

基于声光效应的相干探测光学降噪方法研究

何 宁 冯太琴 廖 欣

桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004

摘要 研究声光效应光栅理论,分析动量匹配与衍射效率关系,探讨相干光平衡探测的噪声抑制机理,进行了系统设计和相关实验测试,验证基于声光效应的相干平衡探测系统光学降噪方法的技术实现。结果表明,相位确定的信号在进行声光相互作用时能建立稳定光栅,其衍射效率将大于相位随机变化的噪声信号,通过平衡探测可有效抑制噪声起伏对系统输出的影响,进一步提高接收信噪比。

关键词 相干光学; 声光效应; 超声光栅; 动量匹配; 光学降噪

中图分类号 TN919.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0706001

Research on Noise Cancellation Based on Acousto-Optic Effect in Coherent Detection

He Ning Feng Taiqin Liao Xin

School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract The grating theory of acousto-optic effect grating is studied. The relationship between momentum matching and diffraction efficiency is analyzed. The noise reduction mechanism of balance coherent detection is discussed. The system is designed and the relative experiment is test. Noise reduction technology based on acousto-optic effect in coherent balanced detection is verified. The result shows that in the interaction of the sound and light, a stable grating could be established when the phase of signal is determined, and its diffraction efficiency is bigger than noise signal whose phase is random. By using balance detection, the influence of noise fluctuation to the system output is effectively inhibited, and the signal noise ratio is improved.

Key words coherent optics; acousto-optic effect; acousto-optic grating; momentum matching

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.4510

1 引 言

声光效应在声光测频和声光信号处理方面有着重要应用^[1-2],结合声光技术和光学相干探测,利用其在通信信号的高速并行处理、动态范围、高分辨率和特有的带宽优势^[3-4],通过幅度、频率、位相、到达方向以及到达时间等全息探测方法^[5],提高系统频率选择性、频带利用率、接收灵敏度和信噪比(SNR),成为改善传统光通信接收性能的有效手段^[6-9],是未来光通信技术的发展方向。无线信号传输受外界随机噪声干扰,在接收端产生噪声积累将导致信噪比的进一步恶化,另外相干光通信中光信号传输过程也会存在相位失配,产生的相位起伏噪声将影响光接收系统输出性能。本文提出一种基于声光效应的相干光探测系统,通过研究声光效应光栅理论,分析动量匹配与衍射效率的关系,探讨平衡探测在抑制光信号传输中随机噪声起伏的优势,分别对基于声光效应的单端探测和平衡探测系统进行抑制噪声的性能对比,给出相应的技术措施,为实际工程应用提供一定的参考依据。

收稿日期: 2015-02-11; 收到修改稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61461014)

作者简介: 何 宁(1958—),男,研究员,硕士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

*通信联系人。E-mail: ftq31497956@163.com

2 声光衍射效应与光栅滤波特性

声波在介质中传播时会发生弹性应力,这种现象称为“弹光效应”^[10]。属于弹性波的声波在介质中传播时会引起介质密度呈疏密交替分布,形成光学“相位光栅”。光波在该介质中传播时发生衍射现象,衍射光强度、方向和频率随声场变化实现了声光调制、声光偏转和声光频移^[11],声光衍射原理如图1所示,其中 θ_d 、 θ_i 分别为衍射角和入射角。

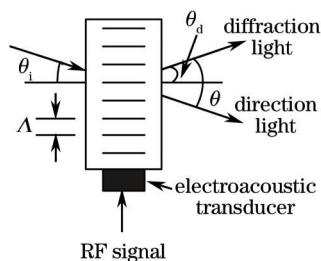


图1 声光衍射原理图

Fig.1 Schematic diagram of acousto-optic diffraction theory

图中 Λ 为相位光栅栅距,等于超声波波长 λ_s 。依据超声波波长 λ_s 、光波在介质中的波长 λ 与二者相互作用的长度 L 间的关系将声光衍射分为拉曼—奈斯衍射和布拉格衍射。当 $L \leq \lambda_s^2/\lambda$ 时发生拉曼—奈斯衍射,除中央零级光斑外,各级衍射光 ± 1 、 $\pm 2 \dots$ 对称分布在入射方向两侧,因此其衍射能量分散,效率低,最大仅为33.9%^[12];而满足 $L \geq \lambda_s^2/\lambda$ 时发生布拉格衍射,此时只出现零级光和+1级(或-1级)衍射光,衍射效率将大大提升,且

