

# 基于全固态单频激光器的光子计数相干探测

张合勇<sup>1,2</sup> 王挺峰<sup>1</sup> 姜润强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出采用光子级别的弱本振光(LO)与弱回波信号进行相干混频。接收单元采用多像素光子计数器(MPPC), 光子混频中心频率为 1 MHz, 本振光与回波光光子光程差分别为 30、45、60 m。实验分析表明, 在距接收系统的任何位置, 其数据的功率谱密度(PSD)中均含有大量噪声成分。为减弱噪声的影响, 采用功率谱密度叠加方法从噪声中提取信号, 并采用匹配滤波算法将信噪比进一步增强。对距接收系统 45 m 和 60 m 处的混频信号进行 6 次功率谱密度叠加后利用匹配滤波算法进行滤波, 信噪比分别提升 5.90 倍和 2.73 倍, 且初始信噪比越高, 滤波后信噪比改善越明显。

**关键词** 探测器; 全固态单频激光器; 光子计数; 相干探测; 信噪比

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0608002

## Photon Counting Coherent Detection Based on All Solid State Single Frequency Laser

Zhang Heyong<sup>1,2</sup> Wang Tingfeng<sup>1</sup> Jiang Runqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A frequency mixing method with photon counting level weak local oscillator (LO) and echo signal is put forward to decrease the shot-noise from the strong LO. The receiver is multi-pixel photon counter (MPPC), the central frequency of the mixing signal is 1 MHz, and the optical path differences are 30, 45, 60 m respectively. The experimental analysis shows that power spectral density (PSD) of every data segment has a great number of noise no matter what the distances is. Accordingly, the method of PSD averaging is used to extract the signal from the deep noise, then, matched filtering method is also introduced to enhance the signal-to-noise ratio (SNR). The PSD averaging and matched filtering method are adopted for the frequency mixing signal at the distances of 45 m and 60 m from the signal receiving system, as a result the SNRs are improved by 5.90 and 2.73 times compared with the original PSD signal, and the higher the initial SNR is, the more prominent the improvement of SNR is.

**Key words** detectors; all solid sate single frequency laser; photon counting; coherent detection; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 040.5160; 140.3570; 030.1640

## 1 引言

全固态激光器由于其工作物质和激励源均不含有气体或液体, 在可靠性和小型化方面具有其他激光器难以比拟的优点; 同时由于采用激光二极管(LD)抽运方式, 电-光转换效率高, 容易获得较大功率或能量输出。因此全固态激光器在近几年取得了飞速发

展, 其应用范围不断扩展, 尤其在光学精密检测中获得广泛应用。精密测量一般分为直接探测和相干探测两大类, 其中相干探测在探测灵敏度和抗干扰能力方面具有较大优势, 因此应用较多。但相干探测对激光器和环境要求较高。全固态单频激光器的出现, 使得光学相干探测所需的窄线宽稳频光源问题得

收稿日期: 2012-12-28; 收到修改稿日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)资助课题。

作者简介: 张合勇(1982—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事激光主动探测方面的研究。

E-mail: yonghezhang1116@126.com

导师简介: 郭劲(1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电对抗总体技术方面的研究。

E-mail: Guojin\_1964@126.com

以解决。激光相干探测大多采用毫瓦量级的强本振光,需通过抑制干涉信号中的复杂噪声提高信号探测灵敏度。其中通过增强本振光功率能在一定程度上抑制噪声,但易引入因本振光产生的过剩散粒噪声。因此有必要研究弱光环境下的激光相干探测(也可称为光子计数相干探测)。光子计数相干探测与传统相干探测的不同之处在于其对探测器具有特殊要求:既要具有光子计数能力,还需要大动态范围。由此研究人员开发了阵列形式的光子计数器。美国麻省理工学院的林肯实验室采用独立研制的雪崩光电二极管(APD)阵列探测器用于三维成像以及光子计数外差实验<sup>[1~4]</sup>,此外该实验室研发的盖革模式 APD 阵列采用单个像元独立输出方式,且每个像元均设置有主动淬灭电路。日本滨松公司研发多像素光子计数器(MPPC)采用所有像素累积输出的方式,因此具有更大的计数动态范围,可广泛用于高能物理、天文学和荧光测量等前沿领域<sup>[5~10]</sup>。国外在该方向的研究集中在近5年内<sup>[10~14]</sup>。国内除北京师范大学联合北京辐射研究中心在2010年利用MPPC进行过拉曼散射测量<sup>[15]</sup>之外,没有利用该探测器进行研究的相关报道。

