

一种圆锥扫描式红外地球敏感器噪声测试方法

盖芳钦,涂智军

(北京控制工程研究所,北京 100190)

摘要:详细分析了圆锥扫描式红外地球敏感器的噪声指标要求和噪声来源组成,设计了一整套针对圆锥扫描式红外地球敏感器的噪声测试方法。经实践验证,该噪声测试方法正确、有效。

关键词:圆锥扫描式红外地球敏感器;微弱信号;噪声测试;双比值判读方法

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.009

Noise measurement method for conical scanning infrared earth sensor

GAI Fang-qin, TU Zhi-jun

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract:The noise indicator and noise source in conical scanning infrared earth sensor are analyzed. A noise measurement method is designed for conical scanning infrared earth sensor. The validity of this noise measurement method is verified through the experiment.

Key words:conical scanning infrared earth sensor; weak signal; noise measurement method; double ratio interpretation method

1 引言

一个探测系统所能分辨的极限(最小)辐射功率取决于它的噪声水平,所以控制噪声在探测系统研制过程中至关重要。圆锥扫描式红外地球敏感器作为一种探测微弱红外信号的探测系统,对噪声水平要求比较高,需要在设计研制过程中进行噪声控制,以确保噪声水平满足整机信噪比指标要求。噪声能够反映电子产品内部微观变化,产品发生缓慢异常变化时,噪声往往能够先于产品宏观指标表现出异常。产品噪声的大小,不仅限制了其检测微弱信号的能力,对于低频噪声而言,更能够反映器件稳定性和可靠性的好坏^[1]。因此,在圆锥扫描式红外

地球敏感器设计研制过程中进行噪声测试十分必要。

本文详细分析了圆锥扫描式红外地球敏感器噪声指标要求及噪声来源组成,设计了一整套针对圆锥扫描式红外地球敏感器的噪声测试方法。实践证明,该噪声测试方法正确、有效。

2 圆锥扫描式红外地球敏感器噪声分析

2.1 噪声指标分析

如图1所示,圆锥扫描式红外地球敏感器的视场相对于地球作圆锥扫描式运动,当视场穿越地平线时,即扫到地球和空间交界时,红外地球敏感器接收到红外辐射能量的跃变,经过红外探测器把这种

辐射能量的跃变转变成电信号,形成地球波信号,然后通过放大和处理电路,把它转变成前后沿脉冲信号,即找到前沿地平检测点和后沿地平检测点,最后通过计算电路,把前后沿地平检测点信号与地中参考点信号进行比较,得到卫星姿态角信息^[2]。

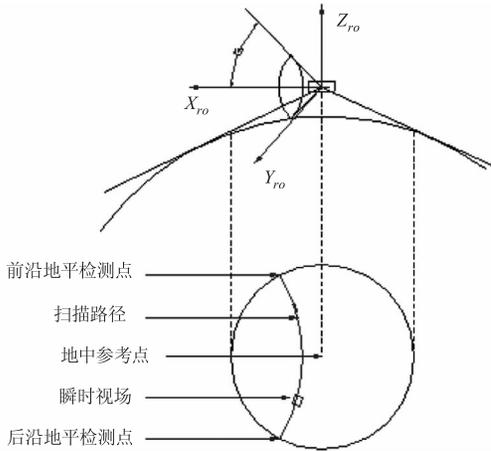


图 1 红外地球敏感器扫描路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared earth sensor scanning path

卫星姿态角测量精度是衡量红外地球传感器的重要指标。圆锥扫描式红外地球敏感器测量得到的姿态角表达式为:

$$\theta = \frac{1}{2}(A_{in} - A_{out}) \quad (1)$$

式中, A_{in} 为前沿地平检测点与地中参考点之间的角度; A_{out} 为地中参考点与后沿地平检测点之间的角度。

A_{in} 的误差 ε_{in} 是由前沿地平检测点信号的误差和地中参考点信号的误差引起的。地中参考点信号幅度高,噪声小,故误差很小。所以 A_{in} 的误差主要就是前沿地平检测点的误差。 A_{out} 的误差 ε_{out} 是由地中参考点信号的误差和后沿地平检测点信号的误差引起的。同理, A_{out} 的误差主要就是后沿地平检测点的误差。

前后沿地平检测点的误差 ε_{in} 和 ε_{out} 由下式确定:

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon_{out} = 360 \times f \times \frac{T_r}{(S/N)} \quad (2)$$

