

## 面向结构健康监测的小型多普勒雷达系统设计\*

马伟<sup>1,2</sup>, 崔海涛<sup>1</sup>, 朱晓曼<sup>1</sup>, 胡长征<sup>1</sup>, 胡伟波<sup>1,2</sup>

(1.南开大学 电子信息与光学工程学院, 天津 300350;

2.南开大学深圳研究院, 广东 深圳 518063)

**摘要:** 直流电压的校准是直接下变频多普勒雷达准确探测振动的难点之一。介绍了一种用于结构健康监测的直流耦合多普勒雷达传感系统, 具有自适应 DC 校准和实时分析预警功能。通过对基带输出信号进行监测, 自适应调整反馈电压, 有效放大有用信号, 避免输出饱和; 基于 LabVIEW 软件, 通过搭建拓展的 DACM 算法架构和预警模块, 实现了信号的实时解调和分析处理。实验结果表明, 该传感器系统的功耗小于 10 W, 能够进行毫米级振动的探测, 探测范围可达 200 m。为了检验系统的分析预警功能, 人为引入损伤异常数据, 仿真结果显示假阳性发生概率低于 1%, 未发现假阴性情况的发生。

**关键词:** 多普勒雷达; 直流耦合; 振动监测; 结构健康监测; 拓展的 DACM 算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222756

中文引用格式: 马伟, 崔海涛, 朱晓曼, 等. 面向结构健康监测的小型多普勒雷达系统设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 150-155.

英文引用格式: Ma Wei, Cui Haitao, Zhu Xiaoman, et al. A miniature Doppler radar system design for structural health monitoring[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 150-155.

## A miniature Doppler radar system design for structural health monitoring

Ma Wei<sup>1,2</sup>, Cui Haitao<sup>1</sup>, Zhu Xiaoman<sup>1</sup>, Hu Changzheng<sup>1</sup>, Hu Weiibo<sup>1,2</sup>

(1.College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2.Nankai University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518063, China)

**Abstract:** One challenge of direct-conversion Doppler radar for accuracy vibration motion detection is the DC voltage presented in the receiving channel. This paper introduces a DC coupled Doppler radar system for structural health monitoring with adaptive DC calibration and real-time analysis and warning functions. By monitoring the baseband output signals, the feedback voltage can be adjusted adaptively to effectively amplify the useful signal and avoid saturation. Based on the LabVIEW, an extended DACM algorithm and an early warning module are built for real-time signal demodulation, analysis and early warning functions. Experimental results show that the total power consumption of the sensor system is less than 10 W. It realizes an excellent resolution of millimeter-scale vibration and the detection range is up to 200 m. Furthermore, the analysis and warning functions are also verified by introducing artificial abnormal damage data. The results show that the probability of false positive was less than 1%, and no false negative was found.

**Key words:** Doppler radar; DC coupling; vibration detection; structure health monitoring; extended DACM algorithm

## 0 引言

作为建筑物和机械结构健康监测系统的重要组成部分, 振动监测是获取目标健康状态的一种有效方法, 被广泛应用于故障诊断和事故预警<sup>[1-3]</sup>。然而, 由于振动本身的复杂性和测量环境的多样性, 精确的振动采集并不容易。最常见的监测方法有 GPS 测量、光纤传感器测量和振动计测量等<sup>[4-6]</sup>。尽管振动测量技术已经取得了很大的进步, 但一些具体应用在成本、精度、探测精度等方面提出了更高的要求<sup>[7]</sup>。近年来, 由于半导体技术和先进处理算法的发展, 非接触式雷达传感器受到了学术

界和工业界的极大关注<sup>[8-9]</sup>。该方法具有精度高、鲁棒性强等优点, 是各种振动测量环境中最具吸引力的方法之一。大量新架构和信号提取方法被发表, 其中许多已经成功集成到单片集成电路中, 实现了低成本、高性能的便携式监测系统<sup>[10-11]</sup>。

在各类雷达中, 多普勒雷达是最常用的振动探测雷达之一。与超宽带雷达、调频连续波雷达、脉冲雷达等雷达相比<sup>[12-14]</sup>, 直接下变频多普勒雷达具有结构简单、精度高、功耗低等优点。然而, 在实际应用中直接下变频多普勒雷达结构应用并不广泛, I、Q 支路不匹配以及直流

