

GSSM 系统抖动测量误差分析

安其昌^{1,2}, 张景旭¹, 杨飞¹, 孙敬伟¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 30 m 望远镜三镜是世界上最大的平面镜, 由于其复杂的功能, 又被称作大型科学可控反射镜(Giant Steering Science Mirror, GSSM)。为了更好地分析与抑制 GSSM 在实现光线中继功能时的抖动, 需要对抖动有精确的测量。由于 GSSM 抖动的要求特殊且严格, 在测量之前, 需要对抖动测量的误差进行仔细地分析与理解, 才可以更好地完成检测任务。首先, 文中针对使用编码器进行抖动测量的情况, 在不同的测量方案以及相对距离下, 通过蒙特卡洛方法可以得到由激光跟踪仪进行标定的误差: 俯仰轴线的定位误差, 在轴上测量的期望为 $1\ \mu\text{m}$, 小于轴外测量的 $3\ \mu\text{m}$; 方位轴线的定位误差在激光跟踪仪偏离两米的情况下为 $4.6\ \mu\text{m}$ 。之后对加速度计测量抖动的误差进行了考虑, 首先推导了使用功率谱方法的完备性条件; 之后使用累积功率谱对于 333B32 的标定结果进行处理, 得到当采样频率为 2 048 Hz, 0.05 Hz 以外的频段, 其精度为 $0.6\ \mu\text{m}$ 。抖动的测量以及误差分析, 不仅是 GSSM 建设过程中十分重要的环节, 同时, 它可以为大口径望远镜建设提供宝贵的统计学先验知识, 并对于系统工程的发展是一种很好的推动。

关键词: 30 m 望远镜三镜; 抖动; 激光跟踪仪; 功率谱密度

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0217002

Error analysis of the giant steering science mirror jitter testing

An Qichang^{1,2}, Zhang Jingxu¹, Yang Fei¹, Sun Jingwei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Thirty meter telescope tertiary mirror is one of the largest flat mirror in this word. It is also called giant steering science mirror (GSSM). In order to better analyze and constrain the jitter of GSSM, the measurement procedure shall be carefully processed. The analysis and understanding of jitter testing was necessary, for the unique and tight requirements of jitter testing. The first section was about jitter testing with high accuracy encoder. And the error was simulated by Monte Carlo method for the profile and relative location between the tracker and the GSSM was discussed. The tilt axis location error for the co-axis case was $1\ \mu\text{m}$ versus the off-axis case $3\ \mu\text{m}$. When it came to the rotational axis, the location error was $4.6\ \mu\text{m}$, and the next consideration was the accelerometers used in the jitter test. For 333B32, at 2 048 Hz sampling frequency, the error was $0.6\ \mu\text{m}$ above 0.05 Hz. The jitter measurement

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(11403022)

作者简介: 安其昌(1988-), 男, 研究实习员, 博士生, 主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。Email: anjj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张景旭(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型光电望远镜结构总体技术方面的研究。Email: zhangjx@ciomp.ac.cn

provides useful insight for the jitter of the system, the error analysis consequently specifies the statistic property of the jitter. This will also give guide to the system engineering.

Key words: 30 m TMT; jitter; laser tracker; power spectral density

0 引言

随着人类对宇宙的探知需求的增长,作为探索宇宙的主要手段之一的天文望远镜技术也越来越被各国科学家所重视。为了实现对宇宙更深远、更详细的探索,望远镜的口径也越来越大;对于大口径望远镜,为了获得更加稳定的图像、更长的曝光时间,对于系统抖动误差的要求也越来越严格。

系统光路的稳定是所有观测设备都需认真考虑的问题,尤其是对运动缓慢且昏暗目标成像时,需要望远镜光路在较长的时间内保持稳定。光路在各个方向的稳定性可用最终靶面上像点的位置以及光程的变化来表征。

在配备有自适应系统的大口径望远镜中,系统的抖动可以使用快速偏摆镜来进行校正。但实际上,随着系统的尺度增加,光路所受的外界扰动量也会增大,加之光线传输范围的加长,系统的焦面处的抖动量往往会很大,快速反射镜大多使用压电陶瓷来驱动,行程明显受到限制,抖动误差很可能会超出其校正范围;同时,如果使用快速反射镜,就必须分出一束光用作反馈,对于望远镜观测更远、更暗的目标十分不利^[1-5]。

