

非经典光场中运算放大器产生 $1/f$ 噪声的分析

王丽婕*, 禹健, 张力文

(山西大学 自动化与软件学院, 山西 太原 030006)

摘要:随着非经典光场的发展,在其测量过程中使运算放大器的测量应尽可能精确。针对上述问题,采用一种用于非经典光场检测光信号的运算放大器,通过比较运算放大器压摆率和输入信号的最大摆率的大小,探究在何时可以无失真传输。研究结果表明当运放的压摆率过低,并小于白噪声的最大摆率时,在输出端会观测到 $1/f$ 噪声。随着运放压摆率由 $5\text{ V}/\mu\text{s}$ 降低至 $0.01\text{ V}/\mu\text{s}$,利用小波分析的最小二乘法可计算出 $1/f$ 噪声的斜率由 0.4396 增加到 0.9674 ,其系统性能逐步在下降,运放的压摆率过低时,会在大动态信号的条件增加系统噪声。

关键词:非经典光场;压摆率;白噪声;最大摆率; $1/f$ 噪声

中图分类号:TN911.7

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)02-0375-10

Analysis of $1/f$ Noise Generated by Operational Amplifiers in Nonclassical Light Fields

WANG Lijie*, YU Jian, ZHANG Liwen

(School of Automation and Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: As nonclassical light fields develop, operational amplifiers measurements should be as accurate as possible during their measurements. In order to solve the above problem, an operational amplifier for nonclassical optical field detection of optical signals was used to compare the slew rate of the operational amplifiers and the maximum swing rate of the input signal to explore when distortion-free transmission is possible. The results show that when the slew rate of the operational amplifiers is too low and less than the maximum swing rate of white noise, $1/f$ noise is observed at the output. As the slew rate of the operational amplifiers decreases from $5\text{ V}/\mu\text{s}$ to $0.01\text{ V}/\mu\text{s}$, the slope of $1/f$ noise can be calculated from 0.4396 to 0.9674 by using the least squares method of wavelet analysis, and the system performance is gradually decreasing. When the slew rate of the operational amplifiers is too low, it increases system noise under the condition of large dynamic signals.

Key words: nonclassical light field; slew rate; white noise; maximum swing rate; $1/f$ noise

0 引言

压缩态光场是一种较为重要的非经典光场,因为其具有极低的量子噪声,成为了精密测量^[1]和量子信息研究^[2]的重要光源。平衡零拍探测系统一般用于压缩态光场中的光学测量装置,被用来测量光场的正交分量量子起伏,故在量子通信、量子信息和非经典光场的检测

等诸多方面有着广泛应用^[3-7]。平衡零拍探测器是测量量子光场的重要方法之一,通过调制相位灵敏光学参量放大器注入的信号,然后使用平衡零拍探测系统测量光学参量放大器输出的压缩光。

1985年,压缩态光场产生,压缩度仅只有 0.7 dB ^[8]。1986年,Kimble小组首次采用二阶

收稿日期:2022-10-19;接受日期:2023-02-21

* 通信作者:王丽婕(1998-),女,山西朔州人,硕士,研究方向为数字信号处理。E-mail:964276695@qq.com

引文格式:王丽婕,禹健,张力文.非经典光场中运算放大器产生 $1/f$ 噪声的分析[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(2):375-384. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023070

非线性参量下转换过程制备压缩光,压缩度提高到 4.6 dB^[9],并于 1992 年该小组采用相同方法制备了爱因斯坦-波多尔斯基-罗森(Einstein-Podolsky-Rosen,简称 EPR)纠缠态^[10]。并在 1998 年,6.2 dB 的 1 064 nm 压缩光由康斯坦茨大学 Schneider 等人制备得到^[11]。东京大学 Furusawa 等在 2007 年通过改进的相位锁定制备得到了 9 dB 的压缩态光场^[12]。2008 年,德国马普实验室测量到 10 dB 的压缩态光场^[13],两年后又将其压缩度提升到 12.7 dB^[14]。该小组又于 2016 年成功制备了 15 dB 的 1 064 nm 真空压缩光,是目前已知最高压缩度^[15]。国内,山西大学光电研究所已经完成了 13.8 dB 的压缩光输出^[16]。

在压缩态下测量量子噪声要求所有经典噪声尽可能小,平衡零拍探测方法可以有效降低经典噪声。平衡零拍探测是检测压缩态光场量子噪声的技术手段。平衡零拍探测的优点是:第一,信号光的正交分量被放大许多倍,以便使用示波器或频谱仪检测,这使得其可以探测较为微弱的光场。第二,所用光电探测效率是影响平衡零拍探测的效率的唯一因素。第三,采用 50/50 光学分束器可将本征光包含的噪声消去,且不会影响实验结果。自 20 世纪 80 年代以来,平衡零拍探测器系统是一种有效探测量子噪声的手段,因此本文采用一种低频真空噪声探测系统,该系统包括一个低频低噪声探测器和一个光学平衡分束器,使用两个光电二极管的自相减方案,降低了分别测试两个光电二极管的直流分量,消除了经典技术噪声的影响。但还存在着一些噪声无法消除。

运算放大器是平衡零拍探测系统的重要组成部分,也是本文着重研究的对象。一般来说,人们只关注运算放大器的增益、输出功率、噪声系数和线性度等传统参数,然而,随着对

运放测量精度技术提高,运算放大器的压摆率逐渐引起研究人员的重视,运放的压摆率是指运放的电压转换速率,是运放的重要参数,也是衡量运放速度性能的指标^[17-20]。运放压摆率须不小于输出电压的最大变化率,否则在压摆率的限制下,输出的波形在过零点时的斜率变为一条直线,输入信号频率继续增加时,则输出的幅度逐渐减小。因此,运放压摆率决定了其能否不失真地满幅度输出信号的带宽,即大信号带宽。

