基于毫米波感知的形变及振动多点同步测量理论与方法

熊玉勇¹, 李松旭¹, 吴高阳¹, 彭志科^{1*}, 马蕾², 孟光¹

1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 上海卫星装备研究所, 上海 200240

*E-mail: z.peng@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-11; 接受日期: 2021-02-26; 网络版发表日期: 2021-05-28

国家自然科学基金(批准号: 51905341, 11632011)和中国博士后科学基金(编号: 2019M651488)资助项目

摘要 虽然加速度计、视觉和激光传感等技术已在形变及振动测量中得到广泛而成熟的应用, 但大型工程结构的多点同步高精度形变及振动测量依然是挑战难题. 利用毫米波线性调频连续波雷达, 发展了一种非接触式形变及振动测量新方法, 建立了基于毫米波感知的多点同步形变及振动测量理论与方法. 从多目标感知的基带信号模型出发, 系统阐述了毫米波多点测振原理和振动信息反演提取方法, 开发了原型测试系统, 搭建了测试实验平台, 与激光位移传感器开展了对比测试研究, 验证了毫米波多点测振原理与方法的准确性. 基于毫米波测振原型系统, 对我国某型航天装备的细长铰接柔性杆结构开展了多点同步振动测量和模态辨识试验, 并开展了户外大型桥梁结构的动态响应监测研究. 结果显示, 基于毫米波感知的振动测量方法能够便捷而准确地提取多目标的振动位移时域信息, 为大型工程结构的力学性能测试与健康监测等提供一种新的非接触式多点同步形变及振动测量方法与途径.

关键词 毫米波感知, 大型工程结构, 形变及振动测量, 线性调频连续波雷达, 多点同步测量

1 引言

针对工程中存在的大量形变及振动测量需求, 人们发展了多种成熟的测量方法, 包括以加速度传感器与应变片为代表的接触式振动测量方法^[1~3], 和以激光多普勒测振仪和视觉测振系统为代表的非接触式振动测量方法^[4~7]. 这些传统方法已在工程振动测试中得到了广泛应用, 满足了绝大部分的工程振动测试需求. 然而, 这些经典测振方法都存在一些固有的局限性. 例如

加速传感器一般低频响应较差, 难以实现较高精度的形变监测, 且由于自身附加质量, 易影响轻质结构的振动特性监测. 激光多普勒测振仪常应用于单目标或单测点的微幅高频振动测量, 对测试环境要求较高, 设备体积及功耗较大, 成本较高. 视觉测振技术为实现较高精度的形变与振动测量, 需复杂的标定与图像流数据处理, 计算量大, 且易受光线及成像质量影响.

传统振动测试方法除了自身的局限性, 对于大型工程结构的形变及振动测量需求, 它们亦面临一系列

引用格式: 熊玉勇, 李松旭, 吴高阳, 等. 基于毫米波感知的形变及振动多点同步测量理论与方法. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 998–1010
Xiong Y Y, Li S X, Wu G Y, et al. Theory and method of multi-point synchronous deformation and vibration measurement based on millimeter-wave sensing (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 998–1010, doi: 10.1360/SST-2020-0489

难以突破的挑战. 首先是测点数庞大, 一般需大量的仪器设备准备和线路排布, 费时费力, 例如对于虎门大桥等大型桥梁的振动测试, 前期测试准备工作通常需要数周时间, 数量庞大的测点又会衍生出多通道同步问题. 其次是超低频多尺度振动, 大型结构特别是大型柔性结构的一阶固有频率一般很低, 通常低于 0.5 Hz, 同时在不同的载荷工况下, 振动幅值变化范围很宽, 从微米级到米级^[8]. 再次是对环境的适应性, 大型工程结构一般都在户外, 很难构建一个理想的测试环境, 例如对于视觉测振系统, 在室内可以构建一个理想的光照场景, 但在户外构建一个大范围的理想光照场景非常困难, 难以实现全天时全天候测试. 最后是测试效率与成本, 由于大型工程结构尺寸跨度可达百米, 甚至千米量级, 对分布式多点形变及振动测量的效率和成本具有较高的要求. 总而言之, 大型结构的大尺寸、超低频、大振幅范围的振动特性对振动测量技术提出了全新的挑战, 现有技术在大范围、多尺度、高精度、高可靠性、低成本及良好的恶劣环境适应性方面存在较大的局限性, 迫切需要探索先进的形变及振动测量新技术与新方法.

连续波微波雷达通过发射特定频率的电磁波信号并接收回波信号, 基于基带信号处理实现目标探测, 主要通过时差计算与多普勒频移实现目标距离和速度信息的监测. 近些年来, 由于具有高灵敏、大探测范围、低功耗和可穿透性等优点, 基于微波雷达的微运动感知研究受到了众多学者的广泛关注^[9~11]. 美国海军研究实验室的Chen等人^[12]通过单频连续波(continuous wave, CW)多普勒雷达感知目标的微动特征, 并利用时频分析的方法提取微多普勒特征来进行目标识别与状态监测. 美国斯坦福大学的Droitcour等人^[13]使用下变频正交接收机结构CW微波雷达解决人体呼吸与心跳频率监测中的测量零点问题. 美国夏威夷大学的Park等人^[14]提出结合直流偏移补偿和反正切解调的信号处理算法, 解决CW雷达存在的直流偏移问题, 提取人体心肺活动信息. Singh等人^[15]利用盲源分离和无源射频标签的方法实现基于CW雷达的运动目标分辨和杂波噪声的抑制. 胡巍^[16]、张华等人^[17]开展了基于CW多普勒雷达的呼吸和心跳信号分离与提取方法的研究. 由于CW多普勒雷达没有距离感知能力, 美国麻省理工学院Adib等人^[18]利用调频连续波(frequency-modulated continuous wave, FMCW)雷达实现了准静