Subaru 望远镜是有日本所建造的 8.2 m 口径的望远镜,其特殊之处在于针对不同的观测任务,其位于卡塞格林焦点处的科学终端会由机械手臂进行替换安装,以避免库德房所带来的相关问题。随之而来的,由于设备需要随着望远镜的跟踪一起运动,对于 1 m 口径量级的子系统,随动时的动力学环境十分复杂。在近年的测试中,发现了特征频率为 3.6 Hz 以及 7~8 Hz 的范围内的振动干扰,对于系统成像形成了一定的影响。

双子星望远镜(GEMINI)是加拿大、智利、巴西、阿根廷和澳大利亚共同出资建造的 8 m 级大口径望远镜,在美国夏威夷群岛以及智利各安放一台,两台设备中位于奈氏焦点处的主要成像设备(Gemini

Planet Imager, GPI), 均受到主要频率集中在 100 Hz 以下,大小为 2.5 mg 的振动影响,成像受到了很大的影响。

抖动的测量与抑制问题,一直制约着大口径望远镜的发展,Subaru 与 GEMINI 都选择了利用控制策略来抑制该频段内的激励。但是当系统尺寸进一步加大,就需要仔细的考虑系统抖动的问题。

TMT(thirty meter telescope)是下一代的大口径望远镜,由美国加州理工学院(Caltech)、加州大学系统(UC)和加拿大大学天文研究联盟联合发起,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承担其三镜系统的研制任务,GSSM(giant steering science mirror)是目前在研的最大的平面反射镜,其尺寸为 3.594 m×2.576 m,厚度为 100 mm。TMT 所配备的探测器种类与数量也远远超出了一般的大口径望远镜^[6-10]。

和 GSSM 体量相当的 4 m 级望远镜:(SOAR, Southern Astrophysical Research)是由美国主导的 4.1 m 口径的望远镜,坐落于智利 atop Cerro Pachón,在长曝光情况下抖动值要求小于 0.15",光程的变化要求小于 0.1 μm。VISTA (visible and infrared survey telescope for astronomy)是由英国主持修建的 4.1 m 口径的地基大口径望远镜,其抖动要求在 0.5"以下。对 GSSM 而言,不仅口径达到四米级,其功能也更加复杂:GSSM 需要将主次镜收集到的光线反射到位于望远镜两侧的奈氏平台上,这就要求 GSSM 与主系统的方位俯仰运动进行对应的指向运动:即 GSSM 需要有精密的光线中继功能,将主镜获得的光线在任意俯仰角下,稳定的反射到科学终端处,受到长传输距离(15 m 以上)的影响,系统的抖动有着比 SOAR 以及 VISTA 更加复杂的要求^[11-13]。

1 系统抖动测试

在较小口径望远镜抖动误差的估计中,大多使用正态分布误差模型,但实际的检测结果往往存在一定的偏移,之前得到的大口径望远镜抖动数据如

图 1 所示。分析可得,即使抖动误差均方根相近,也可能具有不同的统计学分布。对于系统的抖动进行测量,并认真分析其统计学分布,可以更全面的认识系统的性能,进而更好的抑制抖动。同时,通过大量的实验数据,可对其统计学先验信息进行修正,为以后的大口径望远镜设计提供参考。抖动的测量不仅是对某个系统性能表征,也是对系统工程学的一种补充以及推动。

