

# 基于光子射频振荡器的高灵敏度光学探测方法

牟宁, 高万荣, 吕望晗

(南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 针对复杂背景下高灵敏度光学探测问题, 提出了一种基于光子射频振荡器的高灵敏度光学探测方法。首先通过光子射频振荡机理构建了系统, 然后对系统进行数学建模, 并进行了详细的推导分析。同时, 根据光子射频振荡器噪声功率谱密度及系统设计, 分析了系统产生的超低相位噪声功率谱特性, 给出了设计系统仿真结果。仿真实验结果表明, 所提出的方法与直接探测方法相比, 光学探测灵敏度具有数量级的提高, 同时能有效抑制背景色散光谱对目标信息检测的影响, 系统所产生的超低相位噪声特性, 将有力提升光学探测器对目标微多普勒信号的检测能力。

**关键词:** 射频光子学; 超低相位噪声; 振荡器; 超外差探测

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018288

## High sensitivity optical detection method based on photon RF oscillator

MU Ning, GAO Wanrong, LYU Wanghan

School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

**Abstract:** Based on the research of optical coherent detection in complex background, a new type of laser superheterodyne detection method was proposed, which based on a photon radio frequency technology. Firstly a system by photon RF oscillation mechanism and mathematical model was constructed. The principle of constructing the system was deduced and analyzed. The correctness of the method was verified by theoretical simulation and experiment. Compared with the traditional technology, the proposed method can improve the sensitivity of optical detection by several orders of magnitude, and can effectively suppress the influence of background dispersion spectrum on target information detection.

**Key words:** radio frequency photonics, ultra low phase noise, oscillator, laser detection

### 1 引言

一般来说, 光学探测系统采用的方法是直接检测, 即系统相干得到直流或低频信号。当探测目标回波很弱时, 系统输出的检测信号很微弱, 易被直流电源中的低频杂波所淹没, 从而存在易使检测信号淹没在噪声中, 导致系统检测目标的能力减小<sup>[1-2]</sup>, 严重时导致探测系统无法工作。后来技术的发展先后出现了一些光学差频的方法, 例如采用 2 个相位

锁定具有不同波长的激光源进行拍频方法, 以及在一个光学振荡腔内同时产生 2 个不同波长的光纤激光器的拍频方法。但是, 这些方法通常要求 2 个激光源频率必须稳定, 一旦光频发生微小的频偏, 将带来光学拍频信号的相位噪声急剧恶化。

随着工业、军事及医学的探测要求的提高, 对微弱信号和微动目标的检测提出了更高的要求, 这意味着光学探测系统要有更优的相位噪声性能。

本文基于光子射频技术, 提出了一种新的光学

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61275198, No.60978069)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61275198, No.60978069)

检测方法，即基于光子射频振荡器的高灵敏度光学探测方法，这一方法与传统技术相比，能有效地提升现有光学相干检测系统的检测能力，尤其是对微动目标的检测能力具有数量级的提高，特别在激光雷达探测领域中具有重要的实用价值。

