

文章编号: 1671-251X(2024)S1-0161-05

基于激光自混合干涉的测距目标振动监测分析

沈秋彦

(国能神东煤炭集团有限责任公司 乌兰木伦矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

摘要: 为防范顶板松动、断裂等危险, 需要对煤矿巷道、涵洞和隧道的顶底板距离及两帮之间的距离或接近程度进行动态监测。常规激光测距传感器容易受到外部因素的干扰, 特别是由目标振动造成的信号频谱展宽, 严重影响监测精度。针对上述问题, 设计了基于激光自混合干涉的测距系统, 能够通过监测目标的振动来实现测距误差的补偿。仿真结果表明: 实际位移与设定参数之间显示相同的变化规律, 幅值偏差表现出波动变化特征; 对相位信号进行余弦转换, 再对其频谱测试, 经过补偿处理后可对信号频谱展宽起到显著的抑制作用。用扬声器模拟振动, 实验结果表明: 补偿后的信号形成了良好的相位线性度, 有效避免了振动对信号频谱的展宽, 实现了测距精度的显著提升。由于该系统无需重新匹配激光器的性能, 可以满足较大范围的测试需求, 同时光路组件相对简单, 满足煤矿巷道等复杂环境的测试需求。

关键词: 激光测距; 自混合干涉; 振动补偿; 频率重采样; 频谱展宽

中图分类号: TD67 文献标志码: A

Vibration monitoring and analysis of ranging target based on laser self-mixing interference

SHEN Qiuyan

(Wulanmulun Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China)

0 引言

在煤矿智能化建设进程中, 5G 网络的高速率、低延迟和广连接特征, 以及先进的计算机检测技术和传感器技术的广泛应用, 正逐步改变井下作业模式^[1-3]。这些技术的结合为煤矿提供了更为准确和及时的数据支撑, 从而在很大程度上提升了井下作业的安全性和效率。尤其是在保障生产安全方面, 运用这些技术实现对煤矿巷道、涵洞及隧道的顶底板距离及两壁之间的距离或相对位置的动态监测显得尤为关键。通过自动化监测装置可细致监控煤矿顶板及支护结构的变化情况, 对防范顶板松动、断裂等危险有着重要作用。然而, 在现实应用中, 遇到监测目标因作业机械振动或地质因素导致的位移和振动时, 常规激光测距传感器可能会受到这些外部因素的干扰, 从而产生测量误差, 影响监测结果的精度^[4-6]。

FSI(Frequency-Scanning Interferometry, 激光扫频干涉)技术可在无需特定反射介质或标记物的非合作目标上实施远距离测量。该技术具有很好的高频稳定性和抗环境干扰能力, 并能根据国际标准

进行精确的结果溯源^[7-9]。因此, FSI 技术在煤矿等具有挑战性的工业环境中进行距离监测备受关注并成为研究热点。研究人员致力于将 FSI 技术融入煤矿智能化巷道监测系统, 以提高监测系统性能和增强煤矿生产安全性。据 FSI 技术的测距原理推断, 当检测目标振动时, 会导致拍频信号出现多普勒频移, 增加光程波动幅度^[10-11]。这种振动对高精度工业测量至关重要, 因此需要可靠的补偿措施来校正振动引起的误差^[12-13]。为解决振动带来的测量挑战, 研究人员开发了基于双激光器的 FSI 测距系统, 通过反向的频率调谐抵消振动对干涉信号的影响, 提高测距准确性。选择适当的条纹数量和调频范围, 结合卡尔曼滤波模型, 可实现对目标距离的精确测量, 并解析微小振动。然而, 在实际应用中, 需注意振动频率受调制速率影响, 并要求高信噪比以保证测量准确性^[14]。

随着激光自混合干涉测振技术快速发展且精确度达到 4 nm 以内^[15-16], 本文提出了一种新的 FSI 测距误差补偿技术。该技术利用激光自混合干涉测振准确确定目标的振动状态, 并修正测距误差。该技术无需对激光器的控制性能进行复杂的重新配