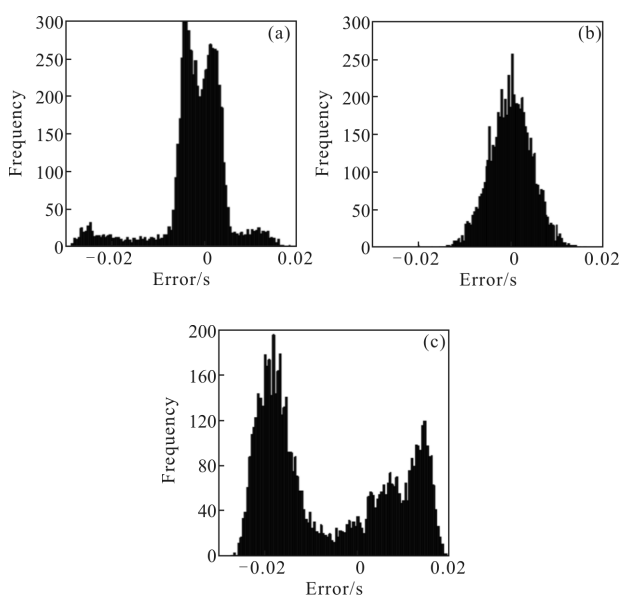


图 1 大口径望远镜的抖动检测结果

Fig.1 Jitter testing result for the large telescope

抖动的测量主要有两个主要的方法:一种是利用高精度的编码器进行测量;另一种是利用加速度计进行测量。这两种方法有着不同的应用场合:利用编码器可对于望远镜的抖动特性进行持续的观测,而利用加速度计不仅可以在建设以及调试初期对于系统进行标校检测,还可以与电控系统有机结合,作为主动吸振的反馈探测器。

激光跟踪仪的原理与测距经纬仪相似,其测距设备的精度高于 $1\ \mu\text{m}$,测角元件精度优于 $1''$ 。由此可以估计每增加 $1\ \text{m}$ 增加的测量误差大约为 $10\ \mu\text{m}$ 量级。在实际的应用之中,可以通过合理的布置测点以及坐标系可有效地减少误差:亚利桑那大学在检测 LSST 以及 GMT 主镜轮廓时,将激光跟踪仪安放在主镜的焦点处,实现等距测量,来减少测角元件的影响;在大型回转体如大型轴承的检测中,计量人员一般将激光跟踪安放在回转轴附近,以获得

更高的测量精度。但实际系统的测量往往比单个部件的检测更加复杂,为了估计其精度,比较通用的方法是使用蒙特卡罗方法来对于最后的结果进行精度仿真分析。对于使用编码器进行抖动测量情况,需要预先对编码器进行标校,标校时使用激光跟踪仪对系统的转轴进行标校,在获得轴线位置后,进而获得转角信息,并与所对应的编码器示的名义值进行核对,建立 look-up table。

将传感器安放于镜面之上,使望远镜进行给定的运动,通过刚体运动学,就可以获得具体的抖动数值。利用多个加速度计可以获得镜面的多维的加速度信息,之后通过积分可以获得位移或者角位移信号。

2 系统抖动测试误差分析

2.1 激光跟踪仪进行编码器标校

利用激光跟踪仪来进行大型结构件的检测与装调,在大型的飞机、船舶的建造中已经有较为广泛的应用,随着大口径望远镜的发展,激光跟踪仪也逐渐应用在地基大口径望远镜的建设之中。

对于大型轴承,可直接使用激光跟踪仪进行测量。利用轴系上的点的测量结果,就可以得到轴系的轴晃、端跳等信息。激光跟踪仪的误差可近似为:增加一米的测量距离,误差增加 $8\ \mu\text{m}$ 。利用三角关系,可以由位移来计算得到角度,如下所示:

$$\theta = 2\arcsin\left(\frac{\Delta}{2r}\right)$$

式中: θ 为待测量的角度; Δ 为测得的位移; r 为测得的距离。经过差分可以得到角度误差与测量的轴系尺寸之间的关系,如下式所示:

$$\delta\theta = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{r}\delta\Delta\right)^2 + \left(\frac{\Delta}{r^2}\delta r\right)^2}}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

由于 $\delta\Delta = \delta r = \alpha r$, 其中 α 为测量误差的比例系数, $\alpha = 8\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。

在小角度假设下可得:

$$\delta\theta = \alpha \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta}{r}\right)^2}$$

其关系如图 2 所示,由图可以看出,随着转动半径的增大,激光跟踪仪测角的误差接近于其标称的误差增加系数 $\alpha = 8\ \mu\text{rad}$ 。故在做标定方案时,需要考虑这一极限情况。