本文基于全固态单频激光器,采用MPPC作为光电接收器件,开展全固态激光器的新型应用研究——光子计数相干探测。根据所搭建的实验装置,获得不同距离位置处的光子计数相干探测功率谱,并采用匹配滤波算法提高功率谱信号的信噪比,为实现更远距离的弱光探测奠定基础。

## 2 实验简述

实验中以全固态单频激光作为发射源,利用MPPC光子计数器作为光学相干探测的混频器,所使用的全固态激光器由法国Oxxius公司生产,参数如表1所示。

表1 单频激光参数

Table 1 Single frequency laser parameters

Wavelength /nm	532±1
Linewidth /MHz	<1
Coherence length /m	>50
Output power /mW	100
Beam diameter	0.7 mm at 1/e <sup>2</sup> , at 50 mm from aperture
Beam divergence	1.0 mrad at 1/e <sup>2</sup> , full angle, in far field
Beam quality	TEM <sub>00</sub> , M <sup>2</sup> <1.1
Power stability	±1% p-p, over 8 hours and ±3℃
Optical noise	<0.2% rms, 10 Hz~2 MHz
Polarization ratio	>100:1, vertical ±3°
Pointing stability	<5 μrad/℃

根据表1所描述的单频激光特征,主要分析影响激光相干探测性能的3个因素:线宽、稳定性和噪声水平。

激光线宽直接决定激光器的相干长度,上述激光相干长度超过50 m,是根据公式 $L_c=c/(2\pi\Delta\nu)$ 计算获得。激光相干长度反应一个波列的长度,原则上讲,只要是单频(单纵模)激光,不管相干长度大小,均可用于相干探测。但是,相干长度较长的激光器,在截取的信号脉冲段内,所包含断续波列数较少,引入相位噪声较小,有利于干涉中频信号提取。所以,在单纵模前提下,激光器线宽将影响探测的信噪比,但对探测距离的影响并非很大,目前诸多远距离激光相干探测系统均工作在远大于激光相干长度的距离范围。

激光器稳定性主要有频率稳定和功率稳定。正常情况下,二者只要有一个不稳定,另外一个也不会具有很高的稳定度。频率稳定度直接影响激光相干频率检测的分辨率。在频率稳定的误差之内,无法区分是目标引起的频移还是激光器本身的频移,因此,用于激光相干探测的光源一定是稳频输出的激光器。功率稳定性主要引起回波信号的强度起伏,其单独影响不会太大。但是一旦功率发生较大的抖动,频率也可能发生大范围漂移,此时的主要影响因素就是频率稳定性。所以对频率稳定性的控制,是激光相干探测的核心。

激光器的噪声水平表示激光输出频谱中所含的噪声频谱比例的大小,噪声越小,由光源本身所引入的光学噪声越小,对提高接收信号的信噪比越有利。实验中所用的激光器工作在单纵模稳频状态,其功率稳定性和频率稳定性经过多次实验测试,均获得了良好效果,满足光学相干探测所需的发射光源要求。尤其在光子计数级别的弱本振光相干探测中,对激光器本身的稳定性和重复性要求较高。利用该激光器搭建的光子计数相干探测实验原理如图1。

如图1所示,全固态窄线宽单频激光器发射光源分为两束,其中一束经转折镜发射到目标上;另一束经过两级声光调制,获得1MHz的频率偏移,再经过衰减片后入射在另一分束镜上,与经过望远镜接收的回波光进行合束,空间准直匹配的2光束经高倍率衰减和光谱滤波后,进入MPPC探测器光敏面混频。实验中所使用的探测器为日本滨松公司2006年推出的像素为400 pixel的MPPC模块,型号为C10507-11-050U,其芯片电路外观如图2(a)所示,经设计加工的封装衰减结构如图2(b)所示。