收稿日期: 2024-01-25; 责任编辑: 盛男。

作者简介: 沈秋彦(1980—), 男, 河北保定人, 高级工程师, 现从事煤矿机电设备管理工作, E-mail: 28838953@qq.com。

置,适用于广泛的测试范围。另外,该技术所需的光路相对简单,可满足煤矿应用场景对于测距精度的高要求。

1 基本原理

激光自混合干涉测振是一种基于激光干涉效应的测振技术,它利用激光器的自混合干涉效应,通过分析激光器中反射回来的部分光信号,来获取目标物体的振动信息。利用激光自混合干涉测振方法对 FSI 测距误差进行补偿的光路如图 1 所示。激光经过光隔离器后,10%的能量被引导至辅助干涉仪,通过光电探测器获得参考信号。而剩余 90%的光能

量则通过 25 : 75 比例的分光耦合器,分离成用于测试的光和本振光。测试光通过光学组件处理后发射出去,在被测物体表面反射后与本振光在光纤中混合,形成干涉信号。平衡探测器区域产生拍频信号以进行测量^[17]。该光路使被测目标表面反射回来的光与原发光束在激光器内部产生自混合干涉效应。通过在激光器中增加光电探测器 2,可以测量干涉信号。测振干涉仪的组件包括单频激光器、波分复用器、可调衰减器和准直器。该设计旨在通过测量干涉信号来准确确定目标振动状态,从而有效补偿 FSI 测距误差,具有简单、实用等特点,适用于工业场景的实际应用需求。

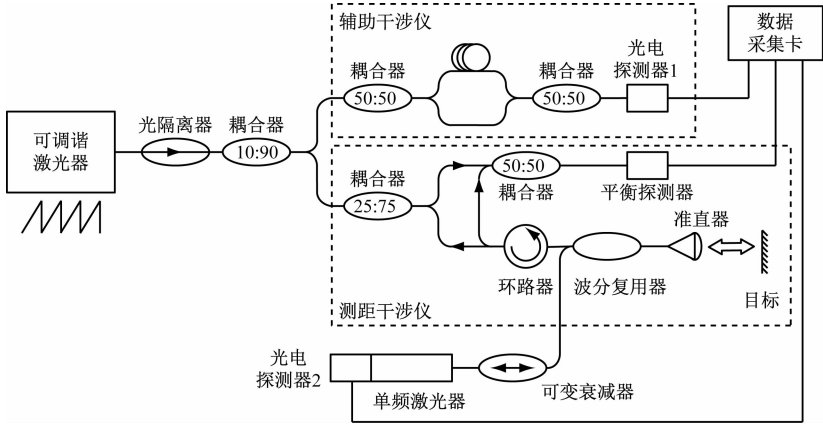


图 1 FSI 测距方案

以线性方式控制激光器频率的表达式如下：

$$v(t) = v_0 + \omega t \quad 0 < t < T \tag{1}$$

式中： v_0 为可调谐激光器的初期频率； ω 为对激光器频率进行调制的速度， $\omega = B/T$ ， B 为激光器调制带宽， T 为调制周期； t 为时间。

对于振动目标，构建以下测距干涉信号：

$$I(t) = A_M \cos(2\pi\tau_m t + 2\pi a \Delta\tau_m(t)t + 2\pi v_0 \tau_m + 2\pi v_0 \Delta\tau_m(t)) \tag{2}$$

式中： A_M 为干涉信号振动幅度； τ_m 为待测距离时延； $\Delta\tau_m(t)$ 为振动引起的时延差异性。

式(2)的第 1 项中存在绝对距离参数，第 2 项取值很小，可将其忽略，第 3 项属于一个恒定常数，第 4 项属于振动过程产生的多普勒项。

相位的变化量为

$$\Delta\varphi_m(t) = 2\pi\tau_m t + 2\pi v_0 \Delta\tau_m(t) \tag{3}$$

对于激光自混合模式的干涉测振光路，设置以下光电探测器信号能进行重新匹配，可以满足较大区间的测试要求。

$$P = P_0(1 + m\cos(\varphi_F(t))) \tag{4}$$

式中： P_0 为在激光器没有光反馈情况下的光功率； m 为光强系数； $\varphi_F(t)$ 为在光反馈条件下的相位。

2 仿真分析

激光器频率调制的非线性计算如下：

$$v(t) = v + \omega t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \quad 0 < t < T \tag{5}$$

