

变速目标的光子回波外差信号处理方法研究

蒲梦瑶^{1,2}, 胡以华^{1,2*}, 曲芳慧³, 张鑫源^{1,2}, 董晓^{1,2**}¹国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;²国防科技大学电子对抗学院电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;³95438 部队, 四川 眉山 620000

摘要 变速运动目标的中频信号特征频谱具有连续集中的多频分量,且具有一定的多普勒展宽,在背景噪声和暗计数的影响下,光子回波外差信号的信噪比较低时,使用传统的信号处理方法得到的中频信号频谱以及时频分析特性效果较差。为提高信噪比,本文提出了将稀疏度自适应压缩感知和密度聚类相结合的信号处理方法,并采用该方法对变速目标的光子回波外差信号进行处理。该信号处理方法解决了变速目标频谱稀疏度 K 无法提前确定的问题,而且只需要较少的观测数据就可以重构信噪比较高的中频频谱。此外,该方法结合密度聚类算法对中频频谱进行了第二重去噪,大幅度减少了噪声分量。研究表明,该信号处理方法能够将信噪比提高一定幅度且多普勒展宽精度误差在 10% 以内,可以得到较为完整的中频信号频谱,同时较好地解决了信号时频分辨率较差的问题以及单光子探测等间隔时间序列造成的时频图中的倍频现象,得到了更好的时频特性描述。

关键词 光谱学; 光子外差; 压缩感知; 聚类去噪; 多普勒测速; 时频分析

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220919

1 引言

近年来,随着单光子技术的日趋成熟,激光外差技术与单光子探测技术相结合极大地提高了探测灵敏度^[1]。基于盖革雪崩光电二极管(GM-APD)的光子计数外差激光雷达为通过光子外差探测实现远距离运动目标的高精度探测提供了可能^[2]。单光子雪崩光电二极管(SPAD)具有低功耗和高集成度等特点,在实际应用中得到了广泛应用;然而,由于单光子探测的固有体制,其探测器响应模式符合泊松分布^[3],其性能影响因素包括背景噪声、暗计数噪声以及后脉冲效应等,限制了单光子计数器的工作性能^[4-6]。因此,单光子雪崩光电二极管通常在门控盖革模式下运行,以实现有效检测^[7-8]。基于 InGaAsP/InP 单光子雪崩二极管的集成型快速主动淬灭近红外单光子探测器已被研制出来,该探测器具有良好的综合性能^[9]。光子计数雷达主要用于远距离目标的高精度测距,沈姗姗等^[10]对测距系统的性能进行了研究,马建平^[11]致力于获得高精度的距离信息。激光外差探测和单光子计数的结合不仅可以实现对目标的高灵敏度测距,还可以获取目标的运动信息。光子外差探测精度和探测带宽取决于系统的性能^[12-13]和信号处理方法。此外,单光子探测

技术也被应用于太赫兹波段^[14-15]。

Chen 等^[16]提出了基于压缩感知的信号处理方法,与传统的直接采用傅里叶变换对光子外差回波信号求频谱相比,其信噪比能提高 15 dB;但是,该信号处理方法多用于只含单频分量或少数多频分量的光子回波,当运动目标连续变速产生连续的多普勒频谱时^[17],该方法具有一定的局限性,信号重构成功率会大大降低,只能获得局部多普勒频率分量,不能得到连续完整的多普勒频谱。另外,Chen 等^[16]采用的压缩感知算法需要提前定义信号分频个数,即稀疏度 K ,这对于变速目标而言,已经不再适用。变速运动目标的光子回波外差信号具有连续的多普勒展宽谱,当信噪比较低时,用上述方法难以分辨,因此需要改进光子回波外差信号处理方法,以提高信噪比,进而提取变速目标完整连续的多普勒频谱,同时获得显著的时频特征。

本课题组先后通过仿真和光子外差实验得到了变速目标的光子回波外差信号到达序列时间流数据,提出了将稀疏度自适应压缩感知^[18]与聚类算法^[19]结合的信号处理方法,并采用该方法得到了准确的多普勒频谱,同时抑制了噪声的频率分量,实现了更高的信噪比,优化了时频性能。本文提出的信号处理方法为光子外差方法探测目标其他运动状态和微多普勒频移提

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-07-21; 网络首发日期: 2022-08-02

基金项目: 国防科技大学科研计划项目重大项目(ZK18-01-02)、国家自然科学基金(61871389)、脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(KY21C604)、电子对抗学院基金项目(KY21C220)、湖南省研究生科研创新项目(CX202200)

通信作者: *skl_hyh@163.com; **skl_dongxiao@163.com

供了参考。

2 基本原理

2.1 光子外差探测系统

光子外差探测系统示意图如图 1 所示。用 1550 nm 连续波激光器作为激光光源,用光分束器(99:1)将激光光源分为信号光和本振光两部分,以实现零差探测。在本振光路中,利用可调衰减器调节本振光的光强。在信号光路中,利用光纤环形器和光纤耦合镜构造收发同轴光路,光纤耦合镜前放置中心波长为 1550 nm、

带宽为 13 nm、透过率为 68.5% 的近红外干涉滤光片,以去除大部分背景噪声。将带有金属扇叶的可调速光轴电机作为变速运动目标。运动目标与外差系统之间的相对运动导致光信号产生多普勒频移。随后,光纤环形器接收端接收到返回的光,返回光在光耦合器(50:50)上与本振光混合,产生中频信号。将混频光进行衰减,使 1550 nm 混频光强对应的光子数在单光子探测器的最大光子计数率内,避免单光子探测器产生饱和效应。通过单光子探测器和单光子计数器得到中频信号的光子响应时间流。

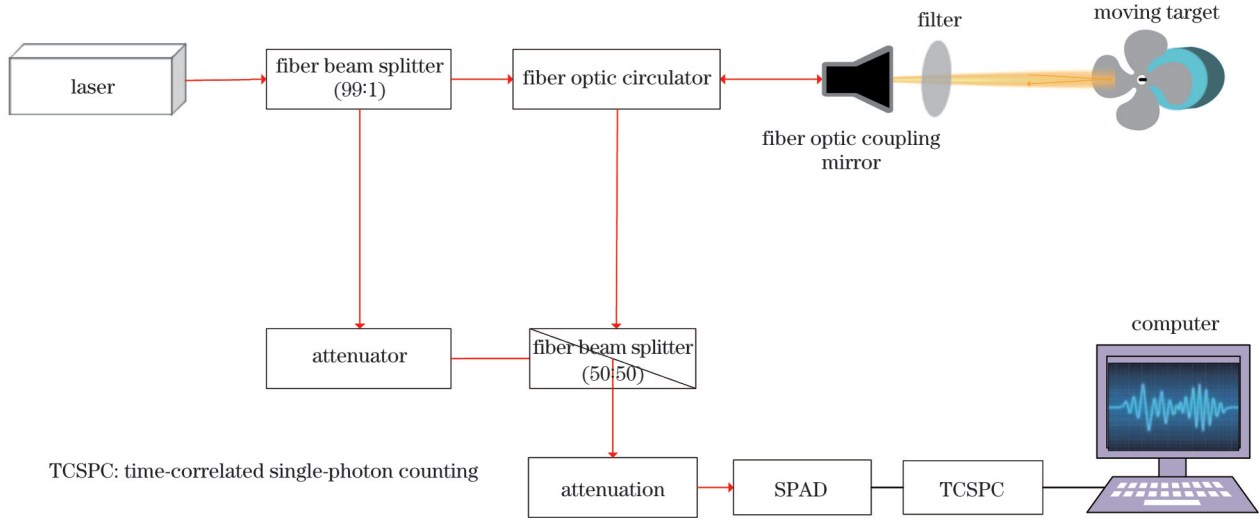


图 1 光子外差探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photon heterodyne detection system

