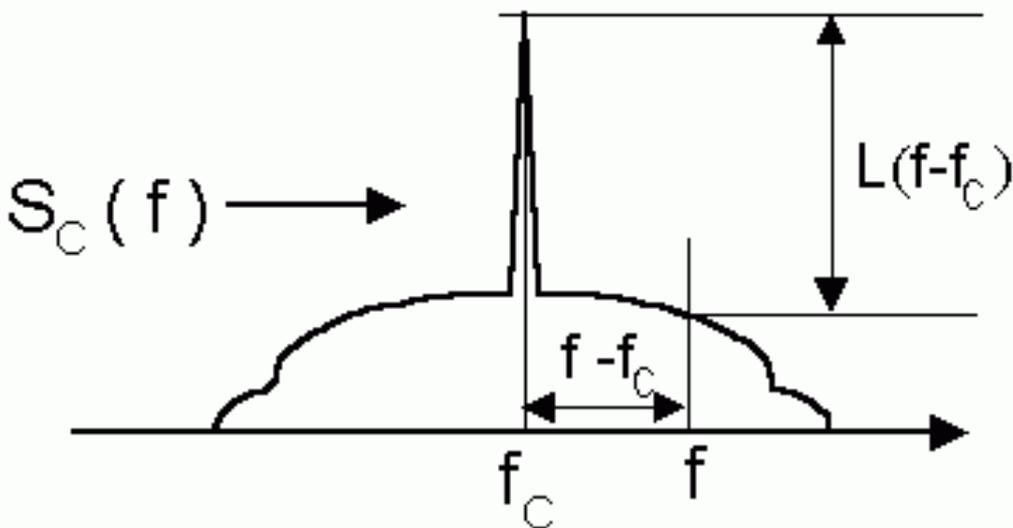


图 2-8 相位噪声谱的定义

由图 2-8 可知，相位噪声谱的数学定义为：

$$L(f - f_c) = 10 \log[S_c(f) / S_c(f_c)] \quad (2-11)$$

单位为 dBc。通过计算不同频偏 $f - f_c$ 处的相位噪声谱，就可以画出信号源输出信号的相位噪声图，横坐标范围一般从 1kHz 到 10MHz，纵坐标的单位为 dBc。然而，这种方式得出的相位噪声不直观，判定两个信号源输出信号质量的优劣往往需要多次对比两者的相位噪声图。因此，在实际测量中往往将相位噪声转化为均方根时间抖动，以此来衡量信号源输出信号的相位噪声，单位为秒。信号的时间抖动是指信号的实测周期与理论周期之间的时间差。由于该时间差具有随机分布的特点，因此可以用均方根时间抖动来描述。下面将推导信号的相位噪声与时间抖动之间的关系式。

具有相位噪声的正弦信号可以表述为

$$v(t) = A \sin(2\pi f_c t + \theta(t)) = A \sin(2\pi f_c (t + \frac{\theta(t)}{2\pi f_c})) \quad (2-12)$$

时间抖动为

$$j = \frac{\theta(t)}{2\pi f_c} \quad (2-13)$$

在式(2-12)中, 由于相位噪声 $\theta(t)$ 远远小于 $\pi/6$, 因此有

$$v(t) \approx A \sin(2\pi f_c t) + A\theta(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (2-14)$$

该正弦信号的频谱可以表示为

$$S_c(f) = \frac{A^2}{4} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{A^2}{4} [S_\theta(f - f_c) + S_\theta(f + f_c)] \quad (2-15)$$

其中, $S_\theta(f)$ 是相位噪声 $\theta(t)$ 的频谱, 于是由相位噪声谱的定义, 有

$$L(f - f_c) = 10 \log[S_c(f) / S_c(f_c)] = 10 \log[S_\theta(f - f_c)] \quad (2-16)$$

反之则有

$$S_\theta(f) = 10^{\frac{L(f)}{10}} \quad (2-17)$$

根据帕斯瓦尔定理, 对于相位噪声 $\theta(t)$ 有

$$D[\theta(t)] = 2 \int_0^\infty S_\theta(f) df = 2 \int_0^\infty 10^{\frac{L(f)}{10}} df \quad (2-18)$$

因此, 对 $\theta(t)$ 的方差开根号, 即得到了时间抖动的均方根:

$$j_{RMS} = \frac{1}{2\pi f_c} \sqrt{D[\theta(t)]} = \frac{1}{2\pi f_c} \sqrt{2 \int_0^\infty 10^{\frac{L(f)}{10}} df} \quad (2-19)$$

这就是信号的均方根时间抖动与相位噪声之间的关系式。有了式(2-19)之后, 通过频谱分析仪测出信号源输出信号的频谱之后, 就可以画出相位噪声谱图, 并计算出时间抖动值, 有了时间抖动的计算值后, 便可以更加直观的对信号源输出信号的频率稳定度做出评定。在一些应用中, 人们只关心特定频段的时间抖动, 这时, 时间抖动的计算公式为

$$j_{RMS} |_{f_1 \text{ to } f_2} = \frac{1}{2\pi f_c} \sqrt{2 \int_{f_1}^{f_2} 10^{\frac{L(f)}{10}} df} \quad (2-20)$$

2.3.2 相位噪声的测量方法

相位噪声测量有多种测量方法, 各种方法之间的优缺点各有不同。在选用相位噪声测量的方法时, 要综合考虑测量系统的易用性、成本以及测量系统的动态范围。常用的相位噪声测量方法有直接频谱分析仪测量法、鉴相法、时间差分法等^[25], 其中直接频谱测量法是最简单的一种方法。通过之前的讨论可知, 信号源输出信号的频谱在时钟频率上下两侧有着无限宽的边带, 这些边带的相对与时钟频率的幅度反映了相位噪声的大小, 频谱分析仪将频率源信号的频谱采集出来, 然后通过转换就能得到单边带相位噪声谱, 进而计算出时间抖动, 如图 2-9 所示。

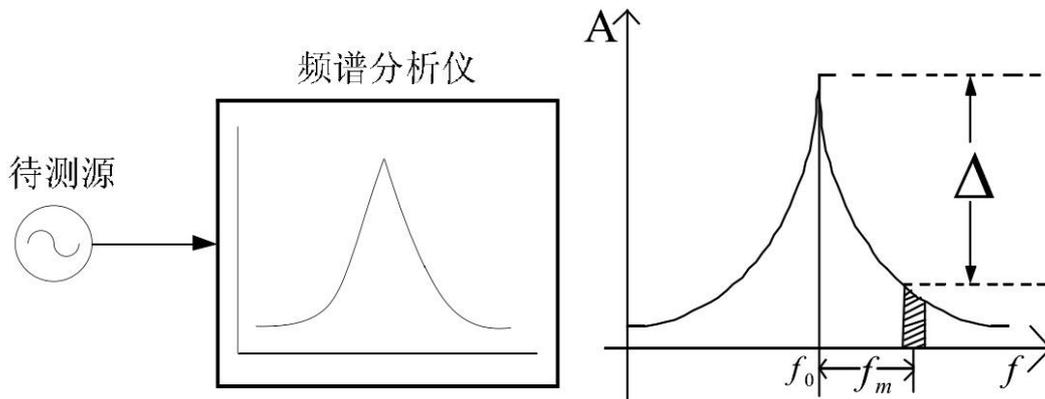


图 2-9 频谱分析仪直接测量法的原理

频谱分析仪直接测量法的步骤如下：

- (1) 将被测的信号源输出信号接入频谱分析仪，调整频谱分析仪的中心频率，使信号的频谱位于频谱分析仪屏幕的中央。
- (2) 选择一个合适的频谱扫描范围，使得相位噪声的噪声边带能够被频谱分析仪显示出来。
- (3) 尽量调小频谱分析仪的扫描分辨率，使得相位噪声的谱线宽度尽量小，且噪底的高度降到最低，此时测量系统引入的误差噪声最小，测量结果最准确。
- (4) 调节频谱分析仪的参考电平，使谱线的顶端位于屏幕刻度的顶端，此时比较容易读数。
- (5) 读出边带噪声的功率和载波的功率，并根据式(2-16)计算出相位噪声谱，根据式(2-19)计算出均方根时间抖动。

频谱分析仪直接测量法的优点是使用灵活，操作简单易行，仅仅需要一台频谱分析仪就可测量出相位噪声谱，是测量相位噪声的一种有效的方法。在光电锁定系统中，参考信号、受控信号、光电鉴相器输出的相位误差信号的相位噪声都可以用频谱分析仪直接测量法快速、准确的测量出来。

2.4 本章小结

光电鉴相锁相技术和光电鉴相器是光电锁定系统的关键。本章分别介绍了基于非线性晶体的光电鉴相器、基于射频混频器的光电鉴相器与基于 Sagnac 环的光电鉴相器。在文中，我们阐述了这些鉴相器的原理，介绍了它们的应用，并分析了它们的优缺点。同时，我们提出了一种新型的光电鉴相器，并分析了这种鉴相器的优势。

衡量光电锁定系统性能的一个重要指标是相位噪声，它同时也是衡量频率源稳定性的关键指标。相位噪声一般由相位噪声谱表征。为了更直观的对比不同系统、不同频率源的相位噪声，许多时候人们使用均方根时间抖动来代表相位噪声。本章通过相位噪声的计算公式推导了相位噪声与均方根时间抖动之间的关系，并介绍了最为简单易用的一种测量相位噪声的方法——频谱分析仪直接测量法。

第三章 被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的锁定

作为大多数通信、运算、测量系统的时钟源，振荡器对这些系统的稳定性和可靠性起着重要的作用，其频率稳定性决定了系统的性能。电锁相环对振荡器频率的稳定可以满足在大多数应用的需求，但在一些大型系统中，如有源相控阵天线、大型强子对撞机、空间探测器等，电锁相环容易受外界电磁环境的干扰，因此会对系统的性能造成影响。使用被动锁模光纤激光器作为参考信号的光电锁定系统能够有效避免外界电磁干扰，因此成为近些年来人们研究的热点。

在这些研究中，J. Kim 等人使用基于射频混频器的光电锁定系统，将锁定系统中参考信号与受控信号间的相位噪声降低到了 100as 以下^[8]；在使用被动锁模光纤激光器作为收发信号的光通信系统中，Franz X. Kartner 的团队使用基于 SHG 效应的鉴相器，将收发端信号间的相位噪声降低到了 1fs 左右^[7]，大大提高了该通信系统的信噪比；J. Y. Zhao 等人使用基于 Sagnac 环的光电鉴相器将光电振荡器锁定到了被动锁模光纤激光器上，形成了一个宽带、低抖动的锁定系统^[9]；K. Jung 提出了一种高频高稳定振荡源的产生方法，该振荡源在 10GHz 下能够产生亚飞秒量级相位噪声的信号，这种方法使用了基于 Sagnac 环的光电鉴相器^[6]。

在本章中，我们分别使用了基于射频混频器的光电鉴相器以及新型光电鉴相器对被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源锁定系统进行了研究，经过对比，新型光电鉴相器的性能更有优势。此外，我们还分析了电源噪声、平衡 PD 噪声、测试系统噪声、鉴相灵敏等因素对参考信号与受控信号间的相位噪声的影响，并根据分析结果对基于新型光电鉴相器的锁定系统进行了优化，使得该锁定系统的性能更加稳定。

3.1 基于射频混频器的锁定系统

基于射频混频器的光电鉴相器结构简单，易于实现。在研究被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的锁定时，我们首先使用了该光电鉴相器实现了锁定系统，既为基于新型光电鉴相器的锁定系统提供参考，又能够通过对比不同锁定系统的稳定性来衡量新型光电鉴相器的性能。基于射频混频器的锁定系统框图如图 3-1 所示。