式中： β_2 为二次调频系数； β_3 为三次调频系数。

文献[18]标定被测试目标呈现简谐振动状态，激光器频率达到 60 Hz，振幅为 5 μm ，中心波长为 1 550 nm，扫描带宽为 30 GHz，扫描速率为 900 GHz/s，二次调频系数为 1.8×10^{11} 。

振动测量仿真结果如图 2 所示。图 2(a)中，虚线表示在仿真程序中设置的振动位移，实线表示通过相位解卷方法计算出的振动位移，结果显示实际位移跟设定参数之间呈相同的变化规律。图 2(b)表示幅值的变化偏差，通过相位解卷方法解算得到振动幅度，可控制偏差达 1.5 nm 以内。幅值偏差表现出波动变化特征，这是由于以相位解卷方法进行振动状态测试导致。逐渐提高振动位移后，形成了更大频率的幅值偏差。

补偿前后的相位信号如图 3 所示，可看出此时相位和采样点数量表现为线性变化的规律。根据式(3)可以推断，从理论层面分析可知光电探测器干涉信号表现为余弦变化特征，目标没有发生振动的情况下，形成了集中分布的频谱能量，目标产生振动的

情况下将会形成较大展宽的信号频谱。对图 3 中的相位信号进行余弦转换,再对其频谱测试,经过补偿处理后可以对信号频谱展宽起到显著的抑制作用。

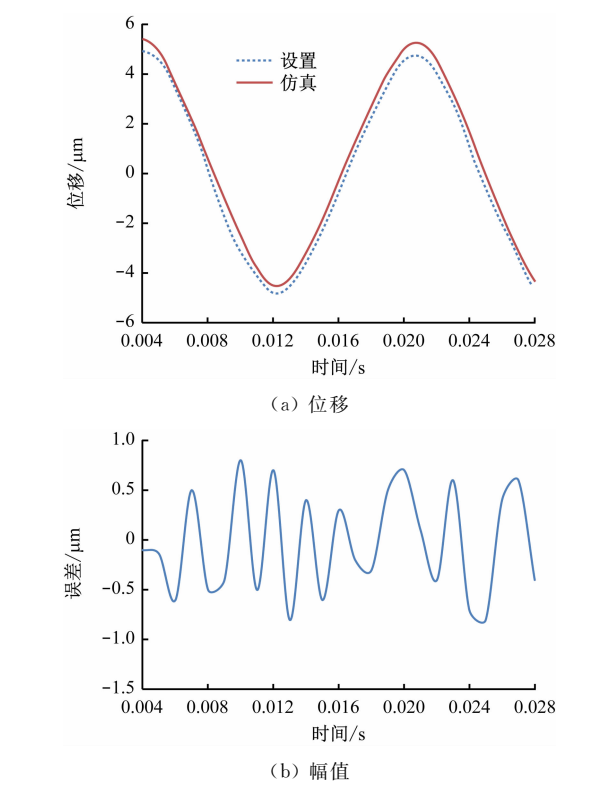


图 2 振动测量仿真结果

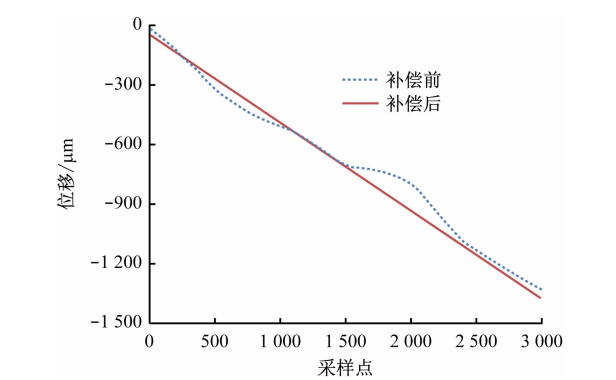


图 3 相位信号仿真结果

在目标中加入 60 Hz 而振幅存在差异的正弦信号,得到振幅与测距偏差,见表 1。控制振幅为 5 μm ,同时调整待测距离,得到偏差数据,见表 2。通过仿真测试可知,可将振幅控制在 10 μm 以内,再通过相位解卷方法测定振动位移,形成 1.1 nm 的幅值偏差,同时获得 2.96 μm 的测距偏差,也可对其实现良好补偿的效果;保持恒定的振幅时,对待测距离进行调整的过程中,测距偏差几乎不发生改变,可明显发现在不同距离下形成的测距偏差基本一致。