## 2 系统构建

基于光子射频振荡器的高灵敏度光学探测方法的系统结构如图 1 所示，其工作原理如下。

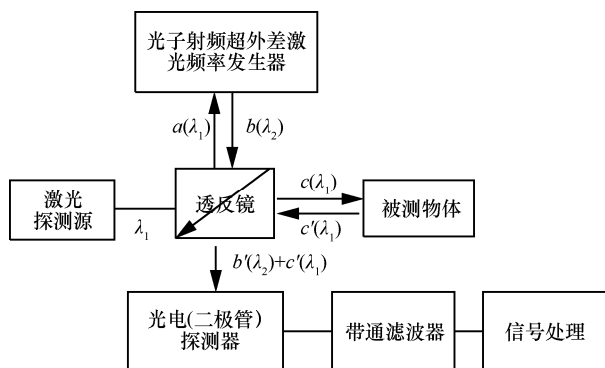


图 1 激光探测系统结构

首先由激光探测源发出载波信号  $\lambda_1$ ，经过透反镜后载波信号  $\lambda_1$  被分成光束  $a(\lambda_1)$  和  $c(\lambda_1)$ ，其中  $c(\lambda_1)$  射向被测物体，而  $a(\lambda_1)$  射向光子射频超外差激光频率发生器，以  $\lambda_1$  为基准并由超外差激光频率产生器产生出信号  $b(\lambda_2)$ 。这时，所设计产生的信号  $b(\lambda_2)$  的频率值，与透反镜输入给超外差激光频率产生器的信号频率  $a(\lambda_1)$  值要保持一个载波频差。信号  $b(\lambda_2)$  通过透反镜后得到的  $b'(\lambda_2)$  与射向被测物体的  $c(\lambda_1)$  所反射产生的回波  $c'(\lambda_1)$  一起加到达光电(二极管)探测器，因其平方律检波，将导致 2 个光信号  $b'(\lambda_2)$  和  $c'(\lambda_1)$  信号拍频。这时，携带被测目标信息的中频信号，经过带通滤波器滤波，滤除高次谐波和干扰信号。经过这一拍频处理，所得到被测信息的信杂比大大提高，带外抑制能力大于 30 dB。

激光探测系统中的光子射频超外差激光频率发生器系统的结构如图 2 所示，由激光探测源发出的信号  $\lambda_1$ ，经过透反镜反射过来的部分光波，通过

光环行器 1 端口 1 耦合到光调制器(MZM)，调制后的信号通过光纤传输后，由光耦合器分为 2 路信号，一路到达光电(二极管)检测器，由光电检测器解调出的调制信息经过放大、滤波后再馈送给 MZM，使上述系统形成正反馈，实现射频自激振荡。系统利用了光调制器以及光纤延迟线中的传输特性，把光转换成了稳定性好、频谱纯度高的射频信号。光耦合器输出的另一路光信号到达光环行器端口 3，并在光环行器端口 1 输出。该输出信号是以  $\lambda_1$  信号频率为基准，符合系统设计要求的激光超外差本振信号  $\lambda_2$ 。

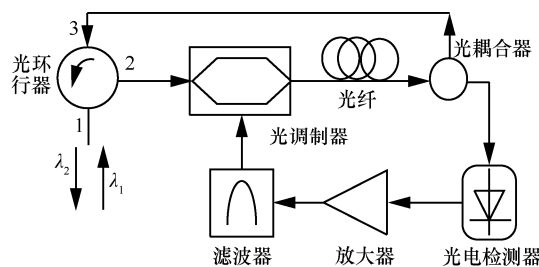


图 2 超外差激光频率发生器系统构建

## 3 系统拍频数学推导分析

### 3.1 系统模型构建

在图 2 所述系统中，设  $\lambda_1$  采用一个普通的马赫-曾德尔光调制器，通过双边带调制的方法在光调制器的输出端产生 2 个或多个频率不同的光波，这种光调制器的输出为<sup>[3]</sup>

$$E_{\text{out}}(t) = Am \left\{ \cos \left[ \omega_0 t + \left( \frac{V_{dc}}{V_{\pi}} \right) \pi + \left( \frac{V_{ac}}{V_{\pi}} \right) \cos \omega t \right] + \cos \left[ \omega_0 t + \left( \frac{V_{ac}}{V_{\pi}} \right) \pi \cos(\omega t + \Delta\theta) \right] \right\} \quad (1)$$