$$\begin{cases} \theta_D = \theta_i = \theta_B \\ \sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\lambda_s} = \frac{\lambda_0}{2n\lambda_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_D 、 θ_i 分别为衍射光和入射光与超声波面的夹角, θ_B 为布拉格角, λ_0 为光在真空中的波长, n 为介质折射率。由于布拉格衍射角很小,一般认为 $\theta_B = \sin \theta_B$ 。衍射光与入射光之间的夹角为布拉格衍射角的两倍,即:

$$\theta = \theta_i + \theta_D = 2\theta_B = \frac{\lambda_0}{nv_s} f_s, \quad (2)$$

式中 v_s 、 f_s 分别为超声波的速度与频率。通过改变超声波频率(加到器件上RF信号的频率),来改变衍射光频率,即为声光移频器或声光偏转器^[8]。

由频率控制的声光器件在布拉格衍射模式下工作时建立的超声光栅可以当作一个体光栅来处理^[13],其一级衍射光满足(1)式。光束在体光栅中的传播方式如图2左图所示。设光栅厚度为 l ,声光介质长度为 w ,折射率调制幅度为 Δn ,超声波矢量、入射光和衍射光在介质中的波矢量分别为 \mathbf{K} 、 \mathbf{K}_i 和 \mathbf{K}_D 。在布拉格衍射条件下,入射光以一定角度入射,衍射光满足动量匹配条件 $\Delta \mathbf{k}_1 = 0$,相互作用后的矢量图只形成一个闭合三角形,即 $\mathbf{K}_D = \mathbf{K}_i \pm \mathbf{K}$,此时可获得最大衍射效率,图2右图为衍射光为-1级时的模式,

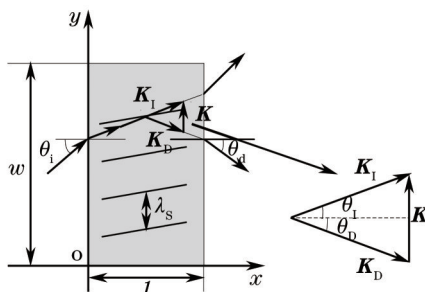


图2 光束在体光栅中的传播方式

Fig.2 Beam propagation mode in the volume grating

由耦合波理论可知,在布拉格条件下,声光相互作用的一级光衍射效率可表示为:

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{(\xi/2)^2 + \varsigma}}{1 + (2\varsigma/\xi)^2}, \quad (3)$$

式中 $\varsigma = \delta' L / 2 \cos \theta_0$, ξ 为声致相移, 表示声光相互作用的强弱。由(3)式可得, 对应不同的声致相移, 衍射效率随 ς 的变化曲线如图3所示。 $\varsigma = 0$ 时, 衍射效率达到最大, 但是随着 $|\varsigma|$ 的增大, 衍射效率会迅速减小, 甚至会出现衍射效率为零的状况。在 $\xi = \pi$ 时, $\eta = 100\%$, 入射光能量可以得到充分利用。此时, 除了零级光外, 只有一级衍射光存在, 所以在实际应用中, 声光器件均工作于布拉格衍射模式下。

