

改进相位生成载波解调法在激光外差语音系统中的应用

华秀宝, 张蓉竹*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 传统相位生成载波(PGC)技术采用了载波多倍频混频方案,从而导致解调过程采样率高、计算时间长。针对这一问题,从语音信号的频谱特征出发,对信号混频方法进行改进。将光电探测器采集并转换后的信号分别与载波的正弦项和余弦项进行混频,在混频信号经过带通滤波器滤波后,分别采用反正切和微分交叉相乘处理的方式来进行解调。对一个简单正弦信号进行解调对比后发现,改进后的解调方法比传统方法所需的采样率更低、计算时间更短。虽然微分交叉相乘法信号处理速度比反正切法更快,但是反正切法的解调效果和抗噪性更好。对实际语音信号进行解调的结果表明,反正切法具有较好的解调效果。

关键词 信号处理; 激光外差语音探测; 相位生成载波解调; 语音信号; 信噪比; 抗噪性

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1607001

Application of Improved Demodulation Methods Based on Phase-Generated Carrier in Laser Heterodyne Speech System

Hua Xiubao, Zhang Rongzhu*

College of Electronics Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China

Abstract The conventional phase-generated carrier (PGC) technology is faced with a high sampling rate and long calculation time during the demodulation process as it adopts a scheme of mixing with a multi-frequency of the carrier. For this reason, improved signal mixing methods are proposed according to the spectral characteristics of speech signals. Signals collected and converted by a photodetector are mixed with the sine and cosine terms of the carrier respectively. After being processed by a band-pass filter, the signals are demodulated by arctangent and differential cross multiplication approaches. The demodulation results of a simple sinusoidal signal prove that compared with the traditional method, the improved demodulation methods require lower sampling rates and shorter calculation time. The differential cross multiplication approach has a faster signal processing speed, whereas the arctangent method has a better demodulation effect and higher noise resistance. The demodulation results of a real voice signal show that the arctangent method has a favorable demodulation effect.

Key words signal processing; laser heterodyne speech detection; phase-generated carrier demodulation; speech signal; signal-to-noise ratio; noise resistance

1 引言

激光外差语音测量技术具有精度高、响应快和非接触测量等优点,其光路结构一般分为外差式^[1-2]和零差式^[3]两种,其中外差结构因具有可以辨别物体振动方向、抑制环境噪声和抗干扰能力强等优点而被广泛应用于实际测量中。外差式光路主要通过外调制的方

式将光频移到兆赫兹频率处,利用光的相干原理让两束频率不同的光进行混频,最后对信号进行解调,从而测得音频信号引起目标振动而产生的多普勒频移。将语音信号解调出来是整个探测过程中的关键环节之一,为了确保信号的真实性,解调算法的高效、准确是必须考虑的重点问题。由于相位生成载波(PGC)技术具有动态范围大、线性度高等优点,故已成为最常用

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-03-04; 录用日期: 2022-03-10

基金项目: 四川省重大科技专项(2019ZDZX0038)

通信作者: *zhang_rz@scu.edu.cn

的信号解调技术之一^[4-5]。

柏林厚等^[4]基于干涉型光纤传感器的三倍频混频解调算法,有效地改善了信号解调结果。晏春回等^[6]针对传统反正切法提出了一种参数估计误差补偿算法,并通过仿真和实验验证了该算法的可行性。结果表明,该算法能在一定范围内还原出原语音信号。张勤等^[7]提出了一种采用压电陶瓷对迈克耳孙干涉仪的参考信号进行调制的激光多普勒语音检测系统,并利用传统微分交叉乘法对干涉信号解调,结果表明,该系统可以动态测量音频量级的微弱振动且可以较好地还原语音信号。已有文献采用的 PGC 解调方法通常都是利用高频载波信号的一倍频与二倍频和三倍频进行混频。在外差法中载波频率达到几十兆赫兹,此时二倍频和三倍频信号需要达到数百兆赫兹,这对采样频率和数字采集系统提出了较高的要求,并且会导致数据计算时间长、采样率高等问题的出现。

考虑到语音信号的频率范围为 300~3000 Hz,具有所需载波频率不高的特点,本文在传统 PGC 解调方法的基础上,提出一种更为快捷的信号混频方法,可以有效克服采样频率高、计算时间长等缺点,并分析两种方法的抗噪性,为激光外差语音系统解调方法选取提供参考。

