

文章编号: 1672-8785(2025)10-0059-10

基于阿伦方差的 FBG 三维检波器 随机误差模型与识别

郑 行^{1,2,3,4} 刘钦朋^{1,2} 李昊泽^{1,2} 马洲琪^{1,2} 李轶睿^{1,2}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;

3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)三维加速度检波器在精密测量与长期监测中存在的误差影响, 提出了一种基于阿伦方差的误差分析与一致性评估方法。建立了 FBG 加速度检波器的误差模型, 分析了三个正交轴向的阿伦方差噪声特性, 评估了其三轴性能的一致性, 并研究了不一致性的可能原因。通过改变阿伦方差分析中样本子集的相关时间 τ , 深入研究了不同随机过程在不同时间尺度下的特征。根据实验结果对 FBG 三维加速度检波器进行误差分析, 研究了主要误差来源, 为该类型检波器的性能优化和误差补偿提供了重要的理论依据。

关键词: 光纤布拉格光栅; 三维; 检波器; 阿伦方差; 噪声识别

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.10.006

Random Error Model and Identification of FBG Three-Dimensional Geophone Based on Allan Variance

ZHENG Hang^{1,2,3,4}, LIU Qin-peng^{1,2}, LI Hao-ze^{1,2}, MA Zhou-qi^{1,2}, LI Yi-rui^{1,2}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the influence of errors on three-dimensional fiber Bragg grating (FBG) accelerometers used in precision measurement and long-term monitoring, an error analysis and consistency assessment method based on Allan variance is proposed. An error model for the FBG accelerometer is established, and the Allan variance noise characteristics along three orthogonal axes are analyzed. The consistency of the three-axis performance is evaluated, and possible causes of inconsistency are investigated. By varying the correlation time τ

收稿日期: 2025-09-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-530)

作者简介: 郑行(2001-), 男, 重庆人, 硕士生, 主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: he15723400@163.com

of the sample subsets in the Allan variance analysis, the characteristics of different random processes at different time scales are further investigated. Based on experimental results, an error analysis of the three-dimensional FBG accelerometer is conducted, and the main error sources are identified, providing an important theoretical basis for performance optimization and error compensation of this type of geophone.

Key words: fiber Bragg grating; three-dimensional; geophone; Allan variance; noise identification

0 引言

加速度测量在工程结构健康监测、故障诊断和地质勘探等诸多领域至关重要。FBG 因其抗电磁干扰、耐腐蚀、传输损耗低、灵敏度高以及适用于传感器网络复用等固有优势,已成为加速度传感领域的重要器件^[1-5]。三维 FBG 加速度检波器能够同时感知空间三个正交方向的加速度信息,可在地质勘探过程中获取更全面的地质信息,克服一维或二维测量中固有的模糊性问题^[6]。

阿伦方差^[7]是一种国际通用的时域分析技术,最初源于对原子钟频率稳定性的表征研究^[8-10]。目前,该方法已被广泛应用于评估陀螺仪、加速度计等惯性传感器的稳定性^[11-16]。通过分析阿伦方差随相关时间变化的双对数曲线,可以有效地识别出传感器输出数据中所包含的不同类型的随机噪声,并确定它们各自的强度。

孙士正等人^[17]提出了一种空间分层结构的三维 FBG 加速度计,其 X、Y、Z 轴的工作频率范围分别为 0~600 Hz、0~700 Hz 和 0~600 Hz,三轴灵敏度分别为 7.85 pm/G、8.15 pm/G 和 6.65 pm/G。周锐等人^[18]提出了一种三维 FBG 加速度计,通过正交排布纤芯并借助角度重构算法解调三维加速度,其工作频带为 10~220 Hz,最高灵敏度达到 335 pm/G。邱忠超等人^[19]研制了一种十字簧片与悬臂梁弹性结构的三维 FBG 振动传感器,通过正交布置三个单轴结构实现三维地震信号检测,其平坦区为 0.1~20 Hz,平均灵敏度为 606.2 pm/G,在 0.01 Hz 极低频地震监测方面表现出显著优势。王慧等人^[20]设计了一种基于柔性铰链的一体式 FBG 三维加速度探测器。实

验测量表明,其 X、Y 与 Z 轴均具有良好的灵敏度,三个方向的共振频率分别为 550 Hz、480 Hz 和 1210 Hz,相应灵敏度分别为 108.7 pm/G、144.2 pm/G 和 27.9 pm/G。

当前,针对三维 FBG 加速度计的研究大多集中于灵敏度、谐振频率、平坦区范围以及交叉灵敏度等核心性能指标。然而,在如何通过结构优化与设计提升其性能方面的研究相对较少,而这正是影响其实际性能的重要方面。在实际应用中,此类传感器不可避免地受到多种噪声源的干扰。这些误差限制了其测量精度与长期稳定性。

为解决上述问题,本文提出基于阿伦方差方法的三维 FBG 加速度计多尺度误差特性分析。通过采集加速度计的三轴静态输出数据,计算并分析阿伦方差,对比三轴阿伦方差曲线的异同,评估其性能一致性。通过改变阿伦方差样本子集的相关时间,研究不同随机过程在不同时间尺度上的表现差异及其对加速度计整体性能的影响。该工作不仅有助于深入理解此类加速度计的误差机制,也为其后续误差补偿与适用性评价提供了重要的实验依据与理论基础。

