

文章编号: 1001-5078(2024)03-0389-07

· 激光应用技术 ·

激光相干雷达中光单次下变频技术

张奕康, 刘波, 吴姿妍, 眭晓林, 赵晓龙
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:在相干激光雷达远程测距中,为提高雷达的探测距离和距离分辨力,通常使用大时宽带宽积的信号如调频信号对光载波进行调制,并在接收端进行脉冲压缩处理,为降低接收端数字信号处理的数据量以提高运算的实时性,需要将接收信号下变频至合适的频段。传统的外差式雷达接收机需对光信号和电信号分别进行一次下变频,导致系统结构较复杂,且受器件非理想化的限制,下变频过程中会引入额外的噪声,此外还存在镜像频率噪声干扰的问题,导致解调信号信噪比降低。提出了一种将光信号直接下变频至脉冲压缩所需频段的方案,该方案使用正交解调的方式进行,能够简化系统结构同时抑制镜频噪声。首先将本振光进行频移并分为两束,通过控制相位使两本振光相互正交。将信号光分为两束并分别与两路本振光在光电探测器表面进行混频,接着对电信号进行采集,通过相关算法对幅相不平衡进行矫正。经仿真和实验,该方法能够在有效简化激光相干雷达接收机系统结构的同时避免镜频噪声干扰,在10 GSps采样率下,相较于外差式接收机,解调信号信噪比提高了约3 dB。

关键词:激光雷达;雷达接收机;IQ解调;镜频抑制

中图分类号: TN958.98; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.009

Single down conversion technology of light in laser coherent radar

ZHANG Yi-kang, LIU Bo, WU Zi-yan, SUI Xiao-lin, ZHAO Xiao-long
(Key Laboratory of Solid State Laser Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: In coherent LiDAR remote ranging, in order to improve the detection range and range resolution of the LiDAR, a large time broadband product signal such as a frequency modulation signal is usually used to modulate the optical carrier, and pulse compression processing is performed at the receiving end. To reduce the data required for digital signal processing at the receiving end and improve the real-time performance of the calculation, it is necessary to down-convert the received signal to an appropriate frequency band. The traditional heterodyne radar receiver requires a single down conversion of the optical and electrical signals, resulting in a more complex system structure and by the limitations of the device non-idealisation, additional noise is introduced during the downconversion process. In addition, there is the problem of image frequency noise interference, which leads to the degradation of the SNR of the demodulated signal. In this paper, a scheme is proposed to downconvert the optical signals to the frequency band required for pulse compression, which is carried out using orthogonal demodulation to simplify the system structure and suppress mirror frequency noise. Firstly, the local oscillator light is frequency shifted and divided into two beams, and the two local oscillators are made orthogonal to each other by controlling the phase. The signal light is divided into two beams and mixed with two local oscillators on the surface of the photodetector. Then, the electrical signals are collected and the amplitude-phase imbalance is corrected through relevant algorithms. Through simulation and experiments, this method can effectively simplify the structure of the laser coherent radar receiver system while avoiding mirror frequency noise interference. At a sampling rate of 10 GSps, the SNR of demodulated signal is improved by about 3 dB.

收稿日期: 2023-05-30; 修订日期: 2023-07-24

compared to a heterodyne receiver.

Keywords: laser-radar; radar receiver; IQ demodulation; mirror frequency suppression

1 引言

在测距激光雷达的发展过程中,为达到更远的测量距离和更高的距离分辨率,研究者们不断地对雷达测距系统的各个部分进行了改进。雷达接收机是对雷达回波信号进行收集、处理的关键设备,在相干激光雷达测距系统中,接收机的信号处理能力很大程度上影响着激光雷达测距系统的性能^[1]。

