

激光与光电子学进展

利用偏振分光技术的空间分离式四光相干运动目标探测

任建迎^{1,2*}, 孙华燕¹, 张来线¹, 赵延仲¹

¹航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416;

²航天工程大学研究生院, 北京 101416

摘要 针对大动态范围下运动目标速度测量受限的问题, 提出四光相干混频探测方法, 通过提取多普勒频率以及移频量与多普勒差频可以实现更大动态范围的速度测量。在四光相干混频探测过程中, 存在输出信号多和信号判别难度大的问题。为了解决以上问题, 提出并设计空间偏振分光结构的四光相干混频探测结构, 使用偏振分光技术实现四路输出信号的完全空间分离, 可以避免信号之间的相互影响, 降低信号处理的难度。从理论上对结构进行原理分析, 并使用光学仿真软件对其进行仿真分析, 验证理论和结构的可行性, 同时可根据不同探测器输出信号判断目标的运动方向。

关键词 相干光学; 四光相干; 偏振分光; 运动目标; 大动态范围; 多普勒频移

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0303001

Space Separated Four-Light Coherent Moving Target Detection Using Polarization Spectroscopy Technology

Ren Jianying^{1,2*}, Sun Huayan¹, Zhang Laixian¹, Zhao Yanzhong¹

¹Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

²Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract Aiming at the problem of limited speed measurement of moving targets in a large dynamic range, a four-light coherent mixing detection method is proposed. By extracting the Doppler frequency and the difference frequency between frequency shift and Doppler frequency, the speed measurement with a larger dynamic range can be achieved. In the process of four-optical coherent mixing detection, there are many output signals and the problem of difficult signal discrimination. In order to solve the above problems, a four-light coherent mixing detection structure with spatial polarization splitting structure is proposed and designed. Polarization splitting technology is used to achieve complete spatial separation of four output signals, avoiding mutual influence between signals and reducing the difficulty of signal processing. In theory, the structure is analyzed in principle, and the optical simulation software is used to simulate and analyze it to verify the feasibility of the theory and structure. At the same time, the direction of the target movement can be judged according to the output signals of different detectors.

Key words coherence optics; four-light coherence; polarizing beam splitting; moving target; large dynamic range; Doppler shift

OCIS codes 030.1640; 260.5430; 040.1880

收稿日期: 2020-05-24; 修回日期: 2020-06-27; 录用日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805283)、试验技术研究青年科技基金(2016SY41B008)

*E-mail: rjyfly@126.com

1 引言

激光相干探测技术具有信噪比高、灵敏度高和探测精度高等优点,在目标探测和多普勒测量领域应用广泛^[1-5]。随着科学技术的发展,目标的运动速度更快且动态范围更广,这对探测系统特别是对探测器的响应范围要求更高^[6-8]。虽然探测器的响应速率和带宽不断增大,而且常规的激光相干探测技术可以实现高速运动目标的探测,但这会产生更快的数据传输速率,为后端实时数据的处理带来难度。为了满足高速大动态范围的运动目标探测需求,需要探索更有效的运动目标探测方法,其中双频激光相干探测技术为高速目标的探测提供了可借鉴的方法^[9-11]。

针对高速大动态范围的运动目标探测问题,本文提出一种基于四光相干混频的运动目标相干探测方法^[12-13]。四光相干混频后会产生不同的信号分量,包括零差相干信号和外差相干信号,其中存在一个外差相干信号分量的频率是移频量与多普勒频率差频的形式。因此,通过提取多普勒频率以及移频量与多普勒频率差频频率的形式,实现更大动态范围的运动目标探测。实际应用中,4束激光同时实现两两相干的难度较大,且多个信号分量之间存在相互干扰,信号判别难度大。偏振态是激光的重要特性之一,在偏振探测、偏振成像和通信领域应用广泛^[14-18],因此可利用激光的不同偏振态来实现多路信号的空间分离。首先对四光相干混频探测方法的基本原理进行分析,然后根据偏振理论对所提方法进行分析并设计实现方案,最后通过仿真分析验证所提方法的可行性和合理性。

