

室内空间测量定位系统共模误差分析与消除

郭思阳, 林嘉睿*, 杨凌辉, 郑继贵

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 室内空间测量定位系统是一种基于旋转激光扫描的分布式测量定位系统, 激光信号从发射站产生经由物理空间传播并被接收器接收最终形成时间信号的各个阶段中, 均易受到干扰并引入测量误差。引入时间信号误差分析方法及对应滤波技术, 其以激光信号计时原理为基础, 对信号测量过程中可能出现的误差因素进行分析, 并基于时间序列统计理论对时间序列信号进行预处理、时域特征分析以及频域特征分析, 发现时间序列中存在共模噪声并采取主成分分析法对其消除。实验结果表明: 经过主成分分析滤波后, 不同时间序列噪声幅度至少减小 10%。

关键词 测量; 仪器科学与技术; 时间序列分析; 相关性分析; 共模误差; 主成分分析

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.041201

Analysis and Elimination of Common-Mode Errors in Workspace Measurement and Positioning System

Guo Siyang, Lin Jiarui*, Yang Linghui, Zhu Jigui

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The workspace measurement and positioning system is a distributed measurement system based on the rotary laser scanning technology. The laser signals are always disturbed in the processes of generation from the transmitter, transmittance through the physical space and reception by the receiver, and simultaneously the measurement errors are introduced. The time signal error analysis method and the corresponding filtering technology are introduced, and the error components occurred in the measuring process are analyzed based on the laser signal timing principle. Meanwhile, the time series signals are preprocessed as well the time and frequency domain characteristics are analyzed based on the time series statistical theory. The common-mode errors are found existing in the time series data, and the principal component analysis method is adopted to eliminate them. The experimental results show that the noise amplitudes of different time series are reduced by 10% after principal component analysis filtering.

Key words measurement; instrument science and technology; time series analysis; correlation analysis; common-mode error; principal component analysis

OCIS codes 120.3930; 120.2440; 120.4640

1 引言

大尺寸空间精密测量技术是制造工艺环节中关键的质量控制手段, 随着高端、高性能产品的不断出现, 测量对象尺度大幅扩展, 需同时兼顾工程测量的大尺度与传统精密测量的高精度, 同时, 制造数量和产能需求不断增加, 测量效率亟待提高^[1-2], 这对大空间精密测量技术提出了新的要求与挑战。

近年来, 分布式测量系统发展迅速, 以室内空间测量定位系统(wMPS)为典型代表, wMPS将旋转激光扫描角度传感原理与大尺寸空间整体网络式测量理念相结合, 摆脱了以单个测站为核心的测量模式, 通过多个测量单元构建出测量尺度可拓展的大型测量网, 测量网内可实现并行测量, 是一种高精度、高测量效率的三维坐标测量系统^[3]。

wMPS在发展完善中逐渐衍生出一些关键

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-07-18; 录用日期: 2018-09-06

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX04001-081-06)

* E-mail: linjr@tju.edu.cn

技术,包括系统硬件性能的提升^[4-6]、算法的优化与改进^[7-9]及辅助测量配件的开发^[10-11]等,这些技术可以有效提高系统的整体性能。但是,wMPS信号产生于发射基站内部的激光器,经由物理空间中传播并通过接收器光敏单元接收,最后在某一时间、空间等客观条件下以时间序列形式表现出来,系统通过时间脉冲之间相位关系计算发射基站扫描旋转角度,从而实现时间-空间角度变换。激光信号在各个环节中可能受到包括传播路径中的温湿度梯度变化、软硬件固有缺陷等的多种因素影响,这些误差混叠在一起并一同呈现于时间序列中,最终影响测量的可靠性与准确性。

本文以 wMPS 时间信号测量原理为基础,分析时间序列产生过程中可能存在的共模误差,利用时间序列统计理论对 wMPS 的测量信号进行预处理以及时、频域分析,针对不同时间序列中存在的共模噪声进行分析与消除。