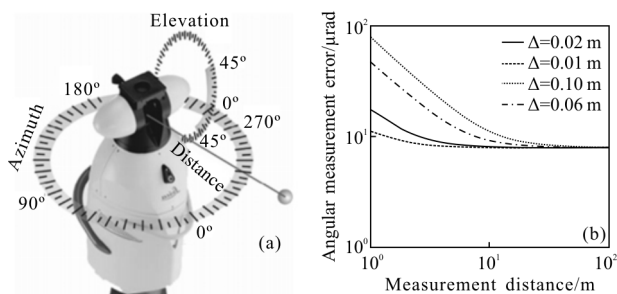


图 2 激光跟踪仪原理图以及测角误差以及测量距离关系图

Fig.2 Sketch of laser tracker measurement principle and relationship between error and measurement distance

利用激光跟踪仪对编码器进行标校的基本原理是：转动体上的点随着转动体运动会在空间上形成一段弧,通过研究这段圆弧所在的圆以及弧上的点,就可以得到这个转动体的诸多信息。但实际应用时,不同的采点方式以及激光跟踪仪的摆放位置,都可能影响最后的结果,故需要对利用激光跟踪仪标定的每个步骤都进行误差分析,并根据此分析确定标定方案。

第一步,要考虑采样点的分布,均匀分布与任意分布的采样的所得到的圆心如图 3(a)所示。一般来说,均匀分布的采样布局可以较为准确地得到所要检测的圆心,如果采样点随机的分布在圆周之上,通过多次仿真实验可得到非均匀分布检测导致的检测位置误差,如图 4(a)所示。根据之前的分析,检测时应该均匀的布置采样点,但是对于实际的检测来说,有些位置很难检测到。

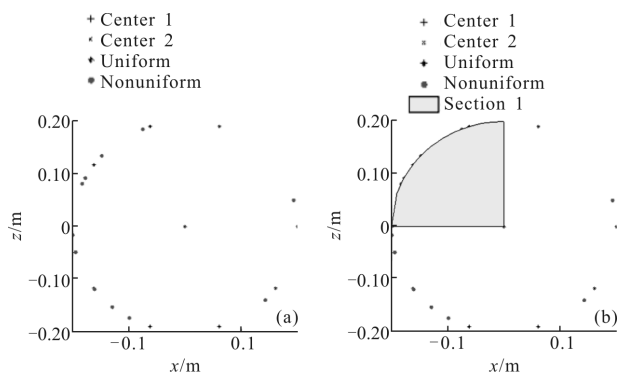


图 3 转轴测量测量分布(a)以及分区域测量示意图(b)

Fig.3 Axis measurement points distribution (a) and measurement section distribution (b)

根据不等精度测量的原理,对于检测的结果进行加权,就可以解决采样不均匀的问题。假设将圆周分为 4 个区域,各个区域检测点的数据点的个数为

N_1, N_2, N_3, N_4 。如图 3(b)所示。每个检测区域所对应的权重为 P_1, P_2, P_3, P_4 。权重与测量点的数量之间的关系如下:

$$P_1:P_2:P_3:P_4 = \frac{1}{N_1} : \frac{1}{N_2} : \frac{1}{N_3} : \frac{1}{N_4}$$

假设所得到的点的坐标为 $[x_i, y_i, z_i]_{i=1-4}$,最后得到

旋转中心为 $[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}]$ 可以由以下的公式可得,利用加权方法得到的圆心拟合精度如图 4(b)所示。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^4 p_i x_i}{\sum_{i=1}^4 p_i}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 p_i y_i}{\sum_{i=1}^4 p_i}, \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^4 p_i z_i}{\sum_{i=1}^4 p_i}$$

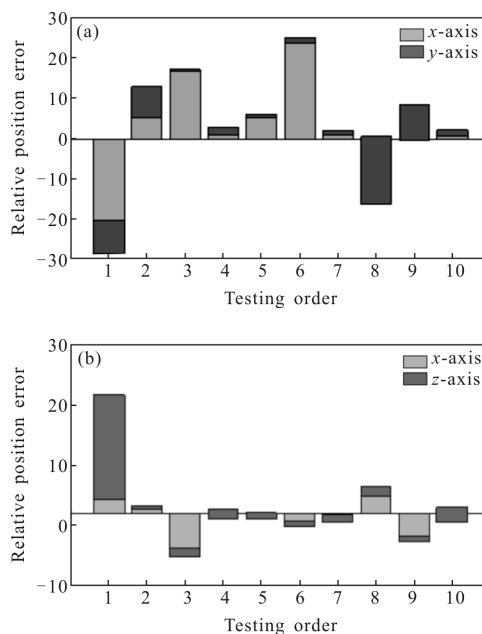


图 4 等权重圆心拟合结果(a)以及不等权重拟合结果(b)

