

文章编号: 0253-2239(2010)09-2493-11

新型双光栅水平向地震检波器的研究

宗 泽 行 鸿 彦

(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要 针对地震勘探中横波检波灵敏度低的问题,提出了一种基于菲涅耳衍射理论的双光栅水平向地震检波器。介绍了系统的工作原理,通过使用新的人工地震动模拟函数,研究检波器力学模型运动微分方程的解和频率特性,证明了系统的可行性。推导了激光束经过双光栅系统衍射后的场分布和光强,仿真分析表明,沿接收屏纵向强度呈波形分布,利于光电信号转换,推出了条纹频率与地震动水平向速度的关系式,利用对称指示光栅提出了一种对地震动位移、速度进行辨向并记录平衡位置时间的简便方法。初步计算该检波器的灵敏度为 136 pm,动态范围达 144 dB,与其他检波器相比,对应的性能参数值提高了 10%以上,有良好的工程应用前景。

关键词 光学设计;地震检波器;衍射;双光栅;条纹频率

中图分类号 TN202; P315.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2493

A Novel Double-Grating-Based Horizontal Geophone

Zong Ze Xing Hongyan

(College of Electronic and information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract A new type of short-period horizontal geophone is developed for solving the low sensitivity for detecting ground motion caused by S-wave, which mainly constructed with a vibration limit pendulum and a double-grating diffraction system. The working principle of this geophone is introduced. Its feasibility is proved by analyzing the differential vibration equation and frequency characteristic of mechanical model using a new simulation function of artificial ground motion and theoretical studying the diffraction field after superposed gratings. The light intensity on receiving screen is derived by applying Fresnel diffraction theory. The horizontal velocity of ground motion is calculated through putting forward an easy way to determine the relation between fringe frequency and ground motion speed, and record the time when pendulum passes through the equilibrium position based on the symmetric indicative grating. The dynamic range and sensitivity of geophone system that uses 1800 grooves/mm gratings and 4096 fringe subdivision technique is around 144 dB and 136 pm, respectively. Compared with other kinds of geophone, the corresponding parameters of this newly system is improved at least 10%, showing its application potential in exploration engineering.

Key words optical design; geophone; diffraction; double-grating; fringe frequency

1 引 言

地震检波器是勘探作业中负责采集和记录由人工地震波反射或折射引起的地面运动信号的主要设备,其性能好坏直接影响数据的采集质量。近年来

随着地震勘探对检波精度要求的不断提高,高灵敏度、大动态范围检波器的研发与装备成为该领域的研究热点。光栅地震检波器就是在此背景下发展起来的一种新型检波设备,一般由力学系统,光学系统

收稿日期: 2009-11-12; **收到修改稿日期**: 2010-03-08

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”项目和江苏省科技创新与成果转化专项(BE2008139)资助课题。

作者简介: 宗泽(1984—),男,硕士研究生,主要从事光电传感与微弱信号处理方面的研究。

E-mail: zongzezz@hotmail.com

导师简介: 行鸿彦(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事微弱信号检测与处理、气象仪器物探测量仪器等方面的研究。E-mail: xinghy@nuist.edu.cn(通信联系人)

以及光电探测系统三部分构成^[1~7]。相对于传统的机械、电磁类检波器,它的高频响应好、动态范围宽、失真度低且抗电磁干扰,是检波器的发展方向之一。目前国内外研制的光栅地震检波器主要有:利用谐振波长对外界温度、应力高敏感度特性的光纤光栅检波器,运用衍射光栅多普勒频移的光栅多普勒效应检波器和利用光栅分光及条纹倍增技术的非对称双极闪耀光栅检波器。然而,无论是前两者有限的动态范围^[1,5,6],还是对角度和间距有特定要求的非对称双极闪耀光栅的高成本和高线数制作难题^[8],都限制了其在高精度勘探领域的进一步应用。此外,光栅检波器都是垂直向设计,用于纵波检波。虽然横波比纵波振幅更大、衰减更慢、分辨率更高,能提供不同的地质构造信息,对于某些地层的勘测更加有利^[9~12]。但是现有的光栅检波器不能明显改善横波检波的灵敏度,这也是阻碍其发展的重要因素^[13]。