1 加速度检波器的阿伦方差原理

当 FBG 动态解调系统的扫描频率不变时,在系统没有输入信号时^[21],加速度信号输出为 A ,采样周期为 $T_s=1/f_s$,采集的数据样本长度为 N 。将 M 个数据分为一组,构成一个样本子集,而且 M 满足 $M < N/2$,每个样本子集的时间 $\tau=MT_s$,总的可以分成 $K=N/M$ 组。再对每组样本求均值,生成新的样本数据:

$$\bar{A}_j(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A_{(j-1)(M+i)}, j=1,2,\dots,K \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau) &= \frac{1}{2} \langle [\bar{A}_{j+1}(M) - \bar{A}_j(M)]^2 \rangle \\ &= \frac{1}{2(K-1)} \sum_{j=1}^{K-1} [\bar{A}_{j+1}(M) - \bar{A}_j(M)]^2 \end{aligned} \quad (2)$$

由于阿伦方差是对 FBG 加速度计在没有输入信号时的输出数据分析, 根据阿伦方差的定义, 式(2)可表示为

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2} [\bar{A}_{k+1}^2(\tau) + \bar{A}_k^2(\tau) - 2\langle \bar{A}_{k+1}(\tau) \bar{A}_k(\tau) \rangle] \quad (3)$$

$$\langle \bar{A}_k^2(\tau) \rangle = \frac{1}{\tau^2} \int_{t_1}^{t_1+\tau} dt \int_{t_1}^{t_1+\tau} \langle A(t) A(t') \rangle dt' \quad (4)$$

若观测的噪声随机过程是平稳的, 则加速度的相关函数满足以下关系:

$$R(t, t') = R(t' - t) = R(\tau) \quad (5)$$

由于加速度功率谱密度 $S_A(f)$ 与加速度相关函数 $R(\tau)$ 是一对傅里叶变换^[21], 则

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (6)$$

所以式(6)可表示为

$$\langle \bar{A}_k^2(\tau) \rangle = \frac{1}{\tau^2} \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) df \int_{t_1}^{t_1+\tau} dt \int_{t_1}^{t_1+\tau} e^{j2\pi f(t' - t)} dt' \quad (7)$$

由于

$$\int_{t_1}^{t_1+\tau} dt \int_{t_1}^{t_1+\tau} e^{j2\pi f(t' - t)} dt' = \frac{\sin^2(\pi f\tau)}{(\pi f)^2} \quad (8)$$

则式(7)化简为

$$\langle \bar{A}_{k+1}^2(\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) \frac{\sin^2(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df \quad (9)$$

因为 $\langle \bar{A}_k^2(\tau) \rangle$ 与 t_k 无关, 则

$$\langle \bar{A}_{k+1}^2(\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) \frac{\sin^2(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df \quad (10)$$

加速度的相关函数表达式为

$$\langle \bar{A}_{k+1}(\tau) \bar{A}_k(\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) \frac{\sin^2(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df \quad (11)$$

根据式(2)、式(9)、式(10)和式(11), 阿伦方差可表示为

$$\sigma^2(\tau) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) \frac{\sin^4(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df$$

$$- \int_{-\infty}^{\infty} S_A(f) \frac{\sin^2(\pi f\tau) \sin(2\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df \quad (12)$$

由于 $\sigma^2(\tau)$ 是一个实函数, 式(14)等号右边第二项不存在, 且 $S_A(f)$ 是一个偶函数, 式(12)可以表示为

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_A(f) \frac{\sin^4(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df \quad (13)$$

2 三维检波器系统中的噪声源

2.1 加速度计结构噪声

FBG 三维加速度计主要由弹性体、惯性质量块、底座和外壳组成, 其结构设计直接决定了传感器对外部加速度的响应, 同时也影响了其内部噪声的产生和传播。弹性体的结构设计直接影响了检波器的谐振频率和灵敏度。高灵敏度的弹性体结构可将微小的加速度信号放大为更大的波长变化。高灵敏度意味着相同的加速度输入会产生更大的光学信号输出, 从而提高了信噪比, 减少了速度随机游走噪声。

对于 FBG 三维检波器来说, 如果三轴灵敏度不一致, 可能会导致数据在矢量合成时出现波形失真, 三轴的振动规律不一致, 从而引入额外的噪声。如果弹性体、质量块、底座等材料不同, 环境温度的微小波动就会在结构内部产生热应力, 从而产生零偏不稳定噪声。对称结构的设计可以更好地抵消温度变化引起的共模应力, 同时提高三轴的一致性。

对于 FBG 三维加速度计来说, 轴间串扰与结构设计密切相关。一个非对称或设计不当的结构在受到主轴以外的振动时, 另外两轴会产生不必要的应变, 导致信号串扰, 从而引入额外的噪声。质量惯性体与弹性元件的相对位置和组合状态会对检波器的响应产生影响。当传感器三轴的质心不一致时, 会导致加速度测量产生附加扭转, 从而增加检波器输出的随机噪声。

2.2 FBG 封装噪声

目前, 光纤光栅的主要封装技术包括全粘结封装技术和两点封装技术。全粘结封装技术目前面临的问题主要是啁啾效应和材料局限

性。在实际制造过程中,封装胶的涂覆、固化及残余应力释放等工艺环节会导致难以实现完全均匀的应变传递。从微观角度来看,这种非均匀性容易引起 FBG 产生啁啾效应。此外,理想的封装材料需具备优异的粘附性、高效的应变传递特性以及良好的温度稳定性。对于全粘结封装而言,啁啾效应和材料非线性引入的随机波长漂移,在阿伦方差分析图中主要体现为速度随机游走。