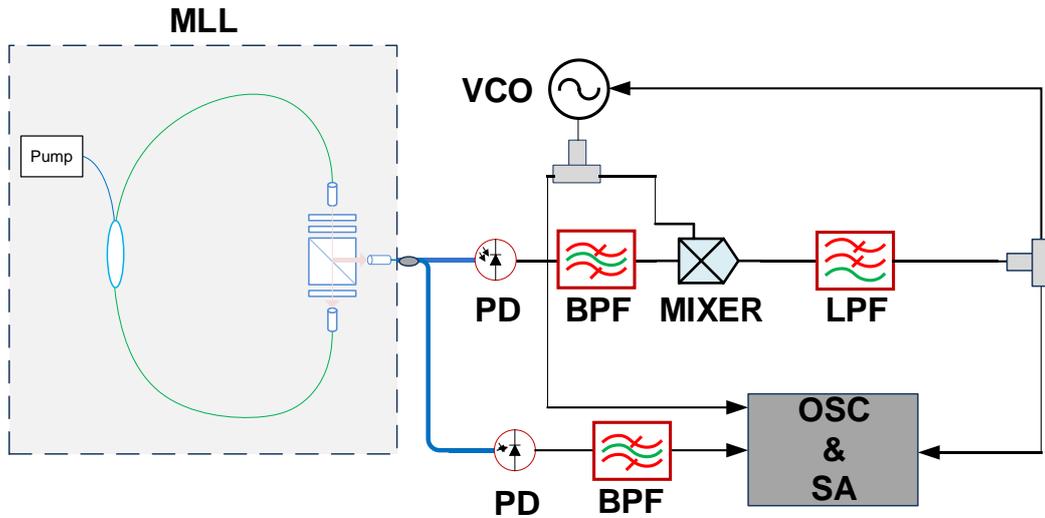


图 3-1 基于射频混频器的被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源锁定系统。OSC：数字示波器；SA：频谱分析仪

在图 3-1 中，被动锁模光纤激光器的输出经过带通滤波器后将基频滤出后作为参考信号输入到射频混频器（Mixer）中，VCO 输出作为受控信号输入到 Mixer 中。Mixer 输出两个信号的相位误差信号，并反馈到 VCO 的控制电压上，实现两个信号的锁定。示波器观测两个信号的波形，频谱分析仪分析受控信号信号、参考信号以及相位误差信号的相位噪声。

锁定后参考信号与受控信号的波形图如图 3-2 所示，蓝线为被动锁模光纤激光器的基频输出，黑线为 VCO 的输出，频率均为 250MHz。

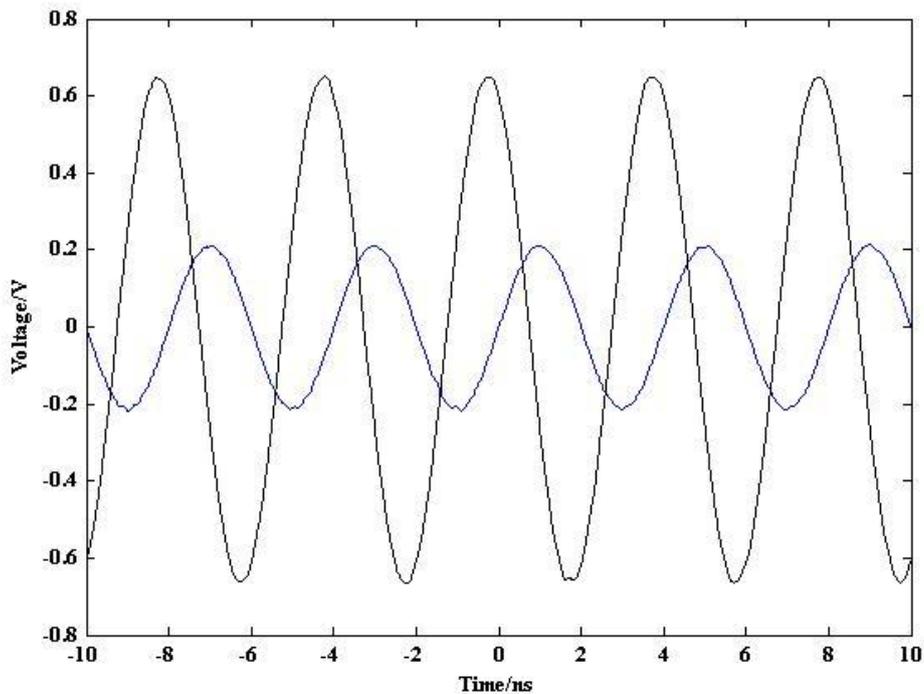


图 3-2 参考信号与受控信号的波形图

锁定后，两个信号通过示波器的触发功能可以实现互相触发，说明两者的相位有了相关性，两个信号的处于锁定的状态。

锁定前后，VCO 输出信号的频谱如图 3-3 所示。

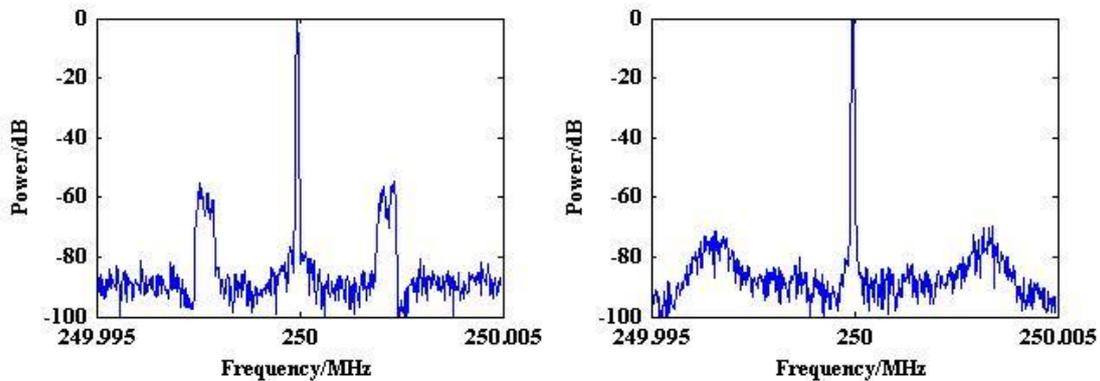


图 3-3 锁定前 VCO 输出信号的频谱图（左）与锁定后的频谱图（右）

根据图 3-3 可见，在未锁定时，VCO 的输出信号在时钟频率的左右各有一个幅度较高边带，这个边带反映了环境因素对 VCO 输出信号的干扰。同时，VCO 的时钟频率在约 100kHz 的范围内变动，不能稳定在同一频率，这种现象主要是加载在 VCO 中受控元件上的电压有纹波造成的。锁定之后，VCO 的输出信号的边带被明显抑制，且由于光电鉴相器的负反馈作用，VCO 的时钟频率稳定在 250MHz，说明锁定后 VCO 输出信号的频率稳定性与频率单一性都有提高。

为了进一步分析锁定系统对 VCO 输出信号性能的改善，我们使用了频谱分析仪通过频谱仪直接测量法测量了 VCO 输出信号在锁定前后的相位噪声，结果如图 3-4 所示。

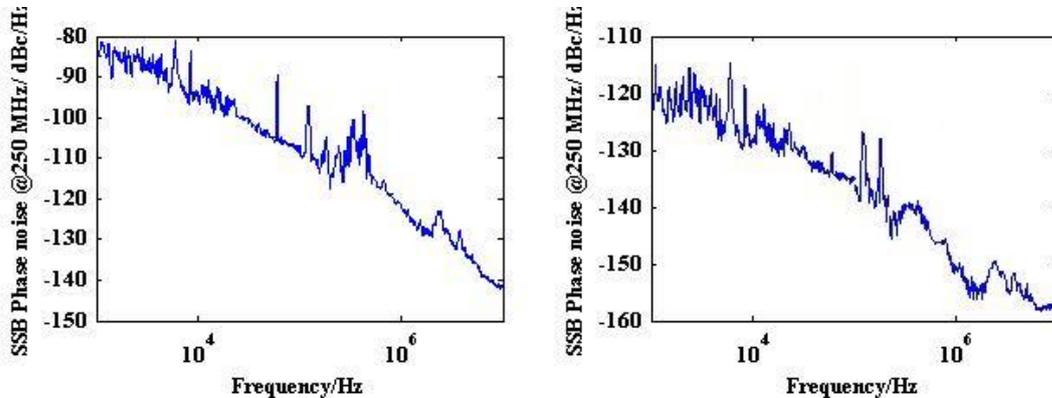


图 3-4 锁定前 VCO 输出信号的相位噪声（左）与锁定后的相位噪声（右）

经过计算，锁定前 VCO 输出信号的均方根时间抖动为 559fs，频段从 1kHz 到 10MHz（本文中均方根时间抖动的计算都采用这一频段）。锁定后输出信号的均方根时间抖动降低到了 34.1fs，可见锁定后 VCO 输出信号的相位噪声明显降低。

在锁定系统中，鉴相器输出的相位误差信号的相位噪声反映了参考信号与受控信号之间的相位噪声，是衡量锁定系统锁定效果与稳定度的重要指标。由锁相环的原理可知，理想状态下相位误差信号的均方根时间抖动应该为 0s，因为此时参考信号与受控信号的相位差是一个固定值。实际上，由于相位差的检测、锁相环路的反馈等过程都需要时间，因此两个信号的相位差不可能完全保持一致，此外，锁相环路中有源器件的噪声、环路的通道失衡等因素也会在环内引入新的噪声，综合这些结果，相位误差信号的均方根时间抖动不是 0s。通过频谱分析仪测量得到的相位误差信号的相位噪声如图 3-5 所示。

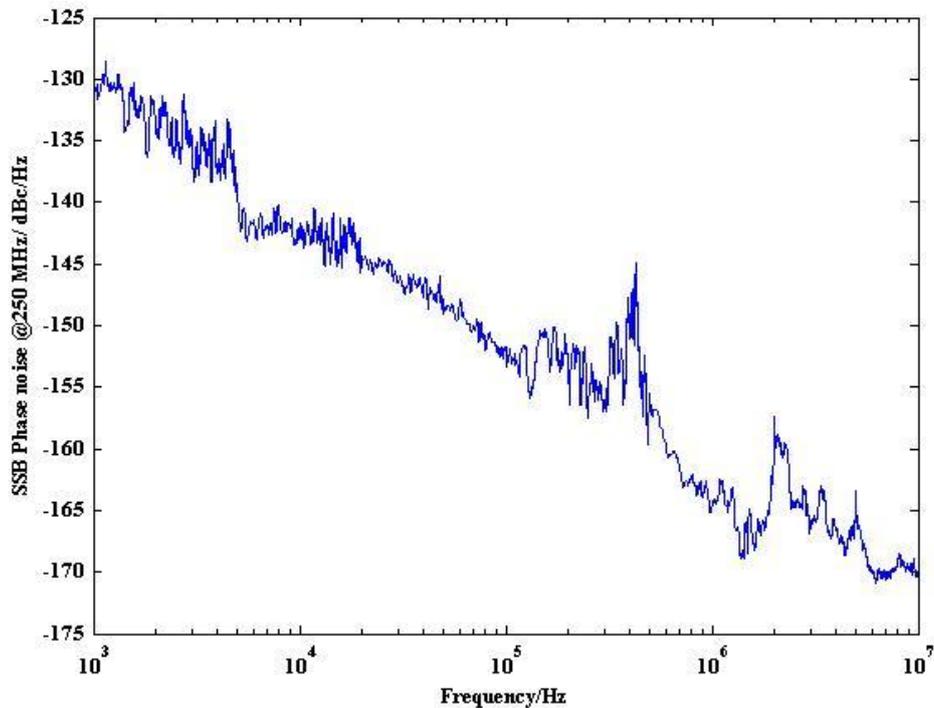


图 3-5 相位误差信号的相位噪声

经过计算，锁定后相位误差信号的均方根时间抖动为 5.41fs，比起锁定之前的结果（约 590fs）明显降低。要进一步降低相位误差信号的相位噪声，应该尽量降低锁相环路中有源器件的噪声、降低电源纹波，同时还需要提高光电鉴相器的 K_d 、提高通道平衡度。