Fig.4 Uniform weight (a) and non-uniform weight fitting (b)

之前确定测量点位置的推导时,假设测量点没有误差,为了更好的测量转角信息以及尽可能精确确定转轴位置,需要考虑测点的测量误差,故在此使用蒙特卡洛的分析方法来得到激光跟踪仪与待测轴系误差最小的相对摆放位置。对于球坐标测量仪器,其得到的坐标值可以使用如下的表达式进行表示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \alpha \sin \beta \\ l \sin \alpha \cos \beta \\ l \cos \beta \end{bmatrix}$$

式中: l 为球坐标下的距离值; α, β 对应的为球坐标下的方位与俯仰角。考虑到每个测量参数可能携带

的误差,可以将 3 个参数进行如下表达:

$$l' = l + \varepsilon_l$$

$$\alpha' = \alpha + \varepsilon_\alpha$$

$$\beta' = \beta + \varepsilon_\beta$$

式中: ε_l 、 ε_α 以及 ε_β 分别对应 3 个测量值的误差。激光跟踪仪的测距误差为 $0.1 \mu\text{m}$, 主要由内部激光器的精度所决定。测角精度为 $1''$, 主要是由于其内部编码器的精度所决定。在此情况下,可以得到加到各个参数上的误差分布为:

$$\varepsilon_l \sim N(0, 0.1), \varepsilon_\alpha \sim N(0, 1), \varepsilon_\beta \sim N(0, 1)$$

对于 tilt 轴,可以选择的标校方式有两种:一种是同轴标校;另一种是轴外标校。分别对应将激光跟踪仪置于轴线上与轴线之外的两种检测相对位置。不同方法的光线走向轮廓图如图 4、5 所示。经过