2.2 单光子响应模型

2.2.1 泊松分布

由于光的粒子性,光子到达探测器的实际个数与理论个数之间存在一定偏差,导致单光子探测器响应光子数与理论光子数之间存在一定偏差,这就是所谓的泊松噪声,这是一种统计噪声。盖革模式下的雪崩二极管在某时刻产生雪崩的概率与 t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻到达单光子探测器的光子总数有关。其雪崩概率是到达光敏面的光子流密度 $\lambda(t)$ 的泊松响应在探测时间内的积分。因此,在 t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻产生 K 个雪崩事件的概率 $P(K)$ 可以表述为

$$P(K) = \int_t^{t+\Delta t} \frac{\exp[-\lambda(\xi)] \lambda(\xi)^K}{K!} d\xi, \quad (1)$$

式中: K 为雪崩事件的个数; $\lambda(t)$ 为光子流密度函数。

2.2.2 光子事件函数

光子到达序列是脉冲函数的和,每个脉冲函数 δ 对应一个光子事件,可以表示为

$$X = \sum_{i=1}^{N_E} \delta(n - n_i), \quad 1 \leq n_i \leq N_T, \quad (2)$$

式中: X 是光子到达序列; N_E 是探测时间内发生光子事件的数量; N_T 是探测时长光子序列长度; n 表示时间; n_i 表示第 i 个光子事件发生时刻。

2.3 光子回波外差信号模型

根据实验原理,激光分束后,本振光为 $E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L)$, 信号光为 $E_S(t) = A_S \cos(\omega_S t + \varphi_S)$, 其中 E_L 和 E_S 分别为本振光和信号光的光强, A_L 和 A_S 分别为本振光和信号光的振幅, ω_L 和 ω_S 分别为本振光和信号光的角频率, φ_L 和 φ_S 分别为本振光和信号光的相位。光外差探测通过将频率一致或相近的光波进行相干叠加,得到中频信号。传统探测器将此中频信号转化为交变电流信号,实现对中频频率的探测。中频光电流为 $i = \frac{e\eta}{h\nu} \overline{[E_S(t) + E_L(t)]^2}$, 变换后得

$$i \propto \frac{1}{2} E_L^2 + \frac{1}{2} E_S^2 + E_L E_S \cos(\omega_i t + \varphi), \quad (3)$$

式中: e 为电子电量; η 为光电探测器的探测效率; $h\nu$ 为单光子能量; ω_i 为中频频率; φ 为本振光场和信号光场的相位差。

然而,光子计数器是对单光子到达时间的记录,只能记录光子的有无。因此,将式(3)中的中频光电流转换为光子数的形式,即

$$N = N_S + N_{LO} + 2m \sqrt{N_S N_{LO}} \cos(\omega_i t + \varphi) + N_D + N_B, \quad (4)$$

式中: N 是总光子计数率; N_S 、 N_{LO} 、 N_D 、 N_B 分别为接收

信号光、本振光、暗噪声和背景噪声的等效光子计数率; m 是外差效率。

图 2 是在死时间为 50 ns、中频信号频率为 1 MHz 的仿真条件下得到的仿真光子到达序列。在死时间的限制下,该探测器的最大计数率为 2×10^7 。光子响应

时间序列与单光子探测器光敏面上到达的光子之间存在图 2 所示的对应关系。从图 2 中可以看到光子到达时间序列的疏密分布与探测光的强弱分布具有对应关系,可以通过光子到达的疏密规律得到中频信号的频谱分布。

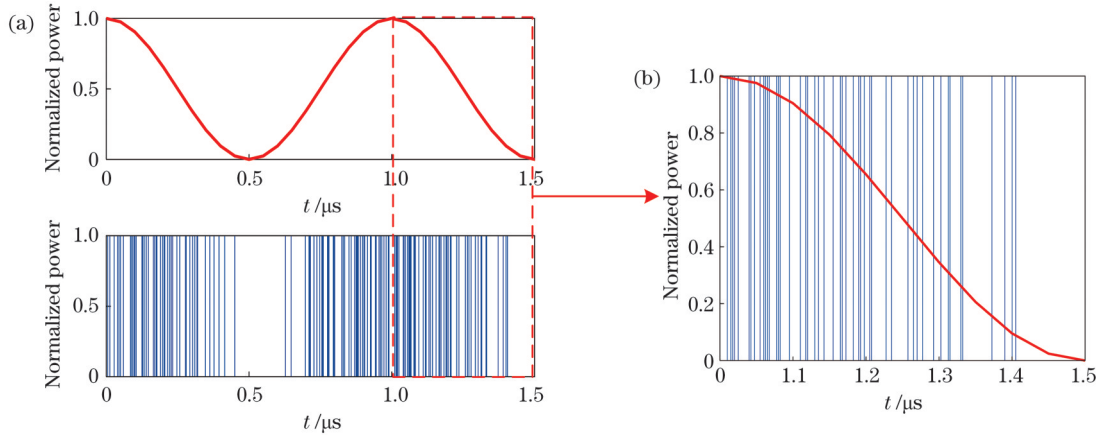


图 2 光子响应时间序列疏密分布与光强对应图。(a)光子响应时间序列和光强对应图;(b)局部对比图

Fig. 2 Density distribution of photon response time series corresponds to actual light intensity. (a) Photon response time series and light intensity map; (b) local contrast map

3 基于压缩感知与密度聚类结合的信号处理方法

本文的信号处理方法包含数据预处理、压缩感知重构中频频谱、密度聚类去除噪声三大步骤。对信号进行处理后得到变速目标的多普勒频谱,使信噪比显著提高。信号处理方法流程如图 3 所示。

本文采用基于短时傅里叶变换原理^[20]的压缩感知数据处理方法来获取信号的时频特性,即对信号加汉明窗,每个窗内的信号通过本文数据处理方法得到频率信息,然后移动汉明窗得到时间信息,进而得到信号的时频特性。

TCSPC 模块采集的数据是单光子探测器光子响应脉冲的一维时间流数据。数据处理的第一步是根据 TCSPC 的时间分辨率对原始数据进行处理,将其重构成等时间间隔下的光子到达时间 0-1 序列,得到与探测时间对应的 0-1 序列的二维数据。

信号压缩感知和重建过程如图 4 所示。一个原始信号是可压缩的或是在某种稀疏基下是可稀疏表示的,原始信号经过已知的观测系统后得到较少的测量值,然后由重建算法完成最后的信号重建。本文采用

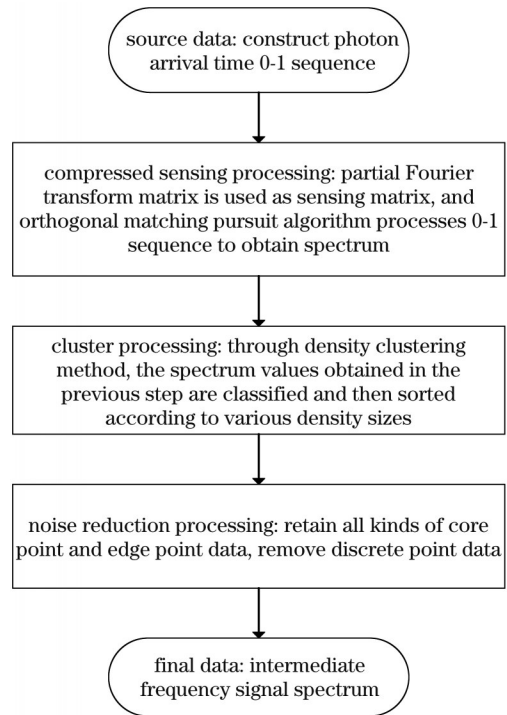


图 3 本文光子外差信号处理流程图

Fig. 3 Flow chart of photon heterodyne signal processing

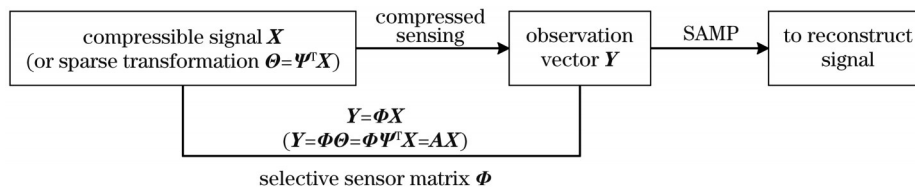


图 4 压缩感知框架

Fig. 4 Compressed sensing basic framework

的重建算法是稀疏度自适应匹配追踪算法(SAMP算法)^[21]。

匹配追踪算法(MP)^[22]是压缩感知领域的常用算法,该算法是一种经典的贪婪算法,能够简单高效地求取全局最优解。本课题组通过仿真测试发现,对于光子到达时间序列这种 0-1 信号,MP 算法相对于压缩感知领域的其他常用算法具有更大优势,其重构中频信号频谱的成功率较高。另外,因为变速运动目标多普勒特征频谱的频率分量集中且范围未知,不能提前定义稀疏度 K 值,所以本文采用 SAMP 算法对上述 0-1 序列进行压缩感知处理。