2 wMPS 测量误差分析

wMPS 主要包括发射节点与接收节点两个基本单元,发射站由旋转平台与固定基座组成,两台线型激光器成一定角度安装于旋转平台,发射站向外发射同步脉冲信号以及扫描激光信号。发射站的同步脉冲信号与光平面激光信号均被接收器光敏单元接收,通过硬件计时方式对各个信号到达接收器的时间进行记录,继而可以得到发射站坐标系原点到

接收器的水平角 α 与俯仰角 β ,两个发射站的角度测量信息联合解算得到最终接收器坐标。

激光信号计时原理如图 1 所示,当扫描光平面处于初始位置,发射站向全周发射同步脉冲信号,接收器接收到同步脉冲信号并以此作为计时起点,旋转过程中,发射站扫描光平面依次经过接收器光敏单元并形成对应的扫描信号脉冲。由于扫描光信号与同步光信号在接收电路中形成一定宽度的脉冲波形,故定义波形中心时刻作为信号到达时刻,处理器通过同步脉冲信号与扫描光信号的关系计算时间信息 t_1 和 t_2 ,并以此准确得到对应的扫描角 θ ,表达式为

$$t_1 = \frac{t_{1r} + t_{1f}}{2} - \frac{t_{ir} + t_{if}}{2}, \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{t_{2r} + t_{2f}}{2} - \frac{t_{ir} + t_{if}}{2}, \quad (2)$$

$$T = \frac{t_{er} + t_{ef}}{2} - \frac{t_{br} + t_{bf}}{2}, \quad (3)$$

$$\theta_i = \omega \cdot t_i = \frac{2\pi \cdot t_i}{T}, i = 1, 2, \quad (4)$$

式中: t_{br} 、 t_{bf} 为前一时刻同步脉冲信号上升沿、下降沿的中点时刻; t_{er} 、 t_{ef} 为后一时刻同步脉冲信号上升沿、下降沿的中点时刻; t_{1r} 、 t_{1f} 为扫描光 1 脉冲信号上升沿、下降沿的中点时刻; t_{2r} 、 t_{2f} 为扫描光 2 脉冲信号上升沿、下降沿的中点时刻; ω 为发射站角速度; t_i/T 为相对时间信息。

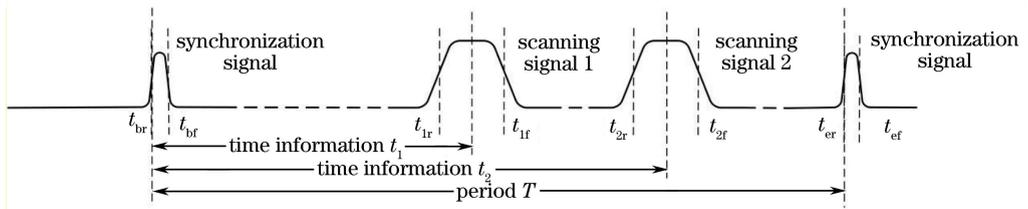


图 1 激光信号计时原理

Fig. 1 Timing principle of laser signals

当电机调速不稳定时,转速的提高或降低将在时间信息中额外增加或减小时间误差 Δt 。同一周期内,当误差 Δt 存在于 $t_{ir} \sim t_{if}$ 时间区间,其将会同时影响 t_1 、 t_2 以及整个扫描周期的测量精度,此时扫描角可以表示为

$$\theta_1 = \frac{2\pi t_1}{T + \Delta t} + \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T + \Delta t}, \quad (5)$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi t_2}{T + \Delta t} + \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T + \Delta t}. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可知,两个扫描角具有相同的

测量误差 $2\pi \cdot \Delta t / (T + \Delta t)$,其中,电机调速不稳引起的时间变化量 Δt 由轴系结构、PID 控制算法、码盘精度等共同决定,为随机变化量。除此之外,wMPS 内部其他因素也会影响计时误差,例如计时器误差与码盘同步脉冲触发误差导致系统时间测量不准确,影响同步光信号提取精度以及扫描光信号提取精度;激光器输出功率稳定性、能量分布会影响光敏单元的识别精度,继而影响激光脉冲信号的提取精度;此外,还包括码盘同步脉冲触发误差、传播路径中环境的变化以及接收器内部电路噪声,同时