态下人体生命体征的监测, 能够非接触式地追踪呼吸和心跳频率随时间的变化. Scherr等人^[19]提出一种基于优化线性调频Z变换(chirp Z-transform, CZT)的FMCW微波测量方法, 通过雷达基带信号频率和相位信息的估计, 实现高精度的距离测量. 意大利IDS公司和佛罗伦萨大学的研究人员通过步进频率连续波(stepped-frequency continuous wave, SFCW)雷达和差分干涉测量方法进行桥梁、建筑等大型土木工程结构的形变监测研究^[20]. 上述研究推动了微波微动感知技术的发展, 但主要为近距离的单目标人体生命体征监测的生物医疗应用研究, 进行微动频率的估计, 难以实现高精度的幅值测量和微振动测量, 且存在多目标感知能力受限、多路径效应及杂波与噪声干扰抑制等问题, 目前在结构形变与振动测量方面的研究亦较少. 此外, 针对大型工程结构的高精度形变与振动监测, 常需要同步监测多个测点, 需解决多测点精确分辨与振动信息反演、邻近目标耦合干扰和杂波干扰抑制等难题.

近年来, 作者团队针对基于微波感知的人体生命体征监测提出了参数化解调算法和微分增强方法, 克服了呼吸引起的谐波干扰抑制难题^[21,22]. 通过搭建微波感知系统, 着重从信号处理角度提出了基于线性调频连续波(linear frequency-modulated continuous wave, LFM CW)雷达的精确距离感知^[23]、微动信息提取^[24]和静态杂波干扰抑制方法^[25], 实现了高精度的非接触式微动感知. 本文在前期研究的基础上, 针对大型结构在大范围、多尺度、高精度及高可靠性形变与振动监测方面存在的局限性与挑战难题, 提出基于毫米波感知的多点同步形变及振动测量新方法与技术. 通过建立毫米波多点测振原理和振动信息反演提取方法实现大型结构的非接触式多点同步形变及振动监测, 并基于模拟振动测试、航天柔性杆结构的模态测试和户外大型桥梁结构的动态响应监测实验研究, 验证了理论与方法的可行性与准确性, 为大型工程结构的力学性能测试与健康监测等提供一种全新的形变及振动测量方法与途径.

2 毫米波形变与振动测量原理及方法

2.1 毫米波多点同步形变及振动测量原理

针对CW多普勒雷达在振动测量中存在的相位解调精度低、抗噪性能差和无法实现多目标振动测量等

问题, 发展基于LFMCW雷达的毫米波多点同步形变与振动测量原理及方法. 由于形变测量可等效为振动位移幅值的测量, 为表述方便, 下文将形变与振动测量统一称为振动测量. 常规地, LFMCW雷达发射线性频率调制的电磁波信号并接收待测目标反射的回波信号, 通过计算回波信号的延迟时间实现距离信息测量. 然而, 振动测量常是微幅运动, 通过测量振动引起的距离变化常要求非常大的带宽. 因此, 基于LFMCW雷达的振动测量是基于振动会对电磁波信号产生非线性调制的基本原理, 通过跨越多扫频周期的干涉相位估计与振动信息反演实现振动位移时域信息的提取. 如图1(a)所示, 采用锯齿波频率调制的LFMCW雷达进行非接触式振动感知, 使用复数形式进行简化描述, 以单目标感知为例, 每个扫频周期发射信号和接收信号的数学模型可定义为

$$S_T(t) = A(t)\exp[j(2\pi f_0 t + \pi K t^2 + \phi_0)], \quad (1)$$

$$S_R(t) = B(t) \times \exp\left\{j\left[2\pi f_0 \left(t - 2\frac{R_0 + x(t)}{c}\right) + \pi K \left(t - 2\frac{R_0 + x(t)}{c}\right)^2 + \phi_0\right]\right\}, \quad (2)$$

其中,

$$K = \frac{B}{T}, \quad (3)$$

式中 $A(t)$ 和 $B(t)$ 分别为发射和接收信号的幅值, f_0 为发射信号初始频率, K 为调制斜率, ϕ_0 为初始相位, t 为时间, c 为电磁波传播速度, B 为信号带宽, T 为单个扫频周期时间, R_0 为雷达到目标之间的初始距离, $x(t)$ 为目标物体的振动位移. 毫米波雷达信号在传输过程中会发生衰减和损耗, 接收天线接收到的回波信号通过低噪声放大器获得高增益的回波信号, 然后与本振信号通过混频、低通滤波得到基带信号为

$$S_B(t) = S_T(t) \times S_R^*(t) = C(t)\exp\left\{j\left[2\pi f_0 \frac{2(R_0 + x(t))}{c} + 2\pi K t \frac{2(R_0 + x(t))}{c} - \pi K \left[\frac{2(R_0 + x(t))}{c}\right]^2\right]\right\}, \quad (4)$$