$$\min_{\alpha} \|\alpha\|_0, \quad \text{s. t. } \mathbf{y} = \Phi\alpha, \quad (5)$$

式中: α 为中频信号频率; Φ 为部分傅里叶矩阵; \mathbf{y} 是由光子到达时间序列得到的观测值。

通过上述压缩感知方法可以得到信噪比更高的重构中频频谱以及信号时频特性分布图,但由于稀疏度 K 的不确定性,重构的中频频谱中还含有一定的噪声。基于变速运动目标光子回波外差信号的中频频谱连续且分布集中紧密的特点,本文采用含噪声的基于密度的聚类算法(DBSCAN算法)^[23]对重构频谱进行去噪处理。

本文将该密度聚类算法进行优化和改进,使其能够对压缩感知重构频谱值进行聚类,并通过每一组数据的密度值排序将最大密度对应的频谱筛选出来,此频谱即为信号频谱。同时,对信号频谱数据添加标签,三种标签分别为核心点、边缘点和离散点。核心点和边缘点都是信号频谱的一部分,离散点可以确定为噪声。因此,可以通过聚类处理进行数字滤波,滤除噪声。至此,通过上述流程就得到了重构的信号中频频谱。

4 仿真与分析

本节将利用仿真方法对本文提出的信号处理算法进行仿真验证,仿真参数如表 1 所示,其中目标的运动状态为匀加速。

本文通过光子回波外差信号模型得到了变速目标的光子外差信号,然后利用快速傅里叶变换(FFT)得到了中频信号频谱,对中频信号频谱进行归一化处理,

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1550
Single-photon detector dead time /ns	50
Single-photon detector dark count /Hz	100
Target initial speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1
Target variable-speed range /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	[0,1]
Detection time /ms	1
SAMP step	5
DBSCAN counts	5
DBSCAN density threshold	0.015

结果如图 5 所示。

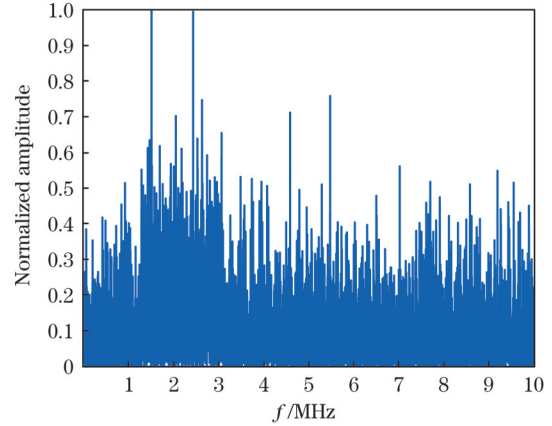


图 5 光子到达时间序列的 FFT 频谱

Fig. 5 FFT spectrum of photon arrival time series

从图 5 可以看出,采用光子外差探测体制探测连续变速目标时信噪比较低,2~3 MHz 范围的频谱较其他频段较高,但界限比较模糊,不能清晰地得到信号的频谱范围。由于背景噪声、泊松统计噪声和暗计数噪声同时存在,对时域信号进行快速傅里叶变换后很难直接从频谱中提取到连续信号的频谱。

本文的信号处理方法具体可分为 4 个过程,分别是压缩感知重构中频频谱、密度聚类、去噪和插值拟合,如图 6 所示。首先,利用 SAMP 算法通过光子到达时间序列进行压缩感知重构,得到重构中频信号的频谱,如图 6(a)所示。此时的频谱经过了压缩感知处理,频谱分量中幅度较低的值被默认为噪声,重构的中频频谱只保留了频谱幅度远高于噪声的离散信号。然而,此时重构的中频信号频谱并不是最终的信号频谱,仍保留了频谱幅度较高的噪声信号。与噪声相比,变速目标的理想频谱信号一定是连续变化的,因此信号的频谱不仅能聚为一簇,而且紧密度很大,通过密度聚类排序得到密度最大的一簇频率分量即为中频信号频率分量,如图 6(b)所示。对重构的中频信号频谱进行密度聚类处理,能够将重构的中频信号频谱按照聚散情况和密度进行分类和排序。另外,在对重构中频频谱进行聚类后也会得到离散点,可将其视为噪声分量加以去除,去噪后的结果如图 6(c)所示。但是,由于压缩感知算法已经将大部分噪声分量去除,又经过了聚类去噪等信号处理,所得中频信号频谱是离散的频谱,与理想变速运动目标的连续频谱不符。因此,对此时的中频信号频谱进行插值拟合,拟合后的结果如图 6(d)所示,此即为最终所得的中频信号频谱。

本文采用所得中频信号的信噪比提高幅度和所得频谱多普勒展宽精度误差来评价本文信号处理方法。信噪比提高幅度的计算公式为

$$\begin{cases} R = 10\lg \frac{P_s - P_n}{P_n} \\ \Delta R = R_{\text{new}} - R_{\text{FFT}} \end{cases}, \quad (6)$$