影响两个扫描角,产生公共的噪声,并最终体现于时间序列之中。

3 共模噪声分析

理论上,wMPS时间序列中存在由多种因素混叠而成的公共噪声,称之为共模误差,通过对时间序列进行分析可有效验证共模误差的存在,其中具体措施包括时间序列预处理、时域分析以及频域分析等。

3.1 预处理

预处理分析可以消除不符合统计规律的异常数据,修正不平稳的wMPS时间序列,保证时频域分析的准确性。

3.1.1 消除粗差

时间序列中不可避免地存在异常粗差点,可通过时间序列的峰度系数判断整体数据的离散程度,并通过 3σ 准则^[12]进行粗差的消除。峰度系数是一个无量纲指标,可衡量一组数据的离群程度,其定义为

$$K = E \left[\left(\frac{S - \mu}{\sigma} \right)^4 \right] = \frac{E(S - \mu)^4}{[E(S - \mu)^2]^2}, \quad (7)$$

式中: S 为时间序列; μ 与 σ 分别为时间序列的均值与方差; E 为期望算子。

数学上已证明,符合正态分布的数据峰度系数近似等于3,若数据中存在粗差,峰度系数将大于3,此时分布曲线中存在明显的厚尾现象,表明数据中有较大的离群点,即粗差^[13]。时间序列的峰度系数可以作为粗差判断的指标,当序列中存在粗差,可通过 3σ 准则进行消除。

3σ 准则适用于样本数量较多的情况,测量样本数量越多,样本越符合正态分布规律,数据分布在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 以内的概率约为99.74%,其中 μ 、 σ 分别为数据均值与标准差。因此,如果时间序列满足以下条件

$$S - \mu > 3\sigma, \quad (8)$$

则可认为数据含有粗大误差,应予以消除,在实际判断过程中,考虑到中位数的抗差作用,可选择使用序列的中位数替代全部数据的均值。

3.1.2 剔除直流量

时间序列可以认为是真值与噪声的混叠序列,真值一般为序列中的直流分量,占据大部分能量,而噪声为交流分量。为了后续更好地对噪声进行处理与分析,需要对时间序列内直流分量进行剔除;同时,接收器在空间中可能会因为蠕变等因素出现一定程度的运动趋势,继而导致时间序列不平稳。因

此,在消除数据粗差后,需要在原始时间序列中消除直流趋势项以获得残差时间序列,一般情况下,直流趋势项为一维直线,可以通过最小二乘法拟合获得。

3.2 时域相关性分析

在测量系统中,单个发射站与单个接收器之间存在3个时间序列,扫描角1对应相对时间序列 t'_1 ,扫描角2对应相对时间序列 t'_2 以及扫描周期时间序列 T' ,当去除趋势项后,各个时间序列转变为残差时间序列。在发射站、接收器等共同作用下,这些残差时间序列可能存在某些依赖关系,接下来对这些时间序列的相关关系进行分析。

相关系数指标可以定量分析时间序列之间的相关程度,本文选择皮尔森(Pearson)相关系数^[14]进行相关性分析,皮尔森相关性系数定义为

$$r(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)D(y)}} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}}, \quad (9)$$

式中: x 、 y 为不同的时间序列; $\text{cov}(x, y)$ 为序列 x 、 y 的协方差; $D(x)$ 、 $D(y)$ 分别为序列 x 、 y 的方差; r 为相关系数。

3.3 频域分析

信号的频域特征分析是通过频率角度分析并认识信号,此方法可以得到信号频率方面的特性,较时域分析方法能够提供更为丰富的信息,一般频域特征分析中,采用傅里叶变换将信号从时域映射至频域。