\* 基金项目: 深圳市科技创新委员会资助项目 (JCYJ20180508161601937)

失调是制约其性能的两个主要因素<sup>[15-16]</sup>。相比于前者,直流失调问题往往更加复杂<sup>[17]</sup>。一方面,由于振动信号比较微弱,基带放大器需要提供较大的增益,较大的直流电平会直接导致放大器输出饱和;另一方面,为了实现振动信号的准确解调,减小信号失真,往往需要保留信号中有用的直流成分。

本文设计了一种基于直流耦合的微型多普勒雷达结构健康监测系统,实现了毫米级振动的有效解调、分析处理以及实时预警。该系统具有自适应的直流校准功能,在保留直流信号的同时,能有效避免放大器输出饱和。基于 LabVIEW 搭建拓展的微分和交叉相乘算法(DACM)解调算法平台,该系统能够对信号进行解调分析处理,并实时预警。

## 1 一般的系统结构

如图 1 所示,雷达前端包括接收通路和发射通路,主要模块有频率源(VCO)、混频器(Mixer)、低噪声放大器(LNA)、功率放大器(PA)以及收发天线。基带电路由低通滤波器(LPF)、可变增益放大器(VGA)以及数据采集器(DAQ)和数据处理器(PC)组成。

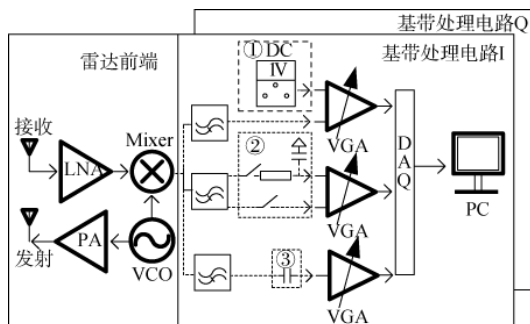


图 1 一般结构示意图

假设发射天线发射的信号表示为:

$$T(t) = \cos(2\pi f_c t + \varphi(t)) \quad (1)$$

其中,  $f_c$  表示发射信号的频率,  $\varphi(t)$  是相位噪声。那么解调后的零中频信号可以表示为:

$$B_{I, ideal} = \sin\left(\frac{4\pi x(t)}{\lambda} + \Delta\varphi(t) + \theta\right) \quad (2)$$

$$B_{Q, ideal} = \cos\left(\frac{4\pi x(t)}{\lambda} + \Delta\varphi(t) + \theta\right) \quad (3)$$

其中  $x(t)$  为物体的位置,  $\Delta\varphi(t)$  是残留相噪,  $\theta$  是由于反射距离和反射界面引入的相位变化。

然而,由于杂波反射干扰和本振泄露等非理想硬件因素,实际的中频信号中往往存在直流偏移:

$$B_{I, real} = B_{I, ideal} + V_{I, offset} \quad (4)$$

$$B_{Q, real} = B_{Q, ideal} + V_{Q, offset} \quad (5)$$

其中  $V_{I, offset}$  和  $V_{Q, offset}$  分别为 I 和 Q 通道的直流偏移。而且,根据频谱分析,理想的中频信号往往也会存在直流分量<sup>[18]</sup>。这两个直流成分会极大缩减基带放大器的输出动

态范围,甚至使输出链路饱和,因此需要进行校准处理。

目前直流校准的方法主要分为两类,即直流耦合法(如图 1 中的①和②所示)和交流耦合法(如图 1 中的③所示)。直流耦合的方法虽然能够有效保留直流电平,但是无法区分有用和无用信号,并且校准不具有自适应性。方法①需要进行手动调节,这在大规模应用时并不实用;方法②通过低通滤波的方式,对中频信号的直流成分进行采样存储,虽然不需要手动调节,但校准往往是一次性的,由于截止频率较低,需要很长的稳定时间。相比于直流耦合,交流耦合虽然能有效地隔离直流电压,避免放大器输出饱和,但是损失了有用的直流信息,并且会导致有用信号的恶化。