2 基本原理

激光外差语音系统光路图如图 1 所示。一束频率为 f_0 的激光经过偏振分光棱镜 PBS_1 后被分为参考光 E_1 和信号光 E_2 。 E_2 经过振动目标物体后被反射,且携带多普勒频移信息,频率变为 $f_0 + \Delta f$ 。 E_1 经过反射镜进入声光调制器 (AOM) 中,被 AOM 调制后,频率变为 $f_0 + f_{AOM}$ 。两束激光通过分光棱镜 (BS) 一同进入光电探测器 (APD) 中,完成光电转换后经过后续的信号解调处理便可以得到物体的振动信息。

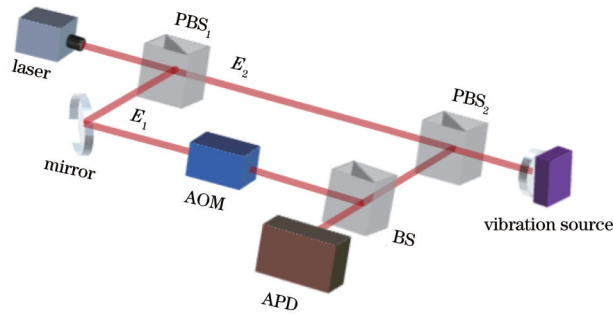


图 1 激光外差语音系统光路图

Fig. 1 Optical path diagram of laser heterodyne speech system

到达光电探测器的参考光和信号光的电场分别为

$$E_1(t) = E_r \cos[2\pi(f_0 + f_{AOM})t + \varphi_1], \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_s \cos[2\pi(f_0 + \Delta f)t + \varphi_2], \quad (2)$$

式中: E_r 和 E_s 分别是参考光和信号光的初始振幅; f_0 为激光器的频率; f_{AOM} 为调制频率; Δf 为多普勒频移; t 为时间; φ_1 和 φ_2 分别为参考光和信号光的初始相位。

光电探测器输出的含有多普勒频移振动信息的电流方程^[2]为

$$i(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi(f_{AOM} \pm \Delta f)t + \phi], \quad (3)$$

式中: I_1 是参考光的光强; I_2 是信号光的光强; ϕ 为信号光与参考光的相位差。

多普勒频移 Δf 的表达式^[2]为

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: v 为振动物体的振动速度; λ 为波长。

将式(4)代入到式(3)中,可以得到

$$i(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(2\pi f_{AOM} t + \frac{4\pi}{\lambda} vt + \phi\right), \quad (5)$$

当振动物体的位移 $x(t) = vt$ 时,式(5)可写为

$$i(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[2\pi f_{AOM} t + \frac{4\pi}{\lambda} x(t) + \phi\right]. \quad (6)$$

考虑到多普勒频移与物体振动之间的关系,且以简谐振动 $x(t) = A \sin(2\pi ft)$ 为例,输出电流表达式^[8]可改写为

$$i(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[2\pi f_{AOM} t + \frac{4\pi A \sin(2\pi ft)}{\lambda} + \phi\right], \quad (7)$$

式中: A 为振动物体的振幅; f 为振动物体的频率。

利用 PGC 算法能够将调制信号中包含的振动信息提取出来,通常利用载波的一倍频和二倍频进行混频从而将目标振动信号分离出来^[9-12]。在外差法中载波频率达到几十兆赫兹,二倍频能达到百兆赫兹量级,这会导致采样率高、计算时间长等问题的出现。这种解调方法适用范围广,对于正常情况下频率在 30~3000 Hz 范围内的语音信号而言,可以采用更为快捷的混频方案。

3 改进的信号解调算法

传统方法将探测器输出信号分别与一倍频载波 $\cos(\omega_0 t)$ 和二倍频载波 $\cos(2\omega_0 t)$ 进行混频。在实际应

用中载波频率一般取几十兆赫兹,二倍频频率会达到几百兆赫兹,所需的采样频率更高。本文将输出信号分别与载波的正弦项 $\sin(\omega_0 t)$ 和余弦项 $\cos(\omega_0 t)$ 混频,所需的采样率更低,从而提高计算速度,减少信号处理时间。