针对在实际工程中运算放大器压摆率对系统造成的影响。本文主要通过改变平衡零拍探测系统中运算放大器压摆率大小,观测输出现象并总结规律。探究运算放大器压摆率逐渐小于信号最大摆率时产生 $1/f$ 噪声,总结采用最小二乘法的小波分析得到 $1/f$ 噪声斜率值与运算放大器压摆率的规律,能够得到信号可以无失真放大传输运算放大器压摆率的值。

1 实验方法

1.1 光电探测系统原理

非经典光具有被称作量子噪声的非经典噪声特性。测量真空噪声通常采用一个标准的平衡零拍探测系统^[21]。由于真空噪声具有电流噪声低的特点,根据其特点在电路中采用运算放大器,为高输入阻抗,低输入噪声型运算放大器。

光电探测器基本上实现了光能和电能的转换。光学探测系统由以下四个部分组成,分别为:光源、光路、电路和其间的光电转换器件,如图 1 所示:光源搭配电路组成此光电探测系统,光学子系统提供待检测的光学信息;电学子系统主要是对光电转换后的光学信息进行分析和处理。

本文研究对象为平衡零拍探测系统中的运

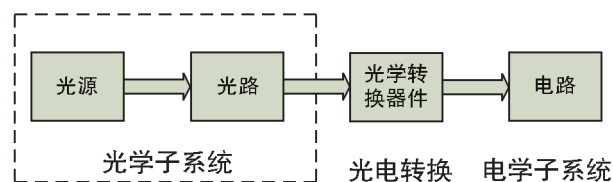


图 1 光电探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectric detection system

算放大器,研究过程是图1中电子学子系统将噪声信号放大的过程。在实验中,将得到的光信号通过运算放大器进行放大。运算放大器(简称运放)在额定全幅输出条件下输出电压的最大转换速率,即为压摆率(Slew Rate),又称转换速率,是衡量运放速度性能的一个较为重要的指标。在传输线中,并不是希望所有的电路都越快越好。过高的速度会导致传输线电阻失配而引起信号反射,因此,在接口电路中的压摆率将受到限制,以此减少传输线上信号产生的电磁干扰(Electromagnetic Interference,简称EMI)。运放输入信号的最大变化率不能大于其压摆率,否则输出波形在过零时的斜率将受到压摆率的限制,形状会发生变化。如果输入信号频率递增,输出振幅将降低。此现象表明压摆率决定了运放能够无失真地且全幅度输出信号的带宽(大信号带宽)。且由于压摆区域的存在使得系统的响应为非线性的。为了减小动态误差,有必要快速建立,从而使得动态误差减小,降低系统的非线性。因此研究平衡零拍探测系统中的运算放大器的压摆率是必要的。本文进一步分析了白噪声作为输入信号时,白噪声的最大摆率(斜率)与运放的压摆率之间的关系。

1.2 实验电路设计

在实验中采用的自相减零拍探测器电路原理如图2所示。

为了将电源产生的噪声对探测器的影响降至最低,实验中采用的电池是 $\pm 12\text{ V}$,作为测试

器件为电路进行供电。首先过滤噪声信号,在频谱分析仪(Agilent 4396B)中进行检测输入之后的信号。本实验最终的选用的是 $47\ \mu\text{F}$ 。本文中采用两个光电二极管(Hamamatsu S5971)使其性能尽可能相似,然后串联组合。在图2中由基尔霍夫定理可得,串联组合处的节点输出的信号为两个相似光电二极管之间的光电流差,这不仅可以防止两个光电流信号的差分增大导致其不平衡,使用运算放大器具有较低电流噪声密度,而且提升了探测器降低其光场共模噪声的能力。

实验过程中选择强度较大的白噪声为输入信号,使得其数量级远大于系统中其他噪声的数量级,以减小其他噪声带来的影响。

1.3 Simulink仿真

本文利用MATLAB中Simulink对实验过程进行定性分析,仿真中采用白噪声为输入信号,如图3所示,主要研究由于压摆率不足带来的失真及其对系统的影响。可以得到信号的摆率可表示为:

$$SR(t) = \frac{dA_{in}}{dt} \quad (1)$$

这实际上是输入信号的一阶微分,且将信号微分可以获得信号摆率的最大值 $SR(t)_{max}$ 。则原信号可以表示为: $A_{in} = \int SR(t)dt$ 。如果运放压摆率的取值为 SR_{op} ,则运放输出信号的压摆率将位于如下区间 $[-SR_{op}, SR_{op}]$,根据这个思路进行建模,并且可以根据信号的最大摆率来调整运放压摆率的区间。

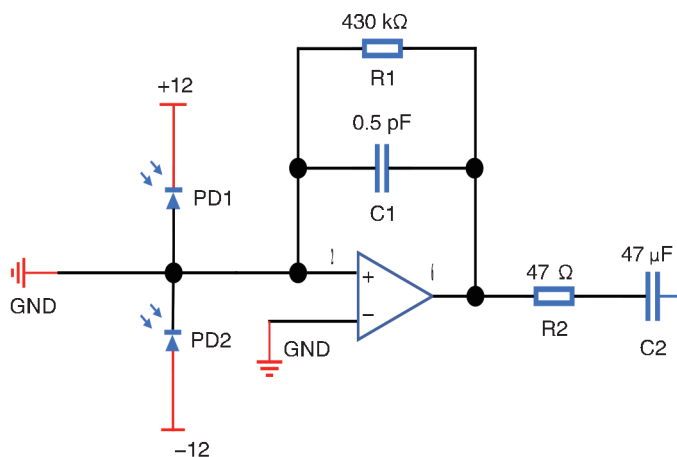


图2 自相减零拍探测器电路原理示意图(PD,光电二极管;R,电阻;C,电容)