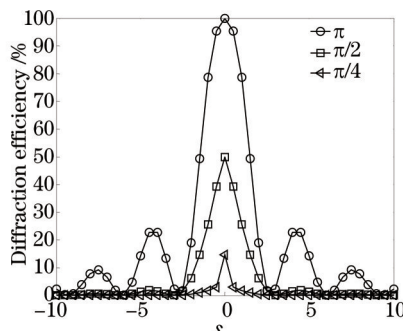


图3 不同声致相移下衍射效率随 ς 的变化曲线

Fig.3 curve about different diffraction efficiency with ς

由以上分析可知, 声光器件在一定信号频率范围内的信号作用时才能产生有效的声光衍射^[14]。噪声作为宽谱信号, 其相位和幅度具有随机性, 当加载于声光器件时, 超声波频率不断变化, 稳定光栅无法建立, 相位失配, 导致衍射效率降低甚至为零。一般情况下, 声光器件实际工作中, 入射光的波长和入射角不变。所以, 输入射频信号发生变化, 即超声光栅的变化将会引起对布拉格条件的偏离, 出现动量失配, 使得衍射光强度发生变化, 从而对输入信号表现出一定的滤波选择性。因此, 声光相互作用超声光栅的稳定建立与否是空间滤波的关键, 对光信号处理十分重要。通过这种方法可有效抑制通信信号带宽内的噪声信号, 减小衍射后有效信号的随机起伏, 保证衍射光信号的平稳性。

3 相位噪声与平衡探测

3.1 相位噪声

相干探测系统中噪声主要由器件本身引起, 如激光器单频特性和光电探测器暗电流及温度特性都将产生不同程度的噪声。理想单频激光器的电场可表示为:

$$E(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{4}$$

式中 A_0 , ω_0 , φ_0 分别表示激光的振幅, 频率和相位, 并且这三个参数均为固定值, 其频谱为单一谱线。实际应用中不可能存在绝对纯净频谱的信号, 信号受噪声信号调制, 存在寄生调幅、调相后可表示为:

$$E(t) = [A_0 + \alpha(t)] \cos[\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi(t)], \tag{5}$$

式中 $\alpha(t)$ 为瞬时幅度起伏, $\Delta\varphi(t)$ 为瞬时相位起伏(相位噪声)^[15]。一般情况下幅度噪声调制功率远小于相位噪声调制功率, 通常忽略不计。

由相干光探测理论可知, 其中频输出信号大小取决于参考光和信号光功率, 一般相干光探测中参考光功率远大于信号光功率。参考光引入相位噪声时, 受噪声信号作用信号频谱将会展宽, 同时产生交互混频。如图4所示, (a)图为到达光电探测器前的信号频谱关系, 包含信号光、干扰信号和带有相位噪声的参考

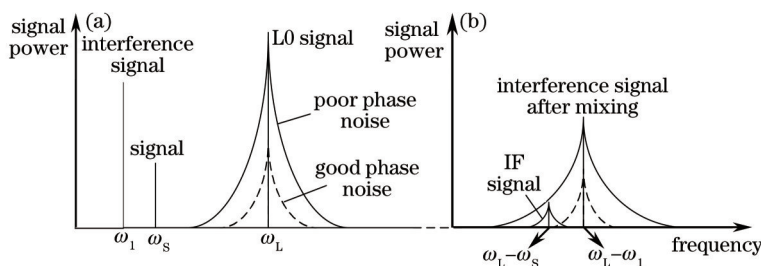


图4 相位噪声对混频的影响

Fig.4 Effect of phase noise on mixing

光;(b)图为进行相干混频后的信号频谱关系,当相位噪声较大时,图中实线部分显示中频信号(IF signal)完全被混频后的干扰信号淹没情形;若参考光引入的相位噪声小或者为零时,中频信号就能显现出来(图中虚线部分),此时,只要经过窄带滤波器就能得到有用信号。