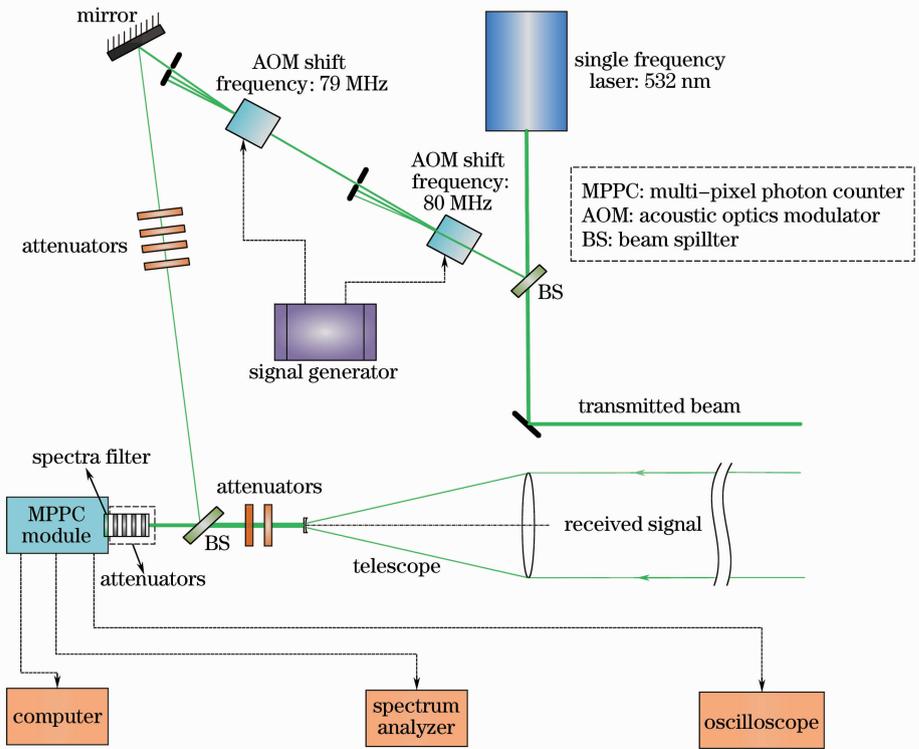


图 1 MPPC 光子计数相干探测示意图

Fig. 1 Sketch map of photon counting coherent detection with MPPC detector

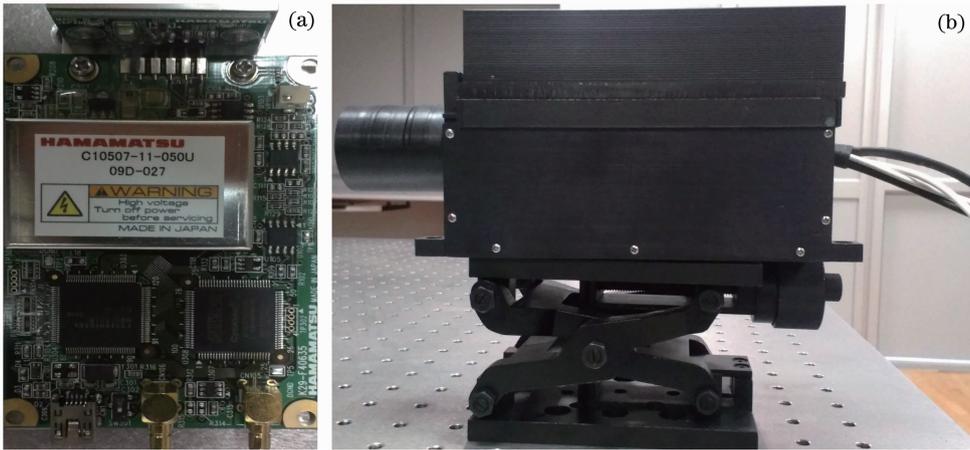


图 2 MPPC 光子计数器的(a)芯片电路和(b)实物图

Fig. 2 (a) Chip circuit and (b) physical map of MPPC photon counting detector

MPPC 光子计数器需要与计算机连接,通过软件设置相应积分时间和光子事件阈值,实验中积分时间设为 1 ms,光子事件阈值为 0.5 pe,所设置参数只影响探测器比较器输出光子数,不影响模拟通道的光子输出。MPPC 具备两个输出通道,分别对应于模拟电压输出和比较器输出,二者可分别通过示波器及频谱分析仪进行时域或频域观测,也可将二者输入到示波器两个通道,同时观测模拟输出和

比较器输出时域波形。上述两通道信号通过示波器的观测结果如图 3 所示。

如图 3 所示,图中上半部分表示光子计数器输出的模拟电压信号,电压幅值对应于光子个数的多少;下半部分表示比较器输出波形,根据选定的光子事件阈值获得相应的光子输出个数。图中所示为示波器界面截图,整幅图涵盖时间长度  $2 \mu\text{s}$ ,每小格对应时间长度为 200 ns。