两点封装技术通过固定光纤两端并使光栅段悬空,从根本上消除了封装胶不均匀导致的啁啾问题。然而,被固定的 FBG 光纤本身存在固有频率,同时加速度计结构也具有共振频率。当外部振动频率接近 FBG 的固有频率时,会激发其共振,干扰真实加速度信号的准确测量。两个粘结点可能会发生非协同蠕变,导致应变传递不稳定,进而转化为加速度读数的随机漂移,造成 FBG 三维加速度检波器的三轴的实验数据与真实值出现偏差。两点封装的结构设计(如夹具、胶固等)如果固定不牢,可能会引入随机机械振动或位置漂移。这些不规则的振动可能导致三轴 FBG 灵敏度出现偏差,可能被传感器误判为加速度信号,并以低频随机噪声形式累积在输出中,表现为加速度随机游走。

2.3 波长解调电路噪声

波长解调电路是 FBG 加速度传感系统中的关键组成部分,其噪声特性直接影响系统整体的测量精度与分辨率。该噪声主要来源于电路中的电子元器件及其信号处理过程。对于 FBG 加速度计等动态测量场景,目前主流的波长解调技术包括基于可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器的扫描解调和基于线性阵列 CCD 的光谱解调。尽管原理不同,二者均受到光电转换环节中固有噪声的限制。无论采用哪种方案,其核心都离不开光电转换和信号放大过程。光电探测器在将光信号转换为电信号的过程中会引入散粒噪声和暗电流噪声,放大器会产生电压噪声和电流噪声,因此检波器面临着光电器

件与放大电路带来的噪声问题。

面对上述多种噪声源的复杂叠加,仅凭信噪比已不足以全面评估解调系统的性能。通过计算不同平均时间下的阿伦方差,可以清晰识别并分离出不同类型的噪声成分。

3 三维检波器系统噪声源识别及分析

3.1 三维检波器系统噪声源识别

将 FBG 加速度计固定于振动台,如图 1 所示。设置解调系统的采样时间为 0.2 ms,采样数据长度为 60000,每组相关时间为 3 s,同步采集 X、Y、Z 三轴数据。所得阿伦方差曲线如图 2~图 4 所示。

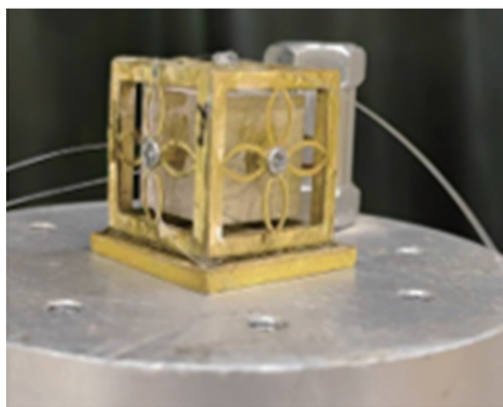


图 1 实验结构示意图

根据图 2 和表 1 可知,X 轴上的主要噪声为零偏不稳定噪声与量化噪声。其中,量化噪声对系统影响较小,零偏不稳定噪声主要来源于解调系统的固有噪声以及光纤和封装材料的粘弹性效应。在全部五个噪声系数中,X 轴的数值均显著高于 Y 轴与 Z 轴。X 轴噪声较高可能由传感器结构或封装不对称所致。由图 3 和图 4 的阿伦方差拟合曲线可以看出,Y 轴与 Z 轴的噪声系数均处于较低水平且数值极为接近,表明这两个轴向应具有优异的传感器特性与噪声抑制能力。