基于射频混频器的被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源锁定系统能够有效的降低 VCO 输出信号的相位噪声，并能够将相位误差信号的均方根时间抖动降低到 5fs 左右。但是对比本章开头提到的一些锁定系统，该锁定系统的性能仍有欠缺。以下的几个原因导致了相位误差信号的相位噪声比较高：1、锁定系统中 VCO 输出信号的频率只有 250MHz，低频率下相位噪声的测量容易受到外界环境的干扰，使结果偏大；2、锁相环路的 K_d 较小，使得相位检测与反馈的时间较长，两个信号的相位差会出现波动；3、射频混频器两个通道间的平衡度不够，在锁定系统中引入了额外的噪声。

3.2 基于新型光电鉴相器的锁定系统

在实现了基于射频混频器锁定系统之后，我们对光电锁定系统有了一定的研究经验。之后，我们实现了基于新型光电鉴相器的锁定系统。该锁定系统较之前的系统，性能有了较大的提升，这一方面与新型光电鉴相器的性能优良有关，另一方面也因为我们从对之前锁定系统的研究中总结了不足，改进了研究方法。

3.2.1 系统结构及原理

基于新型光电鉴相器的锁定系统框图如图 3-6 所示。

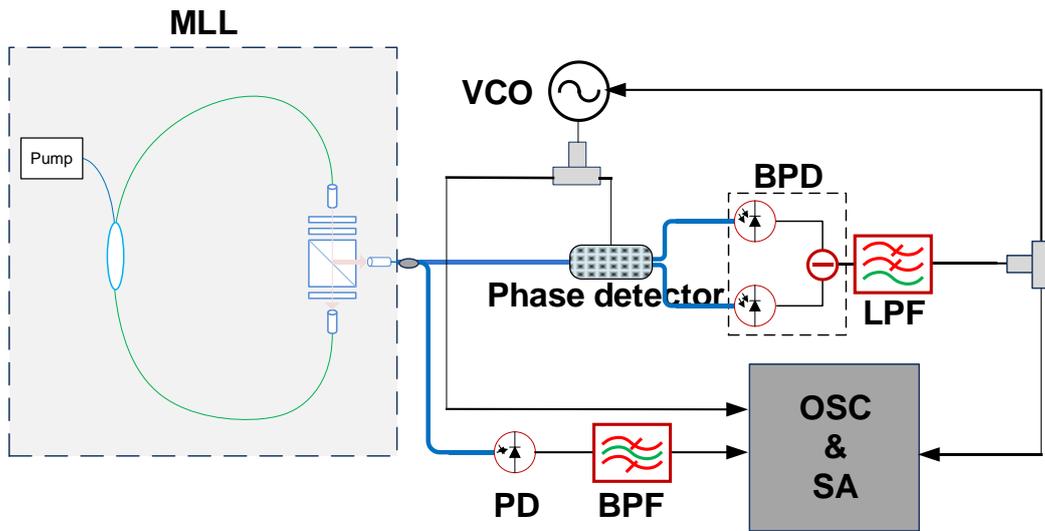


图 3-6 基于新型光电鉴相器的被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源锁定系统

该锁定系统的原理与图 3-1 中的锁定系统原理相同，区别是使用了不同的光电鉴相器。锁定之后，VCO 输出信号的频率为 2.5GHz，锁定在被动锁模光纤激光器输出的 10 次谐波频率上。两者的波形图如图 3-7 所示。蓝色波形为参考信号，频率为 250MHz；黑色波形为受控信号，频率为 2.5GHz。

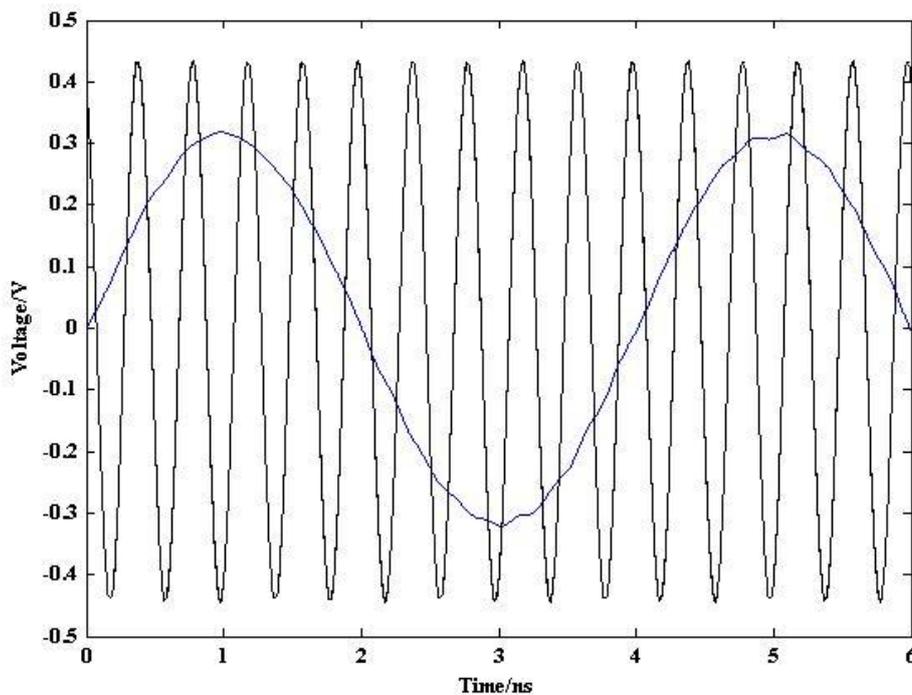


图 3-7 参考信号与受控信号的波形图

锁定后，两个信号通过示波器的触发功能可以实现互相触发，说明两者的相位有了相关性，两个信号的处于锁定的状态。

锁定前后 VCO 输出信号的频谱图如图 3-8 所示。

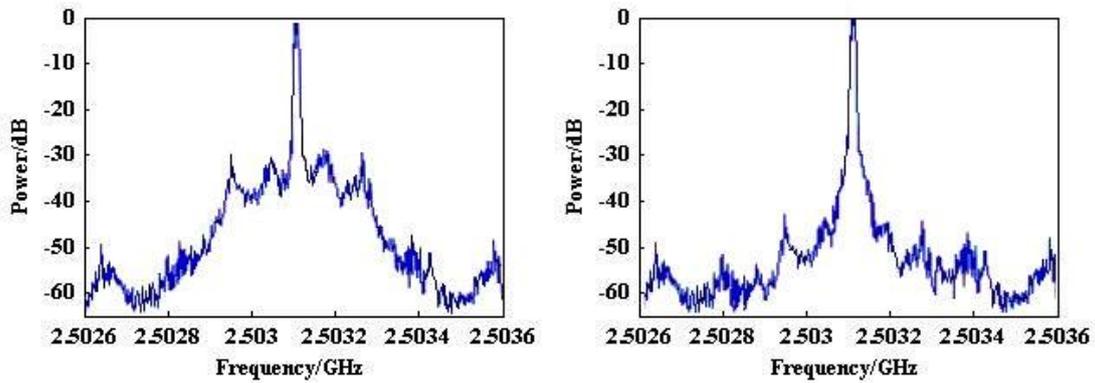


图 3-8 锁定前 VCO 输出信号的频谱图（左）与锁定后的频谱图（右）

由图 3-8 可知，锁定后 VCO 输出信号的频率稳定性与单一性有所提高。为了进一步分析锁定系统对 VCO 输出信号的优化效果，我们测量了锁定前后 VCO 输出信号的相位噪声，结果如图 3-9 所示。

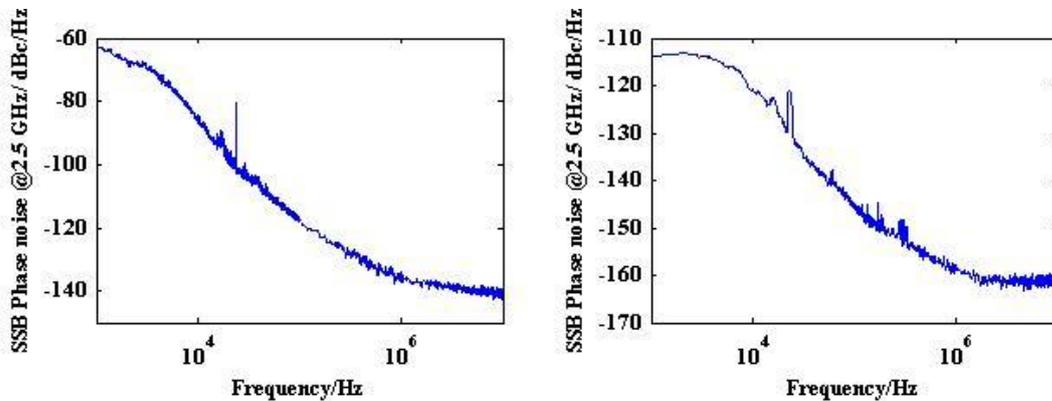


图 3-9 锁定前 VCO 输出信号的相位噪声（左）与锁定后的相位噪声（右）

经过计算，锁定前 VCO 输出信号的均方根时间抖动为 735fs，锁定后输出信号的均方根时间抖动降低到了 29.6fs，有明显的降低。

相位误差信号的相位噪声如图 3-10 所示。

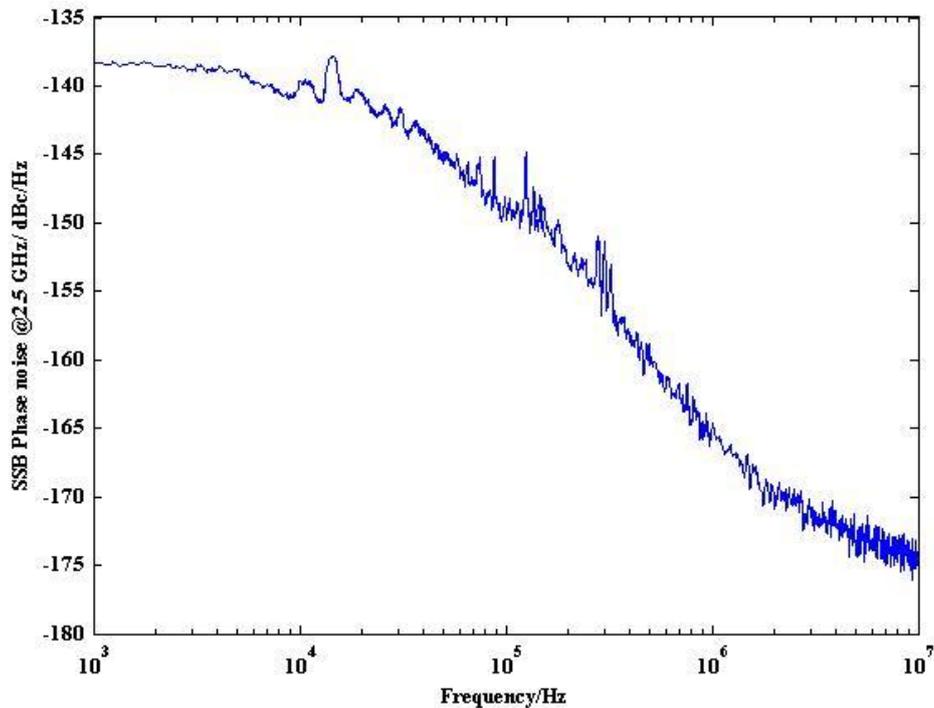


图 3-10 相位误差信号的相位噪声

经过计算，锁定后 VCO 的输出信号与被动锁模光纤激光器的输出信号之间的均方根时间抖动为 1.02fs，比起锁定之前的结果（约 750fs）大大降低。

3.2.2 实验总结

对比基于新型光电鉴相器与基于射频混频器的锁定系统，会发现基于新型光电鉴相器的锁定系统对 VCO 输出信号的稳定作用更明显，这主要有以下几个原因：1、该锁定环路中 VCO 的输出频率为 2.5GHz，是之前的锁定系统中 VCO 输出信号频率的 10 倍，此时相位噪声的测量受外界因素的影响较小。2、两个锁定环路的鉴相器件不同，其中集成光电混频器相比射频混频器能够有效的隔离鉴相过程中的电信号干扰，并有着良好的通道平衡度。