在相干激光雷达测距中,雷达接收机的作用是从带噪信号中提取有用信号并对其进行处理最终得到距离信息,根据信号下变频过程中是否存在中间频率及中间频率的大小,可将变频方式分为超外差、零中频和低中频等^[2]。外差式的变频结构发展时间最长,其方法已相对成熟,在相干激光雷达中使用外差式下变频具有结构简单、系统复杂度较低的优势,这有利于提升系统的鲁棒性^[3]。但在外差式下变频方式中,首次变频时雷达回波信号与本振光信号的混频为实信号混频,这导致混频结果中包含了镜像频率噪声,这种噪声无法在混频后通过滤波消除,致使解调信号信噪比恶化,最终导致探测距离和探测精度的降低^[4]。此外,在二次下变频时,需使用模拟正交下变频或数字正交下变频将中频电信号变频至低频,由于模拟器件受温度、电磁环境等因素影响较大,模拟正交下变频易出现正交信号幅相失配、使用条件受限等问题,且由于电子器件的特性,滤波器的设计也很难达到理想的相应曲线,这也会影响模拟变频的性能^[5-6];而数字正交下变频需在变频前对中频电信号进行模数转换,由于相干激光雷达测距时会使用调频信号以增大信号带宽,这对模数转换器件提出了很高的要求,同时也对采样后的信号处理单元的计算能力提出了要求^[7]。使用零中频探测时,由于 $1/f$ 噪声的影响,使用光电探测器对低频信号直接进行探测时,会导致输出信号信噪比急剧下降^[8]。

本文针对相干激光雷达远程测距,提出了一种对雷达接收信号进行单次变频并对 I/Q 支路幅度相位不平衡进行矫正的方法。本方案使用正交下变频将激光雷达接收信号直接下变频至脉冲压缩所需频段,使用正交解调的方式可以消除镜像频率噪声的影响,提高解调信号信噪比。同时,由于不存在由高

频变频到中频信号的过程,避免了有效信号功率的损失,这有利于提高雷达探测距离。其次,避免了对中频信号进行滤波处理,这有利于提高接收机的动态性能,降低信号的失真程度。同时,本方案将雷达回波光信号直接变频至较低频段,降低了对模数转换和数字信号处理器件的要求,有利于系统的小型化和提升运算速度。

2 原理与仿真

2.1 激光相干雷达信号接收原理

相干激光雷达测距系统如图 1 所示,目前相干激光雷达接收机通常使用外差法进行下变频,其中首次下变频在光域进行,即将雷达回波光信号与本振光信号混频得到中频电信号,中频电信号经滤波、采集后再通过二次混频解调至基带,之后便可对该信号进行脉冲压缩等处理以获得距离、速度等信息。

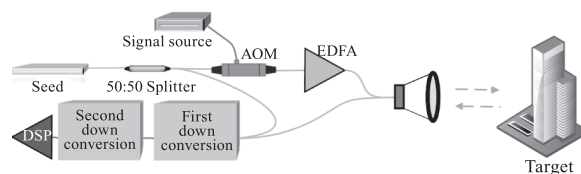


图 1 相干激光雷达工作流程图

Fig. 1 Diagram of laser coherent radar

为克服外差式下变频存在的诸多问题,本文使用单次变频方案将雷达回波光信号直接下变频至目标频带,变频过程完全在光域进行,简化了系统结构,降低了对数字信号处理系统的要求,同时达到了提高接收信号信噪比的目的。

2.2 单次变频原理

激光雷达接收信号的单次下变频方案将外差式雷达接收机的两次下变频过程简化为一次下变频,即将接收到的调制光信号直接变频至目标频段,以实现简化系统结构。由于相干激光雷达回波信号为光信号,因此下变频需在光域进行。当使用实信号混频时,会导致解调信号产生与镜像频率处的噪声信号产生频谱混叠致使解调信噪比恶化,为避免镜像频率噪声的影响,使用正交混频的方式进行下变频^[9]。

正交混频首先将本振光信号分为幅度相等相位相差 90° 的两束光,随后将回波信号光分为幅相等的两路并将两路信号光与两路本振光分别混频,

得到 I 支路信号和 Q 支路信号,如图 2 所示,其中 LO 为幅度相等,相位相差 90°的本振光。在相干激光雷达测距系统中,为在提高雷达作用距离的同时不对距离分辨率产生影响,通常使用调频信号作为发射端的调制信号,因此该本振信号频率应为载波光信号的频率与调制信号的中心频率之和或差^[10]。

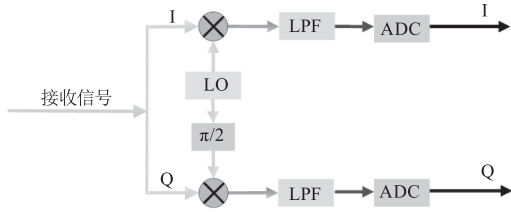


图 2 下变频结构图

Fig. 2 Construction of frequency down conversion

假设使用线性调频信号作为调制信号,其波形为:

$$a(t) = A_0 \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_0 t + \frac{Kt^2}{2})} \quad (1)$$