3.2 三维检波器系统噪声分析

加速度计输出含有多种随机噪声,这些噪声在不同时间段表现出不同特性。阿伦方差通过在双对数坐标系中分析方差与相关时间的关系,将复杂的总噪声分解为不同随机过程贡献

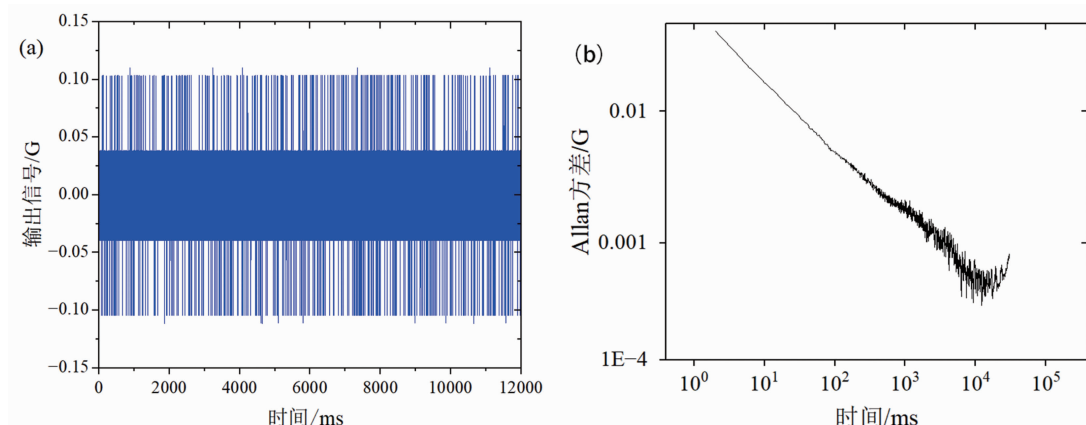


图 2 (a)系统零输入条件下 X 轴的输出信号; (b)阿伦方差曲线

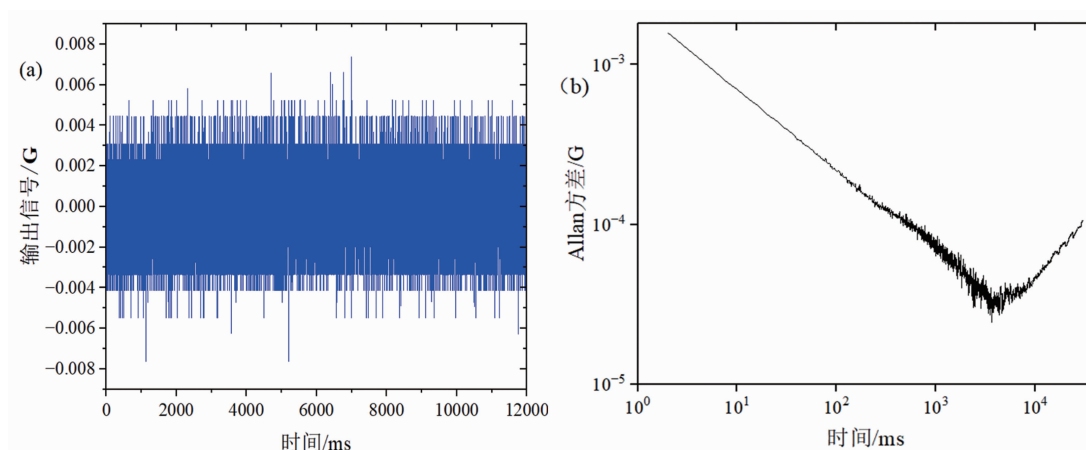


图 3 (a)系统零输入条件下 Y 轴的输出信号; (b)阿伦方差曲线

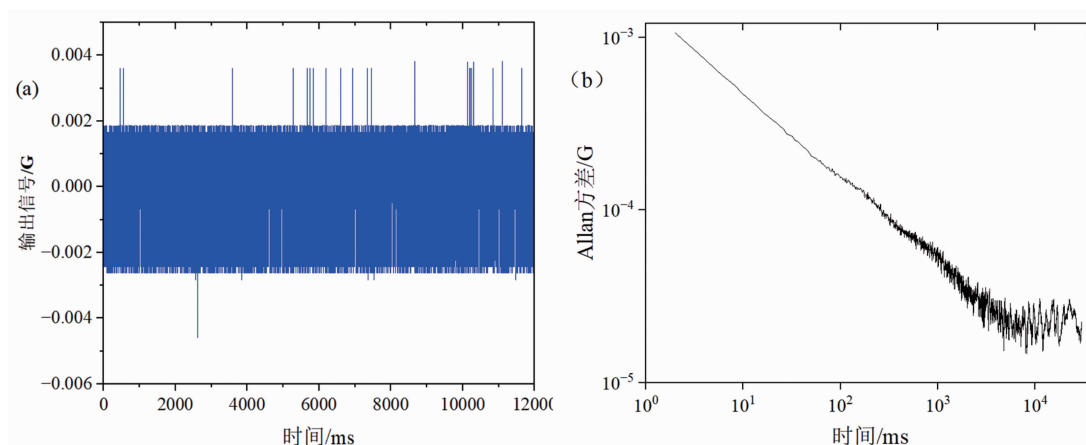


图 4 (a)系统零输入条件下 Z 轴的输出信号; (b)阿伦方差曲线

表 1 三轴误差噪声系数

轴向	$Q(\text{m/s})$	$N(\text{G/h}^{1/2})$	$B(\text{G/h})$	$K(\text{G/H}^{3/2})$	$R(\text{G/h}^2)$
X 轴	6.4×10^{-3}	8.5×10^{-4}	1.6×10^{-3}	9.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}
Y 轴	9×10^{-4}	4×10^{-5}	3×10^{-5}	4×10^{-5}	1×10^{-5}
Z 轴	5×10^{-4}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-5}

的参数。不同的应用场景对传感器的噪声特性有不同要求：对于加速度测量而言，采样时间极短，样本子集的数据极少，更关注加速度随机游走和加速度斜坡对检波器的影响；而长期导航或结构监测则更重视零偏不稳定性，它直接决定了系统经长时间积分后产生的漂移误差，对惯性导航系统的定位精度至关重要。

通过改变相关时间 τ ，阿伦方差的分析结果可显示出在该时间段内占主导地位的噪声类

型。针对不同的噪声特性可采用不同的滤波器或算法：速度随机游走可通过均值滤波或卡尔曼滤波得到有效抑制；过高的零偏不稳定性则可能需要采用温度补偿等措施。

将 X 轴总样本数据划分为 4 组、6 组、8 组和 10 组，对应的相关时间分别为 3 s、2 s、1.5 s 和 1.2 s。通过绘制阿伦方差双对数曲线分析不同随机过程，得到图 5 和表 2 所示的阿伦方差曲线和噪声系数表。