## 2 改进的系统

### 2.1 硬件架构

如图 2 所示,硬件系统主要由雷达前端和基带处理两部分组成。雷达前端能够实现 5.8 GHz 射频信号的发射以及反射信号的接收;基带处理电路具有滤波、放大、直流校准以及量化等功能。

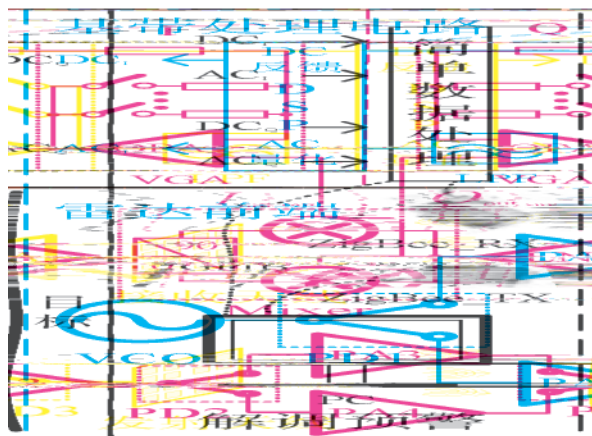


图 2 改进的系统结构示意图

与一般结构类似,在雷达前端中,VCO 的输出经过功率分配器(PD1)后被等分为两份,一份经过功率放大器(PA1)放大后作为本振信号输入混频器(Mixer)中;另一份经过多个功率放大器(PA2, PA3, PA4)放大后发射。低噪声放大器(LNA)能够提供较大的增益,有效放大接收到的微弱的回波信号。混频器具有正交输出,能够有效避免直接下变频接收机中的空点问题。此外,为了实现远距离的探测范围,本系统设计的发射天线和接收天线均为 16 单元的贴片阵列天线,如图 3(a)所示。图 3(b)为该天线的 E 平面和 H 平面增益方向图,最大增益可达 13 dB。

在基带处理电路中,可变增益放大器(VGA)对混频器输出信号进行放大,能够提供 0 ~ 66 dB 的放大倍数,适应不同距离的探测需求。低通滤波器(LPF)能够滤除高频分量,抑制干扰。数字信号处理模块(DSP)具



图 3 16 单元的贴片阵列天线示意图及 EH 平面增益方向图

有量化、AC/DC 分离、数模转换等功能,通过监测并自适应输出一个直流电压,反馈到可变增益放大器的输入端,避免放大器(OPA)输出饱和。

对于数据的分析处理,采集的振动信号既可经过 GPIB 线直接传递,也可通过无线蓝牙模块进行数据传输。在 PC 端,接收到的数据将被作为 LabVIEW 的原始输入数据,进行进一步的分析和处理。

## 2.2 软件架构

三角解调是一种可选的解调方案,但其 $(-\pi/2, \pi/2)$ 的值域范围极大限制了其应用范围。微分和交叉相乘算法(DACM)通过对三角函数求导,虽然打破了值域限制,但对高频噪声十分敏感。拓展的 DACM 算法通过对原有 DACM 进行优化,能够有效地对噪声形成抑制<sup>[19]</sup>。三种解调算法的数字域表达式如下:

三角解调:

$$p(n) = \arctan\left(\frac{B_1[n]}{B_Q[n]}\right) \quad (6)$$

DACM 解调:

$$w(n) = \frac{(B_1[n] - B_1[n-1])B_Q[n] - (B_Q[n] - B_Q[n-1])B_1[n]}{B_1[n]^2 + B_Q[n]^2} \quad (7)$$

拓展的 DACM 解调:

$$p(n) = \sum_{k=2}^n \frac{(B_1[k] - B_1[k-1])B_Q[k] - (B_Q[k] - B_Q[k-1])B_1[k]}{B_1[k]^2 + B_Q[k]^2} \quad (8)$$

对于信号的解调、分析和处理,软件架构主要包含三部分,即拓展的 DACM 算法、存储及预警。图 4 为拓展的 DACM 算法基于 LabVIEW 的实现框图。通过对输入数据进行相应运算,拓展的 DACM 算法能够实时显示目标的运动状态。图 5 为存储模块,在指定存储文件的路径后,数据能够自动存储到相应的文本之中。图 6 为预警模块,当列车经过时,频谱上会出现明显的非零频率尖峰,此时若振动幅度或振动频率超过安全阈值,预警指示灯和蜂鸣器则会被触发,且触发次数也会显示。