Fig. 2 Circuit schematic of self-substraction homodyne detector (PD, photodiode; R, resistance; C, capacitance)

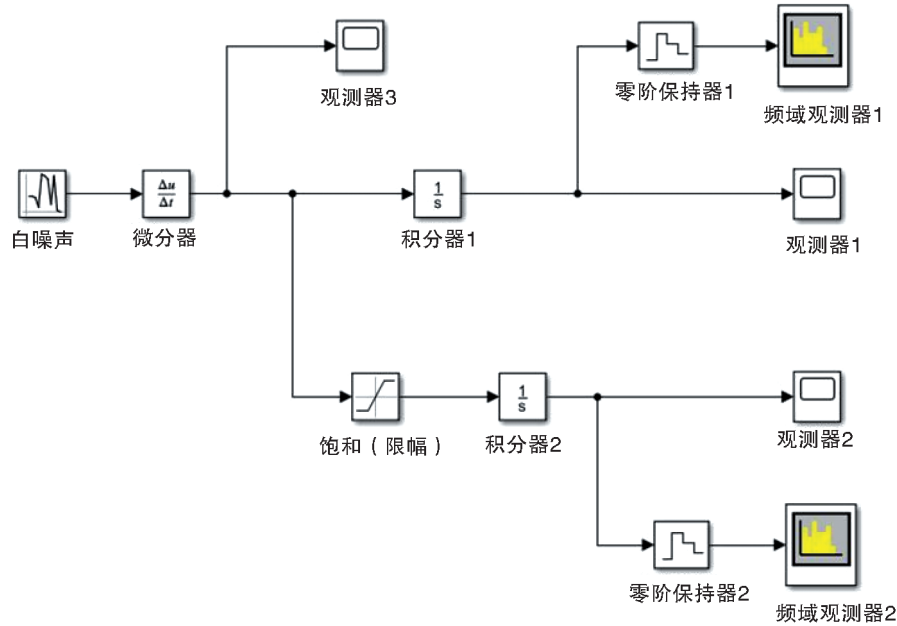


图3 Simulink建模图

Fig. 3 Simulink modeling diagram

在 Simulink 模型中增加了零阶保持器,是为了将连续信号转换为离散信号。在 Simulink 模型中可以清楚地观测到,可将其分为上、下分支,上分支是没有压摆率限制的,下分支是通过压摆率限幅限制的。根据这两个分支在观测器中进行对照观测,在限幅中设置不同程度的压摆率,分析在频域观测器中得到的图像。

2 $1/f$ 噪声及其参数分析

2.1 $1/f$ 噪声的微观特性

$1/f$ 噪声广泛存在于电子元器件和电路中,通过对 $1/f$ 噪声的测量和分析,我们可以获得许多有用的信息。电子元器件中的 $1/f$ 噪声拥有两个较为基础的本质的表征:

(1)在较宽的频带中, $1/f$ 噪声的频率 f 与功率谱密度成反比的,并且其频带的上限及下限都受到限制,高频段的频率是由背景中的白噪声与 $1/f$ 噪声的相对大小决定;当低频段的频率接近为直流时,功率密度依然可以表现出了良好的 $1/f$ 噪声特性。

(2)流过电子元器件中的电流与 $1/f$ 噪声电流和电压的功率谱密度近似成正比,其代表电阻的波动是 $1/f$ 噪声的主要来源。设经过电阻器的电流将保持不变,且电阻器中会出现波动,导致电阻两端存在电压波动,可以得到:

$$\delta V = I \times \delta R, \quad (2)$$

$$S_V(f) = I^2 S_R(f) I^2. \quad (3)$$

2.2 $1/f$ 噪声的自相关函数推导

$1/f$ 噪声的产生,可以看作是白噪声通过一个微分器后再经由压摆率限制,最后积分回去得到的结果。运放压摆率的限制相当于一个峰值剪(clipping),这种形式的非线性系统为:

$$s(t) = clip_{\theta}(Ax(t)), \quad (4)$$

这里

$$Clip_{\theta} = \begin{cases} SR_{op}, & x \geq SR_{op}, \\ x, & -SR_{op} < x < SR_{op}, \\ -SR_{op}, & -SR_{op} \geq x, \end{cases} \quad (5)$$

其中 SR_{op} 为我们设置不同情况下的运放的压摆率。白噪声的双边功率谱密度(double-sided PSD)是如式(6)所示:

$$\frac{v^2}{\Delta f} = \frac{N_0}{2}, \quad (6)$$

式子(6) N_0 为单边噪声功率谱密度,单位是 V^2/Hz 。自相关函数就是简单的功率谱密度的傅里叶反变换。所以白噪声的自相关函数由冲激响应函数给出:

$$R_m(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau). \quad (7)$$

假设白噪声微分之后的信号为 $x(t)$,则其原来的信号为 $\int x(t)dt$,在经过非线性系统峰值剪

$y(t)=Clip_{\theta}(Ax(t))$,再积分得到了 $z=\int_{-\infty}^{+\infty}s(t)dt$,

可以从频域观测到1/f噪声的频谱图。白噪声微分之后的功率谱密度为:

$$PSD=(2\pi f)^2\frac{N_0}{2} \quad (8)$$

已知非线性元件的特性为 $g(t)=Clip_{\theta}(Ax(t))$,以及输入的统计特性,则输出的均值,相关函数可以由输入随机信号的概率密度函数求得:

$$E[G(t)]=\int_{-\infty}^{+\infty}Clip_{\theta}(Ax(t))f_x(x;t)dx, \quad (9)$$

式子中 $f_x(x;t)$ 是输入随机信号 $x(t)$ 的一维概率密度。同理可推得输出端 n 阶矩:

$$E[G^n(t)]=\int_{-\infty}^{+\infty}Clip_{\theta}^n(Ax(t))f_x(x;t)dx. \quad (10)$$