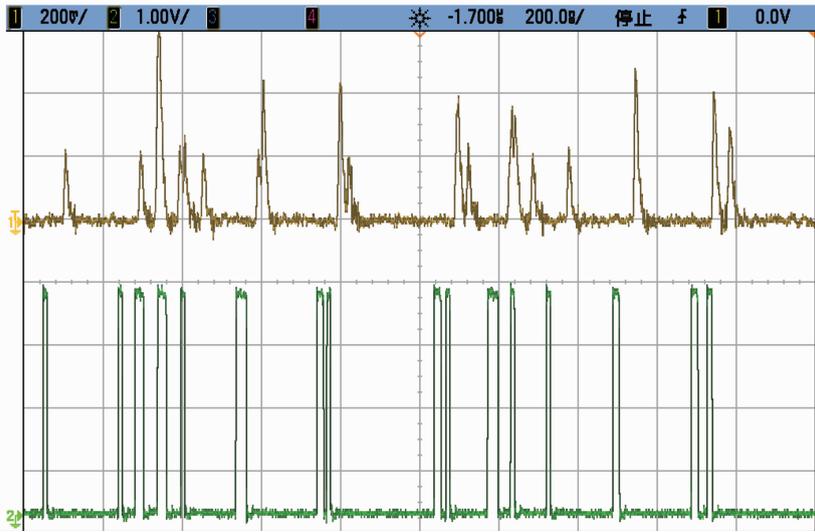


图 3 MPPC 信号输出波形

Fig. 3 Output waveform of signal by MPPC detector

### 3 光子计数相干探测功率谱分析

实验中,声光调制器将本振光频率偏移 1 MHz,发射激光经目标漫反射后,与本振激光发生光子级别的弱光拍频。当目标静止时,回波光子与本振光子拍频后,理论上将产生 1 MHz 的中频信号。对于离散的光子级别的拍频原理如图 4 所示。

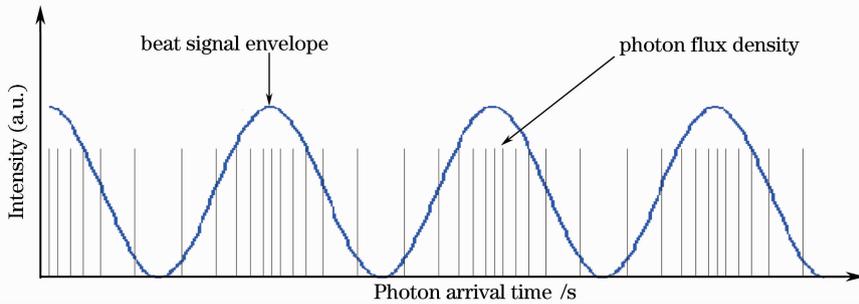


图 4 离散的光子拍频原理图

Fig. 4 Schematic map of frequency beat for discrete photons

由图 4 可知,拍频信号的中频包络在理想情况下对应于正弦波,而对光子级别拍频而言,由于光子稀疏,在时域上无法显示出连续信号,而是对应于一系列离散的光子,这些光子的疏密程度反映了到达光子数的多少,与宏观上理解的拍频信号的包络周期相对应。但实际上,由于回波信号和本振光信号非常微弱,极易受各种噪声干扰,导致回波光子无法显示出理想周期分布。但若采取一定的信号分析手段(常用快速傅里叶分析技术),再结合一些滤波措施(比如匹配滤波技术),就能将淹没在噪声中的拍频信号提取出来。

实验中,将漫反射目标分别放在距接收系统 30、45、60 m 的位置,整个过程中目标保持静止,理

论上认为此时回波光子与本振光子发生混频后的中频信号应为 1 MHz。因为此时没有目标运动造成的多普勒频率移动,两路光子信号混频后的频率成分完全由两路声光调制器的初始频率决定。首先分析目标位于 30 m 距离处的回波光子与本振光子的拍频信号。在该距离处进行了 4 组实验,其中每组数据长度为 2000000,进行傅里叶变换点数为大于该数且最接近于此数的 2 的  $n$  次幂(2097152)。由此可得功率谱密度分别如图 5 中各子图所示。由图 5 可知,在 4 组实验数据中,有两组数据反演出的信号功率谱完全淹没在噪声中,无法进行信号提取。为此,进行功率谱密度叠加,图 6 为进行 2 次和 4 次功率谱密度叠加的效果。