其中,

$$\left[\frac{2(R_0 + x(t))}{c}\right]^2 \ll t \frac{2(R_0 + x(t))}{c}, \quad (5)$$

平方项可忽略不计, 基带差拍信号可简化表示为

$$S_B(t) \approx C(t)\exp\left\{j\left[\frac{4\pi K R_0}{c}t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi(f_0 + Kt)}{c}x(t)\right]\right\}, \quad (6)$$

其中, $C(t)$ 为基带信号的幅值. 由于扫频周期往往较短, 单个扫频周期时间 T 内振动位移的变化量非常小, 因此可假定在一个扫频周期内物体的位移 $x(t)$ 为常数, 则第 i 个扫频周期时间内, 基带差拍信号可表示为

$$\begin{aligned} S_B(iT + t) &= C_i \exp\left\{j\left[\frac{4\pi K R_0}{c}t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \left(\frac{4\pi K t}{c} + \frac{4\pi f_0}{c}\right)x(iT)\right]\right\} \\ &\approx C_i \exp\left\{j\left[\frac{4\pi K R_0}{c}t + \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + \frac{4\pi f_c}{c}x(iT)\right]\right\} \\ &= C_i \exp[j(2\pi f_B t + \varphi_i)], \end{aligned} \quad (7)$$

其中,

$$f_B = \frac{2BR_0}{cT}, \quad (8)$$

$$\varphi_i = \frac{4\pi f_0 R_0 + 4\pi f_c x(iT)}{c} = \frac{4\pi R_0}{\lambda_0} + \frac{4\pi x(iT)}{\lambda_c}, \quad (9)$$

式中, C_i 为第 i 个扫频周期基带差拍信号的幅值, f_c 为中心载波频率, λ_0 和 λ_c 分别为初始和中心载波频率对应的波长, f_B 为差拍频率, φ_i 和 $x(iT)$ 分别为第 i 个扫频周期时间内差拍信号的初始相位和目标振动位移时间序列.

通过上述信号模型表示和公式推导, 可以看出基带信号的干涉相位信息与目标物体的振动位移时域信息成线性关系. 因此, 通过基带信号的干涉相位演变追踪可以得到相邻扫频周期振动位移时域信息的变化量为

$$\Delta x(t) = \frac{\lambda_c}{4\pi} \Delta \varphi(t) / \cos \phi, \quad (10)$$

其中, $\Delta \varphi(t)$ 和 $\Delta x(t)$ 分别为相邻扫频周期基带信号相位信息的变化量和振动位移的变化量, ϕ 为目标振动方向与雷达波束视线的夹角, 进而由位移变化量反演目标振动位移时域信息. 从上式可以看到, 在相同的信噪比及其他条件下, 毫米波测振系统的载波频率越高, 波长越短, 振动位移的测量精度越高.

在建立上述毫米波振动测量原理的基础上, 可进

图 1 毫米波振动测量原理示意图. (a) 锯齿波调制LFMCW雷达发射与接收信号瞬时频率示意图; (b) 多扫频周期基带差拍信号及其距离像示意图; (c) 多点同步振动位移提取示意图

Figure 1 Schematic diagram of millimeter wave vibration measurement principle. (a) Instantaneous frequency of transmitting and receiving signals of a LFM radar with sawtooth modulation; (b) baseband signal with multiple sweep cycles and its range profile; (c) multi-point simultaneous vibration displacement measurement.

一步扩展到多目标同步振动测量原理与方法. 当毫米波雷达视场范围内存在多个目标时, 不同目标反射的回波信号均会被雷达接收, 则雷达接收到的多目标分量混叠耦合, 因此, 第 i 个扫频周期雷达基带差拍信号可简化表示为

$$S_B(iT+t) = \sum_{m=1}^M A_{m,i}(t) \exp[j(2\pi f_{m,i}t + \varphi_{m,i})] \quad (11)$$

其中, M 为雷达视场范围内可探测的目标分量个数, $A_{m,i}(t)$, $f_{m,i}$, $\varphi_{m,i}$ 分别为第 m 个目标分量在第 i 个扫频周期

的幅值、差拍频率和相位. 如图1(b)和(c)所示, 通过对基带信号进行频谱分析, 根据公式(8)进行多目标距离的计算和分辨, 并针对相邻目标分量进行信号解耦分解, 最后对各目标分量开展跨越多扫频周期的相位演变追踪, 从而同步提取多目标的振动位移时域信息.

2.2 形变及振动信息提取方法

基于上述建立的毫米波多点同步振动测量原理, 为实现有效的多目标振动位移测量, 我们提出了相应的振动信息提取方法. 图2展示了基于毫米波感知的

形变与振动测量的处理步骤和提取方法. 首先, 我们可以获取毫米波雷达感知的多扫频周期基带I/Q信号, 然后对基带信号进行频谱分析, 根据幅频谱的峰值分布得到距离像信息和目标的定位信息(如图1(b)所示). 通过峰值搜索和辨别, 可以从距离像信息中判断是否存在多个被测目标. 由于LFMCW雷达的距离分辨率受限于发射带宽, 即距离分辨率 $\Delta R=c/2B$, 因此针对多目标测量场景, 邻近目标分量会产生耦合干扰, 严重影响多目标振动测量的精度和可靠性. 针对该问题, 提出本征非线性调频分量分解的邻近分量解耦分解方法, 通过粗略估计分量的差拍频率后, 基于傅里叶级数拟合的频率偏差补偿修正方法抑制邻近分量的耦合干扰.