对比本章开头提到的一些锁定系统，该锁定系统的性能仍有欠缺，这需要我们进一步探究系统各部分器件对系统噪声的影响，并对锁定系统进行优化方案。

3.3 锁定系统的优化

为了优化基于新型光电鉴相器的锁定系统的性能，我们从以下两方面入手：1、分析了系统各有源器件（集成光电混频器、平衡 PD）的相位噪声并进行优化。2、对光电鉴相器的相位检测特性进行分析与优化。

3.3.1 系统各有源器件的相位噪声分析

系统中的有源器件平衡 PD 与集成光电混频器。平衡 PD 的相位噪声测量方法为将其光信号输入断开，将电信号输出直接接在频谱分析仪上来测量其相位噪声，结果如图 3-11 所示。经过计算，均方根时间抖动为 21as ($1\text{as}=10^{-18}\text{s}$)，对锁定系统的相位噪声影响不大。

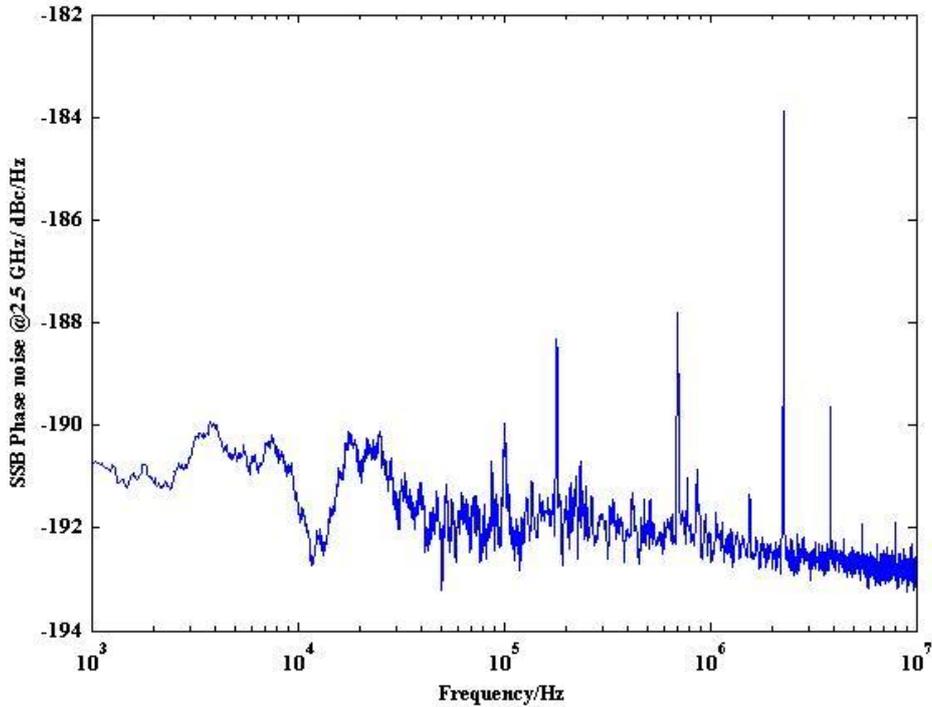


图 3-11 平衡 PD 的相位噪声

集成光电混频器的相位噪声测量方法为将集成光电混频器的电信号与光信号输入断开，并将光输出接入到平衡 PD 中，测量出此时的相位噪声，如图 3-12 所示。经过计算，集成光电混频器的均方根时间抖动为 473as,对锁定系统的相位噪声有所影响。

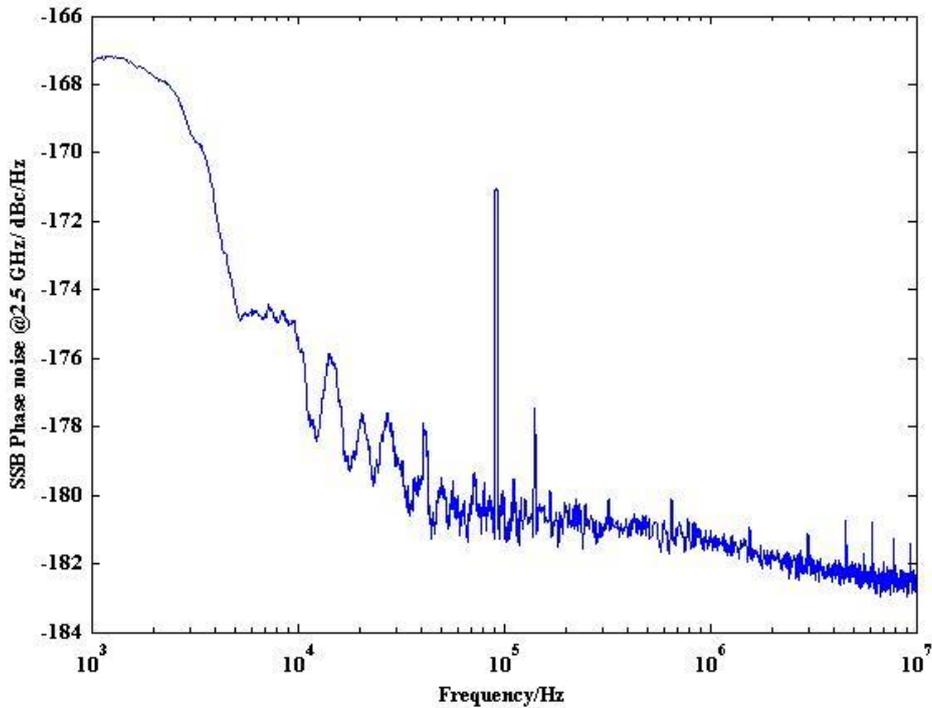


图 3-12 集成光电混频器的相位噪声

集成光电混频器相位噪声的一部分来自混频器的热噪声，另一部分则来自稳压电源的

纹波。为了改善电源的纹波，我们使用了低纹波输出的干电池为集成光电混频器供电^[26]。之后，其相位噪声如图 3-13 所示。经过计算，使用干电池供电后集成光电混频器的均方根时间抖动为 62as，比使用稳压电源供电时的相位噪声低了很多。

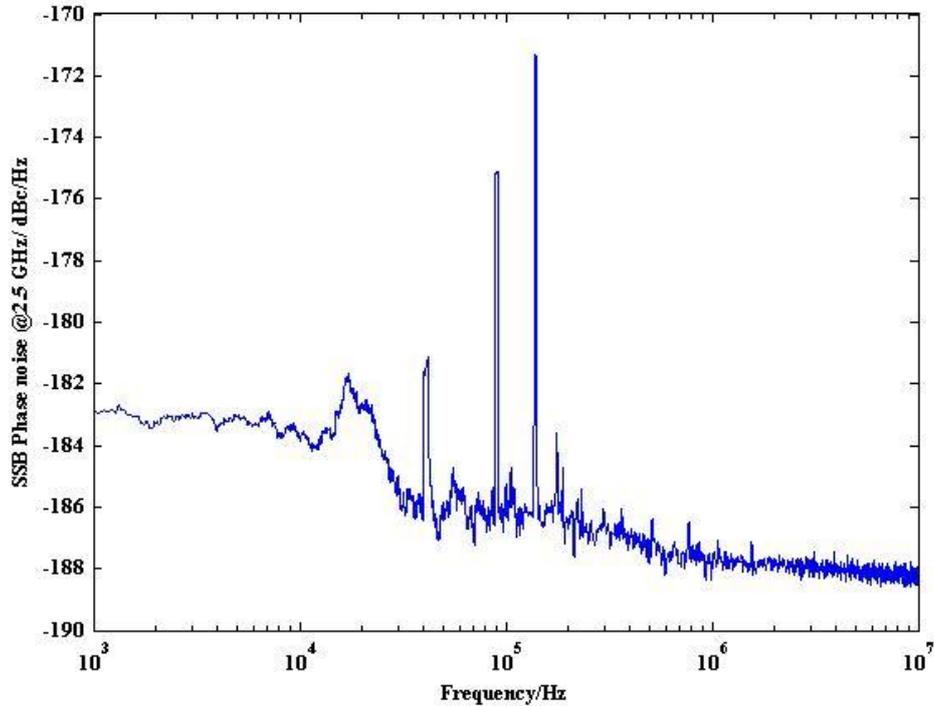


图 3-12 优化后的集成光电混频器的相位噪声

通过对系统中的有源器件相位噪声的分析，我们改变了集成光电混频器的供电方式，进而降低了系统中有源器件的相位噪声，提高了系统的稳定性。

3.3.2 鉴相系数对相位噪声的影响

K_d 是光电锁定系统的一项重要指标，它反映了相位检测的精度与反馈的速度^[27]。 K_d 越大，相位检测的精度越高，反馈曲线的斜率越大。在光电锁定系统中， K_d 应该尽量大。但是当 K_d 过大时，会导致平衡 PD 的输出饱和，影响相位检测的动态范围。在光电锁定系统中， K_d 的大小由环路中各器件的增益决定，可以通过示波器测出。

在图 3-6 的锁定系统中，当 K_d 超过 0.8V/rad 时，平衡 PD 的输出开始饱和，出现了截顶现象，这使得相位检测的线性区缩小。同时，系统开始变得不稳定，稍有触碰就容易失锁。为了能够在增大锁定系统的 K_d 的同时保持系统的稳定性，我们改进了锁定系统的结构，如图 3-13 所示。在该结构中，反馈回路的 K_d 与检测回路的 K_d 大小不同，避免了因为反馈回路 K_d 过大使系统不稳定的现象。这种结构中 K_d 最大可以达到 8V/rad。

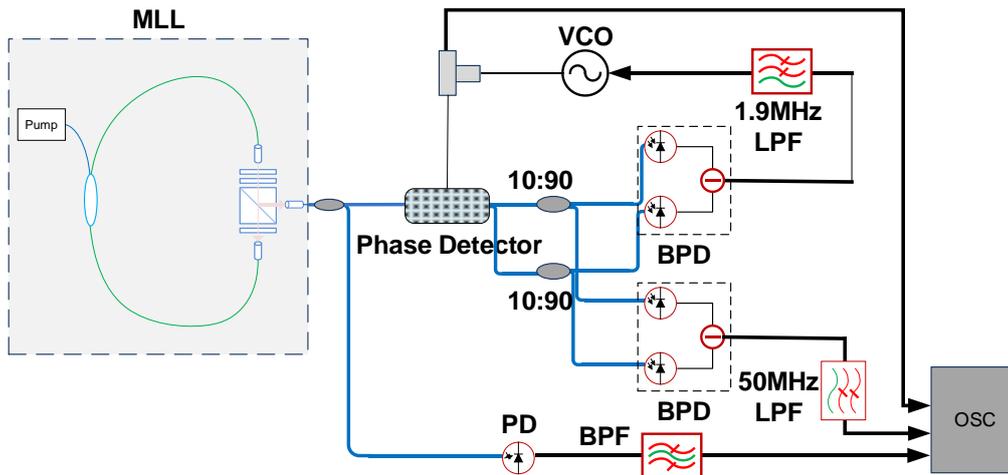


图 3-13 优化后的基于新型光电鉴相器的锁定系统

为了研究 K_d 对相位误差信号的相位噪声的影响，我们通过调整锁定系统中的增益、系统结构等，测出了不同 K_d 下相位误差信号的均方根时间抖动，如图 3-14 所示。由图可知， K_d 越大，相位误差信号的均方根时间抖动越小，锁定效果越好。