3.2 平衡探测原理与抑制噪声分析

与单端探测^[16]相比,平衡探测的优点有:消除参考光的过剩强度噪声和探测器散粒噪声,抑制共模噪声,提高中频信号功率,改善系统信噪比,能充分利用本振光功率^[17]。平衡探测原理如图5所示,它主要由一个2×2光纤耦合器和两个探测器组成。两路光信号 E_L 和 E_S 进入2×2光纤耦合系统后形成了两束光束对 $(E_{S1} + E_{L1})$ 和 $(E_{S2} + E_{L2})$, 两束光分别进入光电探测器形成光生电流 I_1 和 I_2 , 两项光电流经过差分处理后,形成的平衡式探测系统响应电流信号为^[7]:

$$I_{\text{balance}}(t) = \frac{e}{h\nu} \{ [(1-\varepsilon)\eta_1 - \varepsilon\eta_2]A_s^2 + [\varepsilon\eta_1 - (1-\varepsilon)\eta_2]A_L^2 \} + \frac{e}{h\nu} \{ 2(\eta_1 + \eta_2) \sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} A_s A_L \cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)] \} + [n_1(t) - n_2(t)], \quad (6)$$

式中 ε 表示光纤耦合器的分束比, e 表示电子电荷量 η_1 和 η_2 分别为系统中两个光电探测器相应的量子效率, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为噪声电流。

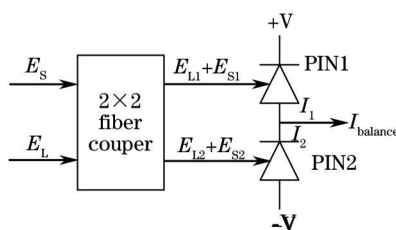


图5 平衡探测原理图

Fig.5 Schematic diagram of balance detection system

光电探测器作为接收系统前端对输出噪声性能影响较大,其光电转换后输出电流包含参考光中的过剩强度噪声、热噪声及散粒噪声,由于热噪声数量级远小于散粒噪声,可忽略不计^[18-20]。而平衡探测的散粒噪声为两探测器噪声之和,依据信噪比公式,可知平衡探测的信噪比满足公式^[7](B_w :带宽):

$$S_{\text{balance}} = \frac{I_{\text{balance}}^2}{I_{\text{excess}}^2 + I_{\text{shot}}^2} = \frac{(\eta_1 + \eta_2)^2 (1-\varepsilon) \varepsilon A_s^2 / h\nu}{\left(\frac{e}{h\nu}\right) \gamma A_L^2 [\eta_1 \varepsilon - \eta_2 (1-\varepsilon)]^2 B_w + [\eta_1 \varepsilon + \eta_2 (1-\varepsilon)] B_w}. \quad (7)$$

同理,在相同的输入信号光和参考光的情况下,以光电探测器1为例,得到单端探测的信噪比满足公式:

$$S_{\text{single}} = \frac{\eta_1 (1-\varepsilon) A_s^2 / h\nu}{B_w + \left(\frac{e}{h\nu}\right) \gamma A_L^2 \eta_1 \varepsilon B_w}, \quad (8)$$

根据(7)式和(8)式,假设平衡探测器中两个光电探测器相匹配,单端探测系统中探测器量子效率为 $\eta_1 = 0.9$, 且相对强度噪声系数取值为 $\gamma = 10^5 A^{-1}$, 平衡探测与单端探测的信噪比随本振光功率的变化关系仿真如图6所示。

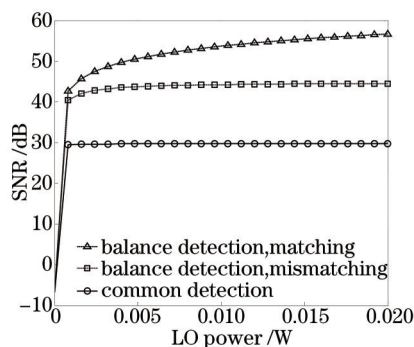


图6 平衡探测与单端探测信噪比特性仿真

Fig.6 SNR simulation of balance detection and common detection

从图6可以看出,在光束的分束比和过剩强度噪声的限制下,单端探测信噪比随本振光功率的增加不明显。而理想的平衡探测系统(匹配状态),由于不存在过剩强度噪声,随着本振光功率的增大,信噪比不断增加。实际应用中由于过剩强度噪声不能完全被消除,信噪比将随本振光功率的增加而趋于一个饱和值。