输出随机信号的自相关函数:

$$R_Y(t_1,t_2)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}Clip_{\theta}(Ax_1(t_1))clip_{\theta}(Ax_2(t_2))\times f_{x_1x_2}(x_1,x_2;t_1,t_2)dx_1x_2. \quad (11)$$

可以知道(11)式子中 $x_1=x_1(t)$, $x_2=x_2(t)$, $f_{x_1x_2}(x_1,x_2;t_1,t_2)$ 为输入随机信号微分后的二维概率密度函数。理想条件下白噪声是一个平稳的随机过程,白噪声微分之后的结果也是一个随机过程,白噪声通过运放压摆率限制的自相关函数可以写成:

$$R_Y(t_1,t_2)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}Clip_{\theta}(Ax_1(t_1))clip_{\theta}(Ax_2(t_2))\times f_{x_1x_2}(x_1,x_2;\tau)dx_1x_2. \quad (12)$$

如果输入端随机信号的二维概率密度函数是已知的,就可以求输出端随机信号的相关函数和功率谱密度。在输入端概率密度为正常函数时,且非线性函数关系比较简单,积分运算也没有很大的困难时,可以比较顺利地计算出结果。计算出了白噪声通过压摆率限制的自相关函数之后进行傅里叶反变换,可以求得其功率谱密度,则实验中可以观测到在功率谱密度大小一定的条件下,能实验观测到压摆率饱和现象。

2.3 1/f噪声参数分析

1/f噪声经典的表征方法是用功率谱密度和指数来表征信号,其功率谱密度可以表示为:

$$S(f)=c+\frac{d}{f^{\gamma}}, \quad (13)$$

其中 c 为电子器件中存在的白噪声。

要想实验是在一个绝对封闭的过程中进行,这是不现实的,所以实验过程中会存在很多干扰。除了有1/f噪声外,实际测量的信号中还应该存在白噪声。在实际检测中的信号设为 $r(t)$,1/f噪声信号可以设为 $m(t)$,并将白噪声设为 $w(t)$ 。于是,我们有以下关系:

$$r(t)=m(t)+w(t). \quad (14)$$

式(13)做小波变换,可以得到即 $r(t)$ 为混合后噪声信号的小波系数:

$$r_j^k=\int_{-\infty}^{+\infty}r(t)\Psi_{j,k}(t)dt=\int_{-\infty}^{+\infty}[m(t)+w(t)]\Psi_{j,k}(t)dt=\int_{-\infty}^{+\infty}m(t)\Psi_{j,k}(t)dt+\int_{-\infty}^{+\infty}w(t)\Psi_{j,k}(t)dt=m_j^k+w_j^k. \quad (15)$$

1992年著名的Wornell证明除了尺度 j 下的小波系数方差为:

$$Var(r_j^k)=\sigma_r^2=\sigma^22^{-j\gamma}+Var(w_j^k)=\sigma^22^{-j\gamma}+\sigma_w^2, \quad (16)$$

其中1/f噪声的小波系数可以用 $\sigma^22^{-j\gamma}$ 来表示,参数 σ^2 和 γ 是在实验过程中我们是希望可以计算出得出的,1/f噪声和白噪声其混合的噪声中白噪声的小波变换的系数为 σ_w^2 。对式(15)整理化简可以得:

$$\log_2(\sigma_r^2-\sigma_w^2)=-j\gamma+\log_2(\sigma^2). \quad (17)$$

参数是 σ^2 和 γ 是在实验过程中需要计算并得出的,在对两个未知数进行计算的时候,通常采用最小二乘法的直线拟合方法来计算,通常其可以表示为: $y=am+b$,在实验过程中检测到的 n 组数据分别为: $(m_1,y_1),(m_2,y_2),\dots,(m_n,y_n)$,我们需要根据 n 组数据之后进一步大致计算出公式中的未知参数 a 和 b 。最小二乘直线拟合法就是使 y 的误差平方加权值可以取得最小值,即求: $Z_{\min}=\sum_{i=1}^Nq(i)[y_i-(a+bm_i)]^2$,此时, a 和 b 为未知数, $q(i)$ 为加权系数,对上式求偏导有:

$$\frac{\partial}{\partial a_i}\sum_{i=1}^Nq(i)[y_i-(a+bm_i)]^2=-2\sum_{i=1}^Nq(i)(y_i-a-bm_i)=0, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial b_i} \sum_{i=1}^N q(i)[y_i - (a + bm_i)]^2 = \\ -2 \sum_{i=1}^N q(i)(y_i - a - bm_i)m_i = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

因为 $q(i) \neq 0$ 将式子(17)和式子(18)化简并整理可得:

$$\begin{cases} aN + b\sum m_i = \sum y_i \\ a\sum m_i + b\sum m_i^2 = \sum m_i y_i \end{cases}, \quad (20)$$