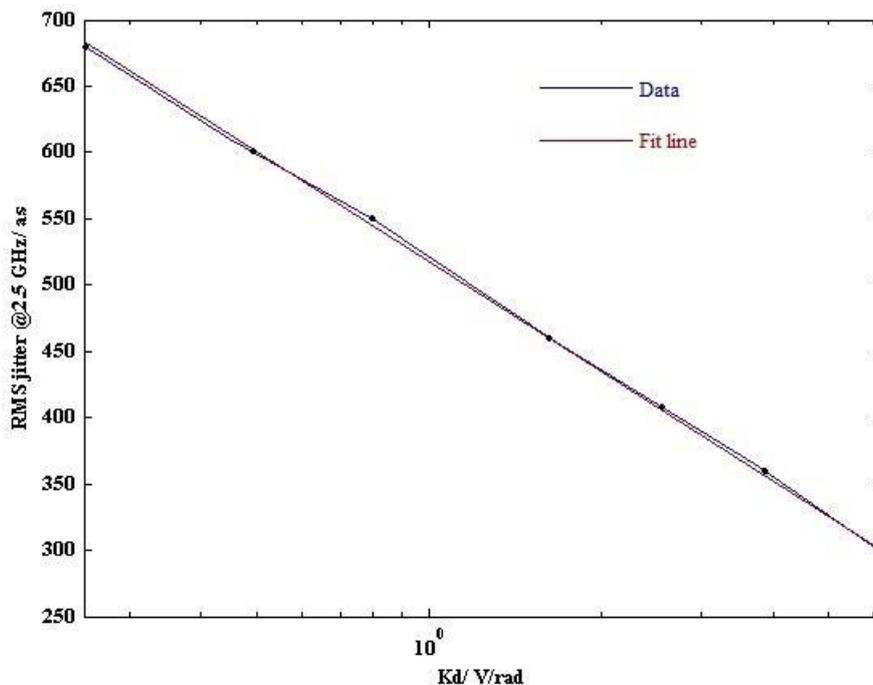


图 3-14 K_d 与锁定系统相对均方根时间抖动的关系

3.3.3 优化结果

通过对锁定系统的分析与优化，我们对基于光电鉴相器的锁定系统做了以下两点优化：1、将集成光电混频器的供电电源由稳压电源变为干电池，减小了电源纹波对锁定系统相位噪声的影响。2、改进了锁定系统的结构，增大了 K_d 并得到了 K_d 与相位误差信号的均方根时间抖动的关系。

经过优化，当 K_d 为 8.187V/rad 时，相位误差信号的均方根时间抖动为 229as，这一结果优于大部分本章开头介绍光电锁定系统。相位误差信号的相位噪声如图 3-15 所示，图中黑色曲线为集成光电混频器的相位噪声，红色曲线为平衡 PD 的相位噪声。

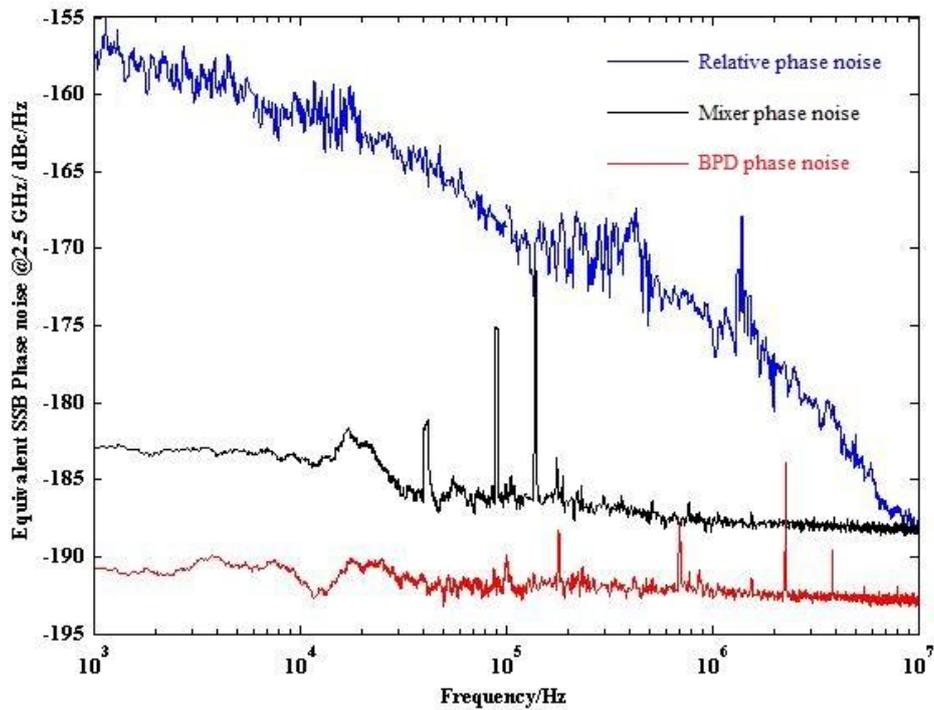


图 3-15 优化后相位误差信号的相位噪声

3.4 本章小结

在本章中，我们首先实现了基于射频混频器的被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的锁定系统。该锁定系统能够有效的降低 VCO 输出信号的相位噪声，并能够将锁定系统相位误差信号的均方根时间抖动降低到 5fs 左右。但是混频器的通道失衡、锁相环路的 K_d 较小、VCO 输出信号的频率较低等原因导致该锁定系统相位误差信号的相位噪声不够低。通过基于射频混频器的锁定系统积累了一定的技术与研究经验后，我们实现了基于新型光电鉴相器的锁定系统，并对该锁定系统做了一系列的分析与优化，其中重点针对锁定系统中有源器件的相位噪声和锁相环路的 K_d 做出了优化。经过优化后，相位误差信号的均方根时间抖动降低到了 229as，性能优于多数光电锁定系统。

第四章 高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器的锁定

被动锁模光纤激光器在光电锁定系统中作为参考信号时，可以有效的改善受控信号的频率特性。在一些系统中，被动锁模光纤激光器需要与作为参考信号的高稳定振荡源进行锁定，以满足特定的应用需求。如在光模数转换系统中，需要作为基准光信号的被动锁模光纤激光器输出信号的频率长期保持在高稳定状态，然而被动锁模光纤激光器输出信号的频率由谐振腔中光纤的长度决定，光纤的长度受湿度、温度等环境因素影响较大，因此不能频率保证长时间的稳定。这种情况下需要将被动锁模光纤激光器与高稳定的振荡源（如原子钟、恒温晶振等）锁定，以减小环境变化对信号频率的影响。又如在激光雷达中，需要被动锁模光纤激光器的输出特定大小的频率的信号，但是被动锁模光纤激光器谐振腔的长度一旦确定输出频率就难以改变。为了使信号频率大小满足要求，需要在谐振腔中加入长度可以改变的光纤，并将其锁定在输出为所需要的频率的参考信号上。

在本章中，我们将研究高稳定振荡源的作为参考信号，频率可变的被动锁模光纤激光器的输出脉冲作为受控信号的光电锁定系统。

4.1 基于 PZT 的频率可变被动锁模光纤激光器

PZT 具有压电效应，在电压作用下会发生形变^[28]。将光纤缠绕在 PZT 上之后，随着 PZT 外加电压的变化，光纤的长度会随着 PZT 的形变而改变。因此，PZT 广泛应用与光纤延时线、光纤移相器等器件中。

我们知道，被动锁模光纤激光器的输出光脉冲的重复频率与激光器的谐振腔中的光纤长度有关，其关系为

$$f = \frac{c}{nL} \quad (4-1)$$

其中 n 为光纤的等效折射率， c 为真空中的光速， L 为谐振腔长度， f 为光脉冲的重复频率。在一般的被动锁模光纤激光器的谐振腔中，光纤长度不能改变，因此其输出光脉冲的重复频率不能被主动的改变，只能被动的受环境影响而变化，这有两个缺点：1、光脉冲的重复频率会随着环境的改变而改变，在一天内波动很大。以 200MHz 重复频率的被动锁模光纤激光器为例，其谐振腔长约为 1m，一般情况下一天光纤相对长度的波动为 10^{-5} 的量级^[29]，因此其一天的频率波动范围约为 5kHz，在稳定的环境下（恒温度恒湿度）频率波动也有约 1kHz，这也是限制被动锁模光纤激光器应用的一大原因。2、光脉冲的重复频率难以精确控制。要想精确获得 200MHz 重复频率的被动锁模光纤激光器，需要将谐振腔长的误差控制在 1 微米的量级，这对于手工切割、熔接的光纤来说几乎不可能。要想克服以上两个缺点且不引入额外的损耗与噪声，在谐振腔中加入 PZT 是一个理想的解决办法。

加入了 PZT 的 NPR 被动锁模光纤激光器的结构示意图如图 4-1 所示。

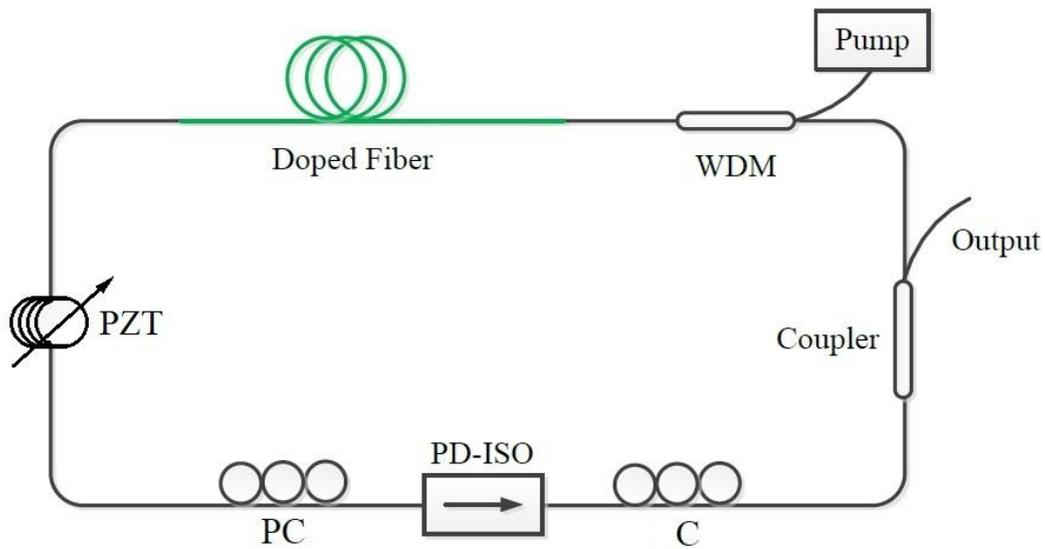


图 4-1 加入了 PZT 的 NPR 被动锁模光纤激光器的结构示意图

PZT 能够使光纤的相对长度变化 10^{-4} 的量级^[28]，只要将谐振腔中十分之一以上的光纤缠绕在 PZT 上，就能够补偿环境改变导致的光纤长度的波动。通过改变 PZT 上的电压，既能够实现对光脉冲重复频率的精确控制，又使得将被动锁模光纤激光器的输出信号锁定在高稳定振荡源的输出信号成为了可能。

要实现高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器的锁定，需要将光电鉴相器的输出反馈在 PZT 上。但 PZT 的驱动电压较大，一般为 100V 以上，因此需要将输出电压经过高压放大器放大后反馈到 PZT 上。谐振腔中加入了 PZT 的被动锁模光纤激光器输出光脉冲的重复频率与加载在 PZT 上的电压关系如图 4-2 所示。