傅里叶变换^[15-16]是以周期信号傅里叶级数为基础,当周期信号满足狄里赫利条件时,可以展开为傅里叶级数,即周期时间信号可以通过一组完备的正交函数集表示为

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t), \quad (10)$$

式中:系数 a_0 、 a_n 、 b_n 为傅里叶系数;角频率 $\omega = 2\pi/T$; T 为时间信号周期。

现实中无法获得长度无限的连续信号,因此需要将连续函数改换为离散数据,且把有限长序列作为周期性离散信号的一个周期进行处理,即离散时间傅里叶变换,通过离散傅里叶变换可进行各个残差时间序列的时频域转换。离散傅里叶变换定义为

$$F(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot \exp(-j\omega k) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot \exp\left(-jn \frac{2\pi}{N}k\right), 0 \leq n \leq N-1, \quad (11)$$

式中： $f(k)$ 为序列长度为 N 的原始离散信号；角频率 $\omega = 2\pi n/N$ 。

4 共模误差消除

若时间序列中存在共模噪声，则需要选择合适的方法对其进行消除。主成分分析是一种统计分析方法，主要通过正交变换将一组多维度相关随机向量转化为一组对应的不相关的随机向量。在原多维向量集合中，由于冗余信息的存在，向量之间具有相关关系，主成分分析方法通过一定规则的正交变换将原向量集合重新组合成新的无相关关系的随机向量集合，并选取较少的主要的维度信息来尽可能多地完整地反映原随机向量集合，实现维度的降低。这种统计方法已经广泛应用于地球物理信号处理、噪声消除等方面^[17-20]。

主成分分析思想可以应用于共模误差消除。假设空间中布置有若干接收器，存在 n 个残差时间序列，且每个序列中含有 m 个数据，这些序列可以构建原始残差时间序列矩阵 \mathbf{X} ， \mathbf{X} 可表示为

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} t'_1(1) & t'_2(1) & \cdots & t'_n(1) \\ t'_1(2) & t'_2(2) & \cdots & t'_n(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t'_1(m) & t'_2(m) & \cdots & t'_n(m) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中： $t'_n(m)$ 为第 n 个残差时间序列的第 m 个元素。矩阵 \mathbf{X} 每一列为一组残差时间序列数据。

主成分分析通过协方差判断向量之间的相关性，而在时间序列预处理过程中，已经通过多项式拟合剔除时间序列的趋势项，因此，每个时间序列的平均值均为 0，实现了中心化，则时间序列矩阵 \mathbf{X} 的协方差矩阵 \mathbf{B} 可以表示为

$$\mathbf{B} = \text{cov}(\mathbf{X}) = \frac{\mathbf{X}^T \mathbf{X}}{m-1}. \quad (13)$$

协方差矩阵 \mathbf{B} 为 $n \times n$ 实对称矩阵，将其进行特征值分解，即有

$$\mathbf{B} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} v_1 & \cdots & v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \lambda_i v_i v_i^T. \quad (14)$$

式中： \mathbf{A} 为特征值矩阵，其中特征值由大到小分别为 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ； $\mathbf{V} = [v_1 \ \cdots \ v_n]$ 为特征向量矩阵。协方差矩阵 \mathbf{B} 的特征向量组成标准正交基，满足 $\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{E}$ 。

假设存在变换矩阵 \mathbf{Q} 使得 $\mathbf{Y} = \mathbf{XQ}$ ，则经过变换后矩阵 \mathbf{Y} 的协方差矩阵为

$$\text{cov}(\mathbf{Y}) = \frac{\mathbf{Q}^T \mathbf{X}^T \mathbf{XQ}}{m-1} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \mathbf{Q}. \quad (15)$$

若矩阵 \mathbf{Q} 等于特征向量矩阵 \mathbf{V} ，则 $\text{cov}(\mathbf{Y}) = \mathbf{A}$ ，此时矩阵 \mathbf{Y} 的协方差矩阵为对角阵，副对角线元素全部为 0，表明转换后矩阵 \mathbf{Y} 各个向量之间的相关系数为 0，无相关关系。

因此，在主成分分析中，通过变换矩阵 \mathbf{Q} （即特征向量组成的标准正交基），可以将原始时间序列矩阵 \mathbf{X} 转换为新的矩阵 \mathbf{Y} ，实现 \mathbf{Y} 的各个列向量之间无相关性，即去相关性。