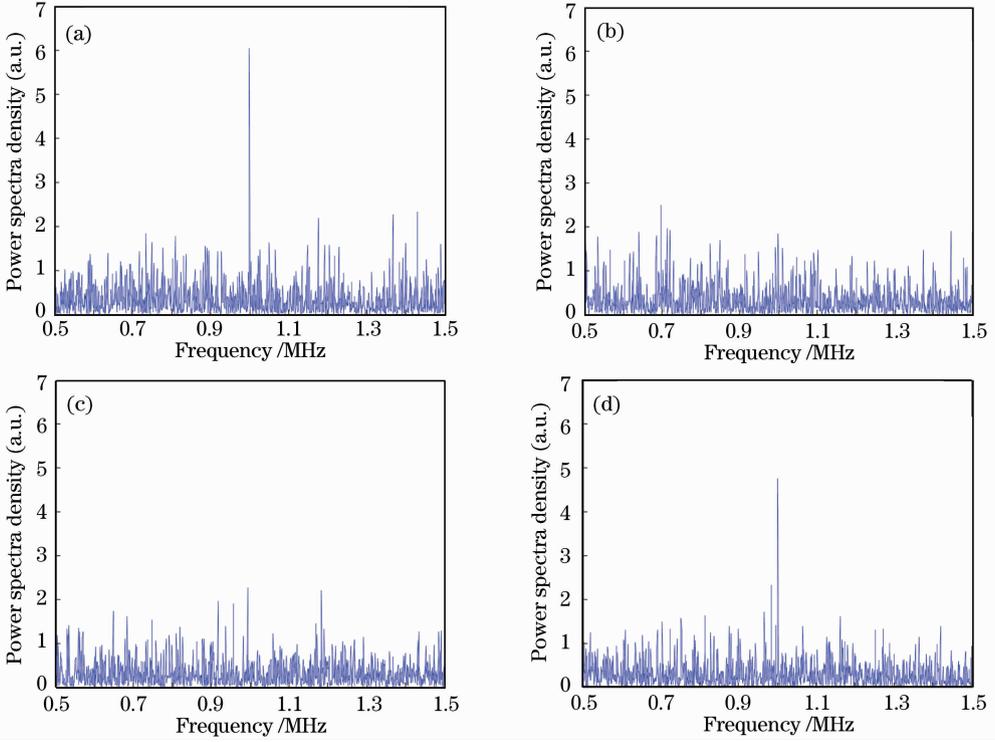


图 5 30 m 距离 4 组实验对应光子拍频功率谱。(a) 第一组数据；(b) 第二组数据；(c) 第三组数据；(d) 第四组数据  
 Fig. 5 Power spectra density of photons beat signal at distance of 30 m. (a) The first data group; (b) the second data group; (c) the third data group; (d) the fourth data group

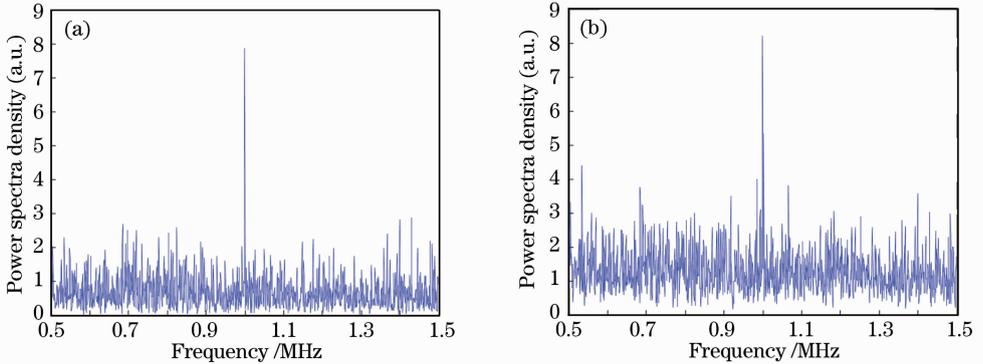


图 6 不同叠加次数的功率谱密度对比。(a) 2 次叠加；(b) 4 次叠加  
 Fig. 6 Power spectra density comparison with different averaging times. (a) Two PSDs averaging; (b) four PSDs averaging

由图 6 可知, 2 次和 4 次功率谱密度叠加保证了拍频信号 1 MHz 从噪声中凸显出来。但是, 功率谱密度叠加次数增加, 并不能很好地提高信噪比。因为在叠加的过程中噪声也同样进行了叠加, 反而有信噪比下降的趋势。因此, 单纯采取功率谱密度叠加的方式, 并不能最大限度提高信噪比, 需要采取其他信号处理方法。

在诸多的信号处理方法中, 针对离散信号提高信噪比的一种有效方法是匹配滤波方法。该方法能够体现出针对具体参考函数的最佳的线性运算, 而

且能够从假定高斯白噪声中提取出该运算方法。假定所探测的信号为

$$g(x) = \phi(x) + \lambda(x), \quad (1)$$

式中  $\phi(x)$  表示时刻  $x$  处对应的原始信号,  $\lambda(x)$  表示功率谱密度为  $S(\omega)$  的噪声。其中噪声假定为稳定的零均值分布, 即

$$\begin{cases} E[\lambda(x)] = 0 \\ E[\lambda(x+\alpha)\lambda(x)] = R(\alpha) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  表示时间间隔。假设  $\phi(x)$  已知, 需要对其进行重建, 以获得其频谱出现的位置。为此, 将  $g(x)$  进