式中, f 为红外地球敏感器圆锥扫描频率; S/N 为地球波信号信噪比; T_r 为地球波信号上升时间。

可以算出姿态的随机误差:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta} &= \sqrt{\left| \varepsilon_{in}^2 - \frac{1}{2}(\varepsilon_{in}^2 + \varepsilon_{out}^2) \right|} \\ &= \sqrt{\left| \frac{1}{2} \varepsilon_{in}^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_{out}^2 \right|} \end{aligned} \quad (3)$$

由于前沿地平检测点误差和后沿地平检测点误差大小基本是相等的,而且两者无相关性,所以:

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{in} = \varepsilon_{out} = 360 \times f \times \frac{T_r}{(S/N)} \quad (4)$$

信号上升时间 T_r 主要取决于地球辐射梯度引起的上升时间 t_h , 红外视场渡越地平边界引起的上升时间 t_A , 红外探测器时间常数 τ_d 引起的上升时间 t_d , 一般取 $t_d = \tau_d$ 。

T_r 由下式近似算出:

$$T_r = \sqrt{t_h^2 + t_A^2 + t_d^2} \quad (5)$$

将相关数据代入,可算出: $T_r = 7.8 \text{ ms}$ 。

假定圆锥扫描式红外地球敏感器圆锥扫描频率 $f=1 \text{ Hz}$, 姿态角随机误差要求小于 0.1° , 根据公式 (4) 可以算出地球波信号信噪比需要满足 $S/N > 28$ 的要求。

红外探测器输出信号幅度可按照下式计算:

$$V = P \cdot R = N_0 \cdot A \cdot \Omega \cdot \alpha \cdot R \quad (6)$$

式中, N_0 为地球面辐射亮度; A 为红外探测器光学系统入瞳面积; Ω 为光学系统立体角; α 为光学系统效率; R 为响应率。

受季节和纬度因素影响,地球波信号幅度基本在 $200 \mu\text{V}$ 到 $300 \mu\text{V}$ 之间波动,最小值为 $200 \mu\text{V}$ 。

因此,圆锥扫描式红外地球敏感器噪声幅度折算到红外探测器输出端应小于 $7.14 \mu\text{V}$ 才可以满足信噪比 $S/N > 28$ 和整机随机误差指标要求。

2.2 噪声来源分析

圆锥扫描式红外地球敏感器组成框图如图 2 所示。

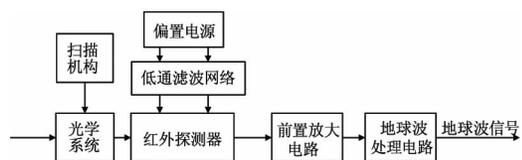


图 2 圆锥扫描式红外地球敏感器组成框图

Fig. 2 Composition diagram of conical scanning

infrared earth sensor

圆锥扫描式红外地球敏感器使用热敏电阻型红

外探测器,偏置电源输出为红外探测器提供偏置电压,前置放大电路将红外探测器输出的微伏级交流信号放大 1000 倍,地球波处理电路将模拟信号处理为成脉冲信号。按照噪声级联原理,地球波处理电路对噪声的影响比前置放大前小 1000 倍,其影响可忽略。因此,圆锥扫描式红外地球敏感器噪声来源是红外偏置电源组件噪声、红外探测器组件噪声和前置放大电路组件噪声。噪声测试方法应该能够覆盖这三个组件及整机的噪声测试。

红外偏置电源噪声 (N_p)、红外探测器噪声 (N_B) 和前置放大电路噪声 (N_Q) 基本不相关,整机噪声 (N_Z) 可以用下式近似表示:

$$N_Z = \sqrt{\left(\frac{N_p}{n}\right)^2 + N_B^2 + N_Q^2} \quad (7)$$

式中, n 为红外偏置电源输出经过低通滤波后的衰减系数。

3 噪声测试方法介绍

3.1 噪声测试系统

为满足圆锥扫描式红外地球敏感器三种组件和整机测试需求,搭建圆锥扫描红外地球敏感器噪声测试系统如图 3 所示。进行组件测试时,需要使用低噪声的器件或设备来代替其他组件,以模拟其在整机条件下进行噪声测试。圆锥扫描式红外地球敏感器噪声测试系统对微弱的噪声信号进行测试,其本身噪声水平至少要低于红外地球敏感器噪声水平 1/5,按照 2.1 节结果计算,噪声测试系统自身噪声峰峰值应小于 1.43 μV 。