4 系统测试与分析

根据以上原理分析,采用声光移频器和平衡探测器设计了基于声光效应的相干探测实验系统,原理框图如图7所示。

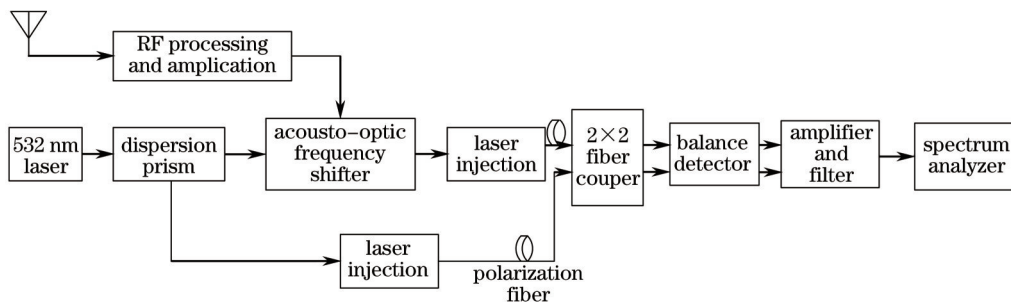


图7 实验系统框图

Fig.7 Diagram of experimental system

实验系统主要由波长为 532 nm 单频激光器、射频(RF)信号处理、激光注入、声光移频器、2×2 光纤耦合器和平衡探测器 6 部分构成。激光器输出经光束分路器分为信号光和参考光;RF 信号处理对天线前端接收的微弱信号进行功率放大,使其满足声光移频器的工作范围。RF 信号送声光移频器进行频率调制,调制输出信号光与参考光经光纤耦合器传输到光电探测器实现相干混频,并完成光电转换和滤波放大输出,频谱仪对输出信号频谱进行测量分析。

为证明声光移频器的滤波特性,采用一定带宽的信号和噪声作用于声光移频器,测试声光移频器对作用信号的选择响应,图8是测试不同信号变化的衍射效率。实验中射频频率为 800 MHz,加载到声光移频器的功率在-20 dBm~0 dBm之间变化,由噪声源提供高斯白噪声信号。

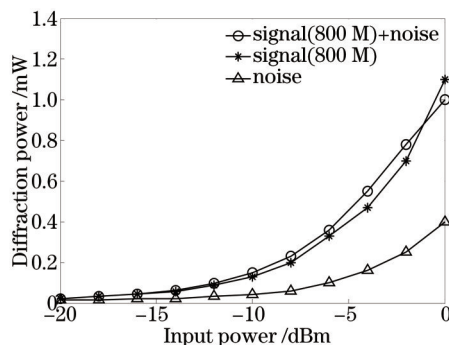


图8 信号和噪声作用下声光衍射效率

Fig.8 Acoustic-optic diffraction efficiency of signal and noise

由图可知,信号单独作用时,声光移频器对入射光的衍射效率高于噪声单独作用时的衍射效率。当信号与噪声同时加载到声光移频器时,衍射效率受噪声的影响不是很大,其衍射效率仍然大于噪声单独作用时的效果,并且与信号单独作用时的效果比较接近。可见,声光移频器对信号和噪声的作用程度明显不同,衍射效率主要还是取决于相位稳定的信号功率。因此,声光移频器因其独有的工作机理而具有一定的空间滤波选择性,有利于信噪比改善。这里所说的滤波不是简单的滤波,而是对信号进行有条件的选择和衍射效率有效地控制,这对应用于声光信号处理的意义重大。