3 实验分析

实际测试过程中,可调谐激光器并不能完成理

表 1 不同振幅下偏差仿真结果

振幅/ μm	位移/ m	振幅偏差/ nm	测距偏差/ μm
2	1	1.06	1.89
4		1.13	1.23
6		1.42	0.72
8		1.36	-1.10
10		1.65	-2.96

表 2 不同距离下偏差仿真结果

振幅/ μm	位移/ m	振幅偏差/ nm	测距偏差/ μm
5	2	1.28	-1.28
	4	1.36	-1.63
	6	1.41	-0.96
	8	1.32	-1.06
	10	1.39	-1.18

想线扫频的效果。为了能够对调频状态进行非线性校正,需在系统内加入一套辅助干涉设备,通过频率采样的方式对调频非线性进行校正^[19-20]。分别对 3 路信号进行采集,将采样时钟设置在参考信号峰谷值点处,完成多普勒校正后再对信号重新实施采样,可以计算出 2 个相邻采样点参考信号之间的相位差等于 π 。通过线性最小二乘拟合方法来确定目标距离。

调制器光程差可达 14.5 m。经信号发生器处理后,形成幅值 100 mA、频率 30 Hz 的锯齿波信号,获得 30 GHz 左右的调频带宽。为了模拟振动,对扬声器施加 250 mV、60 Hz 的正弦信号。单频激光器采用恒流驱动,电流固定在 50 mA。依次对 3 路信号数据进行采集,如图 4 所示。

通过分析自混合干涉信号可发现,线宽展宽系数为 6,估计反馈强度为 4.2。按照相位解卷方法测定相位变化,结果如图 5(a)所示。在扬声器两端设定 250 mV 电压的情况下,经过 10 次测试得到的均值波长为 5 890 nm。按照图 4(c)中的参考信号,对经过相位补偿处理前后的测距信号依次采样,得到的结果如图 5(b)、图 5(c)所示。经对比发现完成补偿后的信号形成了优异的相位线性度,同时限制了恢复余弦信号频谱展宽。

根据最小二乘拟合方法,获得 2 组信号斜率及其距离。未经过补偿的信号距离标准差为 2 744 μm ,经过补偿后的距离标准差为 35 μm 。目标未出现振动的情况下,对测距相位信号实施重采样再计算得到距离。为扬声器两端设置 60 Hz 而电压存在差异的正弦信号,提高电压后扬声器形成了更大振幅,针对各振幅分别进行测试得到标准差结果,见表 3。