2 四光相干混频探测的基本原理

假设不同频率的两束本振光的时域信号光场为

$$E_o(\mathbf{r}, t) = E_{o1}(\mathbf{r}, t) + E_{o2}(\mathbf{r}, t) = \\ U_{o1}(\mathbf{r}) \exp\{i[2\pi f_{o1}t + \varphi_{o1}(\mathbf{r})]\} + \\ U_{o2}(\mathbf{r}) \exp\{i[2\pi f_{o2}t + \varphi_{o2}(\mathbf{r})]\}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 为光场的空间坐标矢量; t 为时间; $E_{o1}(\mathbf{r}, t)$ 和 $E_{o2}(\mathbf{r}, t)$ 分别为不同频率的本振光场; $U_{o1}(\mathbf{r})$ 和 $U_{o2}(\mathbf{r})$ 分别为两束本振光的振幅; f_{o1} 和 f_{o2} 为两束本振光的频率,两束本振光的频差 $\Delta f = f_{o2} - f_{o1}$; $\varphi_{o1}(\mathbf{r})$ 和 $\varphi_{o2}(\mathbf{r})$ 分别为两束本振光的随机相位。

运动目标的回波信号光的时域光场为

$$E_s(\mathbf{r}, t) = E_{s1}(\mathbf{r}, t) + E_{s2}(\mathbf{r}, t) = \\ U_{s1}(\mathbf{r}) \exp\{i[2\pi(f_{o1} + \delta_{o1})t + 2\pi f_{o1}\tau_d + \varphi_{s1}(\mathbf{r})]\} + \\ U_{s2}(\mathbf{r}) \exp\{i[2\pi(f_{o2} + \delta_{o2})t + 2\pi f_{o2}\tau_d + \varphi_{s2}(\mathbf{r})]\}, \quad (2)$$

式中: $E_{s1}(\mathbf{r}, t)$ 和 $E_{s2}(\mathbf{r}, t)$ 分别为在 f_{o1} 和 f_{o2} 频率下的探测光所对应的回波信号光场; $U_{s1}(\mathbf{r})$ 和 $U_{s2}(\mathbf{r})$ 分别为两束回波信号光的振幅; δ_{o1} 和 δ_{o2} 分别为两束回波信号光的多普勒频移, $\delta_{o1} = 2Vf_{o1}/c$, $\delta_{o2} = 2Vf_{o2}/c$,其中 V 为目标径向运动的速度, c 为光速; $\tau_d = 2R/c$ 为延迟时间,其中 R 为系统到目标的距离; $\varphi_{s1}(\mathbf{r})$ 和 $\varphi_{s2}(\mathbf{r})$ 分别为两束回波信号光的随机相位。

四光相干混频系统的结构如图 1 所示,其中 PD 为光电探测器。根据相干混频的原理,四光相干混频后可以产生 6 项相干分量信号^[12],表达式为

$$I_c(t) = i_o(t) + i_s(t) + i_{os1}(t) + i_{os2}(t) + i_{os3}(t) + \\ i_{os4}(t) = I_o \exp\{i[2\pi\Delta ft + \Delta\varphi_o(\mathbf{r})]\} + \\ I_s \exp\{i[2\pi\Delta ft + 2\pi\Delta\delta t - 2\pi\Delta f\tau_d + \Delta\varphi_s(\mathbf{r})]\} + \\ I_{os1} \exp\{i[2\pi\delta_{o1}t + 2\pi f_{o1}\tau_d + \phi_1(\mathbf{r})]\} + \\ I_{os2} \exp\{i[2\pi\delta_{o2}t + 2\pi f_{o2}\tau_d + \phi_2(\mathbf{r})]\} + \\ I_{os3} \exp\{i[2\pi(\Delta f + \delta_{o2})t + 2\pi f_{o2}\tau_d + \phi_3(\mathbf{r})]\} + \\ I_{os4} \exp\{i[2\pi(\Delta f - \delta_{o1})t - 2\pi f_{o1}\tau_d + \phi_4(\mathbf{r})]\}, \quad (3)$$