由(10)式可知，协方差矩阵 \mathbf{B} 可以分解为若干正交向量与对应特征值的组合，每个特征值与其对应的正交向量的乘积都包含矩阵 \mathbf{B} 的部分信息，部分信息在整体信息中所占的比重与特征值的大小有关。如果将正交基按照特征值大小排列并省略掉特征值较小的分量，前几个较大的特征值与其对应正交向量的组合则可以很大程度地反映出矩阵 \mathbf{B} 的信息，这些较大的特征值对应的正交基是主要成分。当使用全部(n 个)正交基作为变换矩阵进行正交变换，转换后新的矩阵各个维度区分度达到最大，但矩阵维度(n)不改变，当变换矩阵 \mathbf{Q} 仅由少量正交基组成时，可通过 \mathbf{Q} 进行正交变换后降低矩阵 \mathbf{Y} 维度。

计算协方差矩阵 \mathbf{B} 的特征值与特征向量后，需要统计各个特征值的贡献率，第 k 个特征值的贡献率为

$$m_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (16)$$

根据特征值的贡献率选择合适的正交基进行矩阵变换，假设选择前 k 个特征值对应的特征向量，生成特征向量矩阵 $\mathbf{V}_k = [v_1 \ \cdots \ v_k]$ ，则通过此变换矩阵得到的矩阵 \mathbf{Y} 为

$$\mathbf{Y}_{\text{new}} = \mathbf{XV}_k. \quad (17)$$

原始数据 \mathbf{X} 进行还原，可得

$$\mathbf{X}_{\text{new}} = \mathbf{Y}_{\text{new}} \mathbf{V}_k^T = \mathbf{XV}_k \mathbf{V}_k^T. \quad (18)$$

若变换矩阵选择全部正交基，则还原后 \mathbf{X}_{new} 与 \mathbf{X} 完全一致，若变换矩阵选择贡献率较大的特征值对应的正交基，则还原后 \mathbf{X}_{new} 保留原始矩阵 \mathbf{X} 的大部分信息。

5 实验验证与分析

5.1 实验平台搭建

搭建实验平台对 wMPS 时间序列进行分析,实

验平台搭建在 $8\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的室内场地上,在空间中布置发射站以及接收器,利用 3 个接收器采集发射站信号,实验平台场景如图 2 所示。

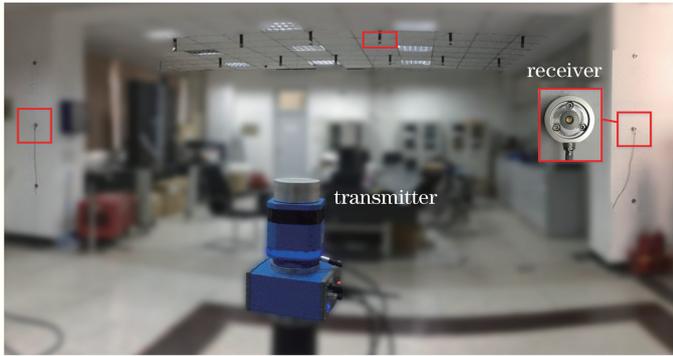


图 2 实验平台场景

Fig. 2 Scene of experimental platform

5.2 时间序列分析

首先对信号进行预处理,消除较大粗差并去除直流分量,得到最终的残差时间序列,通过皮尔森相关系数对相关系数进行验证,计算其中一组发射站与接收器对应的残差时间序列的相关系数,得到时间序列相关系数如表 1 所示。

表 1 时间序列相关系数

Table 1 Correlation parameters of time series

Comparison	t'_1 and t'_2	t'_1 and T'	t'_2 and T'
Correlation coefficient	0.3424	0.0578	0.0355

由表 1 可以看出,残差时间信息 t'_1 与 t'_2 具有相关性,而 t'_1 与 T' 、 t'_2 与 T' 并无相关性,因此周期(即发射站转速)的稳定性不会同时对时间序列信息进