以I通道信号为例, 其信号模型可以重写为

$$\begin{aligned} s(iT+t) &= \sum_{m=1}^M A_{m,i} \cos(2\pi f_{m,i} t + \theta_{m,i}) \\ &= \sum_{m=1}^M \left\{ A_{m,i} \cos[2\pi(f_{m,i} - \bar{f}_{m,i})t + \theta_{m,i}] \cos(2\pi \bar{f}_{m,i} t) \right. \\ &\quad \left. - A_{m,i} \sin[2\pi(f_{m,i} - \bar{f}_{m,i})t + \theta_{m,i}] \sin(2\pi \bar{f}_{m,i} t) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $A_{m,i}$, $f_{m,i}$ 和 $\theta_{m,i}$ 分别为第*i*个扫频周期第*m*个分量信号的幅值、频率和相位. 由于振动运动的调制,

$f_{m,i} = \int_0^{iT} f_m(\tau) d\tau$ 常为非线性时变频率, $\bar{f}_{m,i}$ 为该分量的粗略估计频率, 可通过时频脊线峰值搜索和定位获得. 针对上式由于频率估计偏差产生的时变幅值包络, 利用傅里叶级数逼近拟合为

$$A_{m,i} \cos[2\pi(f_{m,i} - \bar{f}_{m,i})t + \theta_{m,i}] = a_0^{(i)} + \sum_{l=1}^L [a_l^{(i)} \cos(2\pi l F_0 t) + \bar{a}_l^{(i)} \sin(2\pi l F_0 t)], \quad (13)$$

$$-A_{m,i} \sin[2\pi(f_{m,i} - \bar{f}_{m,i})t + \theta_{m,i}] = b_0^{(i)} + \sum_{l=1}^L [b_l^{(i)} \cos(2\pi l F_0 t) + \bar{b}_l^{(i)} \sin(2\pi l F_0 t)], \quad (14)$$

其中 L 和 F_0 分别为傅里叶级数拟合的阶数和基频, 可用于控制信号分解的带宽. 模型参数 $\{a_0^{(i)}, \dots, a_L^{(i)}, \bar{a}_1^{(i)}, \dots, \bar{a}_L^{(i)}\}$ 和 $\{b_0^{(i)}, \dots, b_L^{(i)}, \bar{b}_1^{(i)}, \dots, \bar{b}_L^{(i)}\}$ 可通过多分量联合的最小二乘优化估计得到, 并最终基于估计的模型参数重构目标分量信号.

通过上述方法得到单独的各目标分量后, 需估计跨越多扫频周期的干涉相位演变信息. 为准确提取每个扫频周期的目标分量初始相位信息, 提出近似极大似然估计的相位估计算法, 则第*m*个分量信号第*i*个扫频周期的初始相位可估计为

$$\hat{\varphi}_{m,i} = \arg \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_m(iT + nT_s) \exp(-j2\pi \hat{f}_m nT_s) \right], \quad (15)$$

其中, $\arg[\cdot]$ 为取复数相位运算, $S_m(iT + nT_s)$ 为第*m*个分量在第*i*个扫频周期时间内的离散信号, T_s 为采样时间间隔, N 为信号的总离散点数, $\hat{f}_m$ 为第*m*个分量的差拍频率估计值. 需要指出的是, 由于取复数相位运算的取值范围限定在 $[-\pi, \pi]$, 相邻扫频周期的相位演变可能会发生异常跳变, 因此需对估计的相位演变时间序列进行相位解卷绕处理. 最终, 基于针对每个目标估计的干涉相位演变时间序列, 通过公式(10)反演计算各目标的振动位移时域信息.

3 实验研究与分析

3.1 毫米波测振方法验证与评估

为了验证基于毫米波感知的振动测量方法的有效

图2 基于毫米波感知的形变与振动测量方法流程图

Figure 2 Flow chart of deformation and vibration measurement method based on millimeter wave sensing.

性和准确性, 搭建如图3(a)所示的毫米波振动测量原型系统和如图3(b)所示的模拟振动测试实验平台, 开展实验室环境多点同步振动测试实验研究. 毫米波测振原型系统, 主要包括毫米波雷达模块、信号采集模块、控制器和上位机. 其中LFMCW毫米波雷达模块的发射功率为12 dBm, 载波频段为77 GHz, 采用锯齿波调制, 主要由调制信号源、压控振荡器、功分器、功率放大器、低噪声放大器、正交移相器、混频器、低通滤波器、信号调理电路和收发天线组成. 在压控振荡器的作用下产生线性频率调制的毫米波信号, 经功分器分为两路, 一路通过功率放大器由发射天线发出, 另一路作为本振信号, 通过混频器与接收信号混频处理, 得到中频基带I/Q信号. 然后由信号采集模块传输给上位机, 经一系列信号处理算法提取目标的振动位移时域信息. 模拟振动测试实验平台主要由两个可软件定义振动运动的电动滑台及其控制器组成, 用于提供单点及多点振动运动模拟与测试验证.