其中， $\omega_0$  是激光载波角频率（设为连续光）， $\omega$  是射频角频率（正弦波），光调制器输出的信号经过光纤延迟线的传输，通过光分功器分为 2 路输出，一路由光电转换器把光信号转换为射频电信号，由放大器及滤波后反馈给调制器，足够的正反馈维持回路的自激振荡，而光子微波振荡回路的射频振荡频率<sup>[3]</sup>为

$$V_{\text{out}}(t) = V_{ph} \left\{ 1 - \eta \sin \left( \frac{\pi V_B}{V_{\pi}} \right) \left[ J_0 \left( \frac{\pi V_0}{V_{\pi}} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m} \left( \frac{\pi V_0}{V_{\pi}} \right) \cos(2m\omega t + 2m\beta) \right] - 2\eta \cos \left( \frac{\pi V_B}{V_{\pi}} \right) \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m+1} \left( \frac{\pi V_0}{V_{\pi}} \right) \sin[(2m+1)\omega t + (2m+1)\beta] \right\} \quad (2)$$

其中,  $V_B$  是调制器偏置电压;  $V_\pi$  是调制器半波电压;  $V_{ph}$  是振荡信号幅度;  $J_0$ 、 $J_{2m}$  为贝赛尔函数;  $\omega$  是光子射频振荡器振荡频率, 通过设计系统中的光纤数值, 能产生超低相位噪声的振荡频率  $\omega$ , 具体将在 4 节中详细陈述。

根据光子微波振荡回路振荡频率, 图 1 中光耦合器输出的另一路信号为

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= E_0 \cos(\omega_0 t) V_{\text{out}}(t) \\ &\approx E_0 \left( V_{ph} - V_{ph} \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_0\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \right) \cos(\omega_0 t) - \\ &J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\{\cos[(\omega_0 - 2m\omega)t - 2m\beta] + \cos[(\omega_0 + 2m\omega)t + 2m\beta]\} \end{aligned}$$

由上式看出, 调制器输出有 3 种频率成分, 分别为,  $\omega_0$ 、 $\omega_0 - 2m\omega$ ,  $\omega_0 + 2m\omega$ , 通过选择相应的滤波器滤出感兴趣的成分, 形成需要产生的激光超外差频率。

### 3.2 激光探测系统拍频数学推导分析

在式(2)中含有  $\omega$  的谐波分量, 由光子微波振荡回路中的滤波器, 选出想要的频率分量。将计算式(2), 分为偶次谐波分量和奇次谐波分量这 2 种情况进行讨论。

**情况 1** 偶次谐波分量。滤波器的中心频率为  $2m\omega$  是偶次谐波, 这时滤波输出电压可以表示为

$$\begin{aligned} V_{\text{out}}(t) &= V_{ph} \left\{ 1 - \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) \left[ J_0\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) + \right. \right. \\ &2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cos(2m\omega t + 2m\beta) \left. \right\} \\ &= V_{ph} - V_{ph} \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_0\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) - \\ &\eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cos(2m\omega t + 2m\beta) \quad (3) \end{aligned}$$

假设激光探测源给的信号为  $E_0 \cos(\omega_0 t)$ , 通过调制器之后, 输出端的激光波信号可表示为

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= E_0 \cos(\omega_0 t) V_{\text{out}}(t) \\ &\approx E_0 \left( V_{ph} - V_{ph} \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_0\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \right) \cdot \\ &\cos(\omega_0 t) - J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\{\cos[(\omega_0 - 2m\omega)t - 2m\beta] + \\ &\cos[(\omega_0 + 2m\omega)t + 2m\beta]\} \quad (4) \end{aligned}$$

这时, 光调制器输出主要有 3 种频率成分, 分别为  $\omega_0$ 、 $\omega_0 - 2m\omega$ 、 $\omega_0 + 2m\omega$ , 选择相应的滤波器滤除感兴趣的成分, 然后与回波信号  $A_r \cos(\omega_r t)$  进行合成, 其表示式为  $V_{\text{dec}}(t) = E_{\text{out}}(t) + A_r \cos$ , 采用平方律检测器进行混频, 输出信号可以表示为

$$\begin{aligned} v_1 &= (E_{\text{out}}(t) + A_r \cos(\omega_r t))^2 \\ &= 0.5 \left( J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \right)^2 \cdot \\ &\cos[2(\omega_0 - 2m\omega)t - 4m\beta] + 0.5(A_r)^2 \cos(2\omega_r t) + \\ &A_r J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\cos[(\omega_0 - 2m\omega + \omega_r)t - 4m\beta] + \\ &A_r J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) \cdot \\ &2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cos[(\omega_0 - 2m\omega - \omega_r)t - 4m\beta] \quad (5) \end{aligned}$$