3.1 改进反正切法

将探测器输出的信号等分为两路,一路信号与正

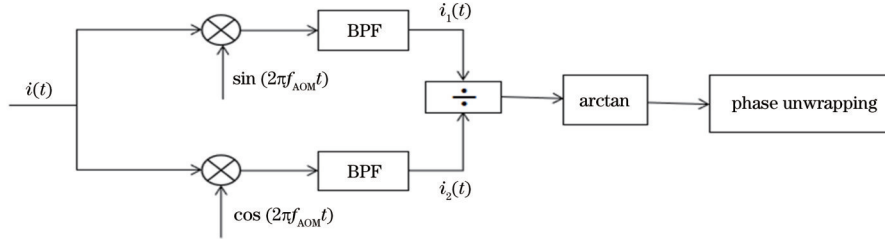


图 2 反正切解调原理图

Fig. 2 Schematic diagram of arctangent demodulation

在理想状态下,干涉信号分别与正弦一倍频载波信号和余弦一倍频载波信号混频后经过带通滤波器可得

$$i_1(t) = -\sqrt{I_1 I_2} \sin(2\pi\Delta f t + \phi), \quad (8)$$

$$i_2(t) = \sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta f t + \phi). \quad (9)$$

将式(8)和式(9)作为两个输入端,两路信号相除后进行反正切处理可得到语音信号,即

$$\varphi(t) = \arctan \left[-\frac{i_1(t)}{i_2(t)} \right] + n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

3.2 改进微分交叉相乘法

将探测器输出的信号等分为两路,一路信号与正弦载波信号相乘混频,另外一路信号与余弦载波信号相乘混频。然后,利用带通滤波器滤除两路信号中的高频信号和直流信号。最后,两路信号相减求积分从而得到多普勒频移。微分交叉相乘解调原理图如图 3 所示。

经过混频滤波和微分交叉相乘后可得到 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 两路输出。理想状态下经过微分交叉后得到的信号输出为

$$I_1(t) = \frac{di_1(t)}{dt} \times i_2(t) = -I_1 I_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} \cos^2[\varphi(t)], \quad (11)$$

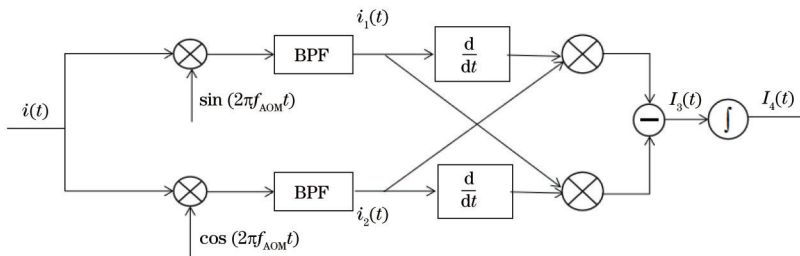


图 3 微分交叉相乘解调原理图

Fig. 3 Schematic diagram of differential cross multiplication demodulation

弦载波信号进行相乘混频,另外一路信号与余弦载波信号相乘混频。然后,利用带通滤波器(BPF)滤除两路信号中的高频信号和直流信号。接着,两路信号进行相除并求反正切。最后,对反正切的结果进行相位解缠可得到多普勒频移。反正切解调原理图如图 2 所示。

$$I_2(t) = i_1(t) \times \frac{di_2(t)}{dt} = I_1 I_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} \sin^2[\varphi(t)], \quad (12)$$

相减后的信号输出为

$$I_3(t) = I_2(t) - I_1(t) = I_1 I_2 \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad (13)$$

$I_3(t)$ 经过积分后可得到语音信号,即

$$I_4(t) = \int I_3(t) dt = I_1 I_2 \varphi(t), \quad (14)$$

式中: $\varphi(t) = 2\pi\Delta f t + \phi$ 。

改进后的两种方法只需要和载波信号的正余弦相乘,而不需要再和二倍频、三倍频进行混频,进而可以克服采样频率高、计算时间长等缺点。同时,采用带通滤波器可以有效去除直流项和高频噪声的干扰,保留语音信号信息。

4 仿真分析

4.1 正弦信号的解调

对上述两种改进解调方法进行数值模拟解调仿真,设定激光器的波长为 632.8 nm,用振幅为 1000 nm,频率为 200 Hz 的正弦信号模拟待测的语音信号,设置调制频率 f_{AOM} 为 40 MHz,模拟光电探测器接收到的信号时域图和频谱图如图 4 所示。