其中, T 为脉冲宽度, A_0 为调制信号幅度, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) =$

$$\begin{cases} 1, & \left| \frac{t}{T} \right| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \left| \frac{t}{T} \right| > \frac{1}{2} \end{cases}; f_0 \text{ 为起始频率}; K = \frac{B}{T} \text{ 为调频信号的}$$

频率变化率; B 为调制信号带宽。

则一个脉冲内雷达回波信号为:

$$E(t) = \lambda \cdot E_c \cdot \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi\left(f_0 + \frac{Kt}{2}\right)t\right] + n(t) \quad (2)$$

其中, λ 为衰减因子; E_c 为载波光信号的振幅; f_c 为载波光信号频率; $n(t)$ 为信道产生的加性噪声。由于 I/Q 支路的本振信号相互正交,故将 I/Q 支路的本振信号当做复信号与接收信号进行混频,设 I 支路和 Q 支路本振信号分别为:

$$y_{LOi}(t) = \cos(\omega_{LO}t) \quad (3)$$

$$y_{LOq}(t) = -j\sin(\omega_{LO}t) \quad (4)$$

$$\omega_{LO} = 2\pi\left(f_c + f_0 + \frac{B}{2} - f_i\right) \quad (5)$$

其中 f_i 期望的解调信号中心频率,则接收信号与本振信号混频得:

$$E(t) \cdot y_{LO}(t) = \{\lambda \cdot E_c \cdot \cos[2\pi f_c t + 2\pi(f_0 + \frac{Kt}{2})t] + n(t)\} \cdot e^{-j\omega_{LO}t}$$

$$= \frac{1}{2} \lambda \cdot E_c e^{-j2\pi f_i t} + n'(t) \quad (6)$$

其中, $n'(t)$ 为频移后的随机噪声,式(6)即为下变频至指定频带后的信号表达式,即下变频得到的解调信号应为幅度相等且相位相互正交的两路信号,因此需要保证解调时使用的 I/Q 支路幅度和相位达到平衡。

2.3 幅度相位不平衡补偿原理

由于解调得到的信号为复信号,为保证解调信号为单边带信号,需确保该复信号的实部和虚部相互正交,否则将在解调信号的频谱中出现双边带噪声信号,致使解调信号信噪比恶化^[11]。在实际的 I/Q 调制与解调过程中,由于器件的非理想化、电路设计的差异、光纤受温度和应力影响等都可能使 I/Q 信号幅度相位不平衡,导致正交失配。因此,需对解调信号进行补偿以降低 I/Q 支路不平衡造成的影响,本文使用数字补偿法对幅度相位不平衡进行补偿。

首先建立补偿前后的 I/Q 信号变换式,设 I/Q 支路输出信号分别为:

$$I = A \cos(\theta) + \gamma \quad (7)$$

$$Q = (1 + \varepsilon) \cdot A \cos(\theta + \phi) + \kappa \quad (8)$$

其中, γ 和 κ 分别为两支路的直流偏置,令不存在幅相不平衡的信号为 I' 和 Q' ,由于 I/Q 支路幅相误差为相对误差,故假定幅相不平衡完全由 Q 支路引入,因此可以构造矩阵 P 使得补偿前后的 I/Q 信号具有如下关系:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I' \\ Q' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A \cos \theta \\ A \sin \theta \end{bmatrix} \\ &= P \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix} \\ &= P \cdot \begin{bmatrix} A \cos(\theta) \\ (1 + \varepsilon) A \sin(\theta + \phi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

解得 $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tan \phi & \frac{1}{(1 + \varepsilon) A \cos(\phi)} \end{bmatrix}$, 对幅度和相位误差值进行估计:

$$\hat{\varepsilon} = \sqrt{\frac{E[Q^2(n)]}{E[I^2(n)]} - 1} \quad (10)$$

$$\hat{\phi} = -\arcsin \sqrt{\frac{E[I(n)Q(n)]}{E[I^2(n)Q^2(n)]}} \quad (11)$$

其中, $\hat{\varepsilon}$ 和 $\hat{\phi}$ 分别为幅度和相位不平衡量的估计值,

由此可构造矩阵 P , 从而对幅度相位进行补偿^[12]。

2.4 仿真分析

2.4.1 下变频仿真分析

对雷达回波光信号单次下变频理论进行仿真分析, 本文所涉及的激光雷达系统使用的是 1550 nm 波长的激光, 其频率为 193.5 THz, 由于频率过高给计算机仿真带来困难, 故仿真中使用 193 GHz 的正弦信号作为载波, 将 300 MHz ~ 700 MHz 的 chirp 信号作为雷达发射端的调制信号, 产生脉宽 500 ns 的脉冲信号, 将该信号叠加高斯噪声模拟雷达回波信号, 验证光信号单次下变频方案的可行性。当模拟雷达回波信号信噪比为 -15 dB 时, 其时域和频域波形如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