行影响。基于此,分别计算每个接收器对应的残差时间序列 t'_1 与 t'_2 之间的相关性,得到部分时间序列的相关系数,如表 2 所示,由表 2 可以看出,大部分残差时间序列都具有显著相关性,不同接收器对应的残差时间序列之间也具有相关性。

由此可见,接收器处于不同的空间位置也会影响残差时间序列之间的相关系数。考虑到实验所在的空間具有相同的温度与湿度,故不同位置处相关系数的一致与传播链路无关。为了进一步判断相关性存在差异的原因,使用新的接收器替换原接收器,且保证新接收器放置位置与原位置保持一致。结果表明,接收器的替换不影响相关系数,相关性存在差异的主要原因为对于接收器来说发射站旋转过程不一致。

表 2 部分时间序列相关系数

Table 2 Correlation parameters of partial time series

Item	Receiver 1		Receiver 2		Receiver 3		
	t'_1	t'_2	t'_1	t'_2	t'_1	t'_2	
Receiver 1	t'_1	1	0.5785	-0.2969	0.1481	-0.3435	0.2557
	t'_2	0.5785	1	0.1481	0.2760	0.2557	0.1741
Receiver 2	t'_1	-0.2969	0.1481	1	0.1143	0.7194	0.2950
	t'_2	0.1481	0.2760	0.1143	1	0.2211	0.5238
Receiver 3	t'_1	-0.3435	0.2557	0.7194	0.2211	1	0.5188
	t'_2	0.2557	0.1741	0.2950	0.5238	0.5188	1

将每个信号生成残差时间序列转变至频域,其中接收器 1 的残差时间序列频谱图如图 3 所示。

图 3 为接收器扫描周期时间序列、残差时间序列 1 与残差时间序列 2 的频域幅度谱,横轴为频率,纵轴为幅度,表示信号的强度。在图 3(a)中,波形比较杂乱,无固定突出频率峰值,全频段均有较大幅度,因

此扫描周期残差时间序列主要由随机噪声组成。在图 3(b)与(c)中,扫描角对应的残差时间序列除了全频段的小峰值噪声信号外,在固定频率处均出现较大峰值,频率约为 6.8 Hz,残差时间序列可以看作全频段随机小噪声与特定频率噪声之和,两个扫描角对应的残差时间序列均受到此频率的噪声影响。

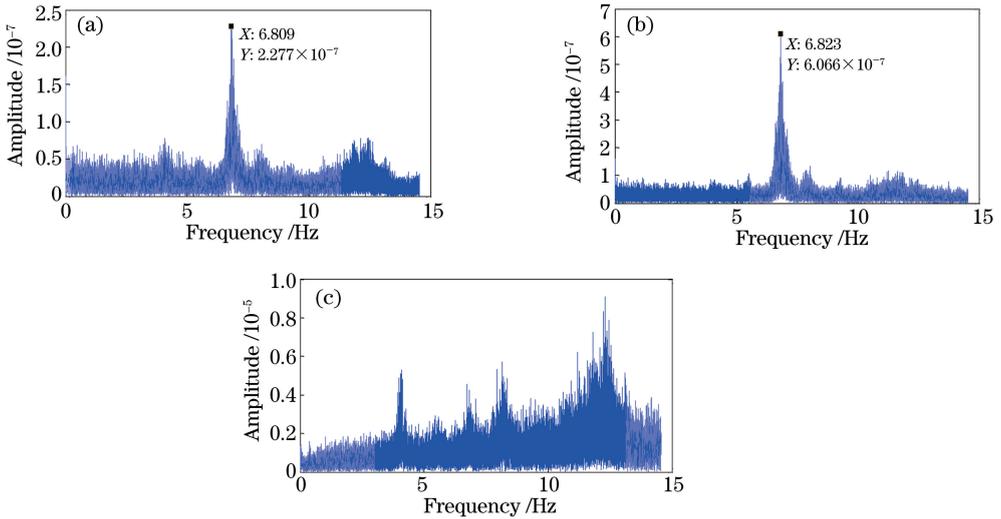


图 3 残差时间序列频谱图。(a)残差时间序列 1 的幅度谱；(b)残差时间序列 2 的幅度谱；(c)扫描周期的幅度谱

Fig. 3 Spectra of residual time series. (a) Magnitude spectrum of residual time series 1;