## 2.3 测量校准

鉴于中频信号中的直流成分包含了目标相关的有用直流信号以及由硬件缺陷和杂波反射造成的直流偏移,为了进一步提高解调精度,需要保留有用的直流信

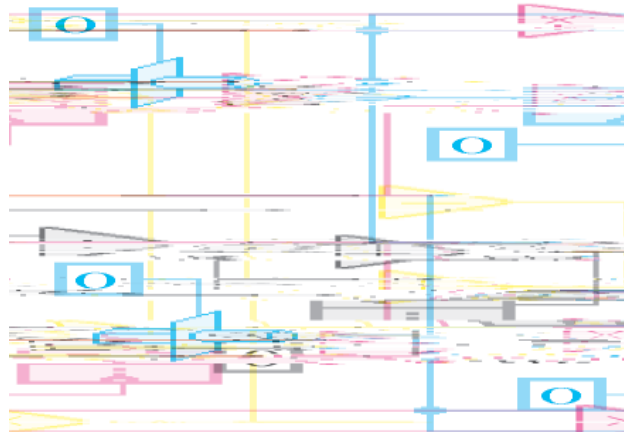


图 4 基于 LabVIEW 拓展的 DACM 算法实现



图 5 基于 LabVIEW 的数据存储模块



图 6 基于 LabVIEW 的预警模块



号,去除无用的直流偏移。图7显示了直流偏移电压对解调波形的影响。实际振动波形为幅度为0.01 m、频率为2 Hz的正弦波,接收信号中 $\Delta\varphi(t)+\theta$ 引入的初始相位为 $\pi/4$ 。如图7(a)所示,当IQ通道的偏移电压均为0时,拓展的DACM解调波形与实际振动波形相吻合,而三角解调由于值域的限制,产生了不连续的波形输出。如图7(b)所示,当IQ通道的偏移电压为0.2 V时,三角解调波形与拓展DACM波形均产生了一定程度的失真。

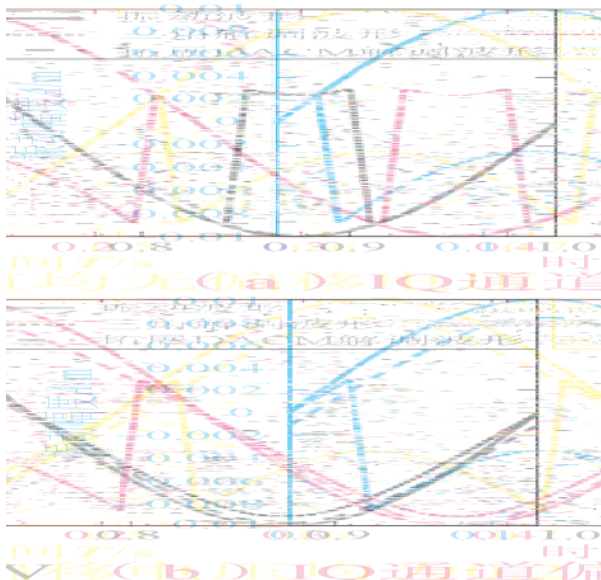


图7 振动波形、三角解调波形和DACM解调波形

因此,在测量前对偏移电压进行预估是必要的。如图8所示,当目标不在雷达探测范围时,混频器输出的直流偏移电压为 $V_{\text{offset}}$ ;当目标出现在探测范围时,混频器的输出信号为 $B+V_{\text{offset}}$ 。通过将测量结果减去偏移电压 $V_{\text{offset}}$ ,可以很大程度上降低无用DC电压对于信号解调的影响。