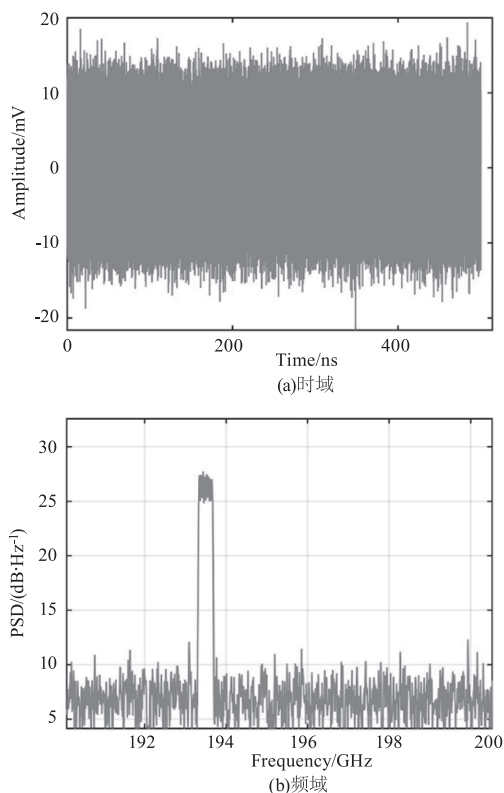


图 3 雷达回波信号时频图

Fig. 3 Diagram of radar echo signal in time domain and frequency domain

使用单频信号进行混频, 将有用信号频谱搬移至低频段, 下变频使用正交混频的方式进行。混频结果为单边带信号, 有效消除了镜像频率的干扰, 为尽可能降低解调信号的频率以降低采样率, 同时避免 $1/f$ 噪声过大产生的信噪比恶化现象, 选择 250 MHz 作为相干信号的中心频率, 混频结果的时域波形如图 4(a) 所示, 其功率谱密度如

图 4(b) 所示。仿真结果表明, 上述方法能够有效将带宽为数百 MHz 级别的调频信号由高频搬移至所需频段。

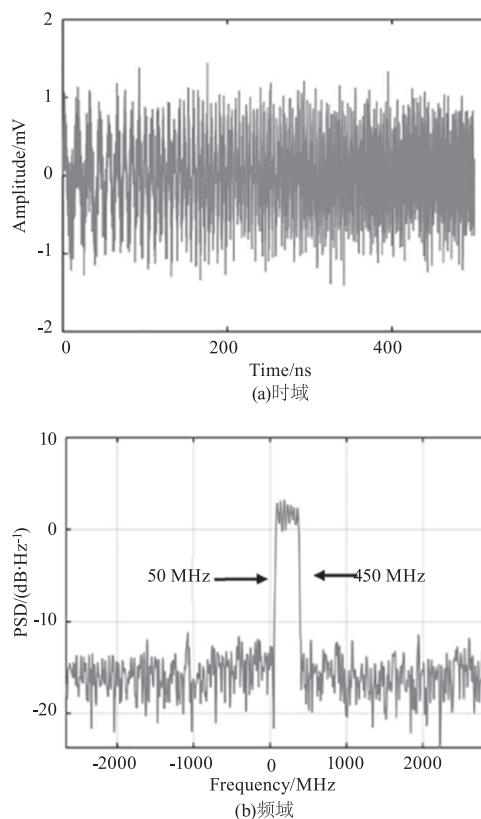


图 4 解调信号时频图

Fig. 4 Diagram of demodulated signal in time domain and frequency domain

为验证对镜频噪声的抑制作用, 同时使用外差式变频进行多次仿真, 两种变频方式得到相同频率的解调信号的信噪比及信噪比增益如图 5 所示, 与外差式下变频相比, 单次变频得到的解调信号信噪比提升约 3 dB。