针对上述问题,设计了一种双光栅短周期检波器,用来采集由人工地震横波引起的地面水平向震动信号。系统利用光栅摆惯性引起有初始旋转角的平行光栅付之间产生相对运动,将微弱震动信号转换为动态条纹信号,通过光电转换,运用地面运动速度与条纹频率的关系式和基于对称光栅的辨向方法,得到地震动波形,实现横波探测。文中提出一种改进的地震动合成函数能更好的验证系统输出的有效性。双光栅衍射的高放大倍数以及条纹细分技术的采用,极大拓宽了系统的动态范围,显著提高了检波的灵敏度。对动态光强的推导和衍射条纹的分析,为更好地处理信号,获取地震信息提供了可靠依据。

2 检波器的内部结构及基本工作原理

双光栅水平向地震检波器的内部结构如图1所示。系统主要由激光器、扩束镜、限振光栅摆、衍射箱和光电探测器构成。激光器与扩束镜均固定于检波器内壁上,通过扩束镜的激光束能够覆盖整个主光栅区域。摆球是一个密度较大、质量均匀的金属球体,球的顶部分别与限振器、摆杆的底端相连。摆杆和限振器均由高强度轻质材料制成,它们的上端通过转轴固定在检波器顶部且固定点之间的连线平行于光轴。限振杆是限振器的主体部分,它由顶角很小的等腰三角金属框构成。限振杆只能在固定的平面内做圆周摆动,其长度大于摆杆长度且它们之间的夹角 $\alpha < 45^\circ$,限振杆的阻尼系数可调,以便将光栅摆限制在垂直于光轴的另一平面内做水平向阻尼

振动,避免其他方向的平动或转动,保证振动信号的单一性。

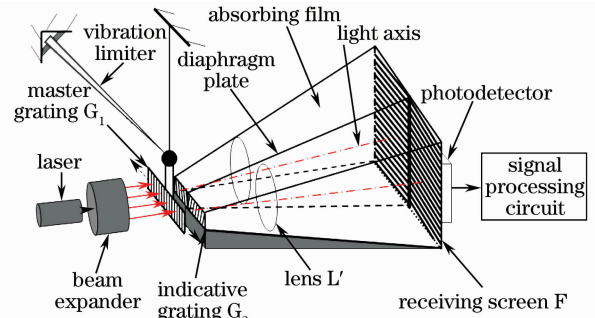


图1 双光栅检波器内部的主要结构

Fig. 1 Internal composition of double-grating geophone

安装在摆球底部中央的小尺寸矩形光栅是检波器的主光栅 G_1 ,紧靠其后方的衍射箱与检波器内壁熔接。衍射箱前表面中央内嵌的尺寸略小于 G_1 的矩形光栅为系统的指示光栅 G_2 。在地面无震动时 G_1 与 G_2 均垂直于光轴,为保证进入衍射箱的激光均经过双光栅的衍射,在系统工作时 G_2 必须始终处于 G_1 的投影区域内。指示光栅的中央分隔线将 G_2 划分为左右两个大小相同的分光栅 G_{2L} 和 G_{2R} ,两分光栅的刻线关于分隔线对称且分别与主光栅刻线形成一大一小相等、方向相反的微小初始旋转角 θ_0 , θ'_0 。为减小两光栅间隙对接收屏上场分布造成的影响, G_1 与 G_2 的间距应尽可能的小,但必须大于其下限值,以防止灰尘和气流磨损光栅。衍射箱后表面为接收屏F,位于内置透镜的后焦面上。衍射箱内壁贴有吸收膜层,滤除那些不通过透镜的衍射光,防止其发生反射给衍射场带来干扰。

检波器工作前必须固定在地表附近的岩体结构上且水平放置。当地震发生时,指示光栅随检波器外壳一起震动,由于光栅摆自身的惯性作用,使主光栅与指示光栅之间产生微弱的水平向运动且光栅付刻线之间的夹角发生微小变化,由激光器发出的窄频带平行光束垂直照射到主光栅表面,经过双光栅衍射系统,在接收屏上得到快速移动的衍射条纹,用光电探测器将条纹信号转换为波形电信号并通过外接信号处理电路,获得地面水平向震动的速度和位移信息。

3 检波器力学模型的分析

人工震源发出的地震波引起地面随机震动,为更好的模拟整个震动过程且便于分析,运用人工合成三角级数法,提出一种改进的加速度时程函数:

$$a(t) = A(\omega, t) \times \sum_{k=0}^n X(\omega_k) \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (1)$$