(b) magnitude spectrum of residual time series 2; (c) magnitude spectrum of scanning period

综上所述,在残差时间序列中普遍存在一种同时影响各个时间序列的误差,即共模噪声,其主要误差源来自发射站。

5.3 共模误差消除

针对 3 个接收器中残差时间序列进行主成分分析滤波以消除共模误差,首先构造原始时间序列矩阵 \mathbf{X} 并计算其协方差矩阵中特征值的贡献度。结果表明,各个成分从大到小的贡献率分别为: 39.63%, 31.11%, 18.56%, 5.59%, 2.91%, 2.20%。可以看出,前 3 个成分占有较大的比重。由残差时间序列之间的相关系数表明,各个时间序列具

有较显著的相关性,共模误差在残差时间序列中占有较大比重,因此选择第一主成分进行共模误差的重建,并在原始残差时间序列中消除此共模误差。

图 4 为主成分分析滤波前后的结果,其中蓝色数据为滤波前残差时间序列信息,绿色数据为滤波后残差时间序列信息。对比对共模噪声进行滤波前后的时域波形图可见,通过主成分分析滤波,残差时间序列标准差至少减小了 10%,同时计算滤波后时间序列之间的相关性可以发现,残差时间序列之间相关性均有所降低,共模误差得到抑制。

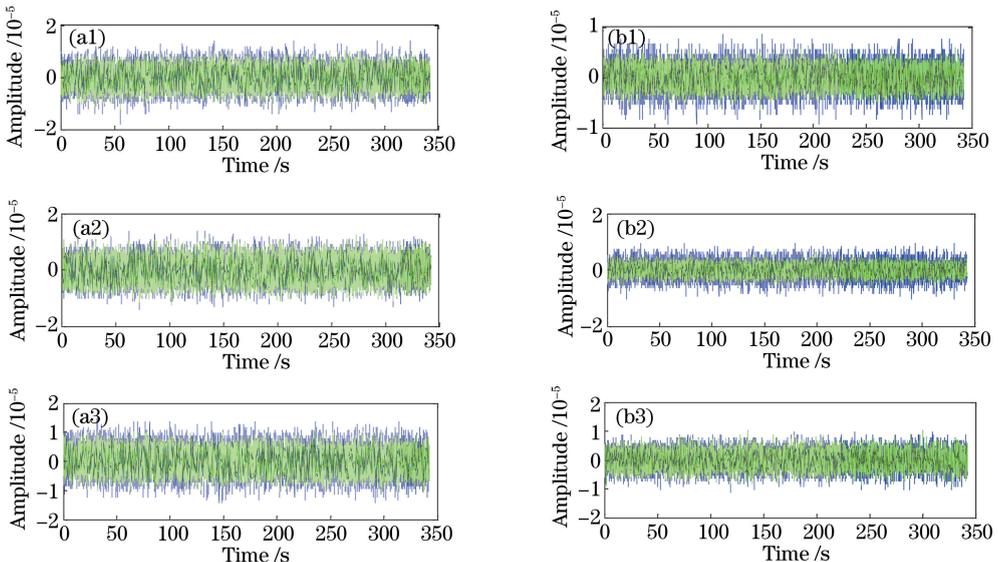


图 4 主成分分析滤波(a)前(b)后结果。(1)~(3)对应接收器 1~3

Fig. 4 Results (a) before and (b) after principal component analysis filtering. (1)-(3) corresponding to receivers 1-3