式中: $i_o(t)$ 为两束本振光混频后得到的相干信号分量; I_o 为信号 $i_o(t)$ 的振幅; $\Delta\varphi_o(\mathbf{r})$ 为信号 $i_o(t)$ 的相位; $i_s(t)$ 为两束信号光混频后得到的相干信号分量; I_s 为信号 $i_s(t)$ 的振幅; $\Delta\varphi_s(\mathbf{r})$ 为信号 $i_s(t)$ 的相位; $i_{os1}(t)$ 和 $i_{os2}(t)$ 分别为 $E_{o1}(\mathbf{r}, t)$ 与 $E_{s1}(\mathbf{r}, t)$ 和 $E_{o2}(\mathbf{r}, t)$ 与 $E_{s2}(\mathbf{r}, t)$ 混频后得到的零差相干信号分量; I_{os1} 为信号 $i_{os1}(t)$ 的振幅; $\phi_1(\mathbf{r})$ 为信号 $i_{os1}(t)$ 的相位; I_{os2} 为信号 $i_{os2}(t)$ 的振幅; $\phi_2(\mathbf{r})$ 为信号 $i_{os2}(t)$ 的相位; $i_{os3}(t)$ 和 $i_{os4}(t)$ 分别为 $E_{o1}(\mathbf{r}, t)$ 与 $E_{s2}(\mathbf{r}, t)$ 和 $E_{o2}(\mathbf{r}, t)$ 与 $E_{s1}(\mathbf{r}, t)$ 混频后得到的外差相干信号分量; I_{os3} 为信号 $i_{os3}(t)$ 的振幅; $\phi_3(\mathbf{r})$ 为信号 $i_{os3}(t)$ 的相位; I_{os4} 为信号 $i_{os4}(t)$ 的振幅; $\phi_4(\mathbf{r})$ 为信号 $i_{os4}(t)$ 的相位。因 $i_s(t) \ll i_{osn}(t)$ ($n = 1, 2, 3, 4$),所以可以忽略 $i_s(t)$ 对相干分量信号的影响。从(3)式可以看到, $i_{os3}(t)$ 和 $i_{os4}(t)$ 的频谱分别为 $\Delta f + \delta_{o2}$ 和 $\Delta f - \delta_{o1}$,即总有一项是 Δf 与 δ_{o1} 或 δ_{o2} 的差,这是四光相干混频探测系统所具有的独有特性。

根据光电探测器的特性,即探测器有固定的截

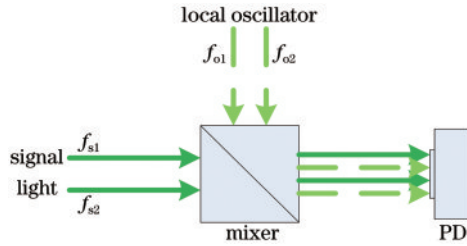


图 1 四光相干混频系统的结构框图

Fig. 1 Structure diagram of four-light coherent mixing system

止响应频率 f_c , 当只有相干光场的频率小于 f_c 时, 探测器才能响应。根据上述分析可知, 系统的多普勒测量范围与 f_c 和 Δf 直接相关, 为了实现更大范围的相干探测, f_c 和 Δf 需要满足 $f_c < \Delta f \leq 2f_c$ 。

当 $\Delta f = 5 \text{ GHz}$, $f_c = 2.5 \text{ GHz}$ 和激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 时, 四光相干混频分量信号的频率与目标的径向运动速度的关系如图 2 所示。从图 2 可以看到, 探测器可响应的零差相干分量信号 $i_{os1}(t)$ 或 $i_{os2}(t)$ 的速度测量范围为 $0 \sim 660 \text{ m/s}$, 探测器可响应的相差相干分量 $i_{os3}(t)$ 或 $i_{os4}(t)$ 中的差频信号的速度范围 $660 \sim 1320 \text{ m/s}$, 当 Δf 是 f_c 的 2 倍时, 四光相干混频分量信号的速度测量范围最大。

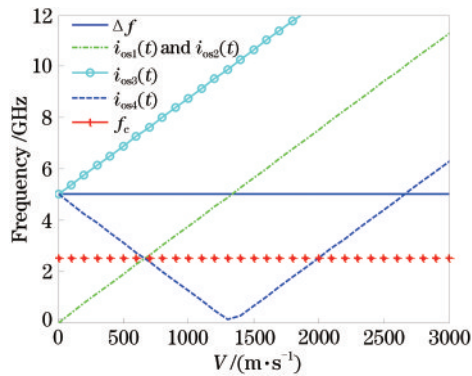


图 2 四光相干混频信号的频率与速度的关系

Fig. 2 Relationship between frequency and speed of four-light coherent mixing signal

3 偏振分光的空间分离式四光相干探测

3.1 偏振分光空间分离式四光相干结构的设计

由(3)式可知, $i_{os1}(t)$ 、 $i_{os2}(t)$ 、 $i_{os3}(t)$ 和 $i_{os4}(t)$ 是实现大动态范围测量的关键参数。若 4 束不同频率的激光实现两两相干, 则对配准精度的要求高而且实现难度大。从图 2 可以看到, 一个频率点对应两个或两个以上的速度值, 则判别输出信号是零差相干