并且由式子(19)解得:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i - n\bar{x}\bar{m}y}{\sum_{i=1}^n m_i^2 - n\bar{m}^2}, \hat{b} = \bar{y} - \hat{a}\bar{x}.$$

本文采用最小二乘直线拟合的方法,优点为计算较为简单,但也存在缺点,就是这种模型只可以用来计算未知参数只有两个的情况。因此只有计算出白噪声的小波变换系数 σ_w^2 时,我们才能进一步计算出 σ^2 和 γ 这两个未知量。这里 σ_w^2 的计算可以利用计算出的信噪比来得出,信噪比的数学公式如下:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sigma_{\text{信号}}^2}{\sigma_{\text{噪声}}^2} \right). \quad (21)$$

对式子(21)进行整理可得:

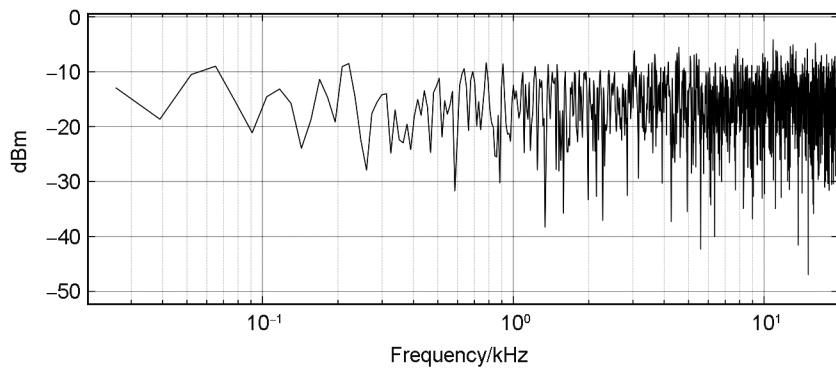
$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2} \right) = 10 \lg \left(\frac{\sigma_r^2 - \sigma_w^2}{\sigma_w^2} \right). \quad (22)$$

将式(17)与 $y = am + b$ 对比可以得知, $-\gamma$ 和 $\log_2(\sigma^2)$ 分别对应 a 和 b , j 和 $\log_2(\sigma_r^2 - \sigma_w^2)$ 分别对应 m 和 y 。令 $j = 1, 2, \dots, n$ 时,便可以得到 n 组不同的数,结合最小二乘法模型可以计算出 $\hat{\gamma}$ 和 $\hat{\sigma}^2$,且我们可以利用小波原理将得到的噪声估计出来,得到其频率指数之后,我们就知道压摆率是如何限制输入噪声信号。其中可知:

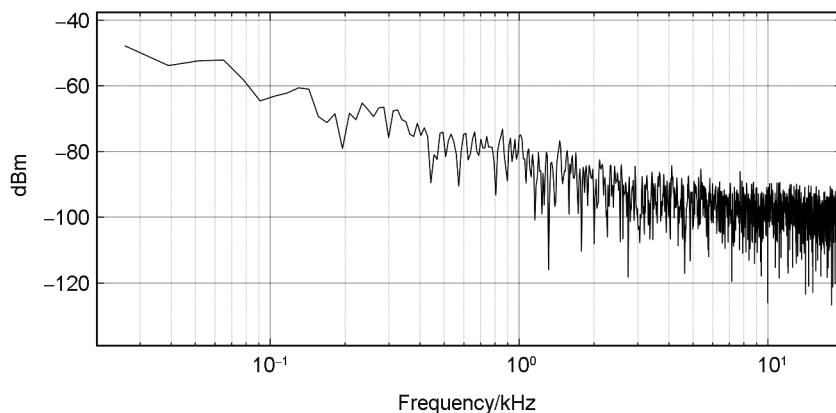
$$\hat{\gamma} = \frac{-\left(\sum_{j=1}^n j \log_2(\sigma_r^2 - \sigma_w^2) - n\bar{j} \overline{\log_2(\sigma_r^2 - \sigma_w^2)}\right)}{\sum_{j=1}^n j^2 - n\bar{j}^2}, \quad (23)$$

$$\log_2(\hat{\sigma}^2) = \overline{\log_2(\sigma_r^2 - \sigma_w^2)} + \hat{\gamma}\bar{j}. \quad (24)$$

由式(24)可得: $\hat{\sigma}^2 = 2^{\overline{\log_2(\sigma_r^2 - \sigma_w^2)} + \hat{\gamma}\bar{j}}$ 。



(a) 观测器1中不经过运放压摆率限制的频谱图(RBW=19.51 Hz, Sample rate=44.1 kHz)



(b) 观测器2中过压摆率为4 V/s 限制后的频谱图(RBW=19.51 Hz, Sample rate=44.1 kHz)

图4 Simulink 两条支路仿真结果图

Fig. 4 Simulink simulation results of two branches

在计算 $\hat{\gamma}$ 和 σ^2 之后,进一步通过运用小波原理将 $1/f$ 噪声估计出来。

3 分析与讨论

实验过程中采用的信号源为白噪声。

在 Simulink 仿真中,即图 3 的频域观测器 1 中,清晰地观测到频域图为图 4 所示。当白噪声不经过运放压摆率限制,即运放压摆率大于信号的最大摆率时,得到的图像为图 4(a) 所示。运放压摆率的数值小于信号的最大摆率时,可以从频域观测器 4(b) 中得到结果。