由上式可以看出, 平方律检测器的输出频率为

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\omega_0 - 4m\omega \\ f_2 &= 2\omega_r \\ f_3 &= \omega_0 - 2m\omega + \omega_r \\ f_4 &= \omega_0 - 2m\omega - \omega_r \quad (6) \end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned} v_1' &= (E_{\text{out}}(t) + A_r \cos(\omega_r t))^2 \\ &= 0.5 \left( J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \right)^2 \cdot \\ &\cos[2(\omega_0 + 2m\omega)t + 4m\beta] + 0.5(A_r)^2 \cos(2\omega_r t) + \\ &A_r J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) 2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\cos[(\omega_0 + 2m\omega + \omega_r)t - 4m\beta] + A_r J_1(\alpha) E_0 \eta \sin\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) \cdot \\ &2J_{2m}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cos[(\omega_0 + 2m\omega - \omega_r)t - 4m\beta] \quad (7) \end{aligned}$$

输出频率为

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\omega_0 + 4m\omega \\ f_2 &= 2\omega_r \\ f_3 &= \omega_0 + 2m\omega + \omega_r \\ f_4 &= \omega_0 + 2m\omega - \omega_r \quad (8) \end{aligned}$$

**情况 2** 奇次谐波分量。滤波器的中心频率为  $(2m+1)\omega$ , 是滤波器滤出奇次谐波情况, 这时滤

波器输出电压可以表示为

$$\begin{aligned} V_{\text{out}}(t) &= V_{ph} - 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \sin[(2m+1)\omega t + (2m+1)\beta] \\ &= V_{ph} - 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \cos\left[(2m+1)\omega t + (2m+1)\beta - \frac{\pi}{2}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

假设激光探测源给的信号为  $E_0 \cos(\omega_0 t)$ ，通过调制器之后，输出端的激光波信号可表示为

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= E_0 \cos(\omega_0 t) V_{\text{out}}(t) \\ &\approx E_0 V_{ph} \cos(\omega_0 t) - J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \left\{ \cos\left[(\omega_0 - (2m+1)\omega)t - (2m+1)\beta + \frac{\pi}{2}\right] + \right. \\ &\quad \left. \cos\left[(\omega_0 + (2m+1)\omega)t + (2m+1)\beta - \frac{\pi}{2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

该信号的频率成分有3种， $\omega_0$ ， $\omega_0 + (2m+1)\omega$ ， $\omega_0 - (2m+1)\omega$ 。采用平方律检波之后，可以得到

$$\begin{aligned} v_2 &= (E_{\text{out}}(t) + A_r \cos(\omega_r t))^2 \\ &= 0.5 \left( J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \right)^2 \cdot \\ &\quad \cos[2(\omega_0 - (2m+1)\omega)t - 2(2m+1)\beta + \pi] + \\ &\quad 0.5(A_r)^2 \cos(2\omega_r t) + \\ &\quad A_r J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \cos\left[(\omega_0 - (2m+1)\omega + \omega_r)t - (2m+1)\beta + \frac{\pi}{2}\right] + \\ &\quad A_r J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \cos\left[(\omega_0 - (2m+1)\omega - \omega_r)t - (2m+1)\beta + \frac{\pi}{2}\right] \end{aligned} \quad (11)$$

平方律检测器的输出频率为

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\omega_0 - (4m+2)\omega \\ f_2 &= 2\omega_r \\ f_3 &= \omega_0 - (2m+1)\omega + \omega_r \\ f_4 &= \omega_0 - (2m+1)\omega - \omega_r \end{aligned} \quad (12)$$