基于构建的毫米波测振系统和振动测试实验平台, 首先进行单目标振动测试以验证毫米波测振系统的精度. 这里将金属滑块作为被测目标安装在伺服滑台B上, 并通过LabView编程软件控制滑台振动. 金属滑块随着滑台做振幅约为2 mm, 频率为0.5 Hz的准正弦振动运动. 将雷达前端固定安装在三脚架上, 发射

天线正对金属滑块, 距离约为2 m, 毫米波测振系统的调制频率设置为250 Hz, 单次采样时间设定为30 s. 同时为了验证毫米波测振结果的准确性, 我们使用激光位移传感器(LK-G80, 基恩士)作为对照, 以提供目标振动位移时域信息的参考值. 根据激光位移传感器的安装使用要求, 将其安装在滑块后方约80 mm位置处. 此外, 为进一步验证毫米波测振系统的性能, 通过Lab-View编程软件改变滑台振动类型, 使其做频率分别为0.2、0.6和1 Hz的复合正弦振动运动, 并利用毫米波测振系统和激光位移传感器同步测量金属滑块的振动位移.

图4展示了模拟振动测试实验的对比结果. 从图4(a)可以看出, 毫米波雷达测试结果与激光位移传感器测试结果吻合得非常好, 验证了毫米波测振的高精度. 同时需要注意的是, 滑台振动运动并不是严格的正弦曲线, 这是因为利用模拟量信号伺服控制滑台往返运动中, 滚珠丝杠的滚珠与丝杠之间存在一定的轴向间隙, 当丝杠反向转动时会产生回空误差, 从而使得正弦曲线的波峰和波谷变得较为平坦, 实验测试结果也较好地反映了这一现象. 图4(b)给出了激光位移传感器和毫米波雷达测得振动位移信号的频谱图, 可看出两者完全重合, 准正弦振动的金属滑块的振动频率为0.5 Hz, 与LabView控制滑台振动的设定值一致. 图4(c)

图3 毫米波振动测量系统示意图(a)和模拟振动测试实验平台(b)

Figure 3 Schematic diagram of millimeter-wave vibration measurement system (a) and experimental platform of simulated vibration testing (b).

图4 模拟振动测试实验结果对比。(a) 准正弦振动位移测试结果; (b) 准正弦振动位移幅频谱; (c) 复合正弦振动位移测试结果; (d) 复合正弦振动位移幅频谱

Figure 4 Comparison of the experimental results of simulated vibration tests. (a) Results of quasi-sinusoidal vibration displacement test; (b) amplitude spectrum of quasi-sinusoidal vibration displacement signal; (c) results of compound sine vibration displacement test; (d) amplitude spectrum of compound sine vibration displacement signal.

和(d)给出了复合正弦振动测试的振动位移时域和频域的波形曲线, 通过与激光位移传感器测试结果对比, 亦得到了高度一致的测量结果, 测量得到的复合正弦振动的频率分量分别为0.2、0.6和1 Hz, 该结果表明, 毫米波振动测量方法能够实现高精度的振动位移和频率的测量, 且不受振动类型的限制。

为进一步验证毫米波多点同步振动测量方法的可行性与准确性, 如图3(b)所示, 利用安装在两个滑台上的两个金属板作为振动目标, 以模拟多点同步振动测试场景, 其中两滑块间隔约为30 cm, 通过LabView编程分别控制两个滑台以不同的振动形式做往返运动。图5给出了测试结果对比图, 可以看出, 通过本文所述的毫米波振动测量方法可以获得高精度的多目标同步振动测量结果。在多点同步测量应用场景中, 相较于需要多台激光位移传感器设备和严格的安装要求, 单个

毫米波振动测量系统能够便捷可靠地满足工程实际中的多点同步振动测试需求和振动位移测量精度要求。

3.2 航天柔性杆结构模态测试

基于毫米波振动测量系统与方法开展航天柔性杆结构的模态测试实验研究, 如图6所示, 为我国某型航天装备的柔性杆结构示意图, 是由多根直径不同的轻质杆铰接而成, 其一端固定安装在气浮平台上, 伸杆部分同时由3个气浮装置支撑使其悬浮于空中, 以模拟在轨零重力运行状态。由于该柔性杆结构具有尺寸较大、基频低、微幅与大幅的多尺度振动等特点, 接触式传感器易影响结构的特性且线路繁杂, 而视觉和激光测振技术在大尺寸、多尺度测量方面受限明显, 且需要布置较好的环境条件, 现有形变及振动测量方法具有较大的局限性。根据柔性杆铰接特点和测试需

图 5 两目标同步振动位移测量结果. (a) 目标A; (b) 目标B

Figure 5 Results of synchronous vibration displacement measurement of two vibrating objects. (a) Target A; (b) target B.

图 6 航天柔性杆结构示意图

Figure 6 Schematic diagram of the space flexible rod structure.

求, 基于毫米波振动测量系统, 选择4个测点进行多点同步测量, 4个测点分别距离伸杆固定端130, 220, 323和440 cm. 在试验中, 将LFMCW毫米波雷达模块固定安装在三脚架上, 调整三脚架位置和俯仰角度使雷达前端发射的波束照射柔性杆测点部位, 通过毫米波测振方法根据距离像信息进行多测点分辨与定位, 并同步提取各测点的振动响应信息.