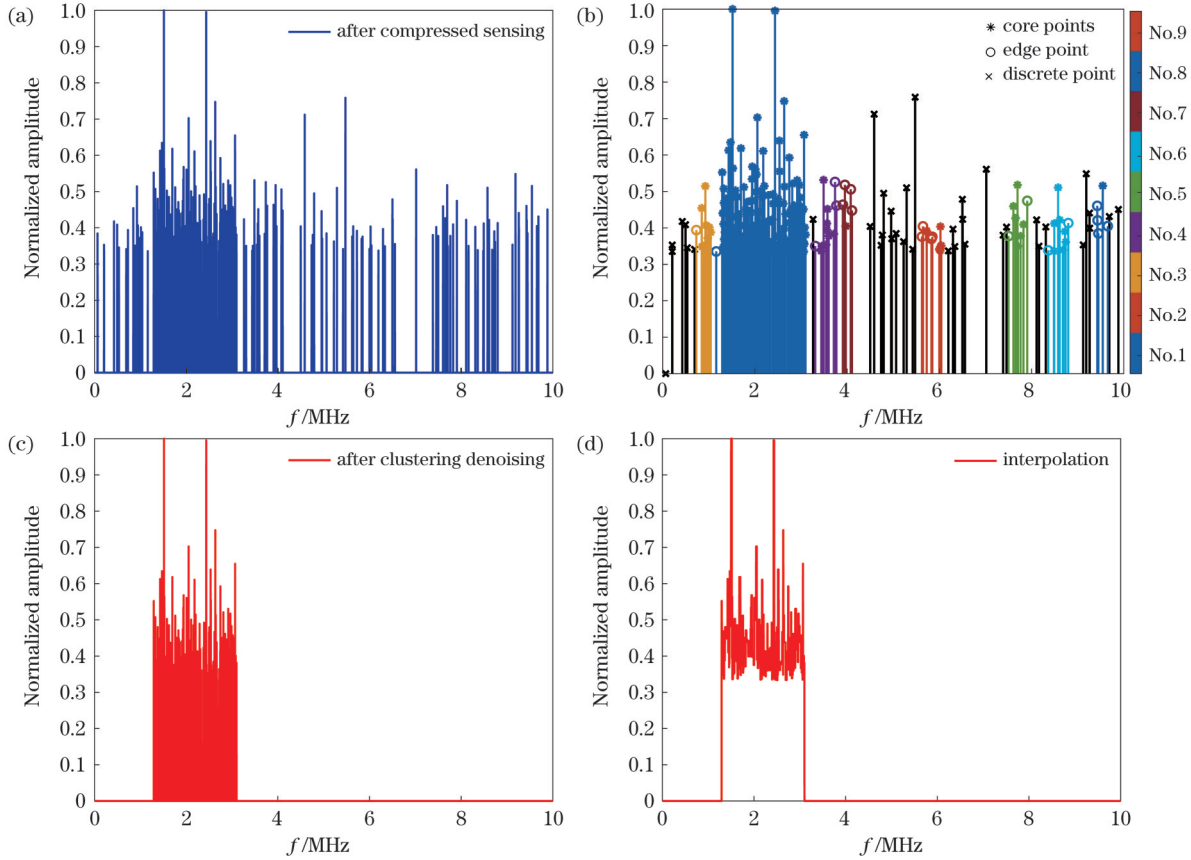


图 6 本文信号处理方法求取中频频谱的具体过程。(a)压缩感知处理;(b)密度聚类处理;(c)去噪处理;(d)插值拟合处理
Fig. 6 Specific process of obtaining intermediate frequency spectrum by our signal processing method. (a) Compressed sensing; (b) density clustering; (c) denoising; (d) interpolation and fitting

式中: P_s 是信号的平均功率; P_n 是噪声的平均功率; R_{new} 是本文方法所得功率谱的信噪比; R_{FFT} 是传统快速傅里叶变换所得功率谱的信噪比; ΔR 是中频信号的信噪比提高幅度。

频谱的多普勒展宽精度误差的计算公式为

$$\delta = \frac{|\Delta f_i - \Delta f_r|}{\Delta f_r} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: δ 是多普勒展宽精度误差; Δf_i 是本文方法所得探测目标的变速频率; Δf_r 是目标的理论变速频率。

接下来对本文信号处理方法与直接傅里叶变换所得频谱进行对比。将两种方法所得频谱进行归一化处理,结果如图 7 所示。可见,采用本文信号处理方法所得中频信号频谱的信噪比较直接快速傅里叶变换所得中频信号频谱的信噪比提高了 11.7 dB,多普勒展宽精度误差为 7.76%。可见,本文采用的将压缩感知和密度聚类相结合的信号处理方法能够大幅提高信噪比,且多普勒展宽精度误差在可接受范围内。本文所提方法提高信噪比的主要原因在于,压缩感知处理时大大抑制了噪声频率分量,密度聚类处理时又会去除余下的分散噪声分量。

接下来继续探讨不同变速范围内,信号多普勒展宽(Δf)对本文信号处理方法信噪比和精度的影响。对

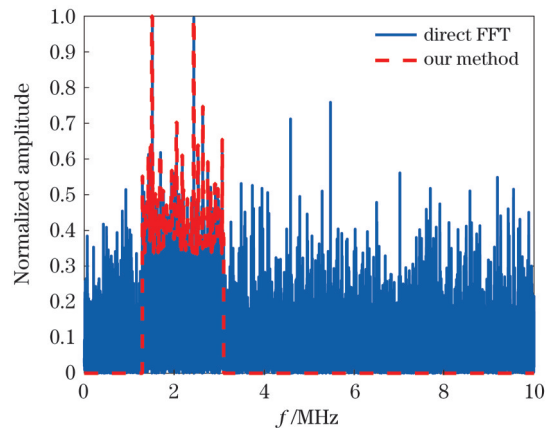


图 7 本文方法和直接快速傅里叶变换所得频谱的对比
Fig. 7 Comparison of spectra obtained with our method and direct FFT

多次仿真结果取平均值,可得图 8。由图 8 可知,本文方法所得频谱的信噪比较传统直接傅里叶变换求得的频谱信噪比的提高幅度在 20 dB 以内,精度误差平均值在 10% 以内。信噪比提高幅度整体上随多普勒展宽的增大而减小,而多普勒展宽精度误差随多普勒展宽增大振荡分布,无明显的分布特点。这是因为本文所提方法是基于稀疏度自适应的压缩感知信号处理方法,多普勒展宽越窄,稀疏度越小,越能精准重构中频

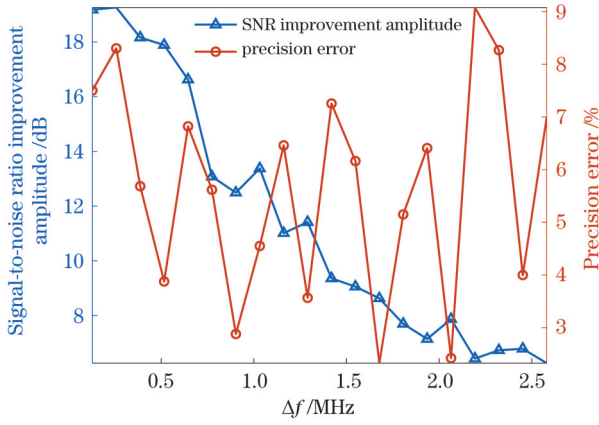


图 8 不同变速范围下本文信号处理方法的信噪比提高幅度和精度误差

Fig. 8 Signal-to-noise ratio (SNR) improvement amplitude and precision error of our signal processing method at different variable-speed ranges

频谱;同时,随着信号多普勒展宽增大,稀疏度逐渐增大,压缩感知重构中频信号的难度随之增大,此时会有一些噪声不能被完全去除,重构的中频频谱中含噪声分量,信噪比提高幅度减小。然而,即使是随着稀疏度增大,有未被完全去除的噪声分量,但密度聚类可将信号的多普勒展宽较为准确地限定在一定范围内(与理论展宽相比,多普勒展宽误差在 10% 以内,与展宽范围无关)。

采用常用的时频分析方法与本文方法得到了信号的时频特性,如图 9 所示。图 9(a)~(d)依次是采用短时傅里叶变换(STFT)、小波变换(WVT)^[24]、Wigner-Ville 分布(WVD)^[25]和本文方法得到的光子外差信号的时频图。

由图 9 可以看出,采用传统方法对光子到达序列进行时频分析可以得到其时频特性。总体而言,光子到达时间序列的时频特性符合匀加速运动特征,但当信噪比较低时,传统方法对时频特征描述能力较差。其中:短时傅里叶变换和小波变换得到的时频特征的可读性较高,但时频聚集性不及 Wigner-Ville 分布得到的时频聚集性高;Wigner-Ville 分布得到的时频特征聚集性较高,但对比度较小,可读性较差。除此之外,在图 9(a)和图 9(c)中还能看到存在较浅的其他频率分量,这些频率分量与主时频特征存在 2 倍或 1/2 倍的关系。这是因为单光子探测的时间序列是等间隔分布的 0-1 序列,与一般模拟信号相比,这类信号更容易存在倍频现象。

将压缩感知与短时傅里叶变换原理相结合得到本文的时频特性分析方法,该方法的汉明窗大小和每一段的重叠样本数均与图 9(a)一致,本文方法所得结果如图 9(d)所示。本文方法所得时频特性的可读性很高,时频分辨率也比其他三种时频方法高,背景区域无