行线性滤波处理,该滤波器在单位冲击响应下的系统函数为  $H(\omega)$ ,结果输出为

$$z(x) = g(x) * h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x-\alpha)h(\alpha)d\alpha = z_{\phi}(x) + z_{\lambda}(x). \quad (3)$$

利用傅里叶变换的卷积定理可得

$$z_{\phi}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x-\alpha)h(\alpha)d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega)H(\omega)\exp(i\omega x)dx. \quad (4)$$

获得最大化信噪比( $R_{SN}$ , SNR)的系统函数  $H(\omega)$  应满足:

$$R_{SN} = \frac{|z_{\phi}(x_0)|^2}{E[z_{\lambda}^2(x_0)]}, \quad (5)$$

式中  $x_0$  表示信号出现的位置。信噪比  $R_{SN}$  表示纯正的信号成分与噪声经过滤波器响应后的幅度比值,即信号出现的真实峰值(常常是频谱峰值),因此不用考虑滤波器远离峰值的响应。需关注的特殊情况主要有白噪声和有色噪声。

1) 白噪声:该类型的噪声可由以下条件进行定义:

$$S(\omega) = S_0, \quad (6)$$

式中  $S_0$  表示自噪声的功率谱密度。该类型噪声对应平坦的能谱分布,根据 Schwartz 不等式有

$$\left| \int_a^b f(x)g(x)dx \right|^2 \leq \int_a^b |f(x)|^2 dx \int_a^b |g(x)|^2 dx, \quad (7)$$

式中  $a, b$  分别为时间积分上下限,(7)式成立条件为

$$f(x) = kg * (x), \quad (8)$$

式中利用  $*$  表示复共轭,此时信噪比可表示为

$$R_{SN} \leq \frac{\int |\Phi(\omega)e^{i\omega x_0}|^2 d\omega \int |H(\omega)|^2 d\omega}{2\pi S_0 \int |H(\omega)|^2 d\omega} = \frac{E_{\Phi}}{S_0}, \quad (9)$$

其中

$$E_{\Phi} = \frac{1}{2\pi} \int |\Phi(\omega)|^2 d\omega, \quad (10)$$

$E_{\Phi}$  表示信号的能量,从 Schwartz 不等式可得(9)式成立条件为

$$H(\omega) = k\Phi^*(\omega)e^{-i\omega x_0}. \quad (11)$$

因此,滤波器响应函数的时域形式正好为信号的镜像运算:

$$h(x) = k\phi(x_0 - x), \quad (12)$$

(12)式表明信号与滤波器的卷积可以表示为信号的互相关函数,因称为做匹配的空间滤波。

2) 有色噪声:如果噪声具有非平坦能谱  $S(\omega)$ ,该噪声可认为是有色噪声。在此情况下,有以下表达式成立:

$$2\pi z_{\phi}(x_0) = \int \Phi(\omega)H(\omega)e^{i\omega x_0} d\omega, \quad (13)$$

$$|2\pi z_{\phi}(x_0)|^2 = \left| \int \frac{\Phi(\omega)}{\sqrt{S(\omega)}} \sqrt{S(\omega)}H(\omega)e^{i\omega x_0} d\omega \right|^2 \leq \int \frac{|\Phi(\omega)e^{i\omega x_0}|^2}{S(\omega)} d\omega \int S(\omega)|H(\omega)|^2 d\omega, \quad (14)$$

因此有

$$R_{SN} \leq \frac{1}{2\pi} \int \frac{|\Phi(\omega)e^{i\omega x_0}|^2}{S(\omega)} d\omega, \quad (15)$$

其中,(15)式成立条件为

$$\sqrt{S(\omega)}H(\omega) = k \frac{\Phi^*(\omega)e^{-i\omega x_0}}{\sqrt{S(\omega)}}, \quad (16)$$

式中  $k$  为无量纲比例系数。对有色噪声的分析所获得的结果表现为该最佳滤波器为信号的修正形式:

$$H(\omega) = k \frac{\Phi^*(\omega)e^{-i\omega x_0}}{S(\omega)}. \quad (17)$$

(17)式表明经过匹配滤波算法后,在信号对应的频率处,噪声所包含的能量成分得以降低,从而提高信噪比。与上文中未进行匹配滤波的功率谱对比,对每一组数据进行匹配滤波,再进行 2 次和 4 次功率谱密度叠加,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,经匹配滤波后的功率谱密度叠加信噪比具有较大幅度提升,噪声在很大程度上得到抑制;同时对于每次测量的信号,由于环境中各种噪声的综合作用,某些数据采集段上可能无法判读信号是否存在。而将这些数据段列入功率谱密度叠加范畴,对于整体信噪比的提高没有实际意义。这在上述的 2 次和 4 次功率谱密度叠加的数据以及匹配滤波后功率谱密度叠加的数据均得以体现;其中 4 次叠加的信噪比改善效果还不如 2 次叠加的结果。因此在数据处理时需进行一定判断,将噪声影响剧烈的数据段进行屏蔽。图 8、9 分别给出距信号探测器 45 m 和 60 m 处的光子计数相干探测功率谱密度经 6 次叠加和匹配滤波后的信号对比。