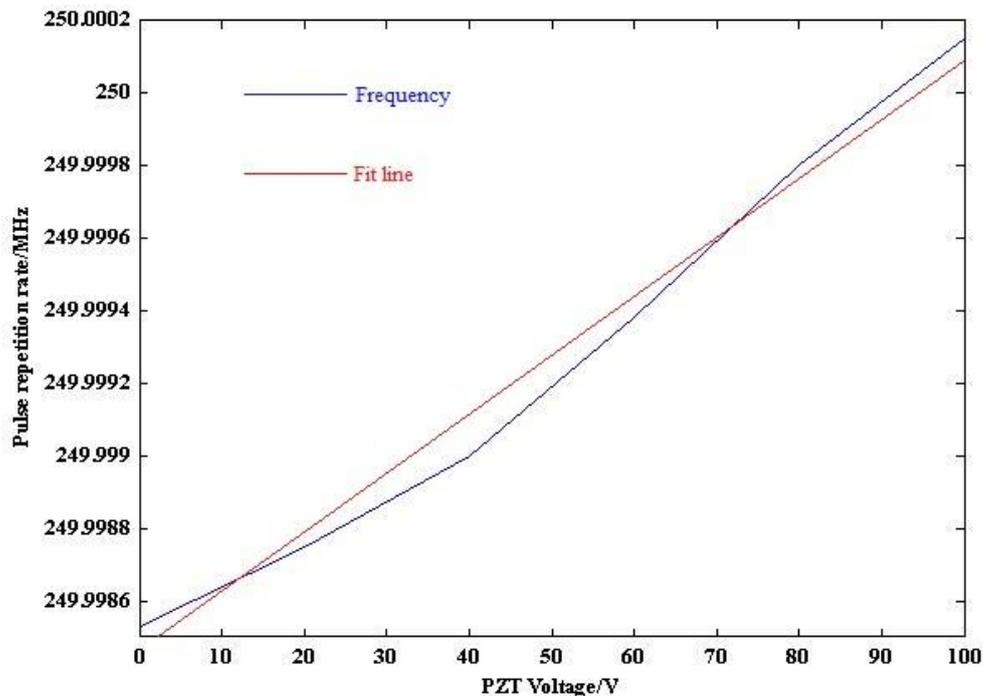


图 4-2 PZT 电压与光脉冲的重复频率关系曲线

4.2 基于射频混频器的锁定系统

基于射频混频器的锁定系统结构如图 4-3 所示，基本结构和锁定原理与图 3-1 中的锁定系统相同。两者的区别为：2、图 4-3 中，被动锁模光纤激光器的谐振腔中加入了 PZT；图 3-1 中没有加。2、射频混频器的反馈电压在图 4-3 中加载到了 PZT 上，在图 3-1 中加载到了 VCO 上。3、在图 4-3 中，电信号源为高稳定振荡源；在图 3-1 中电信号源为 VCO。

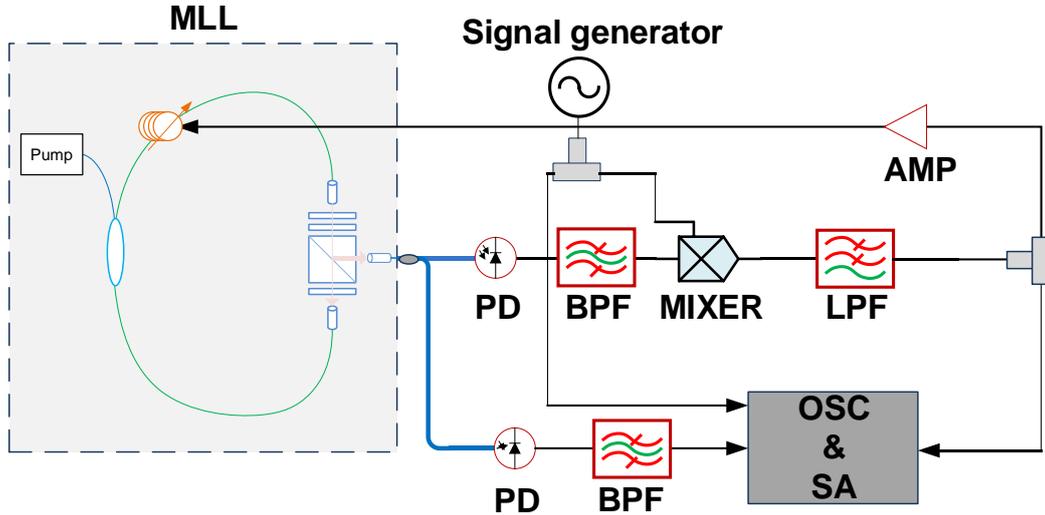


图 4-3 基于射频混频器的高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器锁定系统。AMP：放大器
实验使用的高稳定振荡源的输出信号在 250MHz 的频率下稳定性如图 4-4 所示。

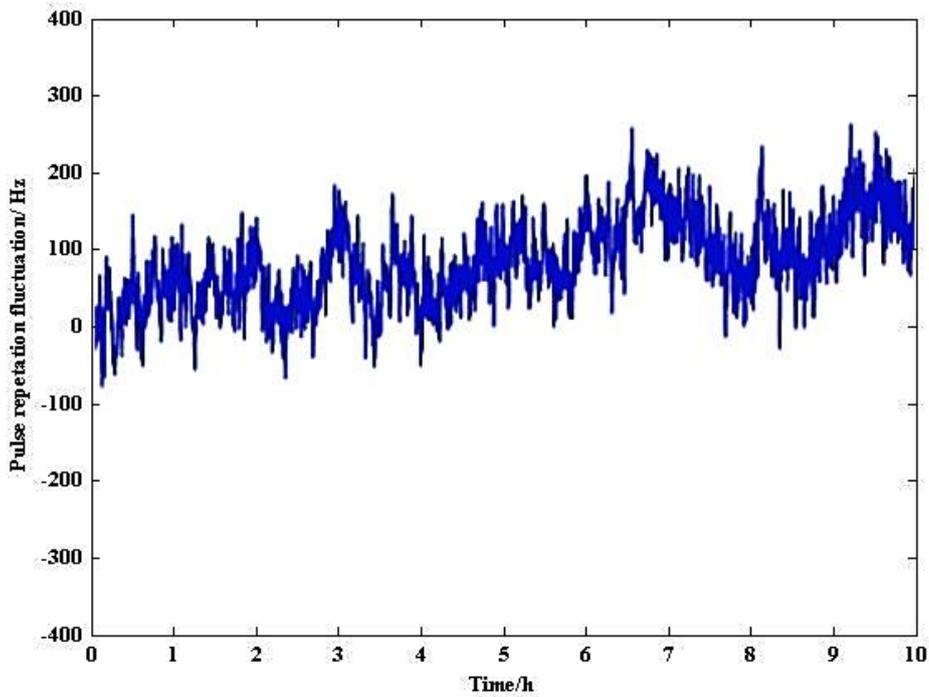


图 4-4 250MHz 高稳定振荡源的频率稳定性

为了验证锁定系统对被动锁模激光器输出脉冲频率稳定性的改善程度，我们测量了被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源锁定前与锁定后光脉冲重复频率的稳定性，测量时长为 10 个小时，结果如图 4-5 所示。由图可见，光脉冲的重复频率在锁定前有约 600Hz 的波动，在锁定后波动降低到了 300Hz。与高稳定振荡源输出信号的频率波动范围一致。

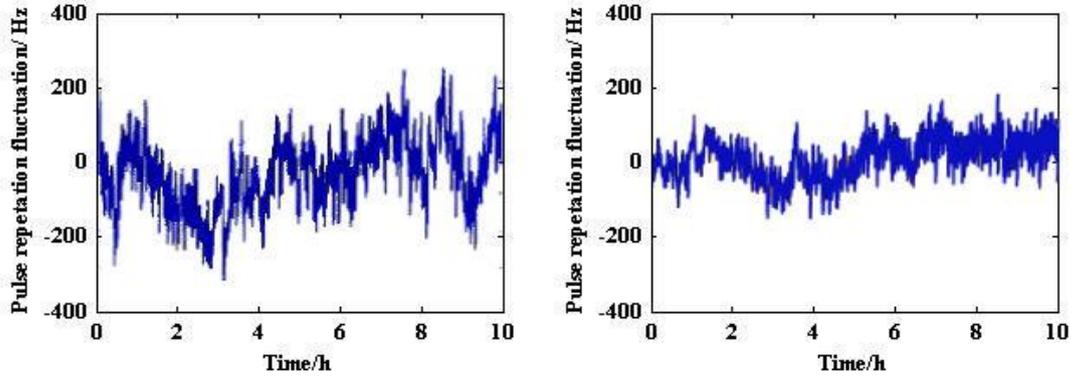


图 4-5 锁定前后光脉冲重复频率的稳定性对比

在锁定前，光脉冲的基频如图 4-6 的左图所示，此时基频频率为 249.9985MHz。锁定后，光脉冲的基频如图 4-6 的右图所示，此时基频频率为 250MHz。可见通过将被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源锁定，可以对光脉冲的重复频率进行调整，调整范围取决于被动锁模光纤激光器谐振腔中缠绕在 PZT 上光纤的长度。

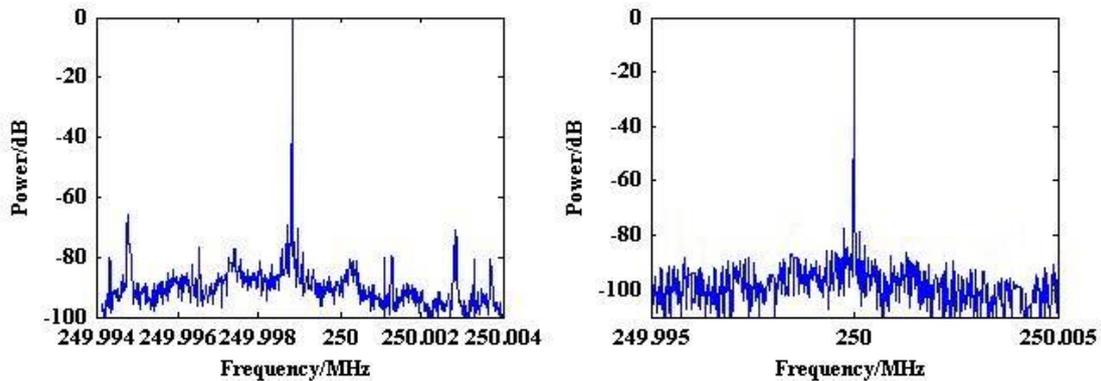


图 4-6 锁定前后光脉冲基频频谱图

锁定后，相位误差信号的相位噪声如图 4-7 所示。经过计算，相位误差信号的均方根时间抖动为 3.27fs，相比图 3-1 中的锁定系统有所降低。但是与第三章开头提到的一些锁定系统以及基于新型光电鉴相器的锁定系统相比仍有一定差距，这主要与锁定系统的锁定频率和光电鉴相器的性能有关。

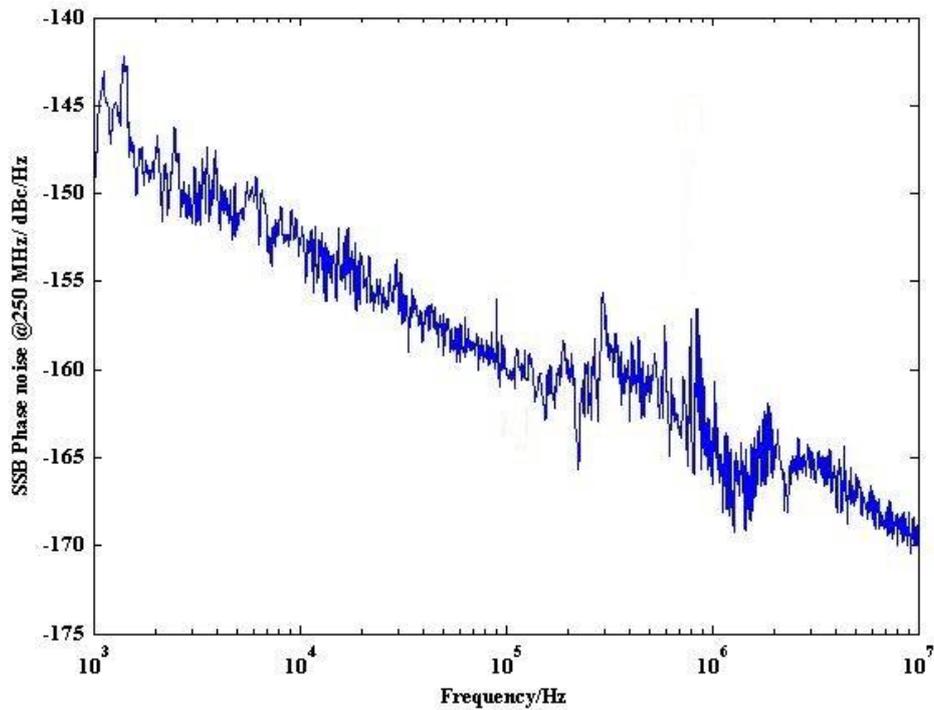


图 4-7 相位误差信号的相位噪声图 (@250MHz)