为了验证毫米波测振系统对柔性杆结构的振动测试效果, 开展多工况振动激励试验, 测试不同工况下柔性杆结构的振动响应并提取各测点的振动位移时域波形. 首先, 开展初始位移扰动情况下的自由衰减振动测试, 分别在柔性杆中间位置和距离伸杆末端约1.5 m处施加一定的初始位移并释放, 同时毫米波测振系统进行雷达基带信号采集与处理, 通过所建立的毫米波多点同步振动测量理论与方法, 反演提取每个测点的振动位移时域信息, 并利用快速傅里叶变换辨识柔性杆结构的固有频率信息; 然后, 利用锤击法进行模态测试, 用力锤在距离末端约1.5 m的位置锤击伸杆, 检测在力锤作用下各测点的振动位移时域信息并辨识模态参数.

如图7所示, 在给定初始位移扰动的情况下, 利用

毫米波振动测量方法得到柔性杆结构自由衰减振动的振动位移时域信息和固有频率信息. 图7(a)为在伸杆中间位置施加手动扰动激励后的测量结果, 可以看出距离固定端越远的测点的振动幅值越大, 且各测点的振动幅值逐渐衰减, 运动趋势相同. 从图7(b)的幅频谱图中可以明显看出柔性杆结构的衰减振动频率约为0.37 Hz. 图7(c)和(d)分别为在伸杆近末端约1.5 m处施加扰动后的测量结果, 此时测得伸杆的一阶固有频率为0.39 Hz. 从实验结果可知, 在初始位移扰动激励情况下, 伸杆主要做有阻尼的自由衰减运动, 仅能提取出一阶固有频率, 柔性杆结构的高阶固有频率未被激发.

在柔性杆结构近末端约1.5 m处利用锤击法进行模态测试, 测量结果如图8所示, 伸杆的一阶固有频率约为0.4 Hz, 二阶固有频率约为1.74 Hz. 从4个测点的振动响应时域波形上可以看出, 高阶固有频率虽然被激励起来, 但是衰减非常快, 持续时间约为3 s. 振动能量主要集中在结构基频, 其他阶次频率能量较小. 考虑到该结构为细长铰接的柔性杆件, 以及实验现场气浮性能的非理想性, 如需准确辨识后几阶模态, 需要改善实验条件和激励方式.

图7 初始位移扰动激励下柔性杆振动测试结果. (a)和(b)分别为柔性杆中部扰动激励振动位移时域波形和幅频谱图; (c)和(d)分别为柔性杆近末端1.5 m处扰动激励振动位移时域波形和幅频谱图

Figure 7 Vibration measurement results of the flexible rod structure excited by initial displacement disturbance. (a) and (b) Time-domain waveform and amplitude spectrum of vibration displacement excited in the middle of the flexible rod; (c) and (d) time domain waveform and amplitude spectrum of vibration displacement excited at 1.5 m near the end of the flexible rod.

图8 锤击激励柔性杆振动位移时域波形及其频谱图. (a) 振动位移时域波形; (b) 振动位移频谱图

Figure 8 Time domain waveform and amplitude spectrum of vibration displacement of flexible rod structure excited by hammering. (a) Time domain waveform of vibration displacement signal; (b) amplitude spectrum of vibration displacement signal.

3.3 大型桥梁结构动态响应测试

大型桥梁结构是我国大型基础设施的重要组成部分, 其在服役期间的健康监测与损伤评估具有迫切的

现实需求和重要意义, 然而传统的结构动态响应测量技术在测量性能、成本、效率及全天候全天候监测等方面具有较大的局限性. 为进一步验证毫米波测振理论与方法在大型工程结构动力学性能测试与健康监测

等领域应用的有效性与优势,开展户外大型桥梁结构的多点形变及振动监测实验研究. 如图9(a)所示,为了监测大型铁路桥在列车运行激励下的安全服役性能,我们选取上海松浦大桥进行测试. 松浦大桥铁路桥位于上海市松江区,横跨黄浦江,主跨约为112 m,横向

两个轨道.

图9(b)展示了实际的测试场景,毫米波测振系统布置在岸边,借助激光笔的辅助定位调整毫米波雷达天线朝向被测桥梁结构. 考虑到铁路桥刚性较大,毫米波测振系统的扫频频率设定为200 Hz. 如图9(c)所

图9 大型桥梁结构在列车激励下的动态响应测试. (a) 测试场景; (b) 毫米波测振现场布置图; (c) 距离像图; (d) 多测点形变及振动测量结果图

Figure 9 Dynamic response monitoring of a large bridge structure under train excitation. (a) Field test scenario; (b) photo of the experimental setup; (c) range profile; (d) deformation and vibration measurement results of multiple points.

示, 可以获取桥梁结构各测点的距离像信息, 并辨别处于不同距离的多个测点. 为了方便分析, 我们选择距离分别为19.65, 24.98, 29.63, 37.5和51 m的5个测点, 并同步提取其形变及振动响应时域信息. 如图9(d)所示, 在列车通过的过程中, 各测点均产生了较大的挠性形变, 且变形的趋势顺序和列车加载通过的顺序一致. 其中, 测点2对应于跨中部位, 其形变量最大约为6 mm, 测点5为接近桥墩部位, 其形变量最小约为4 mm. 另外, 可以看出列车运行激励使各测点产生了明显的受迫振动, 持续时间约为5 s. 因此, 基于各测点的形变及振动响应时域信息, 根据现有分析方法, 易推算出列车的重量、速度等信息, 辨识桥梁结构的模态参数, 从而为桥梁结构的动力学性能评估与健康监测提供关键传感数据支撑.