2.4.2 幅度相位不平衡补偿仿真分析

对 I/Q 支路幅度相位不平衡补偿方法进行仿真, 假设两支路间的不平衡量完全由 Q 支路引起, 由式(10)和式(11)可知, 幅相误差补偿效果与信号采样点数成正相关, 取脉宽 500 ns, 10 GSps 采样率进行仿真。

根据前文, 当解调信号的 I/Q 支路间不存在幅相不平衡时, 解调信号应为单边带信号, 否则将在信号频率相对 0 频对称的频点处产生噪声, 取幅度不平衡量为 0.3, 相位不平衡量为 $\pi/10$, 补偿前频谱图如图 6(a) 所示, 补偿后频谱图如图 6(b) 所示。

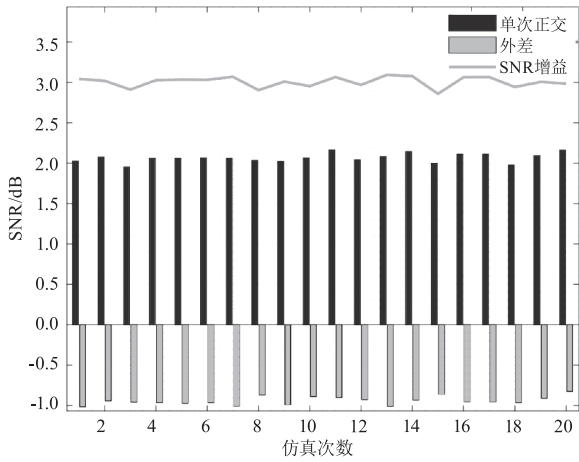
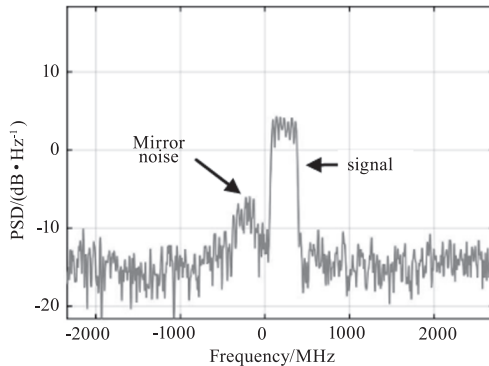
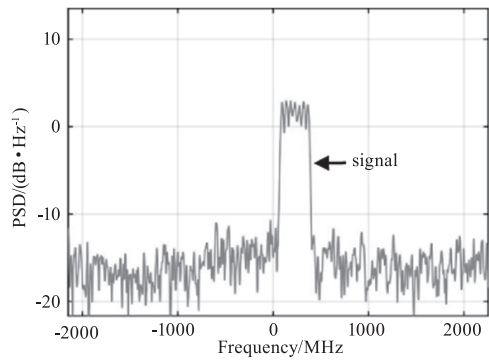


图5 解调信号信噪比对比图

Fig. 5 Comparison chart of SNR of demodulated signal



(a)补偿前



(b)补偿后

图6 I/Q 支路不平衡补偿前后频谱图

Fig. 6 Spectrum before and after I/Q branch imbalance compensation

对相位相等而幅度不平衡进行仿真,取接收信号信噪比为 -15 dB ,相位误差为 0 ,幅度误差不同时的仿真结果如表 1 所示,表中补偿前后的信噪比均为基带信号的信噪比,可见当采样点数固定时,幅度不平衡较大时补偿后仍能达到较高的信噪比。

对幅度相等而相位不平衡进行仿真,补偿前后的信噪比如表 2 所示,取接收信号信噪比为 -15 dB ,当载波的相位不平衡误差小于 $\pi/2$ 时,相

位误差补偿均能够产生较好的处理结果。

表 1 幅度误差补偿前后信噪比数据

Tab. 1 Table of signal to noise ratio before and after amplitude error compensation

Amplitude error/mV	-0.3	0.5	1	2	5
SNR/dB					
SNR before compensation	13.41	8.98	2.96	-3.07	-11.02
SNR after compensation	40.92	40.92	40.92	40.92	40.92
Gain of SNR	27.51	31.94	37.97	43.99	51.94

表 2 相位误差补偿前后信噪比数据

Tab. 2 Table of signal to noise ratio before and after phase error compensation

Phase error/rad	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{5}$	$\frac{\pi}{15}$	$\frac{\pi}{30}$	$\frac{\pi}{50}$
SNR/dB					
SNR before compensation	-0.12	7.14	16.60	22.62	27.06
SNR after compensation	2.99	34.13	34.17	34.17	34.18
Gain of SNR	3.10	26.99	17.56	11.55	7.11