6 结 论

针对时间测量信号中的共模噪声提出一种噪声滤波方法,基于时间序列统计理论对系统时间序列信号时、频域特征进行分析,引入主成分分析滤波方法对测量信号中共模噪声进行消除。实验结果表明,主成分分析滤波方法可在一定程度上降低时间序列噪声。此外,共模误差存在的本质是发射站调速不稳等因素共同导致,可在误差产生的根源进行控制,例如选择高精度的电机伺服系统维持转速稳定;传播路径上由于反光等情况引起的多路径问题,无法通过滤波手段进行去除,需要加入完好性分析算法进行判断。这些问题有待在今后的工作中进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Ye S H, Zhu J G, Zhang Z L, *et al.* Status and development of large-scale coordinate measurement research[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(4): 1-6.
叶声华, 郑继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. *计量学报*, 2008, 29(4): 1-6.
- [2] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, *et al.* Distributed large-scale dimensional metrology [M]. London: Springer London, 2011.
- [3] Yang L H. Research on large-scale space coordinate measurement location technology based on optical scanning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [4] Duan M Q. Research on hardware platform optimization and key technologies of dynamic metrology for wMPS [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
端木琼. wMPS系统的硬件平台优化及动态坐标测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [5] Liu Z X. Research on measurement and positioning method in large complex field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
刘哲旭. 面向大型复杂现场的测量定位方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [6] Lao D B. Research on transmitter optimization and calibration technology of indoor measurement positioning system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
劳达宝. 室内测量定位系统发射站优化及校准技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [7] Huang Z, Yang L H, Zhao Z Y, *et al.* Research on optoelectronic scanning dynamic coordinate measurement algorithm based on extended Kalman filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051201.
黄喆, 杨凌辉, 赵子越, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的光电扫描动态坐标测量算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051201.
- [8] Wang J, Yang L H, Huang Z, *et al.* Indoor integrated navigation algorithm based on photoelectric scanning and strapdown inertial navigation system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101201.
王姣, 杨凌辉, 黄喆, 等. 基于光电扫描/捷联惯导系统的室内组合导航算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101201.
- [9] Zhao Z Y, Zhu J G, Lin J R, *et al.* Transmitter parameter calibration of the workspace measurement and positioning system by using precise three-dimensional coordinate control network [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 084108.
- [10] Liu Z X, Zhu J G, Yang L H, *et al.* A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105004.
- [11] Sun Q, Yang L H. Non-contact measurement method of WMPS based on laser ranging sensors[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 670-675.
孙卿, 杨凌辉. 基于测距传感器的WMPS非接触测量方法[J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 670-675.
- [12] Fei Y T. Error theory and data processing[M]. 7th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [13] Decarlo L T. On the meaning and use of kurtosis[J]. *Psychological Methods*, 1997, 2(3): 292-307.
- [14] Wang J J, Song X Y. Modern applied statistics[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
王建军, 宋香荣. 现代应用统计学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [15] Wu D Z. Analysis of signals and linear systems[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
吴大正. 信号与线性系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [16] Zhou Z Y. Algorithm for pentaprism scanning testing based on the discrete Fourier transform[J]. *Laser &*

- Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071209.
- 周子云. 离散傅里叶级数在五棱镜扫描检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071209.
- [17] Fu Y. Present-day crustal deformation in China and GPS-derived coordinate time series analysis [D]. Shanghai: Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2002.
- 符养. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2002.
- [18] Yuan Z L, Chen J B, Huang W Y, *et al.* Speckle noise reduction of optical coherence tomography based on robust principle component analysis algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0511002.
- 袁治灵, 陈俊波, 黄伟源, 等. 基于稳健性主成分分析算法的光学相干层析成像去除散斑噪声的研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0511002.
- [19] Zhang H, Chi Y, Zhou Y T, *et al.* Three dimensional seismic signal denoising based on four-dimensional block matching cooperative filtering combined with principle component analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041007.
- 张欢, 池越, 周亚同, 等. 结合主成分分析的四维块匹配协同滤波三维地震信号去噪[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041007.
- [20] Yu H C, Liu G, Ou Q H, *et al.* Study on Chinese rose leaves by two-dimensional correlation infrared spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 053003.
- 于海超, 刘刚, 欧全宏, 等. 月季花叶片的二维相关红外光谱研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 053003.