信号还是外差相干信号的难度大。针对以上问题, 提出利用偏振分光技术实现空间分离的四光相干混频方法, 采用该方法可以得到空间上相互独立的 4 束混频信号光。

激光器发射的激光通过偏振分光元件后分为偏振态相互垂直的线偏振光, 其中一路通过移频器后产生移频, 两路线偏振光再次经过偏振分光元件后变为 4 路本振光, 使用偏振控制技术将其中的两路偏振态相互垂直的线偏振光变为圆偏振光, 目的是与偏振分光后的的回波信号光进行相干混频。偏振态相互垂直的两束回波信号光通过偏振分光元件后可以实现不同频率的信号光的空间分离, 分光后变为空间分离的 4 束回波信号光。其中两束偏振态相互垂直的信号光分别与其偏振方向平行的本振光发生相干混频, 得到两束空间分离的零差相干信号; 另外两束信号光分别与偏振方向垂直的本振光发生相干混频(线偏振本振光已变为圆偏振光), 得到两束空间分离的外差相干信号。

空间分离式四光相干混频探测结构如图 3 所示。其中 Q 1 的作用是将激光器发射的线偏振光变为圆偏振光, PBS 1 的作用是将圆偏振光分为偏振方向相互垂直的 p 光和 s 光, 线偏振片 P 1 的作用是隔离移频器产生其他方向的偏振光, Q 2 和 Q 3 的作用是将线偏振的本振光变为圆偏振光, 窄带滤光片 P 2 和 P 3 的作用是滤除信号光中的杂散光, 线偏振片 P 4 和 P 5 的作用是将频率信号光分为 s 光和 p 光。

根据激光的偏振理论, 琼斯矩阵是表示激光偏振特性的一种常用数学形式^[15]。忽略目标对信号光偏振方向的影响, 则偏振分光后空间分离的 4 束相干信号可表示为

$$E_1(t) = I_s I_{rs} \exp[i(2\pi\delta_1 t + \varphi_{m1})] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$E_2(t) = I_p I_{rp} \exp[i(2\pi\delta_2 t + \varphi_{m2})] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$E_3(t) = \frac{I_p I_{rs}}{\sqrt{2}} \exp\{i[2\pi(\Delta f + \delta_2)t + \varphi_{m3}]\} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$E_4(t) = \frac{I_p I_{rs}}{\sqrt{2}} \exp\{i[2\pi(\Delta f - \delta_1)t + \varphi_{m4}]\} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: I_s 和 I_{rs} 分别为 s 光的本振光和回波光的振幅; I_p 和 I_{rp} 分别为 p 光的本振光和回波光的振幅; φ_{m_n} ($n=1, 2, 3, 4$) 为各信号的随机相位; $E_1(t)$ 为 s 光的本振光与 s 光的回波光混频后得到的零差相干分量; $E_2(t)$ 为 p 光的本振光与 p 光的回波光混频后得到的零差相干分量; $E_3(t)$ 为 s 光的本振光与

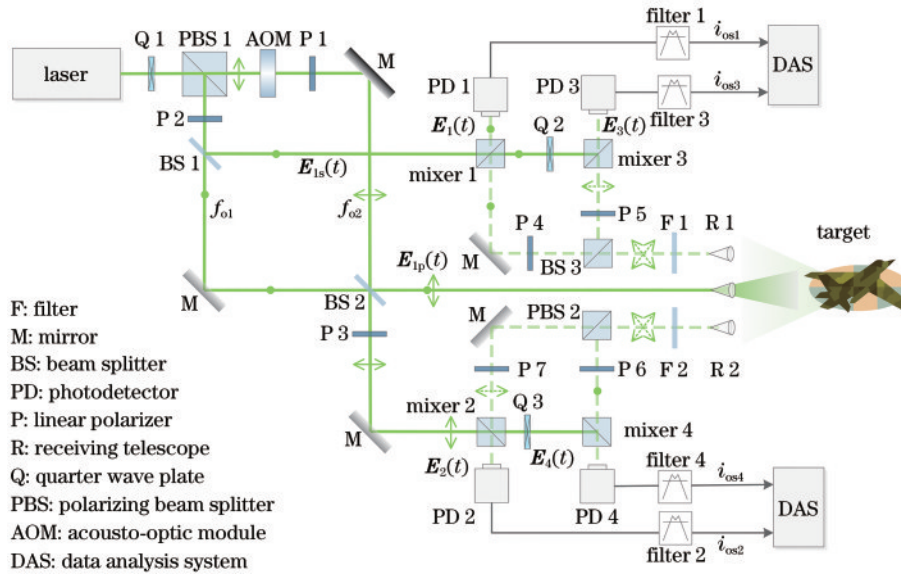


图 3 空间分离式四光相干混频探测的结构

Fig. 3 Structure of space separation type four-light coherent mixing detection

p 光的回波光混频后得到的外差相干分量; $E_4(t)$ 为 p 光的本振光与 s 光的回波光混频后得到的外差相干分量; $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 分别为 s 光和 p 光的归一化琼斯矩阵。