根据信噪比的定义(信号幅值与噪声方差的比值),可以得到在所关注的频谱范围内的信噪比。由此可得在 45 m 距离处,匹配滤波前后的信噪比分别为 35.15 和 207.48,信噪比提升为原来的 5.90

倍;在 60 m 距离处,匹配滤波前后的信噪比分别为 7.95 和 21.71,信噪比提升为原来的 2.73 倍。可见采用匹配滤波算法的信噪比改善与初始信噪比有关,初始信噪比越高,其信噪比改善的程度越明显。这也表明该滤波方法适用于信号没有完全被噪声淹没的情况,如果信号幅值低于噪声方差,那么需要采

用其他手段(如数据段细分功率谱叠加方法)将处于噪声淹没中的信号提取出来,此时再使用匹配滤波算法,将会使信噪比得到大幅度提高。所以,随微弱光子转化而来的电信号中夹杂着多种噪声,需要采取多种技术手段进行信号提取与增强。

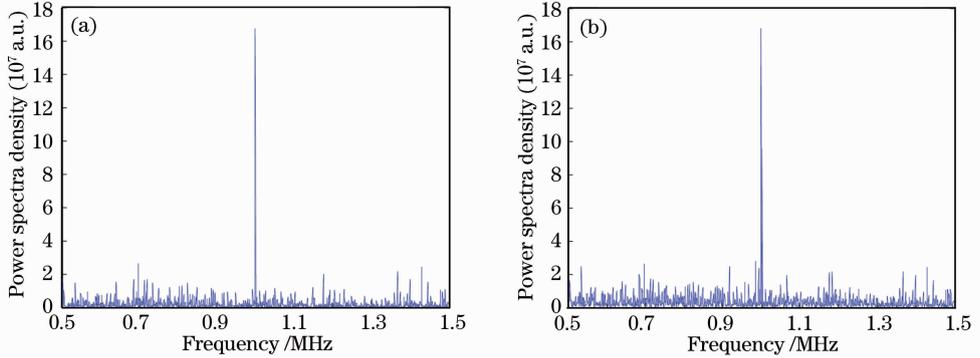


图 7 匹配滤波后不同叠加次数的功率谱密度对比。(a) 2 次叠加; (b) 4 次叠加

Fig. 7 PSD comparison of different averaging times after matched filtering. (a) Two PSDs averaging; (b) four PSDs averaging

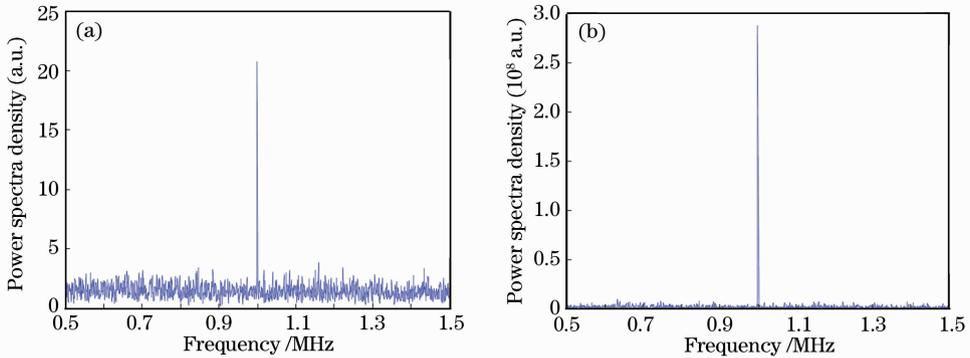


图 8 45 m 处回波光子混频功率谱密度。(a) 匹配滤波前; (b) 匹配滤波后

Fig. 8 Frequency mixing PSD at distance of 45 m. (a) Before matched filtering; (b) after matched filtering