本次实验发现,当白噪声通过运放时,且在运放压摆率小于白噪声信号的最大摆率时,输出的信号频域图才为 $1/f$ 噪声信号。并通过对照组发现:白噪声在不通过压摆率处理时 Simulink 频域观测 2 中其结果不为 $1/f$ 噪声。因此通过分析 $1/f$ 噪声的微观特性,借助其自相关函数

的推导以及 $1/f$ 噪声的相关参数,得到运放压摆率对白噪声信号的影响

表 1 不同压摆率条件下 $1/f$ 噪声的性质

Table 1 Properties of $1/f$ noise at different slew rates

压摆率/ (V/ μ s)	5	4	2	0.5	0.01
频率指数 γ	0.439 6	0.512 4	0.673 2	0.851 9	0.967 4
信噪比/dB	-5.730 0	-17.469 2	-34.462 7	-48.365 9	-59.196 8

研究运放压摆率的变化对输入信号失真的影响,本质上是采用最小二乘的小波分析对 $1/f$ 噪声进行计算,使用 MATLAB 得出参数,再根据数学公式将 $1/f$ 噪声估计出来。

首先,求出混合噪声中 $1/f$ 噪声的小波变换系数,然后再重新构建。当其尺度 j 比较小的时候,其与低频成分等价,此时 $1/f$ 噪声信号开始在混合信号中占主导成分,这种情况下提取 $1/f$ 噪声的比例比较大,但随着尺度 j 的逐渐增

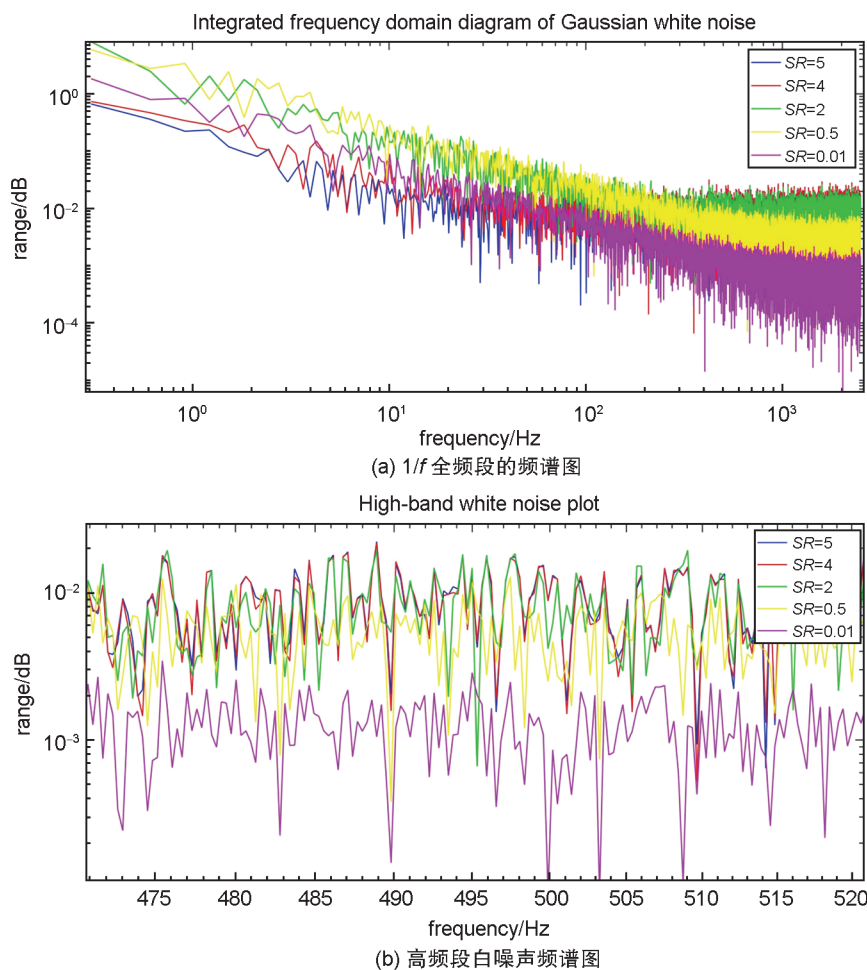


图 5 不同运放压摆率生成的 $1/f$ 频谱图

Fig. 5 $1/f$ spectrum generated by different slew rates of operational amplifiers

加,其逐步等价于高频部分,此时白噪声在混合噪声信号中开始占主要成分,1/f噪声的提取比例逐渐降低。根据计算可得,白噪声的最大摆率为5.489 7 V/μs。因此根据白噪声的最大摆率,将运放的压摆率分别设置为5,4,2,0.5以及0.01,输出的结果如图5(a)所示,频率指数越小则越好。电压转换速率较低时,输入的信号不能及时跟上,导致其信号的幅度比信号减小,系统的分析能力变差。

图5(a)是噪声密度频谱中宽带噪声区域图两个不同的区域,图5(b)是高频段白噪声区,1/f噪声和宽带噪声之间的交越点称为1/f转折频率。从图5(b)得到,运放的压摆由5 V/μs降至0.5 V/μs时其高频段白噪声区差异不大,运放的压摆率为0.01 V/μs时,高频段白噪声区域下移,但整体趋势相近。表明在不同压摆率的条件下,其产生的1/f噪声的高频段白噪声是相同的,但由于系统误差,会产生略微差异。

尤其当运放的压摆率与信号的最大摆率相差十倍时,结果发现:其在高频段噪声与其他条件下的高频段噪声形状相似,但可看作向下平移了一段。

设置的规律是先小幅度减小,之后再大幅度降低。通过最小二乘法计算其产生的1/f噪声的频率指数,和相对应的信噪比。如表1所示:随着压摆率的降低,信噪比逐渐减小,其输入的白噪声信号的功率小于运放中所产生的功率。