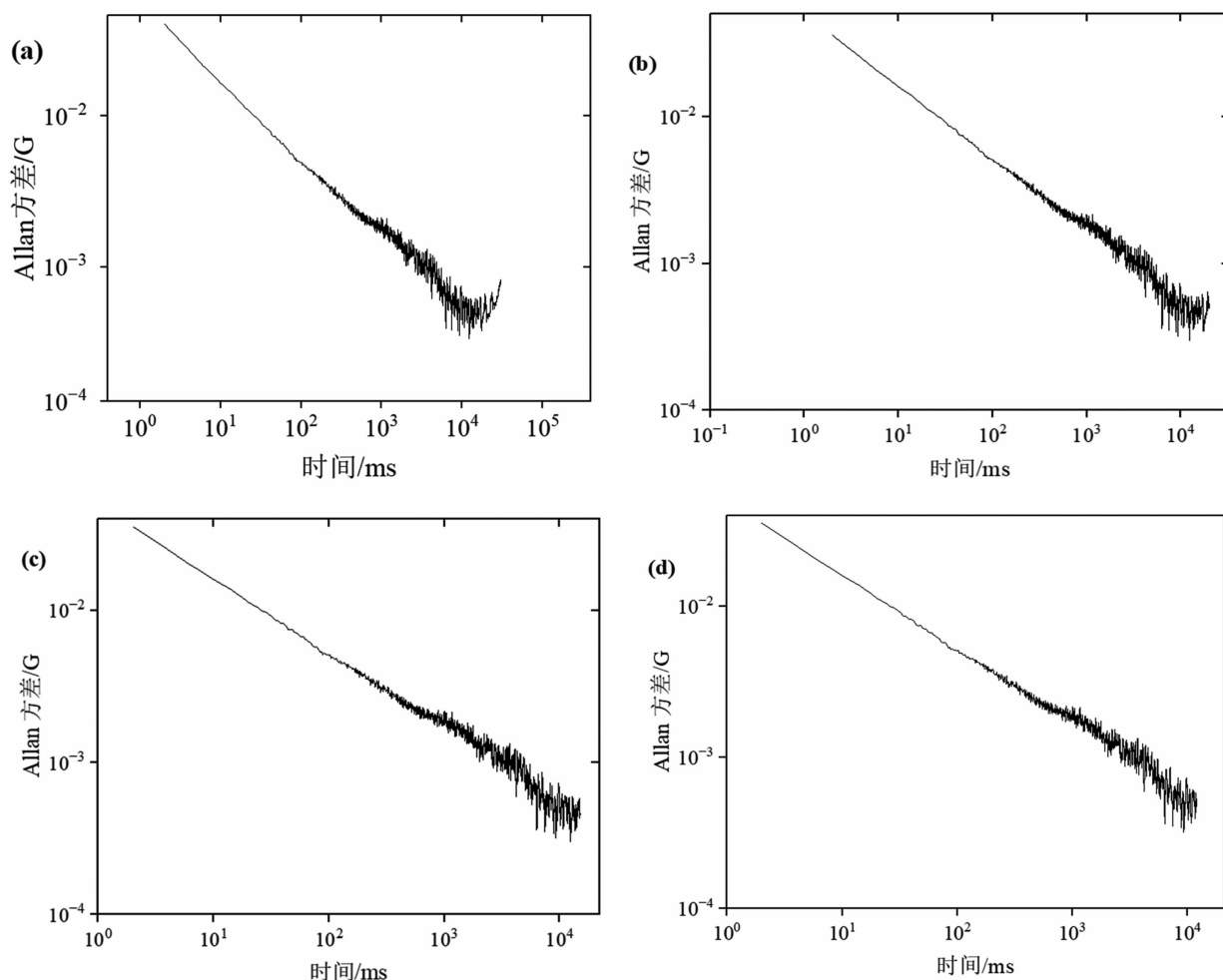


图 5 不同相关时间(3 s、2 s、1.5 s 与 1.2 s)下 X 轴的阿伦方差曲线

表 2 不同时间尺度下 X 轴的噪声系数

时间(s)	$Q(\text{m/s})$	$N(\text{G/h}^{1/2})$	$B(\text{G/h})$	$K(\text{G/h}^{3/2})$	$R(\text{G/h}^2)$
3	6.4×10^{-3}	8.5×10^{-4}	1.6×10^{-3}	9.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}
2	5.8×10^{-3}	8.4×10^{-4}	1.3×10^{-3}	1.2×10^{-4}	3.6×10^{-4}
1.5	5.4×10^{-3}	8.4×10^{-4}	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}	4.6×10^{-4}
1.2	5.1×10^{-3}	8.4×10^{-4}	1.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	5.3×10^{-4}