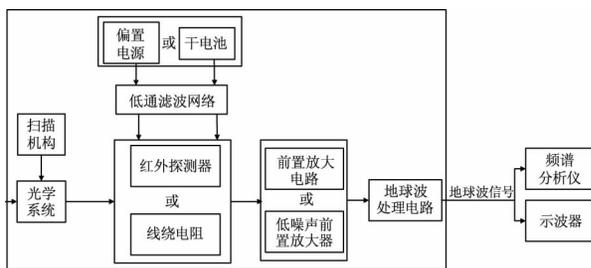


图 3 红外地球敏感器噪声测试系统框图

Fig. 3 Composition diagram of noise measure system for infrared earth sensor

图 3 中线绕电阻可以用来代替红外探测器以测试探测器以外的组件。线绕电阻是用康铜、锰铜或镍铬合金丝在陶瓷骨架上绕制而成的一种电阻器,

特点就是精度高,噪声小,不存在电流噪声和非线性。线绕电阻噪声只有热噪声,其热噪声峰峰值可用下式表示:

$$V_{n1} = \sqrt{4KTBR} \quad (8)$$

其中, K 为波尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} ; T 按照常温取 300 K; B 为带宽,取 100 Hz, R 取红外探测器主片和补片并联后阻值 100 $\text{k}\Omega$,将以上代入,可得 $V_{n1} = 0.40 \mu\text{V}$ 。

图中低噪声放大器 Stanford Research SR560 可以用来代替前置放大电路组件以测试前置放大电路组件以外的组件。低噪声放大器输出噪声峰峰值小于 0.12 μV ,按最大值计算, $V_{n2} = 0.12 \mu\text{V}$ 。SR560 同时能够模拟前置放大电路组件带宽选择和信号幅值放大的功能。

图中干电池可以用来代替偏置电源组件以测试偏置电源组件以外的组件。干电池在电量充足时噪声很小,其峰峰值 V_{n3} 为皮伏量级,可忽略不计。只要在测试前确认电量充足即可。

该套测试系统的总噪声水平 (V_t) 取决于用于替代红外探测器的线绕电阻噪声 (V_{n1})、低噪声前置放大器噪声 (V_{n2}) 和用于替代偏置电源的干电池噪声 (V_{n3})。以上各部分噪声源互不相关,噪声测试系统的最大总噪声水平可以近似用下式计算:

$$V_t = \sqrt{V_{n1}^2 + V_{n2}^2 + V_{n3}^2} \quad (9)$$

将以上分析结果代入公式(9)计算, $V_t = 0.42 \mu\text{V} < 1.43 \mu\text{V}$,满足噪声测试系统自身噪声水平要低于红外地球敏感器噪声水平 1/5 的要求。

3.2 噪声测试结果判读

传统噪声测试结果判读着重关注噪声电压频谱密度曲线,通过对频谱密度曲线进行积分得到噪声的均方根,即 RMS 值,再根据 RMS 值的大小进行判读。本文提出一种双比值方法来进行数据判读。双比值方法是指根据低频噪声 RMS 值与背景低频噪声 RMS 值的比值和时域噪声信号峰峰值与 RMS 值的比值这两个比值来判读噪声。

第一个比值是低频噪声 RMS 值与背景低频噪声 RMS 值做比,这样可以排除多次测试中不同外界环境中外界因素的干扰,将不同外界环境下的噪声测试结果进行归一化。

第二个比值是时域噪声信号峰峰值与 RMS 值做比,是基于圆锥扫描式红外地球敏感器地球波信号是交流信号没有直流分量的情况下得来的。

正常情况下,圆锥扫描式红外地球敏感器大部分噪声服从高斯分布,其概率密度函数^[3]为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

将概率密度函数积分得到概率分布函数为:

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (11)$$

圆锥扫描式红外地球敏感器地球波信号没有直流分量,即 $\mu = 0$,将公式(10)代入公式(11)可得:

$$P(-\sigma < x < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 0.683 \quad (12)$$

$$P(-3.3\sigma < x < 3.3\sigma) = \int_{-3.3\sigma}^{3.3\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 0.999 \quad (13)$$

图 4 为概率密度函数与峰峰值的关系。

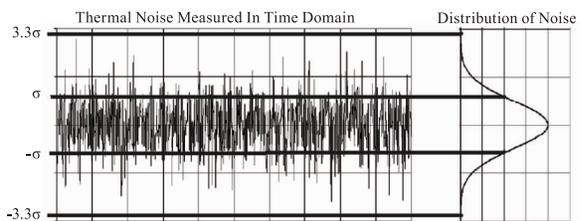


图 4 概率密度函数与峰峰值关系图

Fig. 4 Relationship between probability density function and peak value

由公式(13)和图 4 可知:

$$\frac{V_{PP}}{\sigma} = 6.6 \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (15)$$