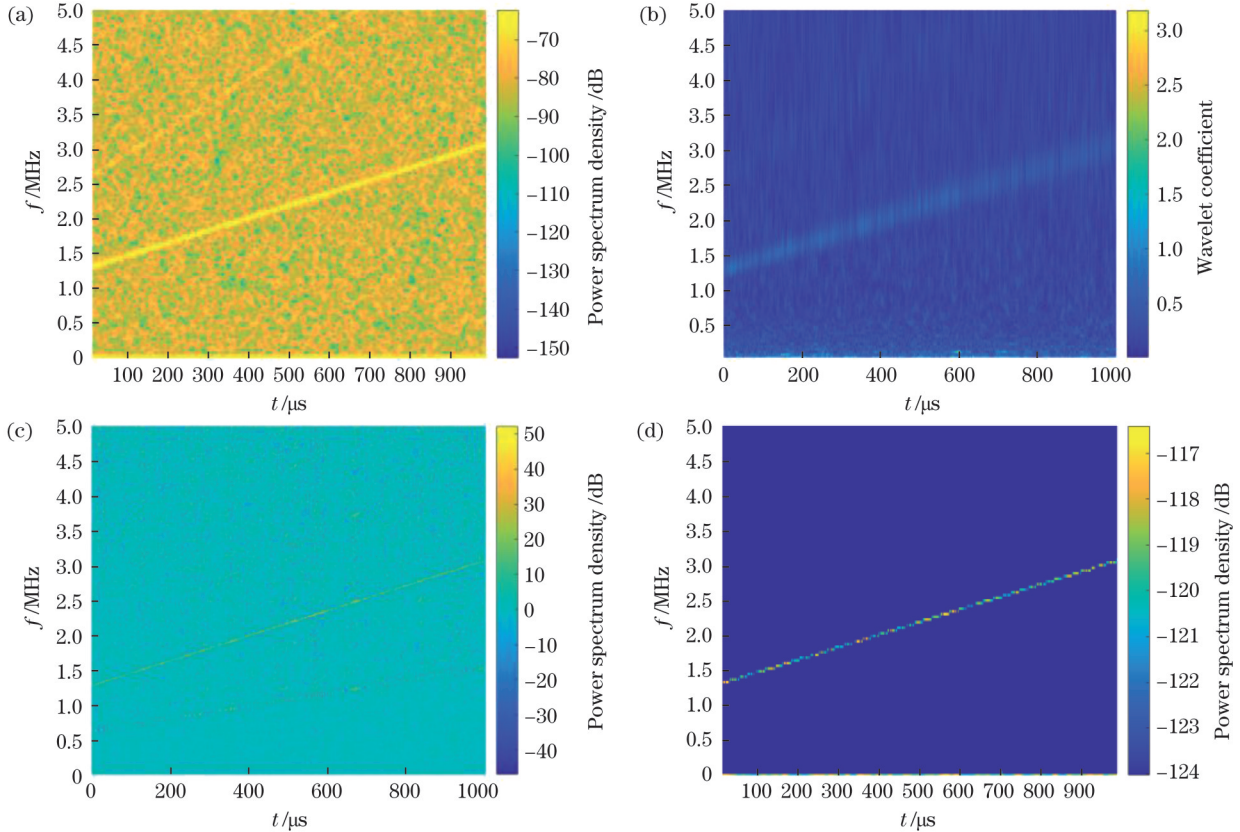


图 9 仿真的光子外差信号时频图。(a)短时傅里叶变换;(b)小波变换;(c)Wigner-Ville 分布;(d)本文方法

Fig. 9 Simulated time-frequency diagram of photon heterodyne signal. (a) Short-time Fourier transform; (b) wavelet transform; (c) Wigner-Ville distribution; (d) our method

杂乱无章的噪声分布,信号在背景中非常清晰;此外,除了实际时频信息外,也无其他频率分量。这是由于在每个汉明窗中,压缩感知处理已经将这部分信号进行了抑制,提高了信噪比,随着汉明窗移动,在时间轴上得到了完整清晰的时频特征分布。

时频分析方法的性能往往通过时频分辨率来评价。本文基于时频特征对比度和时频聚集性这两个指标对本文所提时频分析方法进行评价。

图像峰值信噪比^[26]度量的是图像感兴趣区域与背景噪声区域的信噪比。图像峰值信噪比越大,代表失真越小,本文将这一概念定义为本文的时频特征对比度。频域聚集度通过图像的信息熵^[27]进行度量,图像的信息熵描述了图像信源的平均信息量,反映了时频聚集性。

通常用平均值代表图像信号的强度,而将选定背景区域的标准差作为噪声的大小,因为标准差所代表

的物理意义是噪声相对该区域平均值的波动情况。为方便计算,缩小数据的绝对数值,将对对比度取对数,即

$$C = \lg[\max(I)/\sigma], \quad (8)$$

式中: I 表示图像; $\max(I)$ 表示求取图像的最大像素; σ 是选定的背景噪声区域的标准差。图中时频支撑域与背景的对比度越大,表示时频特征的可读性越好。

对于二维图像,其信息熵的计算公式为

$$E(x) = - \sum_{x \in X} p(x) \log_2 p(x), \quad (9)$$

式中: x 表示图像的灰度值,其取值范围为 0~256; $p(x)$ 为每一灰度级出现的概率。图像熵反映了图像包含的信息量的大小,因此 $E(x)$ 的值越小表示信号的时频聚集性越好。

为了更加直观地应用上述指标对各时频分析方法的性能进行评价,将图 9 中的各时频图进行处理,得到了 Otsu 二值图像,如图 10 所示。

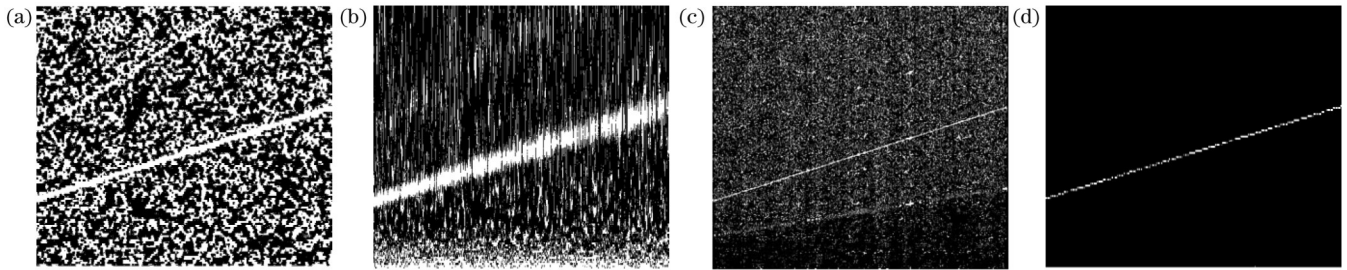


图 10 仿真光子外差信号时频图的 Otsu 二值图像。(a)短时傅里叶变换;(b)小波变换;(c)Wigner-Ville 分布;(d)本文方法
Fig. 10 Otsu binary images of simulated time frequency diagram of photon heterodyne signal. (a) Short-time Fourier transform; (b) wavelet transform; (c) Wigner-Ville distribution; (d) our method

不同时频特性分析方法的性能指标如表 2 所示。为了更直观地对比不同时频分析方法的性能,根据表 2 得到了不同时频特性分析方法的性能对比图,如图 11 所示。由图 11 可以看到,本文方法所得时频图的对比度远高于短时傅里叶变换、小波变换、Wigner-Ville 分布所得时频图的对比度,即本文方法所得时频图的可读性最好。本文方法所得时频图的信息熵最小,意味着该时频图的聚集性最好。从对比度和信息熵两个评价指标可以看出本文所提信号处理方法的性能最优。

表 2 不同时频特性分析方法的性能

Table 2 Performance of different time frequency characteristics analysis methods

Time-frequency characteristics analysis method	Contrast	Concentration class
STFT	1.46	0.67
WVT	1.40	0.80
WVD	1.33	0.97
Ours	8.35	0.06