3.2 仿真分析

为了验证偏振分光技术的有效性,使用 OptiSystem 光学软件来构建偏振分光的空间分离式四光相干仿真链路。激光器的发射功率为 100 mW,线宽为 10 MHz,波长为 532 nm,线偏振光

的方向角为 45° 。使用两个变频器件来模拟两束探测光产生的多普勒频移,四光相干混频后,探测器 1 和探测器 2 分别输出 $i_{os1}(t)$ 和 $i_{os2}(t)$,探测器 3 和探测器 4 分别输出 $i_{os3}(t)$ 和 $i_{os4}(t)$ 。

当目标朝着探测系统运动时,多普勒频移为正,当目标远离探测系统时,多普勒频移为负。当 $\Delta f = 5 \text{ GHz}$ 和 $f_c = 2.5 \text{ GHz}$ 时,对运动速度分别为 100, 1000, -1000 m/s 的目标进行仿真分析。不同的运动速度下,零差相干信号频率和外差相干信号频率如表 1 所示。

表 1 不同运动速度的信号频率

Table 1 Signal frequency of different movement speed

| Speed/(m·s ⁻¹) | Homodyne Doppler frequency/GHz | | Heterodyne Doppler frequency/GHz | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
| | $i_{os1}(t)$ | $i_{os2}(t)$ | $i_{os3}(t)$ | $i_{os4}(t)$ |
| 100 | 0.37593985 | 0.37594318 | 5.37593985 | 4.62406015 |
| 1000 | 3.75939580 | 3.75943180 | 8.75943180 | 1.24060420 |
| -1000 | -3.75939580 | -3.75943180 | 1.24056820 | 8.75939580 |

当运动速度为 100 m/s 时,探测器输出的信号频谱如图 4 所示。从图 4(a)和图 4(b)可以看到,零差相干信号频率在探测器的截止响应频率以内,所以探测器 1 和探测器 2 有频谱信号输出。从图 4(c)和图 4(d)可以看到,外差相干信号的频率大于探测器的截止响应频率,所以探测器 3 和探测器 4 无信号频谱输出。

当运动速度为 1000 m/s 时,探测器输出的信号频谱如图 5 所示。从图 5(a)和图 5(b)可以看到,零差相干信号的频率大于探测器的截止响应频率,所

以探测器 1 和探测器 2 无频谱信号输出。从图 5(c)可以看到,外差相干信号中的和频信号 $i_{os3}(t)$ 频率大于探测器的截止响应频率,所以探测器 3 无信号频谱输出。从图 5(d)可以看到,外差相干信号中的差频信号 $i_{os4}(t)$ 频率小于探测器的截止响应频率,因此探测器 4 有信号频谱输出。

当运动速度为 -1000 m/s 时,即目标远离探测系统,则探测器输出的信号频谱如图 6 所示。从图 6(a)和图 6(b)可以看到,零差相干信号的频率大于探测器的截止响应频率,所以探测器 1 和探测器 2