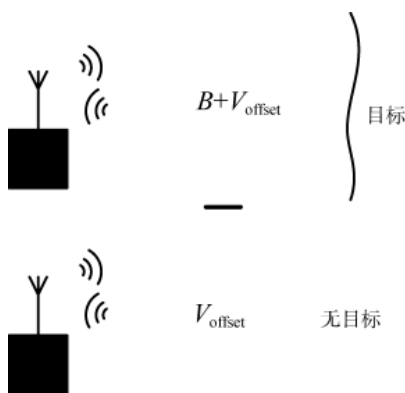


图8 直流偏移校准示意图

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 桥梁振动的测试

图9(a)所示为实际高铁桥梁测试图,雷达传感器由一个移动电源供电,面向桥梁底部,用于探

测高铁列车经过时桥梁的振动情况。发射天线辐射近2 W的电磁能量后,经过桥梁反射,由接收天线进行接收。图9(b)所示为本文所设计的雷达传感器实物图,包括射频前端收发机和微带天线两部分。前端收发机电路是基于四层的RO4350B板设计优化的,尺寸为5.3 cm×7.0 cm。板上集成了不同的电源管理芯片,能够为VCO、PA、LNA等模块提供稳定的电压,整体功耗小于10 W。微带天线是基于HFSS设计优化的,板材为FR4,尺寸为10.6 cm×11.1 cm。

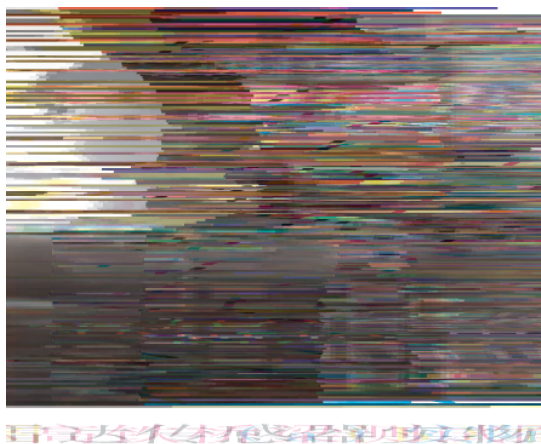


图9 实际桥梁振动测试

图10(a)所示为记录的IQ通道测量数据,该部分数据经过了简单的直流校准。当列车经过时,一方面,列车的重量使桥梁产生了形变,输出的DC发生了跳变;另一方面,运动的列车相当于高铁桥梁的激励源,使其产生了振动。图10(b)为振动数据的星座图,IQ通道满足较好的正交关系。图11(a)是基于拓展的DACM算法解调后的振动波形,振动幅度为2.2 mm。图11(b)为对振动波形的频谱分析,结果显示桥梁的振动频率为3.12 Hz。