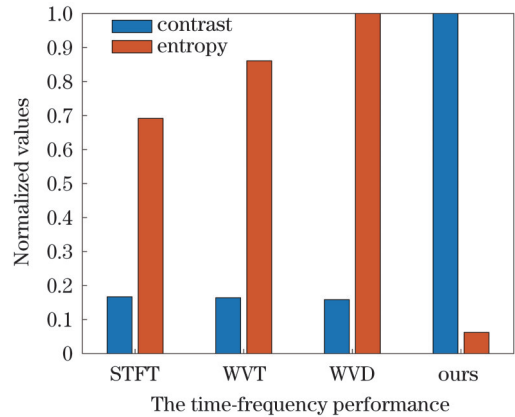


图 11 不同时频特性分析方法的性能对比

Fig. 11 Performance comparison of different time-frequency characteristics analysis methods

5 实验与验证

5.1 构建实验系统

本课题组搭建了全光纤实验系统,用以探测光子外差回波并验证本文所提信号处理方法。如图 12 所示,用光纤分束器(99:1)将发出的光分为信号光和本振光。在光路中,采用可调光纤衰减器来调节信号光

路和本振光路中光子的平均数量,使 SPAD 不饱和。接收端收集回光,回光通过光纤合束器(50:50)与本振光混合。用 SPAD 采集中频信号。SPAD 数据输出端连接一个 TCSPC 模块,以时间标记的方式记录光子事件的时间标记,记录到的光子计数包括信号计数、暗计数和背景噪声计数。实验中将带有金属扇叶的可调速光轴电机作为运动目标。鉴于实验所用单光子探测

器的死时间较长,探测带宽有限,实验中控制电机的转速在较低水平。输出光照点在扇叶上距中心轴约 3 cm 的位置,待系统输出稳定后开始采集数据。电机速度可调范围为 0~300 r/min,即 0~5 r/s,电机初速度设置为电机可调最大速度的 10%,末速度设置为电机可调最大速度的 30%,探测时间截取 0.1 s。实验中的主要参数如表 3 所示。

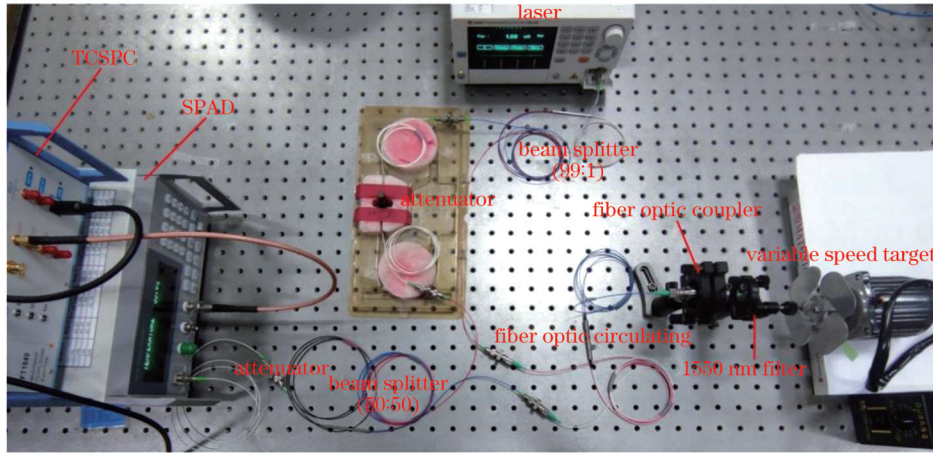


图 12 光子外差实验系统

Fig. 12 Photon heterodyne experimental system

表 3 实验中的主要参数

Table 3 Main parameters used in experiment

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1550
Single-photon detector dead time / μ s	0~99.9
Internal trigger frequency /MHz	1~100
Detection efficiency of single-photon detector	10%
Single-photon detector dark counts /Hz	100
TCSPC temporal resolution /ps	64

5.2 结果与分析

对实验数据进行处理可得到图 13。根据已知的实验参数,通过式(10)计算运动目标在理想情况下的多普勒频谱分布及展宽。

$$\begin{cases} f = \frac{2(v_0 + a \cdot t)}{1550 \times 10^{-9}}, \\ \Delta f_d = f_2 - f_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: f 是运动目标在理想情况下的多普勒频谱分布; v_0 为实验初速度; a 为实验加速度; t 为截取的探测时长; f_2 和 f_1 分别为频谱展宽中信号分量的下限和上限; Δf_d 多普勒频谱展宽。

根据式(6)所示信噪比计算公式求得本文方法所得频谱信噪比相对于直接快速傅里叶法的提高幅度为

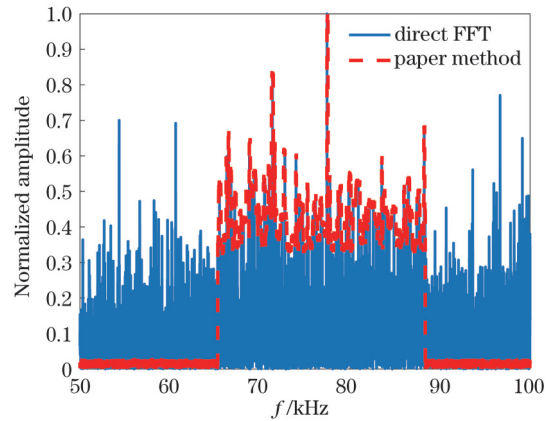


图 13 直接快速傅里叶变换与本文信号处理方法所得光子外差信号频谱

Fig. 13 Frequency spectrum of photon heterodyne signals obtained by direct fast Fourier transform (FFT) and our signal processing method

$$\Delta R = 10 \left\{ \lg \left[\frac{P_{\text{FFT}}(\Delta f_d) / \Delta f_d - P_{n-\text{FFT}}}{P_{n-\text{FFT}}} \right] - \lg \left[\frac{P_{\text{new}}(\Delta f_d) / \Delta f_d - P_{n-\text{new}}}{P_{n-\text{new}}} \right] \right\}, \quad (11)$$

式中: Δf_d 为实验探测带宽; P_{FFT} 和 $P_{n-\text{FFT}}$ 为傅里叶变换方法下的功率谱密度和噪声功率谱密度; P_{new} 和 $P_{n-\text{new}}$ 为本文方法下的功率谱密度和噪声功率谱密度。

根据式(7)所示多普勒展宽精度误差的计算方法求得本文方法所得频谱的多普勒展宽精度误差为

$$\sigma = \frac{[\max(f_{\text{new}}) - \min(f_{\text{new}})] - \Delta f_d}{\Delta f_d} \times 100\%, \quad (12)$$

式中: f_{new} 为本文方法所得频谱展宽分布。

由图 13 可以看出, 基于实验所得数据, 采用直接快速傅里叶变换求得的频谱的信噪比较低, 而经过本文所提数据处理方法求得的结果与仿真结果基本一致。本文所提信号处理方法存在一定的随机误差, 这

是因为稀疏度自适应压缩感知的稀疏度 K 在自适应过程中会有一定误差, 这种误差体现在重构的中频频谱上。因此, 本文截取探测时间相等的 20 段实验数据进行处理, 处理结果如图 14 所示。将处理结果进行线性拟合并求得 95% 置信度下本文所提信号处理方法的信噪比提高值的置信区间为 [8.5 dB, 11.1 dB], 多普勒展宽精度误差的置信区间为 [5.6%, 7.4%]。