依据图7原理搭建了图9所示实验测试平台,对系统噪声性能进行测试与分析。

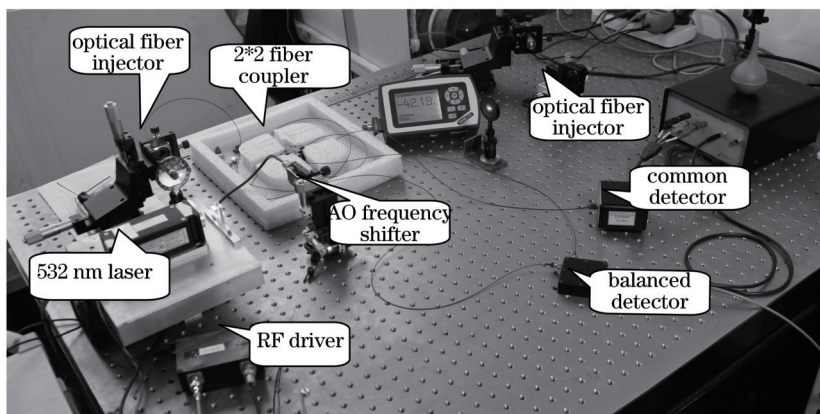


图9 系统实验测试平台

Fig.9 Experimental test platform

根据实验条件,系统设定激光器输出光功率为 16 dBm,声光移频器输入的射频信号频率为 800 MHz,经激光注入到达光纤耦合器的信号光与参考光分别为-29 dBm 和 0 dBm,通过频谱仪观察信号频率在 800 MHz 时系统的信号与噪声输出状态,图 10 所示为单端与平衡探测模拟系统输出端观测的信号频谱。

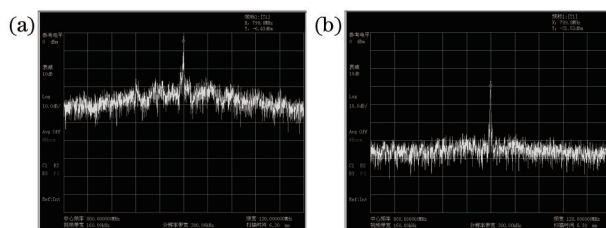


图 10 模拟输出信号的频谱对比。(a) 单端探测;(b) 平衡探测

Fig.10 Spectrum of the analog output signal. (a) Common detection;(b) balance detection

图 10 表示频谱仪测试界面,横坐标为频率,纵坐标为功率,在 800 MHz 频率点测试时,(a)图中载波信号功率为-6.43 dBm,噪声功率为-30 dBm;(b)图中载波信号功率为-31.52 dBm,噪声功率为-60 dBm,计算系统输出载噪比分别为 23.57 dB 和 28.48 dB,载噪比差为 4.91 dB。由图可知单端探测的基底噪声被明显抬高,同时伴随着一些交调起伏现象,而平衡探测的噪声要小很多,且无明显的增大和边频现象,平衡探测系统输出载噪比较单端探测系统提高了近 5 dB,其中噪声比单端探测要低近 30 dB。

系统在无射频信号作用下,测量两种光电探测系统只对有无光信号作用时的噪声性能,按照系统在中心频率为 800 MHz、带宽为 100 MHz 要求,根据噪声信号频谱特征采用信道功率进行测试,比较两种探测系统在 130 MHz(3 dB)积分带宽内的噪声特性。当激光器输出光功率设置为 0,观察两个系统在设定积分带宽的噪声信道功率谱如图 11(a)、11(c),此状态为系统暗电流和电路的输出基底噪声;然后,在激光器有光输入到光电探测器时的系统噪声谱如图 11(b)、11(d),此状态为系统受光激励时输出的量子噪声,其中(a)、(b)图为上部分从左到右,(c)、(d)图为下部分从左到右。