3.4 分析与讨论

基于建立的基于毫米波感知的多点同步形变及振动测量理论与方法, 本小节通过滑台模拟振动测试、某航天柔性杆结构模态测试和户外大型桥梁结构的动态响应监测研究验证了毫米波振动测量方法的可行性、有效性和准确性. 基于毫米波多点测振原理和振动信息提取方法, 通过跨越多扫频周期的干涉相位演变追踪进行振动位移时域信息的反演, 测量精度可达微米量级, 且不受待测目标的振动类型和幅值的限制, 可以实现从微米级到米级振幅的多尺度振动测量. 另外, 通过调节扫频周期, 易实现任意中低频振动的测量, 解决现有技术在太阳能帆板及大跨度桥梁等大型柔性结构的超低频、多尺度形变与振动测量难题. 由于毫米波的感知距离较远, 通过距离像的多目标或多

测点定位与分辨, 并基于振动信息提取方法可实现远距离、大范围多点同步形变与振动测量. 此外, 毫米波感知作为新型传感手段, 具有微型、低功耗和长时间监测等优点, 且由于毫米波不受光照、雨雾天气与粉尘、高低温等环境的影响, 具有优异的恶劣环境适应性, 为复杂环境和工况下的全天时、全天候形变与振动监测提供了新的测试技术和途径. 如表1所示, 相较于现有的振动测量方法, 基于毫米波感知的形变与振动测量方法有望解决大型工程结构在大尺寸大范围(例如>50 m尺寸跨度)、多尺度($\mu\text{m}\sim\text{m}$ 量级)、高精度及高可靠性形变与振动监测方面的挑战难题, 并发展为有别于视觉及激光测振的新型非接触式形变及振动测量技术.

4 结论

针对现有形变及振动测量方法在大型工程结构形变及振动测量中存在的局限性与挑战难题, 本文提出了一种基于毫米波感知的多点同步形变及振动测量新方法与技术原型. 基于LFMCW雷达传感, 建立了毫米波多点同步形变及振动测量理论与方法, 为毫米波测振的工程实际应用奠定了基础. 从多目标振动感知的基带信号模型出发, 系统描述了毫米波形变与振动测量的原理和振动信息反演提取方法, 搭建了滑台模拟振动测试实验平台, 基于开发的毫米波测振原型系统, 与激光位移传感器开展了对比测试实验研究, 验证了毫米波多点测振原理及方法的有效性与准确性. 最后对我国某型航天装备的细长铰接柔性杆结构开展了毫米波多点同步振动测量和模态辨识实验研究, 并开展

表 1 常用的振动测量技术与方法特征对比表

Table 1 Feature comparison table of commonly used vibration measurement technologies and methods

特征	加速度传感器	视觉测振技术	激光多普勒测振技术	毫米波测振技术
形变及位移测量精度	精度低、易受干扰	精度较低、计算量大	精度高	精度高
振动频率与幅值测量范围	低频响应差	低频测量, 微幅和大幅测量受限	大幅测量受限	中低频、多尺度
多点同步测试能力	需针对每个测点布置传感器	多点同步测量	需要扫描同步性较差	多点同步测量
测量结构尺寸范围及条件	组网、线路排布繁杂	较小尺寸, 远距离大视野与测量精度矛盾, 常用于室内测试	较小尺寸, 室内测试	中大型尺寸, 大范围远距离测试, 室内外测试
技术特点及环境适应性	安装组网不便、周期长、成本高	要求光线良好, 恶劣环境适应性差	体积和功耗较大、成本高、环境要求高	微型化、低功耗、优良的恶劣环境适应性

了户外大型桥梁结构的动态响应监测研究, 结果表明, 毫米波测振方法能够便捷而准确地同步提取多目标的振动位移时域信息, 可实现大范围、多尺度、高精度

及高效的多测点同步形变与振动测量, 为军民领域大型工程结构的动力学性能测试与智能运维等提供了一种新的非接触式形变及振动测量方法与途径.