另一种情形的平方检波器输出为

$$\begin{aligned} v_3 &= (E_{\text{out}}(t) + A_r \cos(\omega_r t))^2 \\ &= 0.5 \left( J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \right)^2 \cdot \\ &\quad \cos[2(\omega_0 + (2m+1)\omega)t + 2(2m+1)\beta - \pi] + \\ &\quad 0.5(A_r)^2 \cos(2\omega_r t) + A_r J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \cos\left[(\omega_0 + (2m+1)\omega + \omega_r)t + (2m+1)\beta - \frac{\pi}{2}\right] + \\ &\quad A_r J_1(\alpha) E_0 2\eta \cos\left(\frac{\pi V_B}{V_\pi}\right) J_{2m+1}\left(\frac{\pi V_0}{V_\pi}\right) \cdot \\ &\quad \cos\left[(\omega_0 + (2m+1)\omega - \omega_r)t + (2m+1)\beta - \frac{\pi}{2}\right] \end{aligned} \quad (13)$$

检测器的输出频率为

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\omega_0 + (4m+2)\omega \\ f_2 &= 2\omega_r \\ f_3 &= \omega_0 + (2m+1)\omega + \omega_r \\ f_4 &= \omega_0 + (2m+1)\omega - \omega_r \end{aligned} \quad (14)$$

从式(7)和式(13)可以看出：输出中包含有多个谐波分量，通过一个射频窄带滤波器滤除谐波项，可以得到需要得中频信号，通过对中频信号进行滤波，即可去除杂散光。

所以信号检测能力与直接检测相比，外差式的被测信息的信杂比大大提高，带外杂波和噪声抑制能力大于45 dB以上，同时接收机灵敏度得到大力提升。我们认为，这是由于这里的中频信号电平是由参考光和信号光平均功率的乘积得到的，信号电平比直接探测方法要强得多，所以，只要加大参考光电平输出，即使目标回波信号很弱也能检测出来。另外，系统中光子射频振荡器另一个特点是系统具有超低相位噪声特性，这一特性将有力提升光学探测器对目标微多普勒信号的检测能力。

#### 4 光子射频振荡器系统相位噪声仿真分析

在该系统中，相位噪声决定了射频信号频谱的纯净度。系统噪声由热噪声、散粒噪声和激光相对强度噪声组成，光子射频振荡器射频噪声功率谱密度为<sup>[4-5]</sup>

$$\rho_N = 4k_B T(NF) + 2eI_{ph} R + N_{\text{RIN}} I_{ph}^2 R \quad (15)$$

而光子射频振荡器中振荡频率功率谱密度为

$$S(f') = \frac{\delta}{\left(2 - \frac{\delta}{\tau}\right) - 2\sqrt{1 - \frac{\delta}{\tau}} \cos(2\pi f' \tau)} \quad (16)$$

其中,  $\delta$  为光子射频振荡器的噪声信号比,  $f'$  为光子射频振荡器系统输出的微波信号的频偏量。通过进一步整理得到<sup>[4-6]</sup>

$$S(f') = \begin{cases} \frac{4\tau^2}{\delta}, & |f'| \ll \frac{\Delta f_{\text{FWHM}}}{2} \\ \frac{\delta}{(2\pi)^2 (\tau f')^2}, & |f'| \gg \frac{\Delta f_{\text{FWHM}}}{2} \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $\tau$  是环路延迟时间;  $\delta$  是光子射频振荡器的噪声信号比;  $f'$  为光子射频振荡器系统输出的微波信号的偏频量;  $\Delta f_{\text{FWHM}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta}{\tau^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{G_A^2 \rho_N}{\tau^2 P_{\text{osc}}}$ , 是振荡信号的功率谱密度的半高全宽。