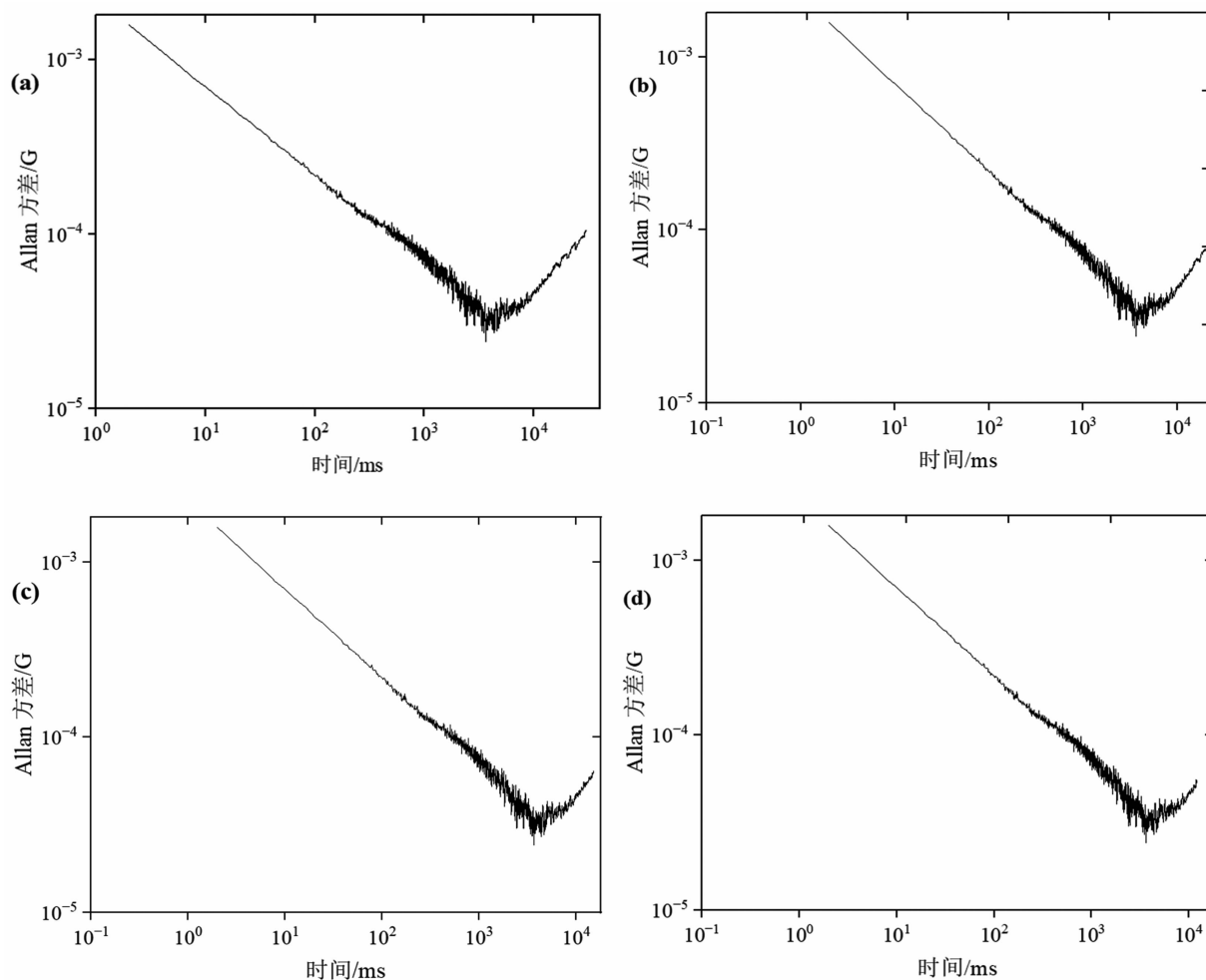


图 6 不同相关时间(3 s、2 s、1.5 s 与 1.2 s)下 Y 轴的阿伦方差曲线

表 3 不同时间尺度下 Y 轴的噪声系数

时间(s)	$Q(\text{m/s})$	$N(\text{G/h}^{1/2})$	$B(\text{G/h})$	$K(\text{G/h}^{3/2})$	$R(\text{G/h}^2)$
3	9×10^{-4}	4×10^{-5}	3×10^{-5}	4×10^{-5}	1×10^{-5}
2	5.3×10^{-4}	4×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.9×10^{-5}
1.5	5.3×10^{-4}	4×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.4×10^{-5}	2.2×10^{-5}
1.2	5.3×10^{-4}	4×10^{-5}	2.4×10^{-5}	3.8×10^{-5}	2.6×10^{-5}

结合图 5 和表 2 可以看出,随着样本相关时间的缩短,量化噪声由 0.0064G 逐渐减小至 0.0051G ,而理论上量化噪声系数应不随时间变化。该现象可能源于以下原因:不同噪声成分的叠加导致量化噪声的拟合系数并非严格恒定;带宽限制或采样频率不足影响了阿伦方差的准确计算。速度随机游走作为传感器内部随机噪声的积分结果,其数值表现出良好的时间稳定性。零偏不稳定性在理论上不应随时间变化,表中数据的微小波动可能是系统内的多种

噪声叠加所致。

加速度随机游走的变化可能源于封装结构的不稳定性,由其对光纤施加时变弯矩所致;加速度斜坡的变化则可能是因为短时间尺度并非该噪声主导区域。

将 Y 轴样本数据划分为 4 组、6 组、8 组和 10 组,对应的相关时间分别为 3 s、2 s、1.5 s 和 1.2 s,所得阿伦方差曲线和噪声系数表如图 6 和表 3 所示。