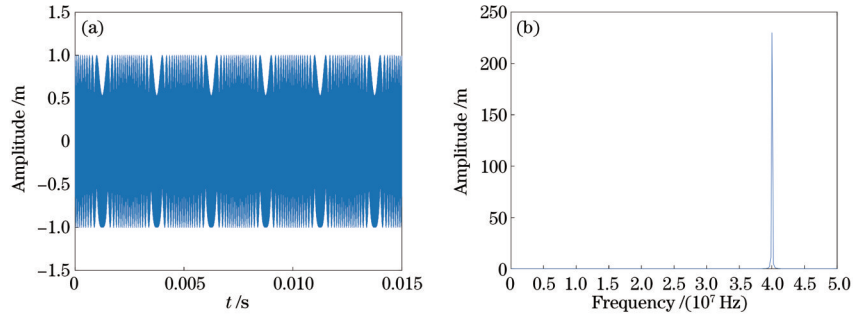


图 4 接收信号的时域图和频谱图。(a) 时域图; (b) 频谱图

Fig. 4 Time domain diagram and spectrum of received signal. (a) Time domain diagram; (b) spectrum

由图 4(b) 可以看出, 目标正弦信号被调制到 40 MHz 附近。对信号进行正弦和余弦混频, 并利用带

通滤波器消除直流项和高频项后, 可以得到图 5 中的两路信号。

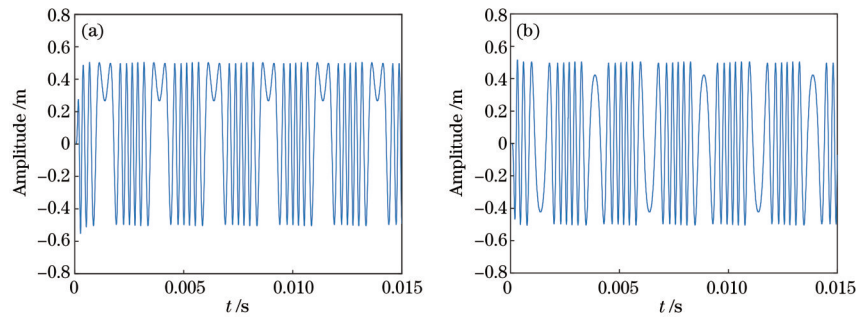


图 5 信号经过带通滤波器后的时域图。(a) i_1 路信号; (b) i_2 路信号

Fig. 5 Time domain diagrams of signals filtered by bandpass filter. (a) Signal i_1 ; (b) signal i_2

图 6 是在 85 MHz 和 200 MHz 采样率下分别采用改进混频方式后的反正切法、改进混频方式后的微分交叉相乘法、传统 PGC 解调法和文献 [6] 中方法解调后得到的结果图。从图 6(a) 可以看出, 在采样率为 85 MHz 的情况下, 改进混频方式后的反正切法和微分

交叉相乘法输出结果符合预期效果, 而此时传统 PGC 解调法和文献 [6] 中方法得到的解调结果已经出现较大失真, 对应的解调后的信号信噪比 (SNR) 和信号处理时间如表 1 所示。

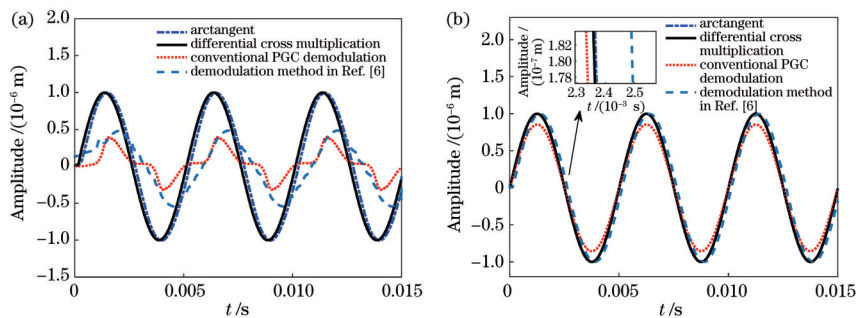


图 6 不同采样率下的解调结果图。(a) 85 MHz; (b) 200 MHz

Fig. 6 Demodulation results at different sampling rates. (a) 85 MHz; (b) 200 MHz

表 1 不同方法在采样率为 85 MHz 下的解调结果

Table 1 Demodulation results of different methods at sampling rate of 85 MHz

Demodulation method	SNR of demodulated signal /dB	Program running time /s
Arctangent	15.53	1.26
Differential cross multiplication	14.49	1.07
Conventional PGC demodulation	1.62	1.35
Method in Ref. [6]	1.78	1.38