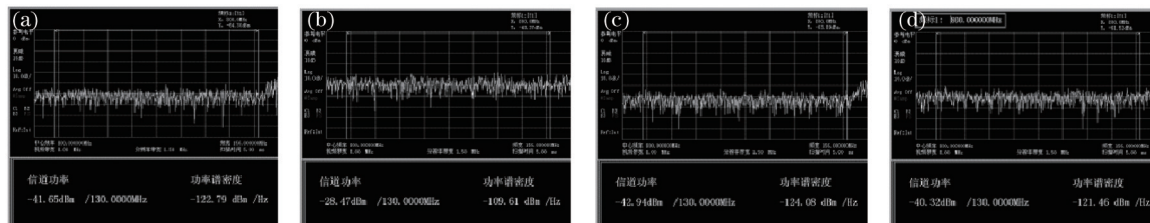


图 11 不同探测方式噪声谱对比。(a) 无光照时,单端探测噪声谱;(b) 有光照时,单端探测噪声谱;(c) 无光照时,平衡探测噪声谱;(d) 有光照时,平衡探测噪声谱

Fig.11 Noise spectrum contrast with different detection. (a) Common detection spectrum with no light; (b) common detection spectrum with light; (c) balance detection spectrum with no light; (d) balance detection spectrum with light

对比图 11(a)、11(c)可知,在没有输入光的情况下,单端探测和平衡探测系统中所存在的噪声几乎相等,为 -42 dBm 左右;而当系统中有光信号作用时,对比单端探测的两种情况,即图 11(a)、11(b),可知,单端探测系统中的噪声基底增加了 13 dB 左右。同样由图 11(c)、11(d)可以看出,平衡探测受光作用带来的噪声基底增加仅为 3 dB 左右。

在以上实验的基础上对系统信噪比进行测试,实验中将模拟射频和噪声信号加载到声光移频器,保证声光移频器一定的射频驱动功率,测试小信号变化时的系统输入和输出信噪比变化情况。输入到声光移频器的噪声功率设定为 -5 dBm,射频频率为 800 MHz,信号功率在 -20 dBm~ 10 dBm 之间以 2 dB 为间隔变化,在声光移频器射频输入端和系统光电探测输出端用频谱仪进行测量,采用图 10 和图 11 的测试方法得到系统带宽内输入和输出的信号与噪声功率。计算系统输入信噪比和输出信噪比随射频信号功率改变得到的数据,并作出信噪比变化对应曲线。经过多次实验测试结果分析得知,当射频信号功率与噪声功率相当或被淹没时,对于不同的射频频率点测试系统信噪比仍有不同程度的改善。在 100 MHz 带宽范围内的信号作用下,通过声光移频的相干光单端探测系统测试信噪比可得到 2 dB~4 dB 的改善,而采用声光移频的相干光平衡探测系统测试信噪比则提高到 5 dB~10 dB。从实验测试充分说明平衡探测对随机噪声有很强的抑制和平滑作用,性能明显优于单端探测,基于声光效应的相干光探测系统的光学降噪特性在未来通信信号处理具有一定优势,为后端信号处理提供有利的信号条件。

5 结 论

提出了一种采用声光效应的光学相干平衡探测系统在抑制噪声方面的技术方法,分析了声光互作用动量匹配与衍射效率关系,对同源相干光探测系统的输出噪声性能进行测试。结果表明,声光器件对相位确定信号作用能建立稳定光栅,在动量匹配条件下其衍射效率优于相位随机的噪声信号;采用平衡探测的相干光探测系统,能有效抑制信号传输过程带来的随机起伏噪声,在信噪比改善等性能方面具有一定优势,有利于提高系统接收能力和输出稳定性,为弱信号环境下通信信号降噪处理的实际应用提供一种新的技术途径。