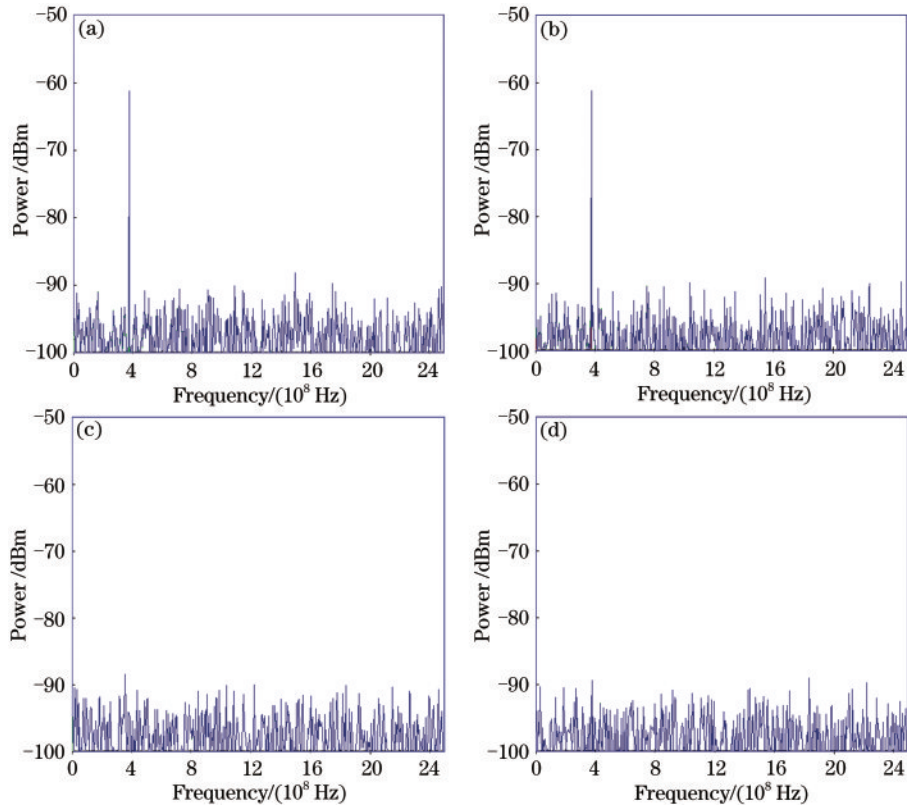


图 4 不同探测器在 100 m/s 的速度下输出的信号频谱。(a)探测器 1;(b)探测器 2;(c)探测器 3;(d)探测器 4

Fig. 4 Signal spectrum output by different detectors at speed of 100 m/s. (a) Detector 1; (b) detector 2; (c) detector 3; (d) detector 4

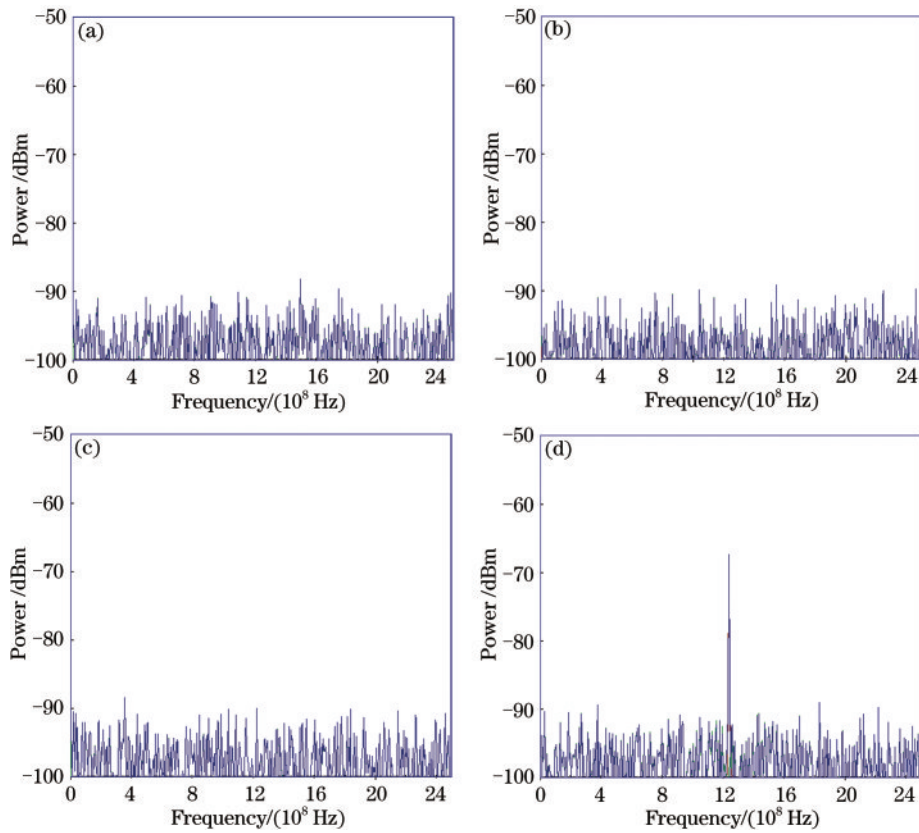


图 5 不同探测器在 1000 m/s 的速度下输出的信号频谱。(a)探测器 1;(b)探测器 2;(c)探测器 3;(d)探测器 4

Fig. 5 Signal spectrum output by different detectors at speed of 1000 m/s. (a) Detector 1; (b) detector 2; (c) detector 3; (d) detector 4