从图 6(b) 可以看到, 在采样率为 200 MHz 的情况下, 这几种方法都能较好地解调出信号, 对应的解调后的信号信噪比和信号处理时间如表 2 所示。

从表 1 和表 2 可知: 当采样率为 85 MHz 时, 改进混频后的解调法解调后的信号的信噪比较高, 而传统 PGC 解调法和文献 [6] 中的解调法解调后的信号的信噪比较低; 当采样率为 200 MHz 时, 这几种方法都能

较好地解调出信号且解调出的信号信噪比较高, 信号处理时间也较长, 这说明在理想情况下提高采样率能提高解调后的信号信噪比, 但也会增加信号处理时间。在能较好解调出信号的前提下, 改进的混频方式解调法需要的采样频率更低、信号处理时间更短。由于反正切法需要对信号相位进行解缠, 故反正切法所需的信号处理时间比微分交叉相乘法更长。

表 2 不同方法在采样率为 200 MHz 下的解调结果

Table 2 Demodulation results of different methods at sampling rate of 200 MHz

Demodulation method	SNR of demodulated signal / dB	Program running time/s
Arctangent	16.21	2.47
Differential cross multiplication	16.20	2.05
Conventional PGC demodulation	12.37	2.56
Method in Ref. [6]	15.26	2.61

4.2 实际语音信号解调

对一个实际探测的语音信号进行解调处理。先将信号进行预处理, 使用小波阈值算法^[13]进行降噪, 在经

过载波正弦项和余弦项混频后, 用带通滤波器进行滤波, 得到的两路信号如图 7 所示。利用反正切法和微分交叉相乘法解调后的语音信号如图 8 所示。

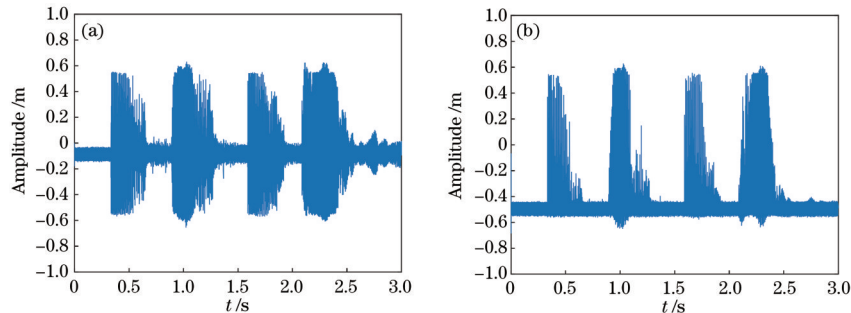


图 7 混频滤波后两路信号的时域图。(a) i_1 路信号; (b) i_2 路信号

Fig. 7 Time domain diagrams of two signals after mixing and filtering. (a) Signal i_1 ; (b) signal i_2

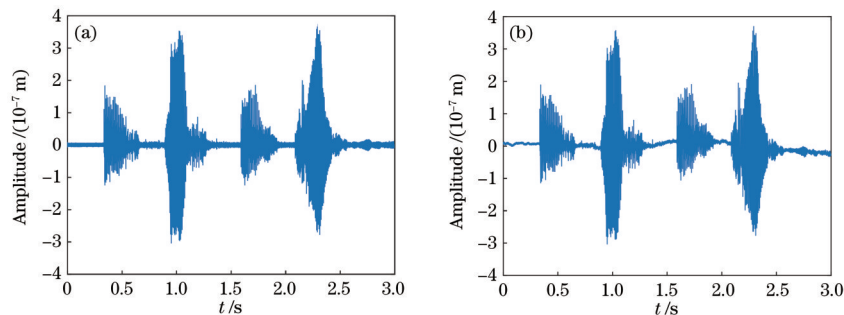


图 8 所提方法的解调结果。(a) 反正切法; (b) 微分交叉相乘法

Fig. 8 Demodulation results of proposed methods. (a) Arctangent; (b) differential cross multiplication