式(16)说明, 光子射频振荡器相位噪声和频率偏移量有关, 只要提高光子射频振荡环路中的延迟时间  $\tau$ , 就能得到较高的振荡频率的谱纯度, 那如何设计高  $Q$  值谐振腔呢? 我们知道, 传统的高质量射频信号通常采用介质腔或石英振荡器元件构成谐振器<sup>[7-8]</sup>, 但这些元件频带比较窄, 当振荡信号超过  $X$  波段后, 介质谐振品质因数  $Q$  迅速下降。导致振荡电路的相位噪声迅速变差。例如, 目前世界上最好的晶振倍频到  $X$  波段的相位噪声仅为 118 dBc/Hz@10 kHz。在光子射频振荡器环路中, 通过设计增加振荡环路中  $\tau$  的值, 就能实现振荡频率相位噪声的降低。现基于式(17), 分别设计光纤不同长度值, 在偏移中心频率 10 kHz 处相位噪声进行了仿真分析, 具体仿真结果如图 3 所示。

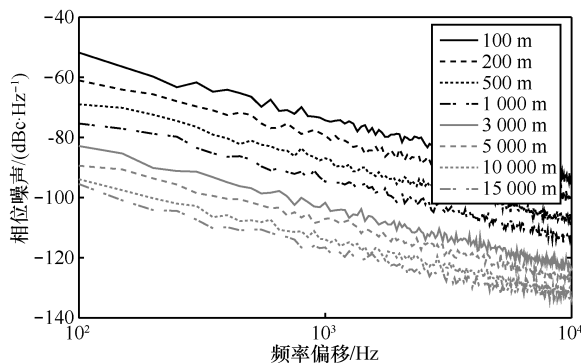


图 3 不同光纤物理长度相位噪声复合曲线

由图 3 可以看出, 随着光纤长度的增加, 系统相位噪声逐渐减小。当光纤长度为 15 000 m 时,

偏移中心频率 10 000 Hz 处相位噪声小于 -135 dBc。而现有技术  $X$  波段, 相位噪声一般为 -105 dBc 左右<sup>[10]</sup>。由此可得, 与传统技术相比, 该方法能有力提升现有光学相干检测系统对微弱信号的检测能力, 特别是对微动目标的检测能力具有数量级的提高。

## 5 系统稳定性分析

所提的基于光子射频振荡器的高灵敏度光学探测方法, 其系统的稳定性主要取决光子射频振荡器, 据相关文献报道的系统试验说明, 所采用的光纤对周围环境温度很敏感, 通过选择对温度不敏感的光纤以及对周围环境进行隔离时, 可以得到系统好的稳定。除此以外, 也有一些使振荡器稳定的好方法, 例如, 参考文献[9]中介绍了通过检测输出的微波信号的频率漂移反馈, 通过压电陶瓷来控制光纤环路的腔长, 输出射频信号的频率稳定度达到了  $10^{-10}$ 。另外系统的频率可以进行调谐, 见文献[10-17], 文献建议采用非线性啁啾光栅特性来实现光子射频振荡器的宽带范围调谐。其原理是通过相位调制到强度调制而转换形成带通微波光子滤波器, 再利用系统的闭环, 这时系统形成高  $Q$  值滤波, 即实现了射频的单频滤波, 总之, 通过上述一些方法可以实现系统的稳定性。

## 6 结束语

本文对所提出的高灵敏度光学探测方法进行了系统构建、数学建模、数学推导、实验仿真。实验结果证明基于光子射频振荡器的高灵敏度光学探测方法与现有技术相比, 能有效地提升现有光学相干检测系统的能力, 特别是对微动目标的检测能力具有数量级的提高。这一新的探测方法将在激光探测领域具有重要的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 牟宁, 高万荣, 魏喆强. 全场光学相干层析三维成像技术研究[J]. 通信学报, 2017, 37(12): 121-127.  
MU N, GAO W R, WEI Z Q, et al. A study on the field of medical image for full-field high-resolution optical coherence tomography[J]. Journal on Communications, 2017, 37(12): 121-127.
- [2] 张海波, 耿国华, 赵映程, 等. 基于非凸  $L_{(1-2)}$  正则子的锥束  $X$  射线发光断层成像[J]. 光学学报, 2017(6): 176-185.  
ZHANG H B, GENG G H, ZHAO Y C, et al. Nonconvex  $L_{(1-2)}$  regularization for fast cone-beam X-ray luminescence computed tomography imaging[J]. ACTA Optica Sinica, 2017(6): 1-17.