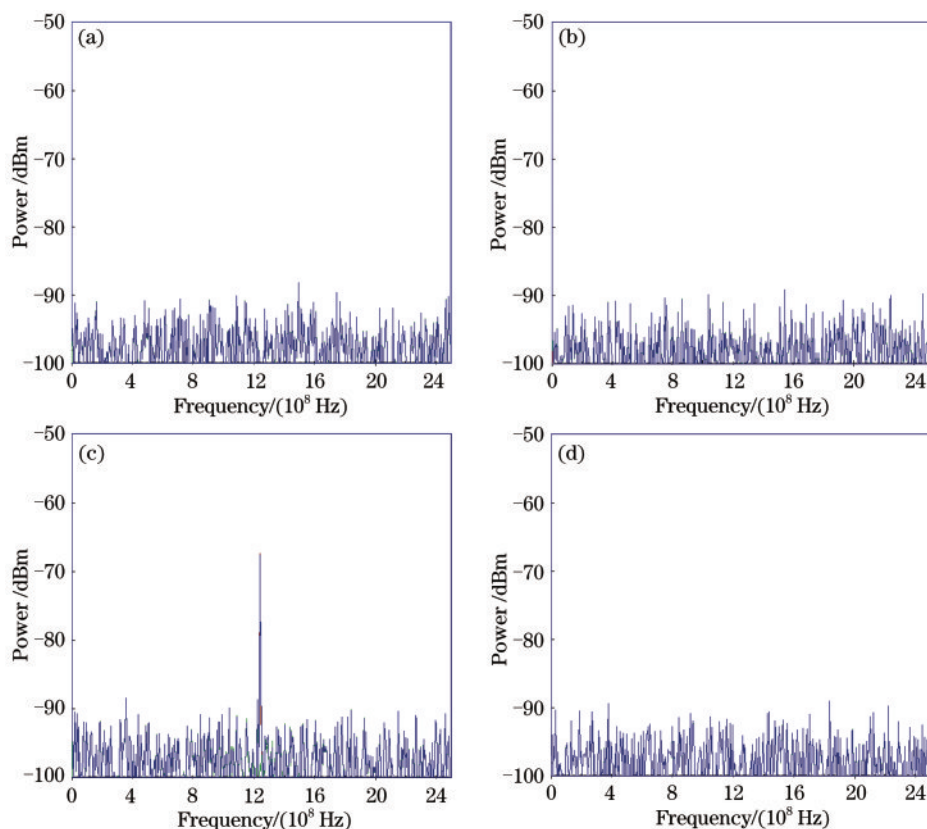


图 6 不同探测器在 -1000 m/s 的速度下输出的信号频谱。(a)探测器 1;(b)探测器 2;(c)探测器 3;(d)探测器 4

Fig. 6 Signal spectrum output by different detectors at speed of -1000 m/s. (a) Detector 1; (b) detector 2; (c) detector 3; (d) detector 4

无频谱信号输出。从图 6(c)可以看到,外差相干信号中的和频信号 $i_{os3}(t)$ 频率小于探测器的截止响应频率,所以探测器 3 有信号频谱输出。从图 6(d)可以看到,外差相干信号中的差频信号 $i_{os4}(t)$ 频率大于探测器的截止响应频率,因此探测器 4 无信号频谱输出。

综上所述,提出的四光相干混频探测方法可以实现更大动态范围的运动目标探测,同时使用偏振分光技术可以实现不同频率的激光的空间分离,从而达到空间分离的四光相干混频信号输出的目的。从偏振分光理论和仿真分析结果可以看到,当探测器 3 或探测器 4 有输出信号时,可根据不同探测器的输出信号来判断目标的运动方向。

4 结 论

通过理论分析证明四光相干混频探测方法可以实现更大动态范围的运动目标探测,为了实现四光相干混频多个信号分量的判别,设计了空间分离四光相干混频探测系统,使用光学仿真软件对偏振分光技术实现空间分离的相干混频进行分析。该方法为大动态范围的运动目标探测提供有效的解