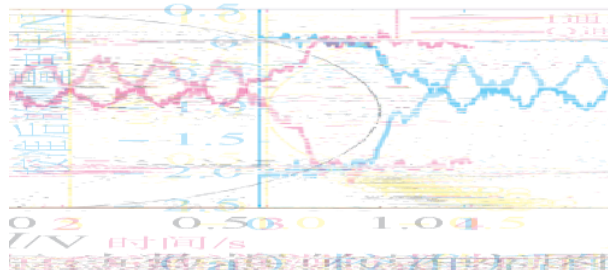


图10 IQ通道测量数据

#### 3.2 探测距离的测试

为了进一步测试系统的监测性能,本实验通过分别探测不同距离目标的运动状态,验证雷达系统的最大探测距离,实测如图12所示。当目标匀速运动至

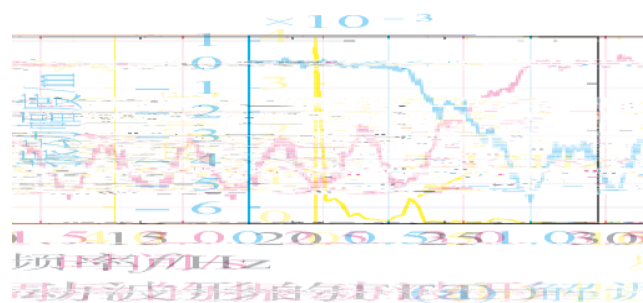


图 11 基于拓展的 DNAM 算法解调后的振动波形

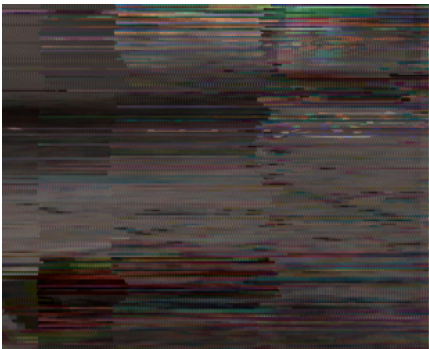


图 12 探测距离的测试图

50 m、100 m、150 m 和 200 m 处时，相关测试结果如图 13 所示，探测到目标运动的速度介于 1.1 m/s 至 1.5 m/s 之间。

3.3 拓展的 DACM 算法预警测试

为了验证预警的准确性，本实验人为引入了三种异常数据，包括幅度异常频率正常、频率异常幅度正常、幅度和频率同时异常。三种情况的总样本数均为 200 份，每种异常数据为 20 份，检测结果如表 1 所示。

表 1 引入异常后的识别准确率 (%)

	幅度	频率	幅度和频率
TP	10	10	10
TN	89	89.5	90
FP	1	0.5	0
FN	0	0	0

其中 TP (true positive) 表示危险有预警的情况；TN (true negative) 表示安全无预警的情况；FP (false positive, 假阳性) 表示安全有预警的情况；FN (false negative, 假阴性) 表示危险无预警的情况。实验结果表明，幅度和频率同时异常时的预警准确率高于仅有幅度异常或频率异常的情况。此外，假阳性发生的概率低于 1%，均无假阴性情况的发生。

4 结论

本文针对结构健康监测，设计了一个直流耦合的多普勒雷达传感器系统。该系统具有自适应的 DC 校准功能，能够有效地避免基带链路出现饱和现象。通过 GPIB 或无线蓝牙模块，采集到的振动数据可以实时传输到 PC 端进行分析处理。在 PC 上，基于 LabVIEW 搭建分析处理程序主要包括拓展 DACM 算法模块、存储模块和预警模块，可分别对数据进行解调、存储和预警。实验结果显示，该系统功耗低于 10 W，探测精度可达毫米级别，探测距离可达 200 m。通过人为引入损伤异常数据，假阳性发生概率低于 1%，未发现假阴性情况。本设计具有良好的性能，在建筑结构健康监测中拥有广阔的应用前景。