在利用改进反正切法和微分交叉相乘法解调后, 信号的信噪比分别为 14.99 dB 和 10.65 dB。从图 7 可以看出, 在经过信号预处理后, 两路信号质量较好, 噪声较小, 对两路信号分别进行反正切和微分交叉相乘处理可得到图 8 所示的结果图。在图 8(a) 中可以看到, 改进反正切法解调效果较好, 不存在信号偏离基线的情况。相比之下, 图 8(b) 中微分交叉相乘法的结果已经出现了明显的失真, 且解调信号出现偏离基线的情况, 信号信噪比也更低。因此, 在软件解调方面, 反

正切法比微分交叉相乘法有着更大的使用范围和更优的抗噪能力。

两种改进方法解调后的信号与原信号的绝对误差分布如图 9 所示。由图 9 可以看出, 改进混频方式后的两种方法解调后的绝对误差都较小, 反正切法解调的最大误差约为 2.35×10^{-8} , 微分交叉相乘法解调的最大误差约为 3.03×10^{-8} 。另外, 图 9(b) 中明显存在偏离基线的情况, 这是因为微分交叉相乘法中存在微分运算和积分运算, 而微分运算和积分运算都对噪声比

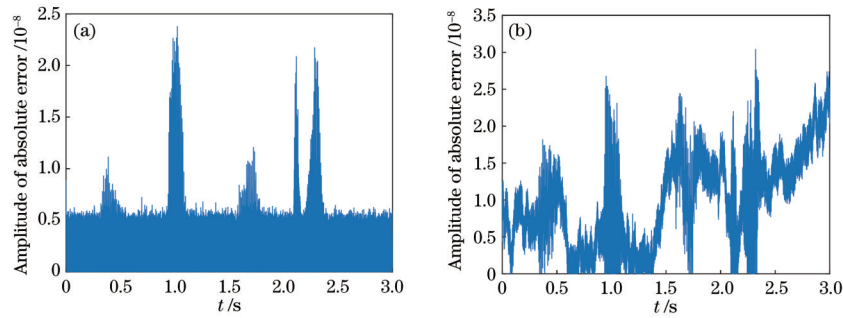


图 9 不同改进方法解调后的绝对误差分布图。(a)反正切法;(b)微分交叉相乘法

Fig. 9 Absolute error distribution after demodulation by different improved methods. (a) Arctangent; (b) differential cross multiplication

较敏感,这会造成一定的测量误差。从实际语音信号的解调结果来看,反正切法比微分交叉相乘法有着更好的解调效果,解调得到的信号的信噪比更高,绝对误差更小。

从上述分析中可以看出:针对简单正弦信号,改进混频后的两种解调方法效果都较好;在实际语音信号的解调处理中,反正切法比微分交叉相乘法的解调效果好。接下来,从抗噪性方面对两种解调方法进行比较。对模拟正弦信号加入高斯白噪声,使得信号信噪比依次为 0 dB, 1 dB, 2 dB, ...。然后,采用两种改进方法得到对应的解调结果,如图 10 所示。

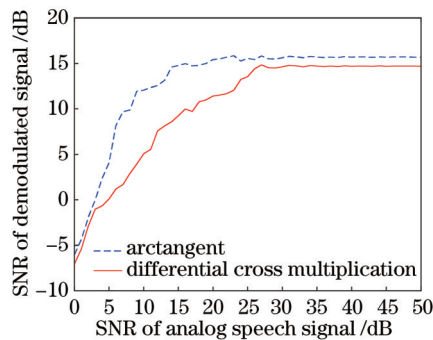


图 10 模拟语音信号 SNR 和解调后信号 SNR 的对应曲线图
Fig. 10 Corresponding curve of analog speech signal SNR and demodulated signal SNR

当加入不同信噪比的白噪声后,输入正弦信号的信噪比和解调后信噪比对应曲线图如图 10 所示。随着输入信号信噪比的提高,两种解调方法得到的解调信号的信噪比也相应地得到了提升。在正弦信号的信噪比大于 25 dB 后,解调信号的信噪比不再有明显变化,趋于平稳。总体而言,反正切法得到的解调效果要优于微分交叉相乘法。当输入信号信噪比为 10 dB 时,经过反正切法解调后的信号的信噪比为 11.93 dB,而微分交叉相乘法解调后的信号的信噪比为 3.93 dB。当输入信号信噪比为 20 dB 时,经过反正切法解调后的信号的信噪比为 14.99 dB,而微分交叉相乘法解调后的信号的信噪比为 10.93 dB。因此,在实际的激光外差语音系统中,可以通过提高语音信号的信噪比或调整光路结构提高信号信噪比的方式来改