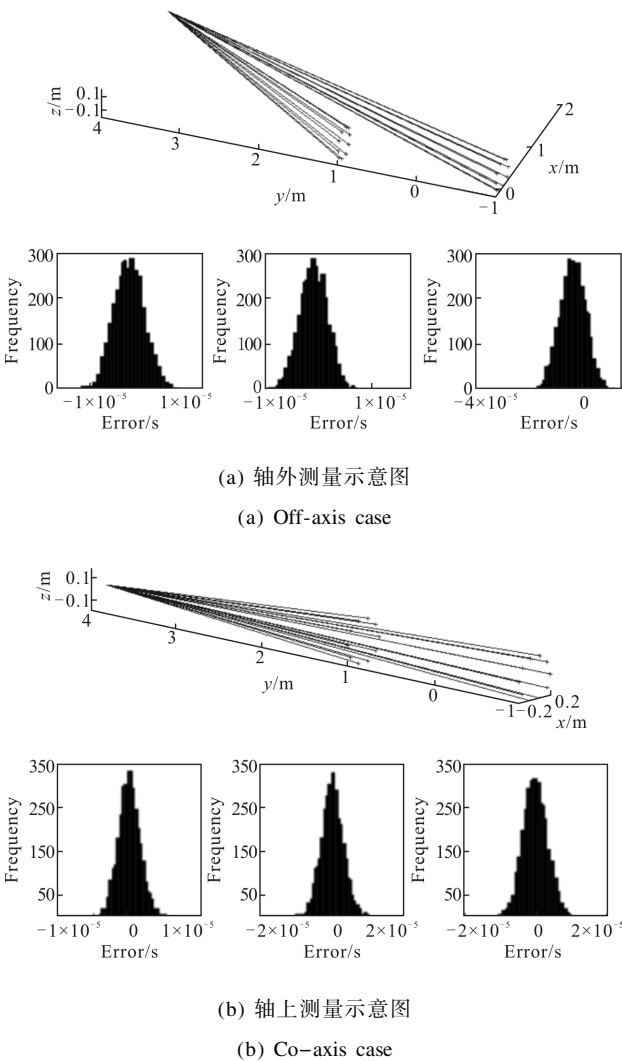


图 5 激光跟踪仪测量俯仰轴以及误差

Fig.5 Laser tracker tilt axis measurement and error

1 000 次仿真分析,最后得到两个圆心连线中心的 3 个方向的误差如图 4、5 中所示,以 x 方向为例,对比可得,在轴上测量不仅误差的期望($1 \mu\text{m}$)小于轴外测量($3 \mu\text{m}$),同时误差的分布也更加紧凑。但在实际的测量中,由于物理位置的限制,可能无法实现轴上测量,那么可根据图 6 来确定离轴量与测量误差的关系。

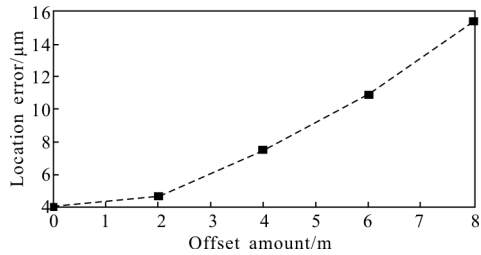


图 6 激光跟踪仪离轴量以及测量误差的关系

Fig.6 Relationship between error and the laser tracker offset

对于方位轴,由于空间以及激光跟踪仪功能的限制,只能进行轴外测量,其光线走向轮廓图以及误差分布如图 7 所示。可得方位轴线的定位误差在激光跟踪仪偏置两米的情况下为: $4.6 \mu\text{m}$ (2-范数)

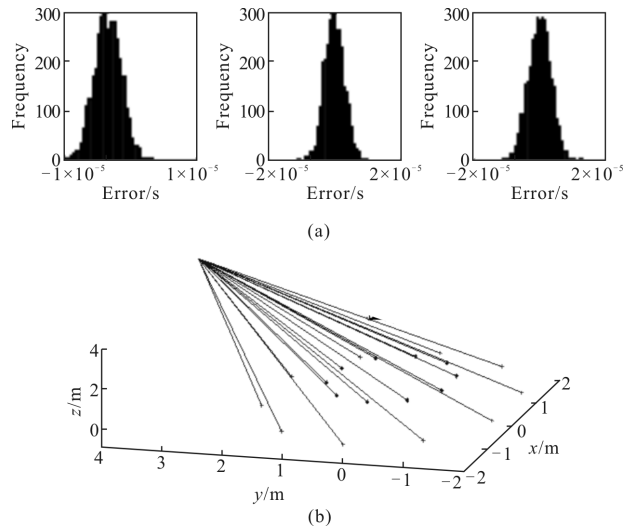


图 7 激光跟踪仪于轴外测量方位轴以及误差

Fig.7 Laser tracker rotation axis measurement and error

2.2 加速度计进行抖动测试

抖动测量的另一项重要的任务就是利用加速度计来测试镜面的抖动以及 GSSM 对于主镜的输出力。在此分别对于采样所带来的误差与加速度计本身的误差进行分析与标定。

对于使用加速度计来进行抖动测量的情况,使

用较多的数学工具为功率谱。功率谱方法可给出统计学上的指导,但是采集数据的方式需要满足一定的要求,才可以全面的体现其统计学特性。正弦与余弦规律都可以作为研究振动的基本数学模型,由于初始位移为零,故研究均方根为 1 的正弦运动 y :

$$y(t)=\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

式中: ω 为该运动的特征频率; t 为时间。在一段采样时间内该运动的平均值 $\bar{y}(t_s)$ 为:

$$\bar{y}(t_s)=\frac{1}{t_0} \int_{t_s}^{t_s+t_0} \sqrt{2} \sin(\omega t) dt =$$

$$\frac{-\sqrt{2}}{\omega t_0} \cos(\omega t) \Big|_{t_s}^{t_s+t_0} = \frac{\sqrt{2}}{\omega t_0} [\cos(\omega t_0) - \cos(\omega t_s + \omega t_0)]$$