从图6中可以发现用小波分析得到的运放的压摆率为0.01 V/μs时,产生的1/f噪声信号的斜率的绝对值相较于其他四组数据是最大的。从图6中可以得到随着压摆率的降低,其频率指数越大,则其性能越差,实验中可根据信号的最大摆率选取合适的运放的压摆率,可以减少传输线上信号产生的电磁干扰。

在实验过程中,采用其他不同型号的运算

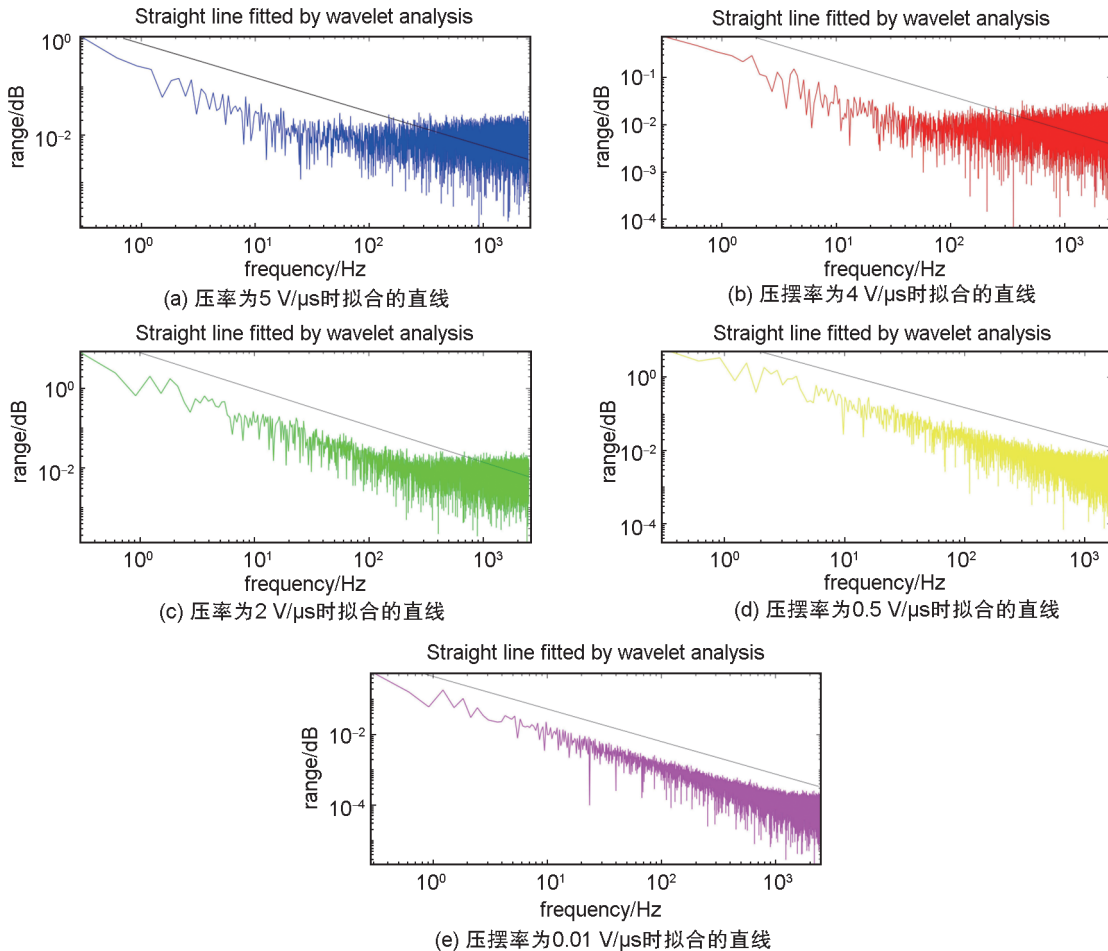


图6 不同运放压摆率下小波分析拟合的直线

Fig. 6 Straight lines fitted by wavelet analysis under different operational amplifier slew rates

放大器时,以相同的输入信号为标准,发现也具有相同的特点。当输入端的信号采取不同种类的信号时,采用同一运算放大器时也和本文所得出的结果一致,因此得到的结论具有一定的普适性。

4 结论

在非经典光场的平衡零拍探测系统中,通过比较系统中运放压摆率和输入信号的最大摆率的大小,并以白噪声为输入信号探讨了其压摆率大于运放压摆率产生的现象。实验结果表明当运放的压摆率过低时,可在输出端观测到 $1/f$ 噪声。运放的压摆率过低时,会在大动态信号的条件增加系统噪声,测量精确度较差。当信号的幅值越大、频率越高时,要求运放的压摆率也越大,因此在噪声的最大摆率小于等于运放的压摆率时,可以无失真地传输。最后通过分析不同信号通过不同运放也具有相同特点,说明结果具有一定普适性。在实验中可根据输入信号的最大摆率选择合适的运算放大器。

参考文献:

- [1] GODA K, MIYAKAWA O, MIKHAILOV E E, *et al.* A Quantum-enhanced Prototype Gravitational-wave Detector[J]. *Nat Phys*, 2008, **4**(6): 472-476. DOI: 10.1038/nphys920.
- [2] BRAUNSTEIN S L, VAN LOOCK P. Quantum Information with Continuous Variables[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**(2): 513-577. DOI: 10.1103/revmodphys.77.513.
- [3] ZELAYA K, HUSSIN V, ROSAS-ORTIZ O. Constructing Squeezed States of Light with Associated Hermite Polynomials[J]. *Eur Phys J Plus*, 2021, **136**(5): 534. DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01536-3.
- [4] MEYLAHN F, WILLKE B, VAHLBRUCH H. Squeezed States of Light for Future Gravitational Wave Detectors at a Wavelength of 1550 nm[J]. *Phys Rev Lett*, 2022, **129**(12): 121103. DOI: 10.1103/physrevlett.129.121103.
- [5] ALLEVI A, BONDANI M. Feasibility of a Novel Quantum Communication Protocol in Jerlov Type I Water[J]. *Entropy (Basel)*, 2022, **25**(1): 16. DOI: 10.3390/e25010016.
- [6] ZHANG A N, XU H C, XIE J, *et al.* Experimental Test of Contextuality in Quantum and Classical Systems[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, **122**(8): 080401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.080401.
- [7] DU S N, LI Z Y, LIU W Y, *et al.* High-speed Time-domain Balanced Homodyne Detector for Nanosecond Optical Field Applications[J]. *J Opt Soc Am B*, 2018, **35**(2): 481-486. DOI: 10.1364/JOSAB.35.000481.
- [8] SLUSHER R E, HOLLBERG L W, YURKE B, *et al.* Observation of Squeezed States Generated by Four-wave Mixing in an Optical Cavity[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**(22): 2409-2412. DOI: 10.1103/PhysRevLett.55.2409.
- [9] WU L A, KIMBLE H J, HALL J L, *et al.* Generation of Squeezed States by Parametric down Conversion[J]. *Phys Rev Lett*, 1986, **57**(20): 2520-2523. DOI: 10.1103/PhysRevLett.57.2520.
- [10] OU Z Y, PEREIRA S F, KIMBLE H J, *et al.* Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**(25): 3663-3666. DOI: 10.1103/PhysRevLett.68.3663.
- [11] SCHNEIDER K, LANG M, MLYNEK J, *et al.* Generation of Strongly Squeezed Continuous-Wave Light at 1064 nm[J]. *Opt Express*. 1998, **2**(3): 59-64. DOI: 10.1364/oe.2.000059.
- [12] TAKENO Y, YUKAWA M, YONEZAWA H, *et al.* Observation Of-9 DB Quadrature Squeezing with Improvement of Phase Stability in Homodyne Measurement[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(7): 4321-4327. DOI: 10.1364/oe.15.004321.
- [13] VAHLBRUCH H, MEHMET M, CHELKOWSKI S, *et al.* Observation of Squeezed Light with 10-dB Quantum-noise Reduction[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**(3): 033602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.033602.
- [14] EBERLE T, STEINLECHNER S, BAUCHROWITZ J, *et al.* Quantum Enhancement of the Zero-area Sagnac Interferometer Topology for Gravitational Wave Detection[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **104**(25): 251102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.251102.
- [15] VAHLBRUCH H, MEHMET M, DANZMANN K, *et al.* Detection of 15 DB Squeezed States of Light and Their Application for the Absolute Calibration of Photoelectric Quantum Efficiency[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **117**(11): 110801. DOI: 10.1103/physrevlett.117.110801.
- [16] SUN X C, WANG Y J, TIAN L, *et al.* Detection of 13.8 DB Squeezed Vacuum States by Optimizing the Interference Efficiency and Gain of Balanced Homodyne Detection[J]. *Chin Opt Lett*, 2019, **17**(7): 072701. DOI: 10.3788/COL201917.072701.
- [17] 吴锋霖, 李思臻, 余凯, 等. 一种增益提升和摆率增强的运算跨导放大器[J]. 电子技术应用, 2020, **46**(7): 65-69. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200079.
- WU F L, LI S Z, YU K, *et al.* An Operational Transconductance Amplifier with Gain Boosting and

- Slew Rate Enhancement[J]. *Appl Electron Tech*, 2020, **46**(7): 65-69. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200079.
- [18] 胡荣, 何尚平, 罗小青. 一种高压摆率低电压 CMOS AB 类放大器的设计[J]. *沈阳工业大学学报*, 2017, **39**(6): 680-685. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2017.06.15.
- HU R, HE S P, LUO X Q. Design of CMOS AB Class Amplifier with High Slew Rate and Low Voltage[J]. *J Shenyang Univ Technol*, 2017, **39**(6): 680-685. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2017.06.15.
- [19] 刘心惟. 一种低功耗高电压转换速率的模拟运算放大器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. DOI:10.7666/d.D00990711.
- LIU X W. Design of an Analog Operational Amplifier with Low Power Consumption and High Voltage Conversion Rate[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. DOI:10.7666/d.D00990711.
- [20] GARDE M P, LOPEZ-MARTIN A, ALGUETA J M, *et al.* Class AB Amplifier with Enhanced Slew rate and GBW[J]. *Int J Circ Theor Appl*, 2019, **47**(8): 1199-1210. DOI: 10.1002/cta.2650.
- [21] 靳晓丽, 苏静, 郑耀辉. 非理想平衡零拍探测系统对实测压缩度的影响[J]. *光学学报*, 2016, **36**(10): 489-495. DOI: 10.3788/AOS201636.102700.
- JIN X L, SU J, ZHENG Y H. Influence of the Non-ideal Balanced Homodyne Detection on the Measured Squeezing Degree[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(10): 489-495. DOI: 10.3788/AOS201636.102700.