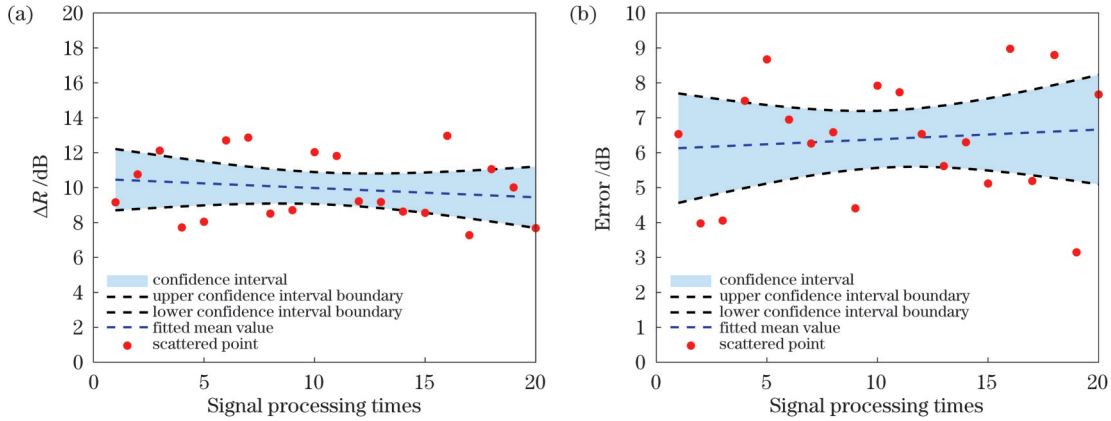


图 14 本文方法在 95% 置信度下的置信区间。(a) 信噪比提高值的置信度分析; (b) 多普勒展宽精度误差的置信度分析
Fig. 14 Confidence interval of proposed method at 95% confidence. (a) Confidence analysis of signal-to-noise ratio improvement; (b) confidence analysis of Doppler broadening accuracy error

分别利用短时傅里叶变换法、小波变换法、Wigner-Ville 分布法和本文方法将所得实验数据进行

处理, 所得时频特性图如图 15 所示。结果表明, 本文方法所得时频特性的可读性很高, 时频分辨率也比传

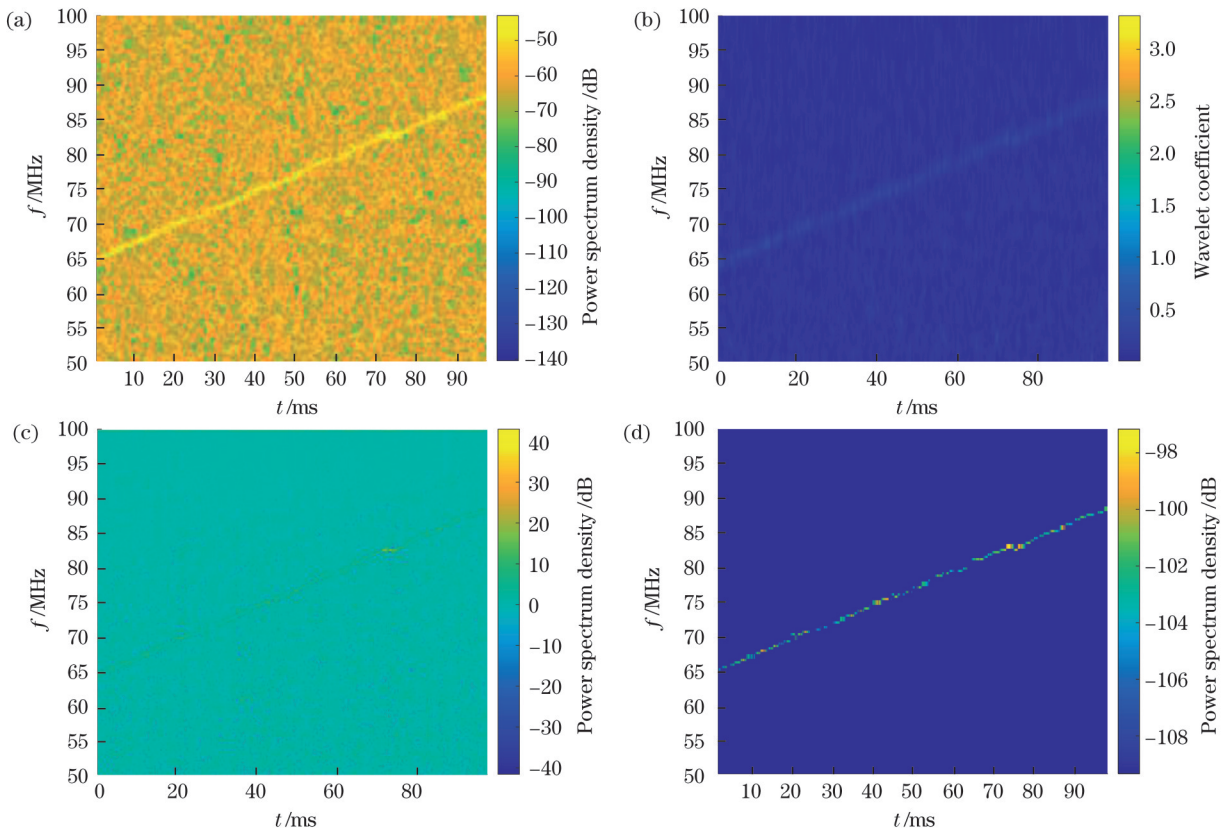


图 15 光子外差信号时频图。(a) 直接短时傅里叶变换; (b) 小波变换; (c) Wigner-Ville 分布; (d) 本文方法
Fig. 15 Time-frequency diagram of photon heterodyne signal. (a) Direct short-time Fourier transform; (b) wavelet transform; (c) Wigner-Ville distribution; (d) our method

统时频方法高,背景区域无杂乱无章的噪声分布,信号在背景中非常清晰,基本符合仿真结果。与传统方法相比,在相同的条件下,本文所提信号处理方法具有更大优势。

6 结 论

与传统的直接短时傅里叶变换相比,本文提出的光子外差信号处理方法创造性地将压缩感知与密度聚类结合起来,对变速目标的光子外差探测信号进行处理。经过验证,本文方法具有如下优点:首先,由于信号处理采用压缩采样机制,信号重构需要的数据样本更少,同时压缩采样重构中频频谱时还原大量信号频谱同时抑制噪声分量;其次,研究变速运动目标的频谱特点时,通过密度聚类的方法将变速运动信号频谱从压缩感知重构中频信号频谱中提取出来,进一步提高了信噪比,同时又能确保一定的探测精度。在仿真中发现,信号的多普勒展宽越小,该信号处理方法的优势就越明显,当信号多普勒展宽逐渐增大或频谱复杂时,重构效果和密度去噪效果均低于预期,因此,复杂运动目标运动信息的提取方法还需要进一步研究。最后通过实验对本文所提光子外差信号处理方法进行了验证,在 95% 置信度下,本文所提信号处理方法的信噪比提高值的置信区间为[8.5 dB, 11.1 dB],多普勒展宽精度误差的置信区间为[5.6%, 7.4%],时频分析特性也基本符合仿真结果。这表明本文方法能够有效提高信噪比,改善信号的时频特性分布,从而优化光子计数外差雷达对变速运动目标的测速性能。本文方法为下一步复杂运动目标运动信息或微动信息的提取提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Jiang L A, Luu J X. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1486-1503.
- [2] Luu J X, Jiang L A. Saturation effects in heterodyne detection with Geiger-mode InGaAs avalanche photodiode detector arrays[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3798-3804.
- [3] Koczyk P, Wiewiór P, Radzewicz C. Photon counting statistics: undergraduate experiment[J]. *American Journal of Physics*, 1996, 64(3): 240-245.
- [4] Yuan Z L, Kardynal B E, Sharpe A W, et al. High speed single photon detection in the near infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(4): 041114.
- [5] Razeghi M. *Technology of quantum devices*[M]. Boston: Springer, 2010.
- [6] Campbell J C. Recent advances in avalanche photodiodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 278-285.
- [7] Xu L L, Wu E, Gu X R, et al. High-speed InGaAs/InP-based single-photon detector with high efficiency[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(16): 161106.
- [8] Jian Y, Wu E, Wu G, et al. Optically self-balanced InGaAs-InP avalanche photodiode for infrared single-photon detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(3): 173-175.
- [9] 刘俊良, 许伊宁, 董亚魁, 等. 集成型快速主动淬灭 InGaAsP 近红外单光子探测器[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1212002.
- [10] Liu J L, Xu Y N, Dong Y K, et al. Integrated InGaAsP near-