它由表示平稳随机过程的高斯函数 $\sum_{k=0}^n X(\omega_k) \times \cos(\omega_k t + \varphi_k)$ [14~16] 和强度、频率非平稳的调制因子 $A(\omega, t)$ 构成, $A(\omega, t) = \beta(\omega, t) \times f(t)$, $\beta(\omega, t)$ 为林家浩等 [17] 提出的高频成分可衰减的指数型调频函数。 $f(t)$ 为确定性分段强度函数 [15, 18]。 $X(\omega_k) = \sqrt{4S_a(\omega_k) \times \Delta\omega}$ 表示函数 $a(t)$ 的幅值, $\Delta\omega = 2\pi/T_d$, T_d 为 $a(t)$ 持时, $\omega_k = \Delta\omega \times k$ ($k = 1, 2, \dots, n$), $S_a(\omega)$ 表示加速度功率谱密度。对(1)式进行傅里叶变换, 得到

$$a(t) = \sum_{k=0}^n B(\omega_k) \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2)$$

式中 $B(\omega_k)$ 和 φ_k 分别为变换后新的幅值和相角, 这样(2)式的相位谱能更好的反映调制函数 $\beta(\omega, t)$ 的作用。

图 2 给出了震动过程中光栅摆力学系统的简化受力分析。以无地震动条件下摆球的中心为原点, 摆杆为 y 轴, 在垂直于光轴的平面上建立如图所示的力学坐标系 xOy 。规定沿 x 轴、 y 轴正方向为 ‘+’, 反之为 ‘-’。

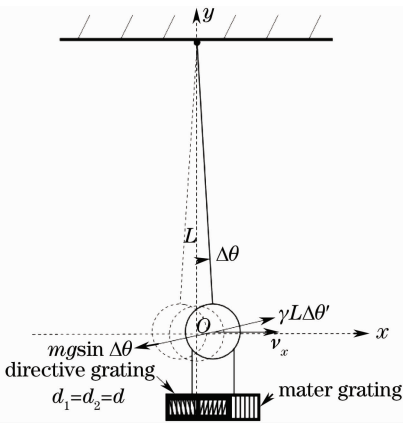


图 2 光栅摆力学系统及其受力分析

Fig. 2 Grating pendulum mechanical system and its load conditions

勘探作业中使用的人工地震能量较小, 根据地震勘探和震级计算的相关文献, 一般低于 3 级 ($M_L < 3$) 且探测点距震中通常小于 20 km ($\Delta < 20$ km) [19~21]。对 1973 年~1994 年国家 and 地方地震台网观测资料中的低震级近震进行统计分析并参考实际地震勘探数据, 发现在各种常见的场地条件下, 人工地震引起的地面运动水平分量的最大振幅 $A \leq 537 \mu\text{m}$ 。光栅摆球相对指示光栅的水平向位移幅度 $|\Delta x| \leq 2A = 1074 \mu\text{m}$ (摆球在最大位移处遇到

反向峰值振幅的震动时取等号)。对于摆长 (摆杆顶点到摆球中心的距离) $L = 0.5$ m 的光栅摆, 其摆角 (摆杆从平衡位置绕顶点旋转到某处所成的角) 的绝对值 $|\Delta\theta| < 0.00215$ rad, $\sin \Delta\theta$ 与 $\Delta\theta$ 的前 9 位数均相同, 即 $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$, 光栅摆做微幅振动, 因此可忽略阻尼力和回复力在 $\Delta\theta = 0$, 角速度 $\Delta\theta' = 0$ 处展开的泰勒级数高次项, 将力学部分近似看成在同一竖直平面内振动的单自由度线性系统。由于摆球质量远大于摆杆、限振杆和主光栅的质量总和, 可假定光栅摆的质心位于摆球中心, 忽略空气阻力, 只需考虑限振杆的阻尼作用。将(2)式作为输入驱动力, 由牛顿第二定律, 根据角动量与力矩的关系式, 列出光栅摆运动微分方程:

$$\Delta\theta'' + 2\omega_0 \beta \Delta\theta' + \omega_0^2 \Delta\theta = \sum_{k=0}^n B_1(\omega_k) \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (3)$$

$B_1(\omega_k) = B(\omega_k)/L^2$, m, γ 分别为光栅摆的质量和阻尼系数, 系统固有角频率 $\omega_0 = \sqrt{g/L}$, $\beta = \gamma/(2m\omega_0)$ 为无量纲阻尼因子。