随着相关时间 τ 的缩短,量化噪声系数(Q

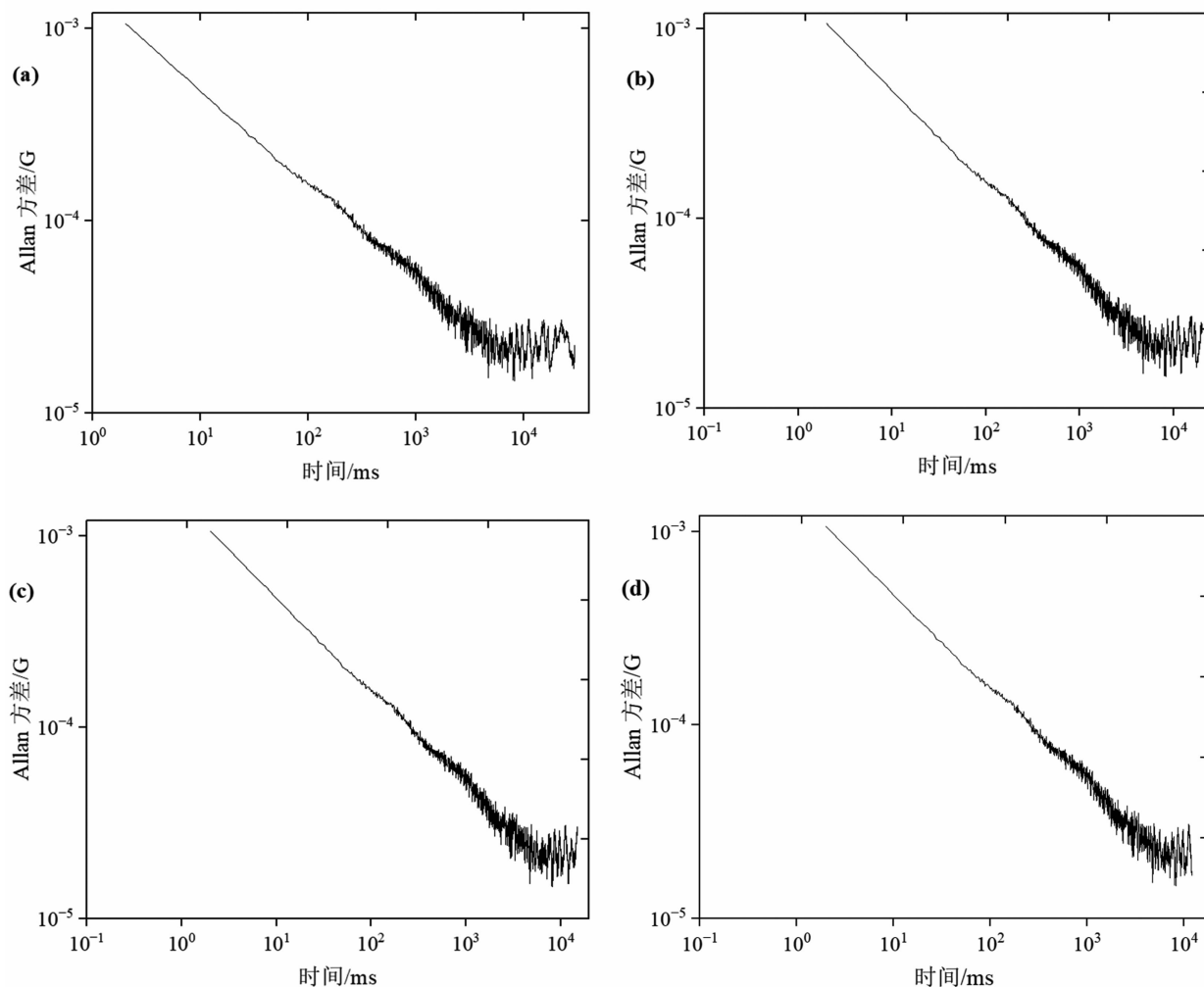


图 7 不同相关时间(3 s、2 s、1.5 s 与 1.2 s)下 Z 轴的阿伦方差曲线

表 4 不同时间尺度下 Z 轴的噪声系数

时间(s)	$Q(\text{m/s})$	$N(\text{G/h}^{1/2})$	$B(\text{G/h})$	$K(\text{G/h}^{3/2})$	$R(\text{G/h}^2)$
3	5×10^{-4}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-5}
2	2.1×10^{-4}	2×10^{-5}	3.1×10^{-5}	2.4×10^{-5}	9×10^{-6}
1.5	2.3×10^{-4}	2×10^{-5}	3.8×10^{-5}	3.9×10^{-5}	1.5×10^{-5}
1.2	2.5×10^{-4}	2×10^{-5}	4.2×10^{-5}	5×10^{-5}	2.1×10^{-5}

值)逐渐减小,在 1.2~2 s 范围内保持稳定。这一特性与量化噪声系数的理论性质一致。3 s 处 Q 值的异常变化可能是受到其他噪声成分干扰。速度随机游走系数(N 值)基本保持不变,符合其随时间相对独立的特性,体现了速度随机游走系数的稳定性。零偏不稳定性系数(B 值)随时间减小略有波动,但整体仍处于较低水平,反映出零偏的良好稳定性。加速度随机游走系数(K 值)和加速度斜坡系数(R 值)在 1.2~3 s 之间出现波动,可能由于较短时间

尺度并非 K 噪声与 R 噪声的主导区域,数据稳定性较差。

将 Z 轴样本数据划分为 4 组、6 组、8 组和 10 组,对应的相关时间分别为 3 s、2 s、1.5 s 和 1.2 s,所得阿伦方差曲线和噪声系数表如图 7 和表 4 所示。

结合图 7 与表 4 可知,随着时间尺度的缩短,量化噪声系数出现波动,其原因可能在于不同噪声成分的叠加使得量化噪声的拟合系数并非严格恒定。速度随机游走系数符合其理论

特性, 表现出良好的时间独立性。零偏不稳定性系数虽存在波动, 但整体上仍处于较低水平, 反映出零偏稳定性较好的特点。加速度随机游走系数与加速度斜坡系数在 1.2~3 s 区间内发生波动, 其原因在于该时间较短, 并非 K 噪声与 R 噪声的主导区域。

上述分析表明: 量化噪声通常仅在极短时间尺度中占主导地位, 在较长时段内其拟合结果易受其它噪声影响; 速度随机游走系数具有时不变特性, 表现出高度稳定性与可预测性; K 值变化可能源于传感器封装应力或结构设计引入的附加噪声; 而加速度斜坡系数的变化则可能是因为短时尺度并非该噪声主导区域所致。对于 FBG 三维加速度来说, 三轴的 FBG 封装和结构设计会对三轴的测量产生影响。因此, 在短时间尺度的振动测量中, 需要更加关注加速度随机游走对检波器的影响。