4.3 基于新型光电鉴相器的锁定系统

基于新型光电鉴相器的锁定系统的结构如图 4-8 所示，基本结构和锁定原理与图 3-6 中的锁定系统相同。两者的区别为：1、图 4-8 中，被动锁模光纤激光器的谐振腔中加入了 PZT；图 3-6 中没有加。2、新型光电鉴相器的输出电压在图 4-8 中加载到了 PZT 上，在图 3-6 中加载到了 VCO 上。3、在图 4-8 中，电信号源为高稳定振荡源；在图 3-6 中电信号源为 VCO。4、在图 4-8 中，电信号的频率为 10GHz；在图 3-6 中电信号的频率为 2.5GHz。

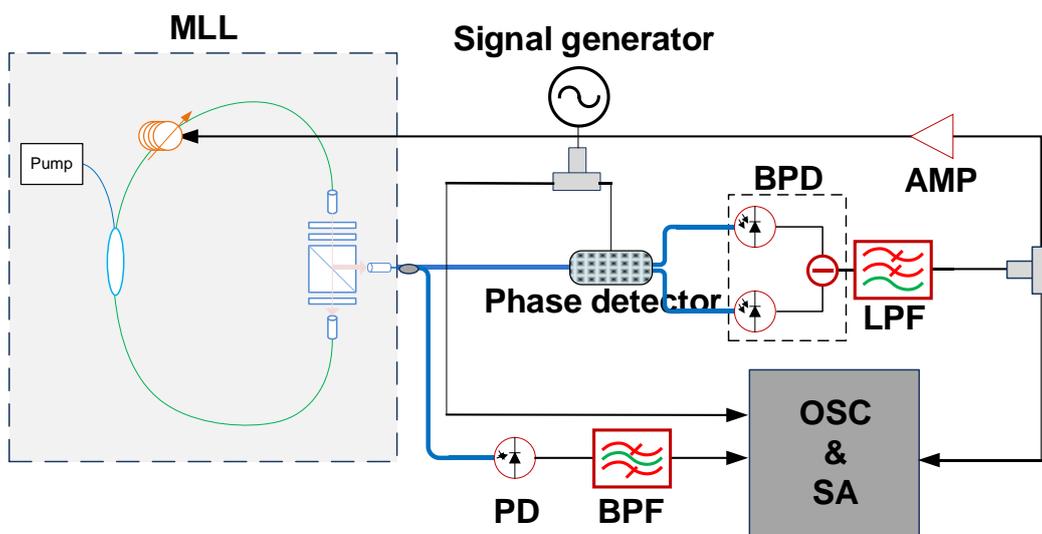


图 4-8 基于新型光电鉴相器的高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器锁定系统

被动锁模光纤激光器输出光脉冲的重复频率稳定性的测量结果如图 4-9 所示。由图可见，在锁定后波动降低到了 100Hz，比图 4-3 中高稳定振荡源频率稳定性的测量结果要好。这主要有两个原因：1、此时的高稳定振荡源工作在 10GHz，而图 4-3 中其工作在 250MHz，工作频率变化了 40 倍，频率稳定性也会有所变化。2、此时光脉冲的 40 次谐波与高稳定振荡源的输出信号锁定，当高稳定振荡源输出信号波动为 40Hz 时，光脉冲基频的波动为 1Hz。因此测量结果会变小。

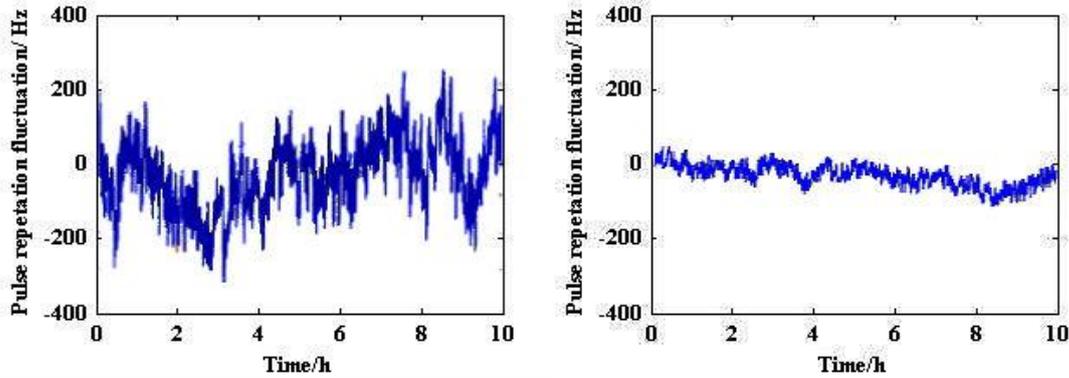


图 4-9 锁定前后光脉冲的重复频率稳定性对比

锁定后，相位误差信号的相位噪声如图 4-10 所示。经过计算，相位误差信号的均方根时间抖动为 383fs，在未对系统进行优化的情况下，已经和图 3-13 中的相位误差信号的均方根时间抖动处于同一数量级。这主要是由于该锁定系统中的两个信号源自身稳定性较高，其均方根时间抖动都在 30fs 左右。

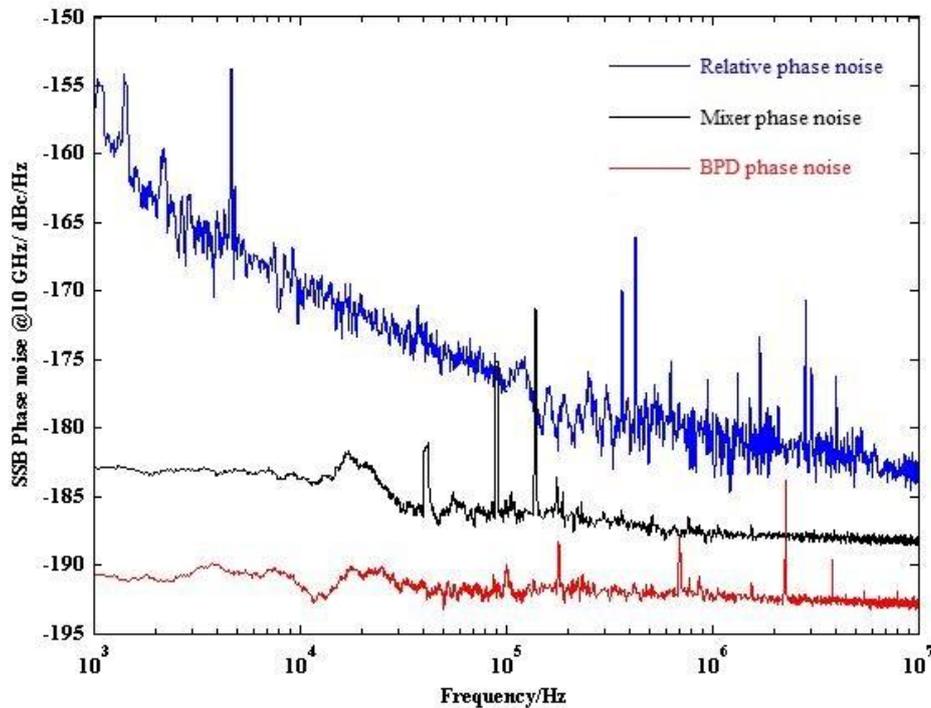


图 4-10 相位误差信号的相位噪声图 (@10GHz)

4.4 本章小结

在本章中，我们首先实现了基于射频混频器的高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器的

锁定系统。该锁定系统能够有效的控制被动锁模光纤激光器输出光脉冲的重复频率，能够将输出光脉冲的重复频率稳定在 300Hz 的波动范围以内，并能够将锁定系统相位误差信号的均方根时间抖动降低到 3fs 左右。但是锁定系统在锁定频率和光电鉴相器性能上的不足使得该锁定系统相位误差信号的相位噪声不够低。随后，我们实现了基于新型光电混频器的锁定系统，该系统相位误差信号的均方根时间抖动为 383as，性能比较出色，且能够将输出光脉冲的重复频率稳定在 100Hz 的波动范围以内。

第五章 总结与展望

本文从探索光电鉴相锁相技术出发，对光电鉴相器与光电锁定系统进行了研究，并最终实现了基于新型光电鉴相器的光电锁定系统。针对该锁定系统，本文做了一系列的分析与优化工作，有效降低了相位误差信号的相位噪声，提高了锁定系统中信号源的频率稳定性。

关于新型光电鉴相器的研究，本文首先对几种已有的光电鉴相器和光电锁定系统进行了分析与研究，总结出了它们的优点与缺陷。在此基础上，本文提出了一种基于集成微波光子器件的新型光电鉴相器，这种新型的光电鉴相器结构简单，稳定性高，适用范围广。

关于被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的锁定系统，本文先后实现了基于射频混频器的锁定系统与基于新型光电鉴相器的锁定系统。通过对比，基于新型光电鉴相器的锁定系统具有高带宽，高稳定性以及低抖动的优点。针对该锁定系统中的不足，本文对系统的相位噪声和光电锁定系统的相位检测特性做出了优化，并使得优化后的的锁定系统性能优于多数光电锁定系统。

关于高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器的锁定系统，本文在基于 PZT 的重复频率可变的被动锁模光纤激光器的基础上，先后实现了基于射频混频器的锁定系统与基于新型光电鉴相器的锁定系统。两个锁定系统都能够对被动锁模光纤激光器输出光脉冲的重复频率进行控制，并能够提高重复频率的稳定性。通过比较，基于新型光电鉴相器的锁定系统性能更加优良。

目前，仍有以下工作存在一定的不足，有待进一步的研究：

(1) 对于新型光电鉴相器，本文是将集成光电混频器，平衡 PD，低通滤波器等元器件通过连接而得到。在接下来的研究中可以通过设计集成电路将这些器件集成在一块芯片上，进而实现对新型光电鉴相器的集成化。

(2) 对于被动锁模光纤激光器与高稳定振荡源的锁定系统，本文中使用的受控信号源为 VCO，在未来的研究工作中可以进一步研究被动锁模光纤激光器与其它受控信号源（如光电振荡器）的锁定系统。