光栅摆正常工作时应处于欠阻尼状态, 即 $0 < \beta < 1$, 设摆体在地震初始时刻 ($t=0$) 位于平衡位置, 分别用 $\Delta\theta_0, \Delta\theta'_0$ 表示摆角和角速度的初始值, 应用三角变换公式得到(3)式对应的齐次方程的通解:

$$\theta_1(t) = \exp(-\beta\omega_0 t) \times \sqrt{\Delta\theta_0^2 + \frac{(\beta\omega_0 \Delta\theta_0 + \Delta\theta'_0)^2}{\omega_0^2 (1 - \beta^2)}} \times \sin \left[\sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t + \arctan \left(\frac{\Delta\theta_0 \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{\Delta\theta'_0 + \beta\omega_0 \Delta\theta_0} \right) \right]. \quad (4)$$

地震勘探一般在自然地震微弱的时段进行, 为简化分析, 忽略人工地震激发前检波器的输入, 认为满足零初始条件。因此 $\Delta\theta_0 \approx 0$ 且 $\Delta\theta'_0$ 较小, 指数因子 $\exp(-\omega_0 t)$ 的存在使 $\theta_1(t)$ 随时间快速衰减, 衰减速度取决于参数 $\Delta\theta'_0$ 和 γ 的值。图 3 是 γ 和摆球相对于指示光栅的水平向振动速度 v_x ($v_x = \Delta\theta'_0 \cdot L$) 在不同取值条件下, $\theta_1(t)$ 及其振幅、相位随时间变化的仿真图, 其中 $L = 0.5$ m, $m = 10$ kg, $\Delta\theta_0 = 0$, $g = 9.794$ m/s² (上海)。可以看出, $\theta_1(t)$ 随时间快速减小, γ 越大, $\theta_1(t)$ 幅值衰减得就越快, v_x 对初始相位的影响就越小。 ($\gamma = 88.4$ 时, 振幅在 1.4 s 内迅速减小到 4 μm 以下, 而初始相位几乎不受 v_x 的影响)。由于 v_x 受地面水平向运动速度 v_{dx} 的支配, 不易控制, 因此只需将 γ 设定在其上限值附近, 便可认为除地震动起始阶段外, 光栅摆运动微分方程的解近似等于它的特解部分, 而通解 $\theta_1(t)$ 可忽略不计。

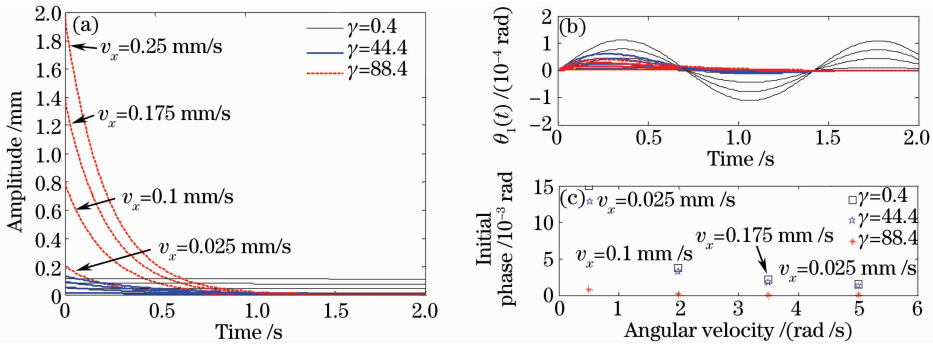


图 3 (a),(b),(c)分别为 $\theta_1(t)$ 及其振幅、相位在时间域上的变化情况

Fig. 3 (a), (b), (c) shows $\theta_1(t)$ and its amplitude and phase changes over time, respectively

考虑(3)式的特解部分,先分析第 k 个输入分量 $f_k(t)$ 单独作用时的微分方程 $\Delta\theta'' + 2\omega_0\beta\Delta\theta' + \omega_0^2\Delta\theta = B_1(\omega_k)\cos(\omega_k t + \varphi_k)$, 令频率比 $R_k = \omega_k/\omega_0$, 解得:

$$\theta_{2k}(t) = \bar{A}\sin(\omega_k t + \bar{\varphi}), \quad (5)$$

式中 $\bar{A} = |B_1(\omega_k)/(\omega_k - \omega_0)|$, $\bar{\varphi} = \arctan\{2R_k\beta/[B_1(\omega_k)(R_k^2 - 1)]\}$. 对于输入函数是由多个分量叠加构成的(3)式,其特解为(5)式对 k 求和,即

$$\theta_2(t) = \sum_{k=0}^n \theta_{2k}(t).$$

参数 β 和 ω_0 为定值,因此振幅、相位的大小均由 $B_1(\omega_k)$ 和 ω_k 决定,这说明光栅摆的响应能够很好的反映实际地面运动的幅值与相位信息。