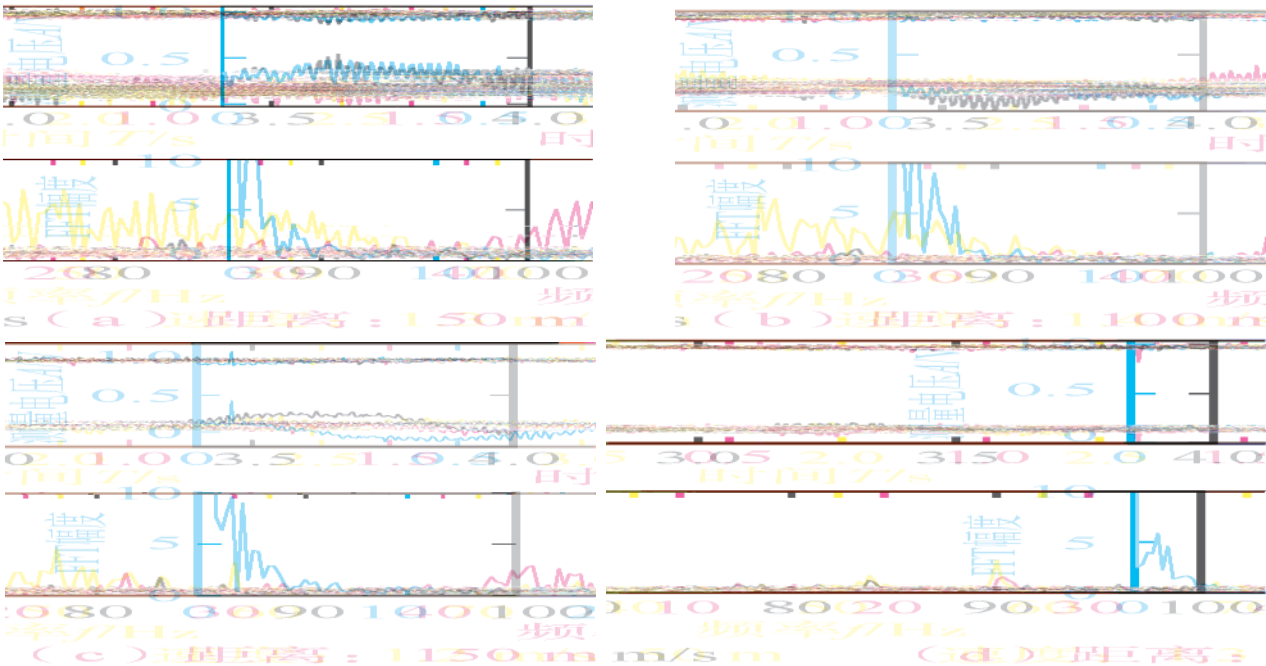


图 13 不同距离处测试时域图和 FFT 结果

## 参考文献

- [1] 周立明. 基于车桥耦合振动的桥梁快速测试与诊断[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [2] 丁华平. 基于健康监测系统的多塔连跨特大型悬索桥结构动态特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [3] ZONZINI F, MALATESTA M M, BOGOMOLOV D, et al. Vibration-based SHM with upscalable and low-cost sensor networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7990–7998.
- [4] 黄声享, 刘星, 杨永波, 等. 利用 GPS 测定大型桥梁动态特性的试验及结果[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004(3): 198–200.
- [5] NISHINO Z T, CHEN K, GUPTA N. Power modulation-based optical sensor for high-sensitivity vibration measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(7): 2153–2158.
- [6] KIM D, SONG H, KHALIL H, et al. 3-D vibration measurement using a single laser scanning vibrometer by moving to three different locations [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(8): 2028–2033.
- [7] HOSHYARMANESH H, ABBASI A, MOEIN P, et al. Design and implementation of an accurate, portable, and time-efficient impedance-based transceiver for structural health monitoring [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(6): 2809–2814.
- [8] 刘炳文, 何密. 非接触式医疗监测雷达研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(5): 107–111.
- [9] 彭小松. 面向大型结构形变监测的有源异频收发式微波雷达系统[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [10] GU C, LI C, LIN J, et al. Instrument-based noncontact doppler radar vital sign detection system using heterodyne digital quadrature demodulation architecture [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(6): 1580–1588.
- [11] KAO T. J, YAN Y, SHEN T M, et al. Design and Analysis of a 60-GHz CMOS Doppler micro-radar system-in-package for vital-sign and vibration detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(4): 1649–1659.
- [12] 李芊宇, 高同强, 卢新, 等. 一种用于生命体征监测的带宽可重构脉冲超宽带雷达发射机电路[J]. 电子设计工程, 2022, 30(4): 11–16.
- [13] XIONG Y, PENG Z, XING G, et al. Accurate and Robust Displacement Measurement for FMCW Radar Vibration Monitoring [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1131–1139.
- [14] 何少华. 宽带单脉冲雷达接收系统设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [15] 王红举. 窄带零中频接收机 IQ 不平衡校准技术研究[J]. 现代导航, 2018, 9(2): 114–118.
- [16] 孔良. 零中频接收机中直流偏移问题与技术解决方案[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(3): 23–24.
- [17] PARK B, BORIC-LOBECKE O, LUBECKE V M. Arc-tangent demodulation with DC offset compensation in quadrature doppler radar receiver systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(5): 1073–1079.
- [18] LI C, XIAO Y, LIN J. Experiment and spectral analysis of a low-power Ka-Band heartbeat detector measuring from four sides of a human body[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(12): 4464–4471.
- [19] WANG J, WANG X, CHEN L, et al. Noncontact distance and amplitude-independent vibration measurement based on an extended DACM algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(1): 145–153.

(收稿日期: 2022-03-17)

## 作者简介:

马伟(1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 模拟/射频电路与系统。

崔海涛(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 数模混合电路与系统。

胡伟波(1982-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 模/数和数/模转换器、无线感知芯片和系统实现、第三代半导体、生物芯片, E-mail: weibohu@nankai.edu.cn。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所