- [3] 蒲涛, 闻传花, 项鹏. 微波光子学原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
PU T, WEN C H, XIANG P. The principle and application with microwave and optical[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry China, BEIJING, 2015.
- [4] 丁子瑜. 低相位噪声频率可调谐光电振荡器性能提高研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
DING Z Y. Study on improving performance of low phase noise and frequency tunable optoelectronic oscillator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] LA M, PARK H, BLOCK E, et al. Highly integrated optical heterodyne phase-locked loop with phase/frequency detection[J]. Optics Express, 2012, 20(90): 9376-9741.
- [6] SHOJI Y, FICE M J, TAKAYAMMA Y, et al. A pilot carrier coherent LEO-to-ground downlink system using an optical injection phase loop (OIPLL) technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(16): 2696-2706.
- [7] YU J, YAO X W, MALEKI L. Compact optoelectronic oscillator With ultra-low phase noise performance[J]. Electronics Letters, 1999, 35(18): 1554-1555.
- [8] 孙斌, 于晋龙, 王菊, 等. K 波段高稳光电振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 166-170.  
SUI B, YU J L, WANG J, et al. K-optoelectronic oscillator with high stability[J]. China Laser Journal, 2012, 39(3): 166-170.
- [9] REGIS M, LLOPIS O, VAN HAAREN B, et al. Ultra low phase noise C and X band bipolar transistors dielectric resonator oscillators[C]//IEEE International Frequency Control Symposium. 1998: 507-511.
- [10] LI W Z, YAO J P. An optically tunable frequency multiplying optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(10): 812-814.
- [11] YANG B, JIN X F, ZHANG X M, et al. A wideband frequency tunable optoelectronic oscillator based on a narrowband phase-shifted FBG and wavelength tuning of laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(1): 73-75.
- [12] SIMOVA E, RAHNAVARD M H, KAVEHRAD M. Chirped grating as a demultiplexer: Analysis and synthesis using coupled mode theory[C]//Antenna Technology and Applied Electromagnetics. 2017.
- [13] KLINGER O, STERN Y, SCHNEIDER T, et al. Long microwave-photonic variable delay of linear frequency modulated waveforms[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(3): 200-202.
- [14] YAO X S, MALEKI L. Multiloop optoelectronic[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(1): 79-84.
- [15] PAN S K, YAO J P. Wideband and frequency tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry-perot laser diode with external optical injection[J]. Optics Letter, 2010, 35(11): 1911-1913.
- [16] CASINI A, AMBROSI F, ZEPPARELLI F, et al. Analog laser predistortion for multi-service radio-over-fiber systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1211-1223.
- [17] LEE G Y, CHOI Y B, SHIN J D, et al. Optical true time-delay feeder for linear phased-array antenna implemented with chirped fiber gratings[C]//Laser and Electro-Optics, Leos the Meeting of the IEEE. 2001: 255-256.

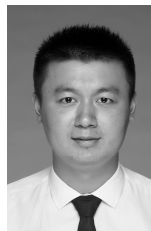
## [作者简介]



牟宁 (1981-), 女, 江苏南京人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为全场相干光学层析、医学成像系统、生物医学图像处理。



高万荣 (1961-), 男, 陕西铜川人, 博士, 南京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为生物医学光学。



吕望晗 (1991-), 男, 江苏宜兴人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为阵列信号处理、压缩感知理论。