将 $\mu = 0$ 代入,则:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} = V_{RMS} \quad (16)$$

由公式(14)和公式(16)可得:

$$\frac{V_{PP}}{V_{RMS}} = 6.6 \quad (17)$$

因次,正常情况下时域噪声信号峰峰值与 RMS 峰峰值的比值应该在 6.6 左右。

双比值判读方法能够从频域和时域两方面来考

察被测目标的噪声水平,可以更全面地考察噪声,对噪声变化十分敏感。

4 噪声测试方法应用

噪声测试方法得到的典型频域曲线示例如图 5 所示,得到的典型时域噪声信号如图 6 所示。

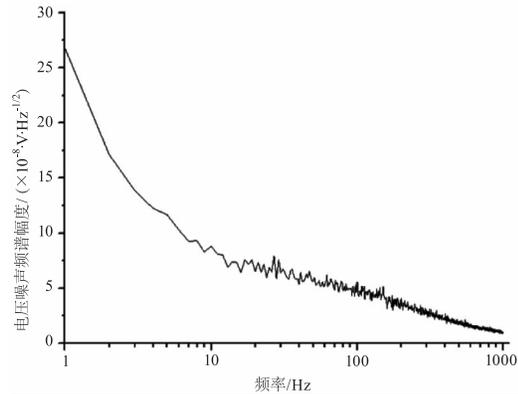


图 5 噪声电压频谱密度曲线

Fig. 5 Noise voltage spectral density curve

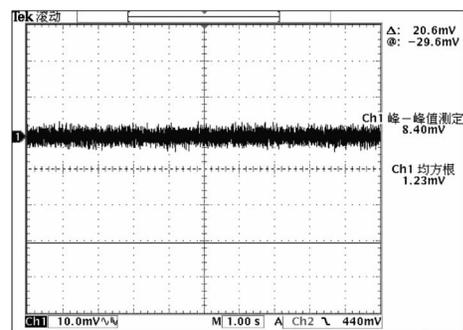


图 6 时域噪声信号

Fig. 6 Noise in time domain

该测试方法已经对上百套圆锥扫描式红外地球敏感器进行噪声测试,实践证明该噪声测试方法简便、有效,在圆锥扫描红外地球敏感器研制过程中发挥了重要作用。该圆锥扫描式红外地球敏感器噪声测试方法为红外地球敏感器设计研制提供了支持,对微弱信号处理系统和探测系统噪声测试有普遍的指导意义。

5 结论

本文对圆锥扫描式红外地球敏感器噪声进行了分析,进而提出一种噪声测试方法,并经过了实践验证,结果表明该测试方法能够满足圆锥扫描式红外地球敏感器噪声测试需求且简便有效。

参考文献:

[1] WU Yong,ZHUANG Yiqi. The method for measuring low

- frequency noise in the operational amplifier [J]. IT Age 2004, (6): 11 - 14. (in Chinese)
- 吴勇, 庄奕琪. 运算放大器的低频噪声测试方法 [J]. 电子科技, 2004, (6): 11 - 14.
- [2] XU Minggeng, WANG Susu, BAO Bairong. Satellite attitude dynamics and control (3) [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2003: 58 - 121. (in Chinese)
- 徐明庚, 王素素, 鲍百容, 等. 卫星姿态动力学与控制 (3) [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 58 - 121.
- [3] SHENG Zhou, XIE Qianshi, PAN Chengyi. Probability theory and mathematical statistics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [4] LI Weihua. A new method for analysis of noise in frequency and time in semiconductor devices [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- 李伟华. 半导体器件噪声频域和时域分析的新方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [5] WU Gang, ZHANG Xiaoping. Research of resistance thermal noise [J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(4): 86 - 87. (in Chinese)
- 伍钢, 张小平. 电阻热噪声的研究 [J]. 测控技术, 2006, 25(4): 86 - 87.
- [6] BAO Junlin, ZHUANG Yiqi, DU Lei, et al. Noise testing and analyzing system of electronic device based on virtual instrumentation [J]. Journal of Instruments and Instruments, 2004, 25(Suppl.): 351 - 356. (in Chinese)
- 包军林, 庄奕琪, 杜磊, 等. 基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试分析系统 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊): 351 - 356.