决方案,但还存在很多不足,如偏振分光功率衰减、目标特性和信道对探测光偏振方向的影响以及相干混频过程中的偏振匹配等问题,针对这些问题还需要进行深入研究,最后还需要实验验证该探测方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Wu Z H, Chen Z Y, Pu J X, et al. Generation of a new kind partially coherent beam and its coherent properties [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0526002.
吴子豪, 陈子阳, 蒲继雄, 等. 新型部分相干光束的产生及其相干特性[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0526002.
- [2] Cheng C H, Lin L C, Lin F Y. Self-mixing dual-frequency laser Doppler velocimeter [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3600-3610.
- [3] Hu X, Li D J, Tian H, et al. Impact and correction of phase error in lidar signal on synthetic aperture imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0306001.
胡焯, 李道京, 田鹤, 等. 激光雷达信号相位误差对合成孔径成像的影响和校正[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0306001.

- [4] Li M L, Wu J, Bai T, et al. Stripmap mode synthetic aperture lidar imaging under large random phase errors condition[J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 130-137.
李明磊, 吴谨, 白涛, 等. 大随机相位误差下条带模式合成孔径激光雷达成像实验[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 130-137.
- [5] Yu X, Hong G L, Ling Y, et al. Homodyne detection of distance and velocity by chirped-amplitude modulated lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0606002.
于啸, 洪光烈, 凌元, 等. 啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0606002.
- [6] Du J, Cheng Y, Zhang X X, et al. An improved method for frequency-shift measurement dynamic range based on phase-modulated Doppler lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0628001.
杜军, 程娅, 张晓晓, 等. 提高相位调制多普勒激光雷达频移测量范围的方法[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0628001.
- [7] Zhang J L, Wang M J. Status and trend analysis of radar detection technology of hypersonic targets in near space[J]. Electronic Science & Technology, 2016, 3(6): 706-709.
张建立, 王明娟. 临近空间高超声速目标雷达探测技术现状与趋势分析[J]. 电子科学技术, 2016, 3(6): 706-709.
- [8] Wang L D, Zeng Y H, Gao L, et al. Technology status and development trend for radar detection of hypersonic target in near space[J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(1): 72-85.
汪连栋, 曾勇虎, 高磊, 等. 临近空间高超声速目标雷达探测技术现状与趋势[J]. 信号处理, 2014, 30(1): 72-85.
- [9] Lee S H, Lan T Y, Chen Y T, et al. A precision dual-frequency laser interferometer for high speed target[J]. Information Technology Journal, 2008, 7(2): 382-385.
- [10] Liu X M, Zhao C M, Zhang Z L. Research on coherent dual-frequency lidar detection technology for hypersonic target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 1105005.
刘潇明, 赵长明, 张子龙. 高超声速目标相干双频激光雷达探测技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 1105005.
- [11] Chen J B, Zhu H B, Xia W, et al. Self-mixing birefringent dual-frequency laser Doppler velocimeter[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 560-572.
- [12] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X, et al. Analysis of lidar receiving characteristics based on four-light coherent mixing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1628004.
任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 基于四光相干混频技术的激光雷达接收特性分析[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1628004.
- [13] Ren J Y, Zhang X L. Research on the method of detecting high-speed moving target with single-source dual-frequency laser coherence[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11341: 113410P.
- [14] Zhai Z S, Hu Y T, Lü Q H, et al. Research on controlling the polarization state of laser beam with a spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 032601.
翟中生, 胡勇涛, 吕清花, 等. 基于空间光调制器的光束偏振态控制方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 032601.
- [15] Lu C Y, Liu X, Liu Y, et al. Coherent combining of two beams based on polarization phase locking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1437-1441.
卢常勇, 刘旭, 刘洋, 等. 基于偏振锁相的双光束相干合成[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1437-1441.
- [16] Ye S, Yan H F, Sun X B, et al. Modified image demodulation algorithm for spatially modulated full-polarization imaging systems[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0607001.
叶松, 严浩方, 孙晓兵, 等. 空间调制型全偏振成像系统的图像解调算法修正[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0607001.
- [17] Feng M Q, Sun Q, Deng Y Q, et al. Influence of laser polarization on fiber-type terahertz time-domain spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614019.
冯美琦, 孙青, 邓玉强, 等. 激光偏振态对光纤型太赫兹时域光谱仪的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614019.
- [18] Gou X C, Tian A L, Zhu X L, et al. Influence of polarization state on interference fringe contrast[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241202.
勾鑫聪, 田爱玲, 朱学亮, 等. 偏振态对干涉条纹对比度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241202.