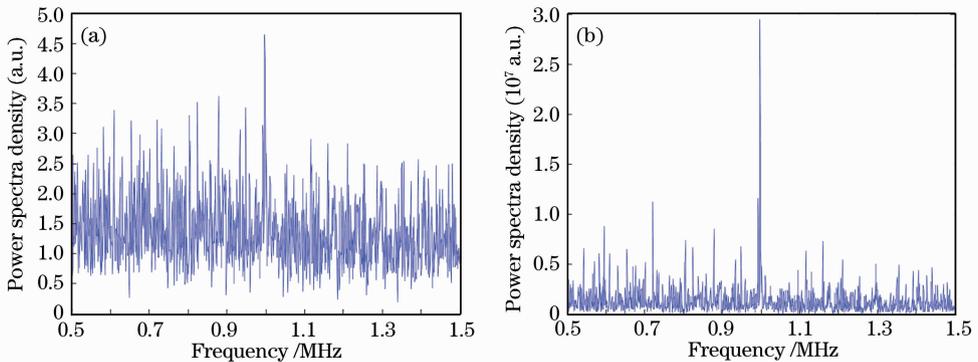


图 9 60 m 处回波光子混频功率谱密度。(a) 匹配滤波前; (b) 匹配滤波后

Fig. 9 Frequency mixing PSD at distance of 60 m. (a) Before matched filtering; (b) after matched filtering

## 4 结 论

为解决传统相干探测系统中过强的本振光信号

引起的过剩散粒噪声问题,将全固态单频激光器用于光子计数相干探测系统。采用本振光和回波信号

(均是光子量级)进行光学混频的方法,获得了距信号探测系统不同距离(30, 45, 60 m)处的光子计数混频信号,该混频信号中心频率为 1 MHz。本振光和目标反射的回波信号较弱,易受外界环境噪声干扰,导致信号提取较为困难。因此,提出采用功率谱密度叠加和匹配滤波相结合的方式,首先将弱信号通过功率谱密度叠加逐渐从噪声中分离,然后利用匹配滤波方法进一步提高信噪比。实验结果表明,在 45 m 和 60 m 距离处,信噪比提升倍率分别为 5.90 和 2.73 倍,实现了光子计数级光学相干信号的有效提取。

### 参 考 文 献

- Marius A. Albota, Brian F. Aull, Daniel G. Fouche *et al.*. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 351~370
- Brian F. Aull, Andrew H. Loomis, Douglas J. Young *et al.*. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 335~350
- Jane X. Luu, Leaf A. Jiang. Saturation effects in heterodyne detection with Geiger-mode InGaAs avalanche photodiode detector arrays[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3798~3804
- Leaf A. Jiang, Jane X. Luu. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1486~1053
- Chang Lyong Kim, Wang Gin-Chung, Sergei Dolinsky. Multi-pixel photon counters for TOF PET detector and its challenges[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, **56**(5): 2580~2585
- Akihiro Minamino, Naoki Nagai, Daniel Orme *et al.*. Development of multi-pixel photon counters for T2K long baseline neutrino experiment [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2008, **50**(1): 3111~3114
- Martin Gottlich, Erika Garutti, Valentin Kozlov *et al.*. Application of multi-pixel photon counter to positron emission tomography[J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2008, **50**(4): 3119~3122
- Debora Henseler, Ronald Grazioso, Nan Zhang *et al.*. SiPM performance in PET applications: an experimental and theoretical analysis [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2009, **28**(1): 1941~1947
- F. Retiere, Y. Du, S. Foreman *et al.*. Characterization of multi pixel photon counters for T2K near detector [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, **610**(1): 378~380
- Liu Lisheng, Zhang Heyong, Guo Jin *et al.*. High precise measurement of target velocity using laser heterodyne technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2366~2372  
刘立生,张合勇,郭劲等.用激光外差技术高精度测量目标速度[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2366~2372
- Zhao Shuai, Guo Jin, Liu Hongbo *et al.*. Application of multi-pixel photon counters to single photon detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 972~976  
赵帅,郭劲,刘洪波等.多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 972~976
- Zhang Heyong, Zhao Shuai, Guo Jin *et al.*. Experiment of coherent and multi-mode thermal light statistics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(10): 2132~2139  
张合勇,赵帅,郭劲等.相干和多模热光场的光子统计实验[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(10): 2132~2139
- Zhang Heyong, Guo Jin, Zhao Shuai *et al.*. Research on Fano factor for pseudo-thermal light field based on multi-pixel photon counter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008010  
张合勇,郭劲,赵帅等.基于多像素光子计数器的赝热光场 Fano 因子研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008010
- Liu Lisheng, Zhang Heyong, Zhao Shuai *et al.*. Characteristics analysis of the photons arrival time interval of laser beat signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0403001  
刘立生,张合勇,赵帅等.激光拍频信号光子到达时间间隔特性分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0403001
- Guoqing Zhang, Xiaobo Hu, Ru Yang *et al.*. Fast identification of trace substance by single-photon detection of characteristic Raman scatterings with gated coincidence technique and multipixel photon counters [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(14): 2601~2605

栏目编辑: 张 腾