综上,当幅度和相位误差在一定范围内时,不平衡补偿能够有效消除正交信号幅度相位不平衡产生的影响。

3 实验结果及分析

搭建实验对光单次下变频方案进行实验验证,本实验采用的连续光种子源中心波长为 1550.129 nm ,实验采用两路 ADC 同时对解调信号进行采样,ADC 速率为 10 GSps 。实验装置连接如图 7 所示,实验中将连续光种子源输出光经 $50:50$ 分束器分为两束,一束经电光调制器 (EOM) 调制后接入光纤放大器作为雷达发射光,其中输入 EOM 的射频信号由射频信号源产生,实验采用频率为 $300\text{ MHz} \sim 700\text{ MHz}$ 的 chirp 信号作为调制信号,其时频图如图 8 所示。另一束种子源输出光接入声光调制器以产生 250 MHz 频移,并在产生频移后分为两束作为本振光。将雷达回波信号经 $50:50$ 分束器分为两路并分别与两本振光在光电探测器表面进行混频,将混频信号经过 ADC 采样,最后对采样信号进行分析处理。

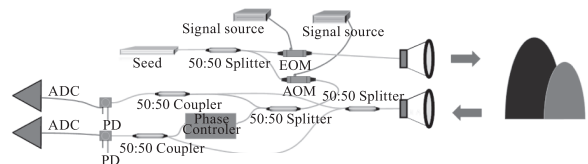


图7 下变频实验光路图

Fig. 7 Diagram of frequency down conversioning experiment

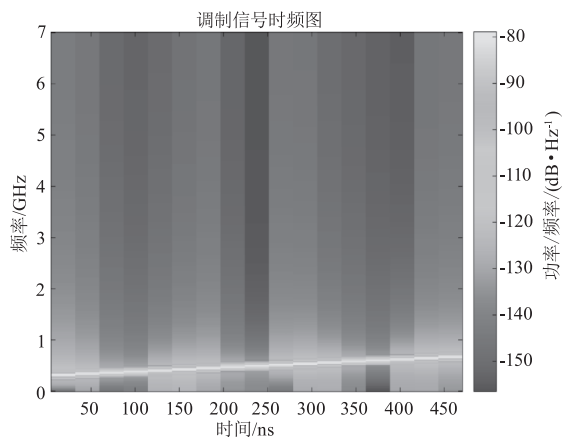


图8 EOM输入信号时频图

Fig. 8 EOM input signal time-frequency diagram

对下变频信号进行采集分析, I支路和Q支路信号如图9所示, 使用I/Q法在未经幅度相位不平衡补偿时得到的解调信号信噪比为4.69 dB, 此时两支路平均相位不平衡量为 32.34° , 幅度不平衡量0.078, 采用2.3节中的方法对I/Q解调信号进行幅度相位不平衡补偿后其信噪比达到4.87 dB。而相同条件下使用外差式下变频解调所得复信号的信噪比为2.05 dB, I/Q法所得信噪比相较于外差式下变频提升约2.82 dB。

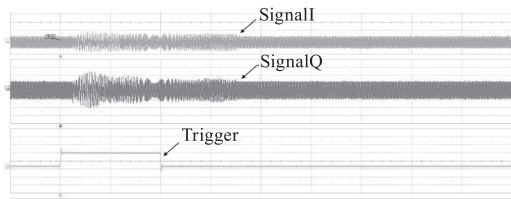


图9 解调信号时域波形

Fig. 9 Diagram of time domain waveform of the demodulated signal

使用不同信噪比的回波信号进行分析, 使用外差法和单次下变频法的解调信号信噪比及信噪比增益如图10。接收信号的信噪比反应为解调后电平值的大小, 电平值越大则接收到的回波信号信噪比越高, 结果表明, 在不同的回波信号信噪比下, 本文的单次下变频方案相较于外差法均能够产生3 dB左右的信噪比增益的同时, 有效简化了系统结构。

4 总结

本文以激光相干雷达测距为背景, 对接收机光下变频系统进行优化, 提出了一种通过单次变频将光信号直接变频至较低频段的方案。该方案将激光雷达回波信号通过一次混频直接下变频至后续信号处理所需频段, 且解调信号为复脉冲压缩所需的复