式中: t_s 为开始测量的时刻; t_0 为采样时间; ω 为该运动的特征频率; t 为时间。

一段采样时间内该运动的均方根 $\sigma^2(t_s)$ 为:

$$\sigma^2(t_s)=\frac{1}{t_0} \int_{t_s}^{t_s+t_0} [\sqrt{2} \sin(\omega t) - \bar{y}]^2 dt =$$

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_s+t_0} [\sqrt{2} \sin(\omega t) - \bar{y}]^2 dt$$

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_s} [\sqrt{2} \sin(\omega t) - \bar{y}]^2 dt =$$

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_s+t_0} [2\sin^2(\omega t) - 2\sqrt{2} \sin(\omega t) \bar{y} + \bar{y}^2] dt$$

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_s} [\sqrt{2} \sin(\omega t) - \bar{y}]^2 dt =$$

$$\frac{1}{t_0} \left[t - \frac{\sin(2\omega t)}{2\omega} - 2\sqrt{2} \sin(\omega t) \bar{y} t + \bar{y}^2 t \right] \Big|_0^{t_s+t_0} -$$

$$\frac{1}{t_0} \int_0^{t_s} [\sqrt{2} \sin(\omega t) - \bar{y}]^2 dt =$$

$$\frac{t_s+t_0}{t_0} - \frac{\sin(2\omega t_s+2\omega t_0)}{2t_0\omega} -$$

$$\frac{1}{t_0} [2\sqrt{2} \sin(\omega t_s+\omega t_0) \bar{y} + \bar{y}^2] (t_s+t_0) -$$

$$\frac{t_s}{t_0} + \frac{\sin(2\omega t_s)}{2t_0\omega} - \frac{1}{t_0} [2\sqrt{2} \sin(\omega t_s) \bar{y} + \bar{y}^2] (t_s) =$$

$$1 - \frac{\sin(2\omega t_s+2\omega t_0)}{2t_0\omega} - \frac{1}{t_0} [2\sqrt{2} \sin(\omega t_s+\omega t_0) \bar{y}] (t_s+t_0) +$$

$$\bar{y}^2 + \frac{\sin(2\omega t_s)}{2t_0\omega} + \frac{t_s}{t_0} [2\sqrt{2} \sin(\omega t_s) \bar{y}]$$

式中: $\bar{y}(t_s)$ 为一段采样时间内该运动的平均值; t_s 为开始测量的时刻; t_0 为采样时间; ω 为该运动的特征频率; t 为时间。

观察上式,可以得到在极限情况下的抖动均方根值。

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \bar{y}(t_s) = 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \sigma^2(t_s) = 1$$

说明采样频率无限高,就可不必考虑采样周期的问题,但是实际情况不可能满足极限条件,故需要按照具体的情况考虑采样方案。假设由于测试者的反应所带来的时间延迟 $t_s=0.1$ s, 可得抖动均方根值与频率的关系如图 8 所示。根据图 8 可以对应找到关心频段与采样时间的对应关系。如果要考虑 0.05 Hz 的分量,所以需要接近 10 s 的采样时间。

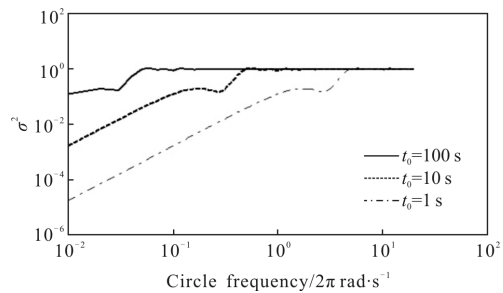


图 8 抖动均方根值与频率的关系

Fig.8 Relationship between jitter RMS and frequency

在大口径望远镜动力学特性研究中,累计功率谱获得了大量的应用,利用累积功率谱,可以更好地研究对于系统影响较大的频率,因为在较为关键的频率位置,累积功率谱会产生类似于阶梯一样的形状,根据功率谱积分可以均方根的性质来看,在该频率存在一个影响较大的峰值,累积功率谱的定义如下式所示:

$$PSD_c(F) = \int_0^F PSD(f) df$$

式中: $PSD_c(F)$ 为累积功率谱; F 表示积分到的频率值; $PSD(f)$ 为原始的功率谱; f 为积分算子。累积功率谱的物理意义在于分析系统不同频段范围内系统的均方根值。