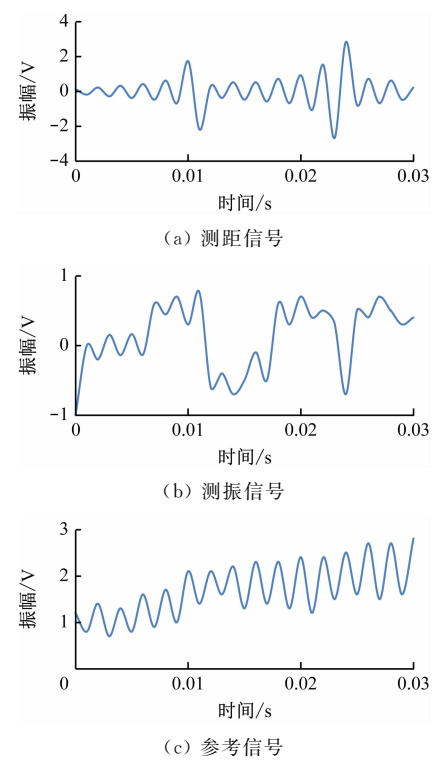


图 4 目标振动采集信号

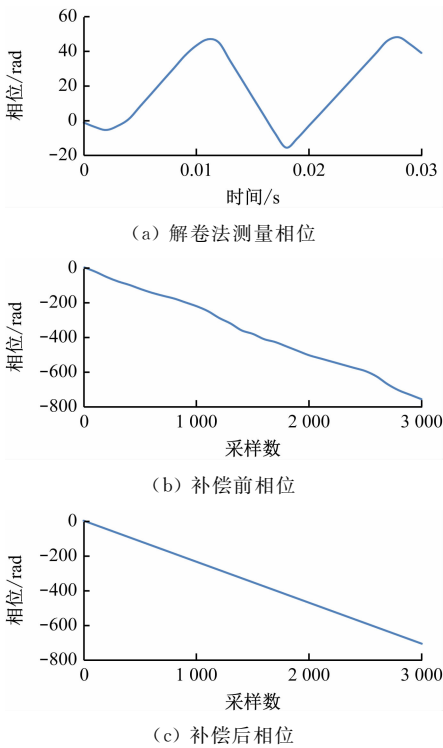


图 5 信号相位

对振动目标进行测试发现,对测距误差起到了理想补偿效果。

4 结论

1) 仿真结果表明,实际位移跟设定参数之间呈现同样的变化规律,幅值偏差表现出波动变化特征。对相位信号进行余弦转换,再对其频谱测试,经过补偿处理后可对信号频谱展宽起到显著的抑制作用。

表 3 不同电压下测量结果

电压/mV	振幅/m	标准差/ 10^3 nm	
		补偿前	补偿后
0	—	22.1	—
100	2 274.5	2 056.3	25.3
150	3 392.5	2 283.1	42.4
200	4 679.2	2 576.2	33.2
250	5 892.3	2 743.8	31.5
300	7 104.5	3 295.8	22.4

2) 实验结果表明,补偿后的信号形成了良好的相位线性度,有效避免了振动对信号频谱的展宽,实现了测距精度的显著提升。

参考文献:

[1] 王国法,杜毅博,任怀伟,等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践[J]. 煤炭学报,2020,45(6):1909-1924.

[2] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G[J]. 工矿自动化, 2020,46(8):1-7.

[3] 张蓄金,乌岚. 多传感器信息融合技术在煤自燃安全预警系统中的应用[J]. 煤炭技术,2022,41(6): 156-158.

[4] 连会青,杨艺,杨松霖,等. 基于微震监测技术的煤矿顶板水害预测[J]. 煤矿安全,2023,54(5):49-55.

[5] 董毅,谢玮霖,冯宇祥,等. 延迟自外差锁相控制的激光线性扫频技术及其应用[J]. 光学学报,2021, 41(13):30-38.

[6] 王悦,于水,王苏健,等. 微震监测技术在煤矿底板突水预警中的应用[J]. 煤炭科学技术,2018,46(8): 68-73.

[7] 陆龙钊,张大鹏,曾厚财,等. 基于短环形腔制备高速扫频光源的研究[J]. 光学学报,2020,40(24): 112-119.

[8] DENG Zhongwen, LIU Zhigang, JIA Xingyu, et al. Dynamic cascade-model-based frequency-scanning interferometry for real-time and rapid absolute optical ranging[J]. Optics Express. 2019, 27(15): 21929-21945.

[9] 邹峰,郑天雄,张官扬,等. 基于 AOM 声光调制器线性扫频测距研究[J]. 应用激光,2020,40(6):1132-1137.

[10] 苏成志,王承运,刘响,等. 机器人标定系统自适应控制器研究[J]. 机械设计与制造,2020(3): 277-280,284.

[11] 高旭龙,宗光华,于靖军. 基于激光视觉的胶型跟随检测系统的研究[J]. 机械设计与制造,2019(9): 168-171.

5 结语

针对现有研究煤和矸石分选速度较慢,煤矸石结构层易造成破坏,容易生成更多的杂质的问题,提出了 TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术。通过对 TDS 智能干选机的组成与运行模式研究,用低能 X 射线测定煤和矸石的质量衰减系数,并利用 PID 调整分选系统,降低扰动,完成分选智能控制。通过实验,证明所提技术能够使 TDS 智能干选系统控制分选效果更佳,保证煤和矸石准确划分,减少精煤中的杂质。

参考文献:

[1] 王玉佳,方伟,徐涛,等. 基于遗传模糊树的海空对抗无人机智能决策模型[J]. 系统工程与电子技术, 2022,44(12):3756-3765.