信号形式, 避免了传统外差式接收机的二次下变频接收, 有效简化了接收机系统结构。同时, 在光信号下变频过程中引入了正交变频方案, 通过将正交结构输出信号构造为复信号的形式, 并对于潜在的正交支路不平衡, 使用基于统计特性的算法进行补偿, 有效抑制了镜像频率噪声干扰和支路不平衡引起的信噪比降低, 相较于外差式接收机, 解调信号信噪比提高约3 dB。

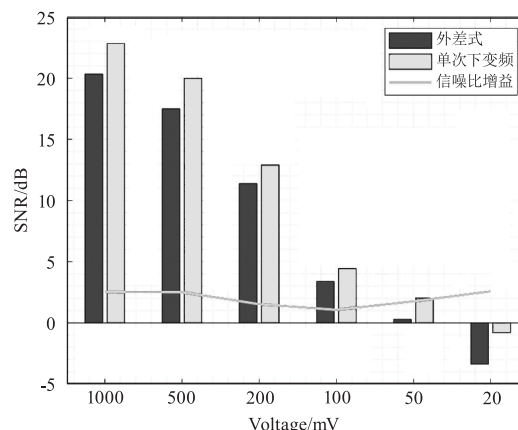


图10 解调信号信噪比柱状图

Fig. 10 Histogram of SNR of demodulated signal

参考文献:

- [1] Grönwall C, Steinvall O, Gustafsson F, et al. Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 106201-106201-11.
- [2] Gatt P, Henderson S W. Laser radar detection statistics: a comparison of coherent and direct-detection receivers [J]. *Laser Radar Technology and Applications VI*. SPIE, 2001, 4377: 251-262.
- [3] Liu Bin, Zhang Jun, Lu Min, et al. Research progress of laser radar applications [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 117-122. (in Chinese)
刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(2): 117-122.
- [4] Huang Gang. Research on digital downconversion of high speed sampling signal [J]. *Modern Navigation*, 2023, 14(1): 70-74. (in Chinese)
黄刚. 高速采样信号数字下变频研究 [J]. *现代导航*, 2023, 14(1): 70-74.
- [5] Tang Xiaoming, Zhu Hongwei, Liu Zhikun, et al. Design and fabrication of broadband image rejection mixer [J]. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(11): 49-52.

- (in Chinese)
唐小明,朱洪伟,刘志坤,等. 宽带镜频抑制混频器设计及实现[J]. 电讯技术,2009,49(11):49-52.
- [6] Wang Zhixuan. Research on the laser radar transmitting and receiving module[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2019. (in Chinese)
王志玄. 激光雷达发射与接收模块的研究[D]. 北京: 北京交通大学,2019.
- [7] Huang Wei. Research on hardware processing of receiving error of echo signal in pulse lidar[D]. Guang Xi: Guilin University of Technology,2019. (in Chinese)
黄伟. 脉冲激光雷达回波信号接收误差的硬件处理研究[D]. 广西: 桂林理工大学,2019.
- [8] Chen Yubao,Bu Zhichao,Wang Zhenhui. A Doppler wind lidar based on image-reject homodyne technology [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2018,38(2):205-210. (in Chinese)
陈玉宝,步志超,王振会. 基于镜频抑制零差探测的全光纤测风激光雷达系统[J]. 北京理工大学学报,2018,38(2):205-210.
- [9] Anttila L,Valkama M, Renfors M. Circularity-based I/Q imbalance compensation in wideband direct-conversion receivers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2008,57(4):2099-2113.
- [10] Zhang H,He S,Lin L, et al. A fast and resource-efficient GSOP implementation for optical coherent receivers[C]//2022 IEEE 16th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT). IEEE,2022:1-3.
- [11] Cao Changdong,Qin Peng,Sui Xiaolin, et al. Application of pulse compression technology in coherent laser radar [J]. Laser & Infrared,2017,47(6):659-662. (in Chinese)
曹昌东,秦鹏,眭晓林,等. 脉冲压缩技术在相干激光雷达中的应用研究[J]. 激光与红外,2017,47(6):659-662.
- [12] Cao Yuchen,Wan Jian,Tao Jiayang. Efficient correction algorithm for IQ imbalance based on statistical features [J]. Journal of Electron Devices,2022,45(2):468-473. (in Chinese)
曹钰琛,万建,陶加祥. 基于统计特征的 IQ 不平衡高效校正算法[J]. 电子器件,2022,45(2):468-473.