对于从加速度获得位移信号,低频区中含有大量噪声,故针对此情况文中引入了反向累计功率谱如式所示:

$$PSD_{r,c}(F) = \int_F^{\infty} PSD(f) df$$

式中: $PSD_{r,c}(F)$ 为逆累积功率谱; F 表示积分到的频率值; $PSD(f)$ 为原始的功率谱; f 为积分算子。利用该式

可以分离低阶噪声的影响,在反向累积功率谱的拐点处,获得系统的特征频率。通过观察逆累积功率谱也可以看出,结果系统的各阶模态分布的较为均匀。

按照之前分析得到的方法,对于实验所用到的加速度计 333B32 进行了检测,并利用逆累积功率谱得出在 0.05 Hz 以外,其精度为 0.6 $\mu\text{m}@2048\text{ Hz}$ 。

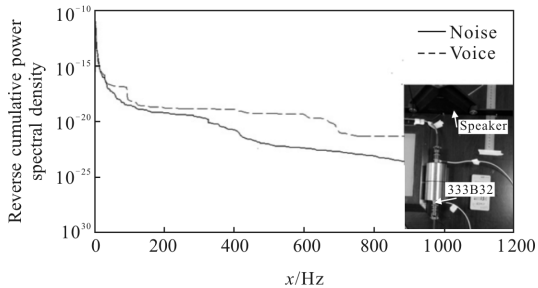


图 9 加速度计标定示意图以及误差

Fig.9 Sketch for the accelerometer calibration and the error

4 结 论

在文中分别对于利用激光跟踪仪以及加速度计进行 jitter 测试的情况进行了误差分析。得出激光跟踪仪俯仰轴线的定位误差,在轴上测量不仅误差的期望(1 μm)小于轴外测量(3 μm);方位轴线的定位误差在激光跟踪仪离开两米的情况下的模为 4.6 μm ,并利用逆累积功率谱得出加速度计 333B32 在 0.05 Hz 以外,其精度为 0.6 $\mu\text{m}@2\ 048\text{ Hz}$ 。

参考文献:

[1] Virginia Ford, Christopher Carter, Christophe Delrez, et al. Jitter studies for the secondary and tertiary mirror systems on the thirty meter telescope[C]//SPIE, 2014, 9151: 91512H.
 [2] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli. Overview of AC servo control system for the large telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 895–908. (in Chinese)
 [3] Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao, et al. Rapid length

measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1524–1530. (in Chinese)
 [4] Glaese R, Sheehan M. Vibration mitigation for wind-induced jitter for the giant magellan telescope[C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2012: 8440–8444.
 [5] Peng Shuping, Chen Tao, Liu Tingxia, et al. Reflection process of fast-steering mirror of laser launching system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 378–386. (in Chinese)
 [6] Hambly N C, Mann R G, Bond I, et al. VISTA data flow system survey access and curation: the WFCAM science archive[C]//SPIE, 2004, 5493: 423–431.
 [7] Cao Xiaotao, Sun Tianyu, Zhao Yunlong, et al. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope[J]. *Chinese Optics*, 2014,7(5): 739–748. (in Chinese)
 [8] Gunnels S. The giant magellan telescope (GMT): structure design updatev[C]//SPIE, 2008(1): 7012.
 [9] C Michael Warner, Victor L Krabbendam, German Schumacher, et al. Delgadillo, SOAR telescope: 4 meter high performance mount performance results[C]//SPIE, 2004, 49: 5495.
 [10] Zhang Zili, Zhu Han, Zhou Weihu. Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1205–1212. (in Chinese)
 [11] Robert D Sobek. Mitigating wind induced telescope jitter [C]//SPIE, 2005, 5810: 1–10.
 [12] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Analysis for opto-electrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7 (6): 879–888. (in Chinese)
 [13] George Z Angeli, Scott Roberts, Konstantinos Vogiatzis. Systems engineering for the preliminary design of the thirty meter telescope[C]//SPIE, 2008, 7017: 701704.