[2] 王雪纯,陈红坤,陈磊. 提升区域综合能源系统运行灵活性的多主体互动决策模型[J]. 电工技术学报, 2021,36(11):2207-2219.

[3] 唐文虎,申悦晴,钱瞳,等. 双碳目标下城市楼宇群能源系统灵活性量化分析与调控技术研究现状与展望[J]. 高电压技术,2022,48(9):3423-3436.

[4] 李岩,陈夏,李巍巍,等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(13):4749-4760.

[5] 王锐,桂志国,刘祎,等. 基于 X 射线和结构光相机的煤矸石分拣方法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2021,42(2):123-128,134.

[6] 陈佳鑫,赵国贞,程伟,等. 基于动态称量和图像识别

技术的井下煤矸石智能分选装置研发[J]. 矿业研究与开发,2023,43(2):178-183.

[7] 康红普,冯彦军,张震,等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术,2023,51(1):31-44.

[8] 任帅,王方田,李少涛,等. 深井超高水充填工作面小煤柱稳定性规律及控制技术[J]. 煤矿安全,2021,52(6):243-249,254.

[9] 阿伦,齐虎春,白艳姝. 基于遗传算法的 SVM 决策模型在选煤监控系统中的应用[J]. 煤炭技术,2022,41(9):243-245.

[10] 陈彪,卢兆林,代伟,等. 基于轻量化 HPG-YOLOX-S 模型的煤矸石图像精准识别[J]. 工矿自动化,2022,48(11):33-38.

[11] 谭云亮,范德源,刘学生,等. 煤矿深部超大断面硐室群围岩连锁失稳控制研究进展[J]. 煤炭学报,2022,47(1):180-199.

[12] 杨修宇,孙健舒,刘玉娇,等. 气网管存与电转气协调运行提升电-气互联系统灵活性的调度策略[J]. 电网技术,2023,47(1):236-247.

[13] 王闰泽,郎利影,席思星. 用于智能煤矸分选机器人的改进型 VGG 网络煤矸识别模型[J]. 煤炭技术,2022,41(1):237-241.

[14] 张吉雄,屠世浩,曹亦俊,等. 煤矿井下煤矸智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2021,50(3):417-430.

[15] 王云刚,康军保,杜炳成,等. 金能煤矿软岩掘进巷道变形破坏特征及控制技术研究[J]. 科学技术与工程, 2023,23(12):5340-5347.

(上接第 164 页)

[12] SLOTWINSKI A, REZK M. Compact fiber optic geometry for a counter-chirp FMCW coherent laser radar:US7139446[P]. 2006-11-21.

[13] TAO Long, LIU Zhigang, ZHANG Weibo, et al. Frequency-scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter[J]. Optics Letters,2014,39(24):6997-7000.

[14] 赵潇,杨海马,强佳,等. 基于卡尔曼滤波的高精度相干激光测距方法[J]. 光学学报,2020,40(14):115-123.

[15] SHANG Yue, LIN Jiarui, YANG Linghui, et al. Precision improvement in frequency scanning interferometry based on suppression of the magnification effect[J]. Optics Express,2020,28(4):5822-5834.

[16] 柴晓博,吴腾飞,殷璞芙. 基于激光自混合测振的 FSI 测距误差补偿方法[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(11):206-212.

[17] 李雅婷,张福民,潘浩,等. 调频连续波激光测距系统的振动补偿仿真研究[J]. 中国激光,2019,46(1):166-173.

[18] 张广娜,叶会英,薛琦,等. 基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2008,45(3):66-70.

[19] 徐赵龙,解研,王迎新,等. 太赫兹量子级联激光器自混合干涉测量技术研究[J]. 光学学报,2020,40(11):154-161.

[20] 姚艳南,张福民,曲兴华,等. 基于硬件的等光频间隔采样及频谱分析方法[J]. 光学学报,2016,36(12):113-122.