(3) 对于高稳定振荡源与被动锁模光纤激光器的锁定系统，本文尚未针对基于新型光电鉴相器的锁定系统进行优化，在后续工作中可以开展对该锁定系统的优化工作。

参考文献

- [1]. 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2]. 张杰. 强场物理——一门崭新的学科[P]. 中国学术期刊(网络版), 1997(11).
- [3]. Li X, Zou W, Chen J. 41.9 fs hybridly mode-locked Er-doped fiber laser at 212 MHz repetition rate[J]. Optics letters, 2014, 39(6): 1553-1556.
- [4]. C. Otto, K. Lüdge, A. G. Vladimirov, M. Wolfrum, E. Schill. Delay-induced dynamics and jitter reduction of passively mode-locked semiconductor lasers subject to optical feedback[J]. New Journal of Physics, 2012 (11)
- [5]. P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, and A. Capria. A fully photonics-based coherent radar system. Nature, 2014, 507:341-345.
- [6]. J. Kim, J. A. Cox, Chen J, F. X. Kärtner. Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources. Nature Photonics, 2008, 2: 733-736.
- [7]. K. Jung, J. Kim. Sub-femtosecond synchronization of microwave oscillators with mode-locked Er-fiber lasers. Optics letters, 2012, 37(14): 2958-2960.
- [8]. T. K. Kim, Y. Song, K. Jung, C. Kim, H. Kim, C. H. Nam, and J. Kim. Sub-100-as timing jitter optical pulse trains from mode-locked Er-fiber lasers. Optics letters, 2011, 36(22): 4443-4445.
- [9]. D. Hou, X. Xie, Y. Zhang, J. Zhao. Highly Stable Wideband Microwave Extraction by Synchronizing Widely Tunable Optoelectronic Oscillator with Optical Frequency Comb. Scientific Report, 2013.
- [10]. K. Jung, J. Shin, J. Kim. Ultralow Phase Noise Microwave Generation From Mode-Locked Er-Fiber Lasers With Subfemtosecond Integrated Timing Jitter. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(3)
- [11]. G. Agrawal. Applications of nonlinear fiber optics[M]. Academic press, 2001.
- [12]. 钟先琼, 陈建国, 李大义. 三、五阶非线性光纤中的交叉相位调制非稳研究[J]. 中国激光. 2005(08).
- [13]. J. Kasparian, R. Sauerbrey, D. Mondelain. Infrared extension of the super continuum generated by femtosecond terawatt laser pulses propagating in the atmosphere. Optics Letters, 2000.
- [14]. Filamentation of ultrashort light pulses in a liquid scattering medium[J]. Applied Physics B, 2008 (1).
- [15]. G. Agrawal, P. Baldeck, R. Alfano. Modulation instability induced by cross-phase modulation in optical fibers. Physical Review A Atomic Molecular and Optical Physics, 1989.
- [16]. Lu L, Wang J, Pan H. Excited Emission and Self-frequency-doubling Effect of $\text{Nd}:\text{Y}(\text{BO}_3)_4$ Crystal. Chinese Physics, 1986.
- [17]. 任志君, 王辉, 金洪震, 应朝福, 金伟民, 万旭. 具有高阶色散项的交叉相位调制不稳定性分析[J]. 光学学报. 2005(02).
- [18]. J. Diels, J. Fontaine, L. McMichael et al. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy. Applied Optics, 1985.
- [19]. C. Grivas. Optically pumped planar waveguide lasers, Part I: Fundamentals and fabrication techniques[J]. Progress in Quantum Electronics, 2011(6).

- [20]. D. JAGER. Microwave photonics. Optical Information Technology, 1993.
- [21]. Vázquez, Carmen, Vargas, E. Salvador, P. Sanchez, M. José Sagnac loop in ring resonators for tunable optical filters. Journal of Lightwave Technology, 2005.
- [22]. W. Ng, L. Luh, D. Persechini, D. Le. Ultra-high speed photonic analog-to-digital conversion technologies. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2004.
- [23]. M. Amemiya, M. Imae, Y. Fujii. Time and Frequency Transfer and Dissemination Methods Using Optical Fiber Network. Frequency Control Symposium and Exposition, 2005.
- [24]. M. Irsigler, B. Eissfeller. PLL Tracking Performance in the Presence of Oscillator Phase Noise[J]. GPS Solutions, 2002(4).
- [25]. 李计顿. 源的单边带相位噪声测量技术——直接频谱法. 无线电工程, 1990(02).
- [26]. Sun L, Tan X, Xie F. The Battery Management System for Electric Vehicle Based on Estimating Battery's States. 15th Electric Vehicle symposium, 1998.
- [27]. Egan, W. F. Frequency Synthesis by Phase Lock. 2000
- [28]. 余瑞兰, 刘勇, 王安, 李保生. 压电陶瓷相位调制器相移系数的测量[J]. 光电子技术与信息, 2004(06).
- [29]. P. André A. Pinto. Chromatic dispersion fluctuations in optical fibers due to temperature and its effects in high-speed optical communication systems[J]. Optics Communications, 2004(4).

致谢

大学四年的时光，犹如白驹过隙，从我手指间匆匆流过。回首这四年的时光，要感谢的人太多。

首先要感谢我的毕业设计导师邹卫文教授。邹老师是个充满激情与能量的青年科学家，他一丝不苟的科研态度，刻苦钻研的工作作风给我留下了深刻的印象。邹老师有着深厚的理论功底、丰富的创造力与敏锐的洞察力，他总是细致的为我解答学术上的问题。更难能可贵的是，邹老师尤其重视对本科生科研素质的培养。不管工作再忙，他总会抽出时间每周与我讨论，为我把关毕业设计的方向，指出我在研究过程中的弯路和不足。在邹老师的耐心指导下，我在科学研究的道路上踏实前行。

同时，我也要感谢课题组李杏师兄与杨光师兄在实验过程中的指导。李杏师兄将自己调试、制作锁模激光器多年的经验毫无保留的分享给我，在实验过程中给我解决了不少难题。杨光师兄在实验中总是能够发现新的思路，找到新的方法，对我的毕业设计提供了很多启发。杨光师兄对待实验严谨求实的态度也值得我学习。此外，课题组的袁野师兄、张斯滕师兄、于磊师兄等人也在实验仪器的使用、实验系统的优化等方面给了我帮助，在毕业设计的执行过程中给了我毫不遗余力的支持。

感谢在毕业设计中给我提供帮助、指导和启发的人们！

RESEARCH OF SYNCHRONIZATION OF PASSIVE MODE-LOCKED LASER AND HIGHLY STABLE OSCILLATOR

The development of laser has made people discover many new physical phenomena and laws, and the dream of exploring the unknown field gradually become reality. Plenty of phenomena which are undetectable for conventional measurement methods, such as the motion of electrons in the molecule and the breaking and formation of chemical bond, can be now observed by using femtosecond laser technology. The mode-locked fiber laser can stably output ultrafast laser pulses, therefore it becomes the core component of many optical signal processing and optical communication systems. The performance of the mode-locked fiber laser has become the primary limiting factors of these systems. However, the performance of the mode-locked fiber laser still need to be improved in many places, since the pulse output frequency stability is largely affected by the environmental, the phase noise is not small enough, the repetition frequency is not high enough, and the spectrum width are not wide enough. The influence of frequency stability and phase noise on the mode-locked fiber laser is particularly prominent, as it restricts the application range of the mode-locked fiber laser. Although the phase noise of mode-locked fiber laser output signal can be lower than 10 femtoseconds, which is superior to the general electric frequency source, it still too high compared with the sub-femtoseconds jitter of solid state laser. In addition, the frequency of the output signal of the mode-locked fiber laser is relatively large affected by temperature, humidity, air flow and other environmental factors, which also limit its area of application.

In order to overcome these disadvantages, the optoelectronic phase detection and lock technology is gradually developed. Similar to the electric phase-locked loop, the optoelectronic lock system can lock the frequency of the control signal to the frequency of the reference signal. It can make their frequency be same and their phase have a stable difference. The input of the optoelectronic lock system can be either optical or electric signal. By using the optoelectronic lock system, we can generate a set of coherent signals with equally frequency and low phase noise, therefore the frequency stability of the system is improved and the phase noise of the system is reduced. Phase noise is an important parameter to define the stability of a frequency source, and it is the main limiting factor for the performance of many systems, such as communication system, signal processing system, analog digital conversion system etc. For example, in communication system, the phase noise in the system will cause the signal to noise ratio decreased, resulting in the increase of bit error rate; in the analog to digital conversion system, effective bits and phase noise are inseparable, and when phase noise becomes lower, the effective bit will become higher. In the actual measurement, the phase noise is often converted to RMS jitter.

As the most important part of communication, computing and measuring system, the oscillator plays a vital role in the stability and reliability of these systems. Therefore, the stability

of oscillator itself should be as high as possible. In most applications, the conventional electric phase-locked loop can make the stability of the satisfy the oscillator acceptable, but in some large systems, such as active phased array antenna, the large hadron collider, and space explorer, the signal source frequencies of different signal sources should be kept as the same as possible. If we use the traditional electric phase-locked loop to lock the signal sources, the performance of the phase-locked loop will be vulnerable to the interference of external electromagnetic environment. Compared with the output of the electric phase-locked loop, the output pulse of the passive mode-locked laser has strong anti-interference ability and self-stability, so it is an ideal reference signal in such systems. In this paper, the locking technique of the passive mode locked laser with high stability oscillator is studied in order to achieve the above objectives.

In some systems, the passive mode locked laser needs to be locked with a high stability oscillator as a reference signal to meet the specific application requirements. For instance, in the optical analog to digital conversion system, the output signal frequency of passive mode-locked laser should be maintained at the high steady state for a long time. However, the mode-locked laser output signal frequency is determined by the fiber in the laser resonant cavity, whose length is affected by humidity, temperature and other environmental factors, and therefore the laser's frequency cannot guarantee to be stable for a long time. This case requires lock the passive lock mode laser to high stability oscillation source, such as atomic clocks, OCXO, in order to reduce the influence of environmental change. In other applications, such as in the laser radar, the frequency of the output signal of the passive mode-locked laser should be precisely determined. However, once the length of the resonant cavity of the passive mode-locked laser is determined, it is difficult to change so that the output frequency is hard to control and change. In order to satisfy the requirement of the variability of the signal frequency, the length of the optical fiber in the resonant cavity should be changeable. To do so we can add a PZT in the cavity and lock the passive mode-locked fiber laser to a high stable oscillator. In this paper such technology is studied.

After decades of development, the electric phase-locked loop has formed a complete theory and rich practical results. To study the optoelectronic phase detection and lock technology, one can be enlightened by electrical phase-locked loop and electrical phase detector. In fact, in recent years, the optoelectronic phase detection and lock technology has gradually become a new focus in the field of optical research, and several types of optoelectronic phase detector and optoelectronic lock systems are reported. After a comprehensive analysis of these optoelectronic phase detection and lock technology and optoelectronic lock systems, we find that these lock systems are born out of electric phase-locked loop, with only some devices and units, such as optoelectronic feedback and control units, phase detector, etc., are newly proposed in order to fit the optical signal. Therefore, it is seen that the research on the new type of optoelectronic phase detectors is the key work of the study of optoelectronic lock system.

The existing optoelectronic phase detectors have their own advantages and disadvantages. The optoelectronic phase detector based on SHG effect is suitable for optical signal phase detection, which has the advantages of simple principle, low noise, and disadvantages of low stability, complex structure and difficult to integrate. The optoelectronic phase detector based on the sum frequency crystal is suitable for the lock between optical signals, and it can lock the light signals of different wavelengths. The optoelectronic phase detector has the advantages of low noise, and it can effectively eliminate the noise caused by the unbalance of the detection unit. Its

disadvantage is that it is difficult to integrate, and the performance is greatly influenced by the environment. The optoelectronic phase detector based on the radio frequency mixer is suitable for the lock between the optical signal and the electric signal. Its advantages are its principle is simple and its cost is low, and its disadvantages are that it is limited by the bandwidth of the mixer, which cannot be applied in the system of high frequency and high bandwidth, and the noise of the system is large. The optoelectronic phase detector based on Sagnac ring is suitable for the lock between the optical signal and the electric signal. The optoelectronic phase detector can be used in the synchronization system of some wide band and high frequency signals. Its disadvantage is that the structure is relatively complex so it is difficult to integrate.

Based on the investigation of several kinds of optical phase detector, we put forward a new type of optoelectronic phase detector, which is based on the integrated microwave photonic devices. The optoelectronic phase detector is suitable for the lock between passive mode-locked laser and highly stable oscillator. It is simple in principle, which only need an integrated optoelectronic mixer, a balanced PD and a RF low-pass filter. It is also relatively low cost and is easy to integrate. The operating frequency and the bandwidth of the integrated optoelectronic mixer are high, so the optoelectronic phase detector is suitable for high frequency and wide band wide applications. The disadvantage is that the balanced PD thermal noise and the noise caused by the bias voltage of the integrated optoelectronic mixer will decrease the stability of the detector, but the appropriate optimization measures can be taken to reduce these noises.

In order to optimize the performance of novel optoelectronic phase detector, we studied the the lock between passive mode-locked laser and highly stable oscillator and realized two lock systems based on the RF mixer based phase detector and the novel optoelectronic phase detector respectively. By comparison, the novel optoelectronic phase detector is significantly better than others. In addition, we also analyze the influence of the power supply noise, PD noise, test system noise, and we optimize the the novel optoelectronic phase detector based locking system according to the analysis results, which makes the system become more stable.