参 考 文 献

- 1 V V Akunets, A I Decchenko, Yu F Evtushenko, *et al.*. Analyzer of radar signals based on acousto-optic deflector[C]. Microwave & Telecommunication Technology, 2000: 503-504.
- 2 I C Chang. Acousto-optic devices and applications[J]. IEEE Trans Sonics and Ultrasonics, 1976, 23(1): 2-22.
- 3 J Wu, A D Boardman. Coherence length of a Gaussian-schell model beam and atmospheric turbulence[J]. J Mod Opt, 1991, 30(7): 1355-1367.
- 4 He Ning, Xie Zhaoling. Effect of beam characteristic on detection efficiency for the coherent optical detection system based on acoustic-optic deflection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206007.
何 宁, 谢朝玲. 光束特性对声光偏转相干光探测效率的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0206007.
- 5 Ma Zhonghong, Yang Yong, Wu Yongli, *et al.*. Spatial angular multiplexing for enlarging detection area of off-axis digital holography with low-coherent-length light source[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0509001.
马忠洪, 杨 勇, 吴永丽, 等. 采用角分复用技术拓展低相干光源离轴全息术的探测面积[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0509001.
- 6 Wang Chunhui, Gao Long, Li Yanchao, *et al.*. Investigation of balanced detection and receiver for coherent lidar[C]. Proc SPIE, 2009, 7382: 73820I.
- 7 Xu Nan, Liu Liren, Wang Lingyu, *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 347-351.
许 楠, 刘立人, 王玲玉, 等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 347-351.
- 8 Gong Yuxin, He Ning, Zhang Lei. Research into the approaches of coherent detection with optical fiber delay line based on phase-controlling[J]. Optical Communication Technology, 2014, 29(7): 14-16.
龚雨心, 何 宁, 张 雷. 基于光纤延迟线相位控制的相干光探测方法研究[J]. 光通信技术, 2014, 29(7): 14-16.
- 9 K K Das, K M Iftekharuddin. Heterodyne detection using hexagonal detector: effects of beam profiles and phase front misalignment[C]. Processing of the IEEE, 1997, 1: 476-481.
- 10 Paul Peter Ewald. Zur begründung der kristallographie[J]. Teil I Ann Phys, 1916(49): 1-38.

- 11 Zheng Haobin, He Yanlan, Tan Jichun, *et al.*. Fabrication of volume Bragg gratings for spatial filtering[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(1): 125-130.
郑浩斌, 何焰蓝, 谭吉春, 等. 用于实现空间滤波的体布拉格光栅的制备[J]. *光电工程*, 2009, 36(1): 125-130.
- 12 He Yan, Wang Wenkui, Xia Wenbing, *et al.*. Laser Doppler vibrometer for acousto-optic communication[J]. *Chinese J Laser*, 2007, 34(5): 703-706.
贺 岩, 王文奎, 夏文兵, 等. 激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 703-706.
- 13 D Dickson. Optical considerations for an acousto-optic deflector[J]. *Appl Opt*, 1972, 11(10): 2196-2202.
- 14 Sun Ning. Signal Processing System for Acousto-Optic Technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009: 6-17.
孙 宁. 基于声光技术的信号处理系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 6-17.
- 15 Li Yongbo. Effect of local oscillator phase noise on receiver performance[J]. *Technology Engineering*, 2012, 52(4): 562-565.
李永波. 本振相位噪声对接收机性能的影响[J]. *电讯技术*, 2012, 52(4): 562-565.
- 16 Liu Liren. Principle of auto-scanning synthetic aperture imaging lidar using hyperbolic wavefront difference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0128001.
刘立人. 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0128001.
- 17 Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun, *et al.*. Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of $2\mu\text{m}$ balanced coherent system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1104002.
王春晖, 高 龙, 庞亚军, 等. 光束分束比对 $2\mu\text{m}$ 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1104002.
- 18 Yang Yanling, Li Yanchao, Gao Long, *et al.*. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1918-1922.
杨彦玲, 李彦超, 高 龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1918-1922.
- 19 Liu Hongyang, Zhang Yange, Ai Yong, *et al.*. Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2014, 51(7): 070601.
刘宏阳, 张燕革, 艾 勇, 等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计和实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 070601.
- 20 Xu Shilong, HuYihua, Guo Liren. Design and performance analysis of aircraft wake vortex coherent laser detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2014, 51(8): 081202.
徐世龙, 胡以华, 郭力仁. 飞机尾涡相干激光探测系统设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 081202.

栏目编辑: 刘丰瑞