- infrared single-photon detector with fast active quenching[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1212002.
- [10] 沈姗姗, 陈钱, 曹芳, 等. 高噪声高精度时间相关单光子测距系统性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0604001.
- [11] Shen S S, Chen Q, Cao F, et al. Research on performance of single photon counting ranging system with high background noise and high resolution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0604001.
- [12] 马建平, 尚建华, 孙嘉瞳, 等. 基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0810004.
- [13] Ma J P, Shang J H, Sun J T, et al. Laser ranging system based on high-speed pulse modulation and echo sampling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0810004.
- [14] Shcherbatenko M, Lobanov Y, Semenov A, et al. Potential of a superconducting photon counter for heterodyne detection at the telecommunication wavelength[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30474-30484.
- [15] Chen Z, Liu B, Li Z K. Wideband spectrum estimation for photon counting heterodyne[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(6): 313-316.
- [16] Liu K, Luo C G, Yi J, et al. Target detection method using heterodyne single-photon radar at terahertz frequencies[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 3505605.
- [17] 尹晓琴, 范书振, 李永富, 等. 和频、差频共存的大赫兹波上转换探测理论分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1214001.
- [18] Yin X Q, Fan S Z, Li Y F, et al. Theoretical analysis of terahertz-wave frequency up-conversion detection based on coexisting difference- and sum-frequency generation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1214001.
- [19] Chen Z, Liu B, Guo G M, et al. Photon counting heterodyne with a single photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(17): 931-934.
- [20] 董晓, 胡以华, 徐世龙, 等. 不同气溶胶环境中相干激光雷达回波特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0101001.
- [21] Dong X, Hu Y H, Xu S L, et al. Echoing characteristics of coherent lidar in different aerosol environments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0101001.
- [22] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [23] Rinaldo A, Wasserman L. Generalized density clustering[J]. *The Annals of Statistics*, 2010, 38(5): 2678-2722.
- [24] Griffin D, Lim J. Signal estimation from modified short-time Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1984, 32(2): 236-243.
- [25] Huang H L, Makur A. Backtracking-based matching pursuit method for sparse signal reconstruction[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(7): 391-394.
- [26] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [27] Kriegel H P, Kröger P, Sander J, et al. Density-based clustering[J]. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 2011, 1(3): 231-240.
- [28] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1990, 36(5): 961-1005.
- [29] 王忠仁, 林君, 李文伟. 基于 Wigner-Ville 分布的复杂时变信号的时频分析[J]. *电子学报*, 2005, 33(12): 2239-2241.
- [30] Wang Z R, Lin J, Li W W. Time-frequency analysis for complex time-varying signals based on Wigner-Ville distribution[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2239-2241.
- [31] Huynh-Thu Q, Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment[J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(13): 800-801.
- [32] Pal N R, Pal S K. Entropy: a new definition and its applications[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1991, 21(5): 1260-1270.

Signal Processing Method of Photon Echoes Heterodyne for Variable-Speed Target

Pu Mengyao^{1,2}, Hu Yihua^{1,2*}, Qu Fanghui³, Zhang Xinyuan^{1,2}, Dong Xiao^{1,2**}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

²Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

³No.95438 Unit of PLA, Meishan 620000, Sichuan, China

Abstract

Objectives The research purpose and focus of this paper is to propose a new signal processing method that processes a photon echo heterodyne signal and can achieve a higher signal-to-noise ratio (SNR) intermediate frequency (IF) signal spectrum and signal time-frequency characteristics with an improved performance to improve the photon counting heterodyne radar speed measurement performance of variable-speed moving targets.

Methods This study applies the adaptive sparse degree compression perception method to a variable-speed target heterodyne photon echo signal and solves the problem whereby the sparse degree of K can not be determined in advance. The reconstructed frequency spectrum has a relatively high SNR but error and some unfiltered noise are also found on the spectrum. Furthermore, according to the characteristics of concentrated and continuous Doppler spectrum components of the variable-speed target, density clustering is creatively applied to the denoising of the above-reconstructed spectrum, and the sparsity adaptive compression sensing and clustering algorithm are combined as a new heterodyne signal processing method of photon echoes. In this paper, the first part of the proposed signal processing method is to solve the frequency spectrum. This process is divided into four parts, namely compressed perception reconstruction of the IF spectrum, density clustering, denoising, and interpolation. First, the frequency spectrum is reconstructed by the sparsity adaptive matching pursuit (SAMP) algorithm according to the photon arrival time series, the IF signal spectrum is reconstructed, and compressed perception processing is performed. The lower amplitude of the spectrum component is assumed as noise, and only discrete signals whose amplitudes are significantly higher than noise are retained in the reconstructed IF spectrum. However, at this time, the reconstructed IF signal spectrum is not the final signal spectrum, and the noise signal with higher spectrum amplitude is still retained. Compared with the noise, the signal of the ideal spectrum of the variable-speed target must be continuously changing, so the reconstructed IF signal spectrum is processed by density clustering. The frequency component with the highest density can be obtained by classifying and sorting the spectrum of the reconstructed IF signal according to the density-based clustering, which can be determined as the frequency component of the IF signal. In addition, discrete points can also be obtained while clustering the reconstructed IF spectrum, which can be regarded as noise components and then denoised. However, because the compressed sensing algorithm has removed most of the noise components, and through signal processing such as clustering denoising, the obtained IF signal spectrum becomes a discrete spectrum, which is inconsistent with the continuous spectrum of the ideal variable-speed moving target. Therefore, the IF signal spectrum is interpolated and fitted to obtain the final IF signal spectrum. The second part of the proposed signal processing method is to obtain a time-frequency characteristic analysis method with improved performance. According to the principle of short-time Fourier transform to obtain the time-frequency characteristic of signals, we combine the sparsity adaptive compression sensing in this method with the time-frequency characteristic analysis method in this paper.

Results and Discussions The simulation results show that the proposed method has excellent advantages. Compared with the traditional direct Fourier transform spectrum, the SNR is improved by up to 20 dB on average, and the average accuracy error is within 10% (Fig. 7). It is found that the smaller the signal Doppler broadening, the more obvious the advantage of this signal processing method. When the signal Doppler broadening is gradually increased or the spectrum is complex, the reconstruction effect and density denoising effect will be lower than expected value (Fig. 8). Meanwhile, the contrast of time-frequency maps obtained by the proposed signal processing method is much higher than that of the short-time Fourier transform, wavelet transform and Wigner-Ville distribution, which indicates that the readability of the time-frequency maps obtained using the proposed method is the best (Fig. 9). From the two evaluation indexes of contrast and information entropy, the performance of the proposed time-frequency characteristic analysis method is seen to be the best (Fig. 11). Finally, experiments are performed to verify that the confidence interval of the SNR improvement value of the signal processing method in this paper is [8.5 dB, 11.1 dB] with a confidence interval of 95%. Further, the confidence interval of the Doppler broadening accuracy error is [5.6%, 7.4%] (Fig. 14), and the time-frequency analysis characteristics are consistent with the simulation results that were obtained (Fig. 15).

Conclusion The results show that the proposed method is effective at improving the SNR and time-frequency distribution of signals to optimize the speed measurement performance of the photon counting heterodyne radar against variable-speed moving targets. This method proves the feasibility of extracting the motion information or fretting information of the next complex moving target. Therefore, further research is needed to understand the extraction method of motion information for complex moving targets.

Key words spectroscopy; photon heterodyne; compressive sensing; clustering denoising; Doppler velocimetry, time frequency analysis