参考文献

- Xie Y, Liu P, Cai G P. Parameter identification of flexible plate based on the acceleration output (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2014, 46: 128–135 [谢永, 刘盼, 蔡国平. 基于加速度信号的柔性板的挠性参数辨识. *力学学报*, 2014, 46: 128–135]
- Hao B, Li C G, Wang H. Application of bonded strain gauge to external engine piping vibrational measurement (in Chinese). *Aeroengine*, 2002, 3: 9–12 [郝兵, 李成刚, 王浩. 胶粘常规应变片在发动机外部管路振动测量中的应用. *航空发动机*, 2002, 3: 9–12]
- Ren L, Jia Z G, Ho M S C, et al. Application of fiber Bragg grating based strain sensor in pipeline vortex-induced vibration measurement. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 1714–1720
- Das S, Saha A. Laser beam position-dependent PSD-based calibrated self-vibration compensated noncontact vibration measurement system. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2019, 68: 3308–3320
- Chen S, Chen G X, Han X J, et al. Development of vision-based displacement test method (in Chinese). *J Vibration Shock*, 2015, 34: 73–78 [陈苏, 陈国兴, 韩晓健, 等. 基于计算机视觉的位移测试方法研究与实现. *振动与冲击*, 2015, 34: 73–78]
- Cuadrado M, Pernas-Sánchez J, Artero-Guerrero J A, et al. Model updating of uncertain parameters of carbon/epoxy composite plates using digital image correlation for full-field vibration measurement. *Measurement*, 2020, 159: 107783
- Zhong J, Zhong S, Zhang Q, et al. Vision-based system for simultaneous monitoring of shaft rotational speed and axial vibration using non-projection composite fringe pattern. *Mech Syst Signal Process*, 2019, 120: 765–776
- Meng G, Zhou X B, Miao J. Mechanical problems in momentous projects of aerospace engineering (in Chinese). *Adv Mech*, 2016, 46: 267–322 [孟光, 周徐斌, 苗军. 航天重大工程中的力学问题. *力学进展*, 2016, 46: 267–322]
- Li C, Lubecke V M, Boric-Lubecke O, et al. A review on recent advances in Doppler radar sensors for noncontact healthcare monitoring. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2013, 61: 2046–2060
- Lien J, Gillian N, Karagozler M E, et al. Soli: Ubiquitous gesture sensing with millimeter wave radar. *ACM Trans Graph*, 2016, 35: 1–19
- Zhang Y. Study on radar characteristics of human fretting (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2009 [张翼. 人体微动雷达特征研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2009]
- Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2006, 42: 2–21
- Droitcour A D, Boric-Lubecke O, Lubecke V M, et al. Range correlation and I/Q performance benefits in single-chip silicon Doppler radars for noncontact cardiopulmonary monitoring. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2004, 52: 838–848
- Park B K, Boric-Lubecke O, Lubecke V M. Arctangent demodulation with DC offset compensation in quadrature Doppler radar receiver systems. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2007, 55: 1073–1079
- Singh A, Lubecke V M. Respiratory monitoring and clutter rejection using a CW Doppler radar with passive RF tags. *IEEE Sens J*, 2012, 12: 558–565
- Hu W. Research on non-contact vital signs detection technology based on Doppler radar (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014 [胡巍. 基于多普勒雷达的非接触式生命体征检测技术研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2014]
- Zhang H, Zhang P F, Xue H J, et al. Non-contact measurement of heartbeat signal via Doppler radar using adaptive filtering (in Chinese). *Chin Medical Equipment J*, 2012, 33: 8–9 [张华, 张鹏飞, 薛慧君, 等. 非接触生物雷达基于自适应滤波的心跳信号检测. *医疗卫生装备*, 2012, 33: 8–9]
- Adib F, Mao H Z, Kabelac Z, et al. Smart homes that monitor breathing and heart rate. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Seoul, 2015. 837–846
- Scherr S, Ayhan S, Fischbach B, et al. An efficient frequency and phase estimation algorithm with CRB performance for FMCW radar applications. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2015, 64: 1868–1875

- 20 Pieraccini M, Fratini M, Parrini F, et al. High-speed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures. *Electron Lett*, 2004, 40: 907–908
- 21 Xiong Y, Chen S, Dong X, et al. Accurate measurement in Doppler radar vital sign detection based on parameterized demodulation. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2017, 65: 4483–4492
- 22 Xiong Y, Peng Z, Gu C, et al. Differential enhancement method for robust and accurate heart rate monitoring via microwave vital sign sensing. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2020, 69: 7108–7118
- 23 Xiong Y, Chen S, Xing G, et al. High-precision frequency estimation for FMCW radar applications based on parameterized de-alternating and modified ICCD. *Meas Sci Technol*, 2018, 29: 075010
- 24 Xiong Y, Peng Z, Xing G, et al. Accurate and robust displacement measurement for FMCW radar vibration monitoring. *IEEE Sens J*, 2018, 18: 1131–1139
- 25 Xiong Y, Chen S, Xing G, et al. Static clutter elimination for frequency-modulated continuous-wave radar displacement measurement based on phasor offset compensation. *Electron Lett*, 2017, 53: 1491–1493

Theory and method of multi-point synchronous deformation and vibration measurement based on millimeter-wave sensing

XIONG YuYong¹, LI SongXu¹, WU GaoYang¹, PENG ZhiKe¹, MA Lei² & MENG Guang¹

¹ State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

² Shanghai Satellite Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China

Although accelerometer-, vision-, and laser-based sensing technologies are widely used in deformation and vibration measurements, the multi-point simultaneous deformation and vibration measurement of large-scale structures with high accuracy remains a challenge. Herein, we developed a novel technology for contactless deformation and vibration measurement using millimeter-wave (mmWave) linear frequency-modulated continuous wave radar, establishing the theory and method for multi-point simultaneous deformation and vibration measurement based on mmWave sensing. The principle of mmWave multi-point vibration measurement and a method of displacement extraction were systematically described using the baseband signal model of multi-target perception. We built a prototype of the proposed mmWave vibration measurement system and a platform for simulated vibration tests. The accuracy of the mmWave multi-point vibration measurement technology was verified and compared with that of laser displacement sensors. Using the prototype system, we conducted experiments on the multi-point synchronous vibration measurement and model identification of the slender hinged flexible rod structure of a certain aerospace equipment in China and then described the dynamic response monitoring of a large bridge structure. Results showed that the deformation and vibration measurement method based on mmWave sensing developed in this work could conveniently and accurately extract the time domain information of multi-target vibration displacements. Our work provides an innovative method and approach for non-contact multi-point synchronous deformation and vibration measurements that could be applied to the mechanical performance test and health monitoring of large structures.

millimeter-wave sensing, large structures, deformation and vibration measurement, linear frequency-modulated continuous wave, multi-point synchronous measurement

doi: [10.1360/SST-2020-0489](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0489)