4 结束语

本文基于阿伦方差方法, 对三维 FBG 加速度的误差特性进行了全面分析与一致性评价, 系统研究了 FBG 封装方式、传感器结构等因素对阿伦方差的影响。通过对比分析三轴阿伦方差曲线的异同, 发现其三轴性能表现出良好的一致性; 通过改变相关时间, 深入研究了不同时间段内各类随机噪声的贡献特性。通过分析三轴在不同时间尺度下的噪声差异, 为后续误差补偿、性能优化与稳定性评估奠定了坚实的理论基础。本项目下一阶段的研究将从机理分析过渡到补偿和优化, 主要从特定噪声源的针对性抑制和传感器结构与封装工艺的优化两方面开展相关工作。

参考文献

- [1] Shen H, Zhu Z, Lu H, et al. Development of a Sandwiched Piezoelectric Accelerometer for Low-Frequency and Wide-Band Seismic Exploration [J]. *Sensors*, 2023, **23**(22): 9168.
- [2] Li J, Shen B, Zhao D, et al. A High-sensitivity FBG Accelerometer Based on a Bearing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, **40**(1): 228–236.
- [3] 高宏, 禹大宽, 罗小东, 等. 光纤矢量地震检波器最新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2025, **54**(4): 146–166.
- [4] Teng Y, Wang Y, Tang Y, et al. A new L-shaped rigid beam FBG acceleration sensor [J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1): 12511.
- [5] 刘强, 李文静, 马超, 等. 二维低频光纤布拉格光栅振动传感器的设计 [J]. *中国光学(中英文)*, 2024, **17**(6): 1450–1457.
- [6] Xiong L, Guo Y, Zhou W, et al. Fiber Bragg Grating-Based Three-Axis Vibration Sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**: 25749–25757.
- [7] El-Sheimy N, Hou H, Niu X. Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, **57**(1): 140–149.
- [8] Cheng W, Nie G, Zhu J. Characterizing Periodic Variations of Atomic Frequency Standards via Their Frequency Stability Estimates [J]. *Sensors*, 2023, **23**(11): 5356.
- [9] Ishizaki T, Ichimura T, Kawaguchi T, et al. Higher-order Allan variance for atomic clocks of arbitrary order: mathematical foundation [J]. *Metrologia*, 2024, **61**(1): 015003.
- [10] 陈汗龙, 谢超, 郑晓雪, 等. 原子钟时域频率稳定度评估方法 [J]. *导航定位学报*, 2024, **12**(4): 18–24.
- [11] Liu M, Fan Q, Zhou Y, et al. A System Phase Noise Model for Frequency-Modulated MEMS Gyroscopes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(14): 16124–16133.
- [12] 邹晨曦, 石震, 刘迪, 等. 基于 BP 神经网络模型的光纤陀螺全站仪温度补偿算法 [J]. *测绘学报*, 2025, **54**(6): 1021–1030.
- [13] Wang C, Cui Y, Liu Y, et al. High-G MEMS Accelerometer Calibration Denoising Method Based on EMD and Time-Frequency Peak Filtering [J]. *Micromachines*, 2023, **14**(5): 970.
- [14] Liu Q, Liu B, Yan C, et al. A Broadband and Highly Sensitive Fiber Optic F-P Geophone With Low Crosstalk [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, **25**(10): 1–10.

- 2025, **25**(8): 12703–12710.
- [15] Lu K, Wang X, Wang B, et al. A high-precision online compensation method for random errors of optical gyroscope [J]. *Measurement*, 2023, **222**: 113616.
- [16] Bai Y, Wang X, Jin X, et al. Adaptive filtering for MEMS gyroscope with dynamic noise model [J]. *ISA Transactions*, 2020, **101**: 430–441.
- [17] Sun S, Wu Y, Pang K, et al. A High-Precision 3-D Vibration Acceleration Sensor Based on FBGs [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, **25**(2): 2321–2330.
- [18] Zhou R, Chen F, Li S, et al. Three-Dimensional Vector Accelerometer Using a Multicore Fiber Inscribed With Three FBGs [J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2021, **39**(10): 3244–3250.
- [19] Qiu Z, Zhang Y. Three-Dimensional Low-Frequency Earthquake Monitoring Vibration Sensor Based on FBG [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, **73**: 1–9.
- [20] Wang H, Yan B, Liang L. A 3D FBG Accelerometer Based on Two Pairs of Flexible Hinges [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(19): 21586–21593.
- [21] 刘钦朋, 惠君尧, 乔学光, 等. FBG 加速度传感系统随机误差模型及实验研究 [J]. *光电子·激光*, 2016, **27**(5): 468–472.
- (上接第 22 页)
- [92] Dai Y, Li X, Zhou F, et al. One-stage cascade refinement networks for infrared small target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 1–17.
- [93] Sun H, Bai J, Yang F, et al. Receptive-field and direction induced attention network for infrared dim small target detection with a large-scale dataset IRDST [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 1–13.
- [94] Zhu H, Liu S, Deng L, et al. Infrared small target detection via low-rank tensor completion with top-hat regularization [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **58**(2): 1004–1016.
- [95] Lu R, Yang X, Li W, et al. Robust infrared small target detection via multidirectional derivative-based weighted contrast measure [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, **19**: 1–5.
- [96] Zhao B, Wang C, Fu Q, et al. A novel pattern for infrared small target detection with generative adversarial network [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **59**(5): 4481–4492.
- [97] Kim J H, Hwang Y. GAN-based synthetic data augmentation for infrared small target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 1–12.