善实际语音信号的解调结果。

5 结 论

基于传统的 PGC 解调方法采用多倍频混频的缺点,提出一种改进混频方法,利用载波信号的正余弦进行混频,有效克服了信号处理时间长、采样频率高的缺点。同时,分析两种方法的使用范围,仿真和实验结果表明:在能较好地解调出振动信号的前提下,改进的混频方式解调法需要的采样频率更低、信号处理时间更短。微分交叉相乘法在信号处理时间上比反正切法更短,但从对实际语音信号解调的结果来看,反正切法解调结果优于微分交叉相乘法。随着输入信号信噪比的提高,两种解调方法得到的解调信号的信噪比也相应地得到了提升。在输入的正弦信号的信噪比大于 25 dB 后,解调信号的信噪比不再有明显变化,趋于平稳。总体而言,反正切法得到的解调效果要优于微分交叉相乘法。

参 考 文 献

- [1] 姚欣. 激光多普勒振动检测技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Yao X. Study on vibration detecting technology of laser Doppler[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [2] 李丽艳. 用于多普勒干涉测振的光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
Li L Y. Optical system of vibration measurement by laser Doppler[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [3] 何武光, 王豹亭, 杨春平, 等. 零差激光测振系统中含噪多普勒信号处理方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(12): 1842-1846.
He W G, Wang B T, Yang C P, et al. Noisy Doppler signal processing for homodyne laser vibrometer system [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(12): 1842-1846.
- [4] 柏林厚, 廖延彪, 张敏, 等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1324-1327.
Bo L H, Liao Y B, Zhang M, et al. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2005,

- 34(9): 1324-1327.
- [5] 郎金鹏, 常天英, 陈建冬, 等. 改进式相位生成载波调制解调方法[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1207004.
Lang J P, Chang T Y, Chen J D, et al. Improved phase generated carrier modulation and demodulation method [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1207004.
- [6] 晏春回, 王挺峰, 张合勇, 等. 激光语音检测系统反正切补偿算法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0906004.
Yan C H, Wang T F, Zhang H Y, et al. Arctangent compensation algorithm of laser speech detection system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0906004.
- [7] 张勤, 张建勇, 曾华林, 等. 基于 PGC 解调的激光多普勒语音检测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1115-1118.
Zhang Q, Zhang J Y, Zeng H L, et al. Acoustic signal detection system using PGC demodulation algorithm and laser Doppler effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1115-1118.
- [8] 谷晓彬, 冯国英, 刘建. 自适应滤波算法在微弱振动测量中的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0417003.
Gu X B, Feng G Y, Liu J. Application of adaptive filtering algorithm in the weak vibration measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0417003.
- [9] 孙韦, 于淼, 常天英, 等. 相位生成载波解调方法的研究[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0806004.
Sun W, Yu M, Chang T Y, et al. Research and improvement based on PGC demodulation method[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0806004.
- [10] 严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的 PGC 解调非线性误差补偿方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904002.
Yan L P, Zhou C Y, Xie J D, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filtering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904002.
- [11] 冉艳丽, 倪晶利, 傅润秋, 等. 一种基于光纤激光水听器的 PGC 改进解调算法[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 421-427.
Ran Y L, Ni J L, Fu R Q, et al. Improved PGC demodulation algorithm based on optical fiber laser hydrophone[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 421-427.
- [12] 李树旺, 邵士勇, 梅海平, 等. 基于同步载波复原的干涉相位生成载波解调算法[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1204004.
Li S W, Shao S Y, Mei H P, et al. Interference phase generated carrier demodulation algorithm based on synchronous carrier restoration method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1204004.
- [13] 吴艳, 张蓉竹. 小波阈值降噪算法在光电探测器信号处理中的应用[J]. 光子学报, 2019, 48(10): 1004004.
Wu Y, Zhang R Z. Application of wavelet threshold denoising algorithm in photodetector signal processing[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(10): 1004004.
- [14] 尚凡, 戚悦, 马丽娜, 等. 基于光纤光栅的时分复用传感阵列相位噪声研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306011.
Shang F, Qi Y, Ma L N, et al. Background phase noise of interferometric TDM sensing array based on fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306011.