对微分方程的分析表明光栅摆为因果连续系统,它的传递函数 $H(s) = s^2/[L^2(s^2 + 2\omega_0\beta s + \omega_0^2)]$,极点均位于 s 域左半开平面内,是一个有界输入有界输出(BIBO)稳定系统。仍用图 3 中的参数值,分别对 $L=0.5\text{ m}$, $L=0.3\text{ m}$ 两种条件下的力学系统的频率响应进行分析(ω_k, φ_k 等参数需实地取值)。图 4 所示为 $0\sim 1000\text{ Hz}$ 范围内检波器力学系统的频响曲线图。可以看出,在 $\omega > \omega_0$ 区域内,系统幅度和相位均保持稳定;而在 $\omega = \omega_0$ 附近,系统的

幅值激增,相移达 180° ,放大特性和相移特性变化显著,说明系统对接近其固有频率的输入震动信号表现出明显的共振特性。因此检波器的固有频率 ω_0 应控制在低于地震动基本频带的范围内,以避免共振干扰,降低低频响应的失真度。系统的固有频率位于低频 0.8 Hz 附近,能够保证正常的检波工作,符合地震勘探的要求。此外,根据(5)式和图 4,不难看出 γ 越大, ω_0 处的幅值就越小,但是共振涉及的频带就越宽。因此设计时应在高值区域内选择合适的阻尼系数,使固有频率和齐次方程通解对系统的影响达到平衡,从而保证检波的效果。

4 双光栅衍射场的傅里叶分析

由于检波器衍射部分的对称性,因此只需研究单侧分光栅系统。图 5 所示为左光栅衍射系统,为便于分析,尤其是简化对场分布的推导,以 G_{2L} 对称中心 z_0 在激光扩束镜出射平面 P 上的投影点 O 为基准,从点 O 到 z_0 为 z 轴正方向,建立三维光学直角坐标系 xyz 。在地面无震动时,光轴(z 轴)先后垂直穿过双光栅、薄透镜和接收屏的对称中心,且与主光栅的交点记为 z'_0 , G_1 的长边和宽边分别与 x 轴、 y 轴平行。

假设检波器内具有均匀的空气介质,从扩束镜射出的激光束可看成是场振幅沿径向光轴成正态函数衰减变化的基横模高斯光束,它具有很好的单色性、方向性和很高的相干光强,可作为单色相干平面波来分析^[22,23]。在时谐条件下,光波电场强度的复振幅满足亥姆霍兹方程。根据麦克斯韦电磁场理论,在位置矢量 $z = z_0$ 处的主光栅前表面上光场复振幅可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{E}(x, y, z_0) &= E_n(z_0) \times \\ \exp\left\{-i\left[kz_0 - \eta(z_0) + \frac{kr^2}{2n^2q(z_0)} + k(r)z\right]\right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

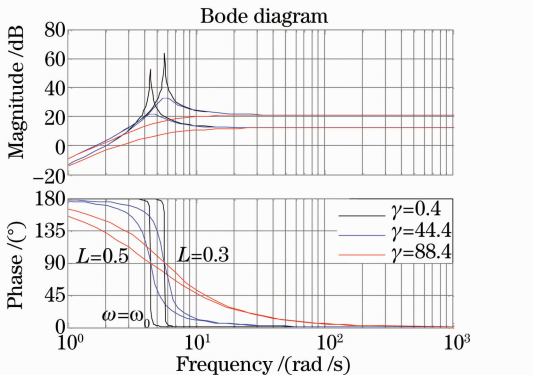


图 4 检波器力学模型的波特图

Fig. 4 Bode plots of the geophone mechanical model

式中 $E_{\Omega}(z_0) = E_0 \Omega_0 / \Omega(z_0)$, Ω_0 表示从扩束镜射出的高斯光束腰半径, $\Omega(z_0)$ 为 z_0 处的光斑半径, $q(z_0) = (i\pi\omega_0^2) / \lambda + z_0$, $\eta(z_0)$ 表示附加相移^[23]. k 为波矢量, 空间某点到激光束光轴的距离 $r =$

$\sqrt{(x - a/2)^2 + y^2}$, $\exp[-ik(r)z]$ 是波函数空间相位因子, n 表示扩束镜放大倍数. 由光强与振幅的关系, 得到主光栅前表面上光强:

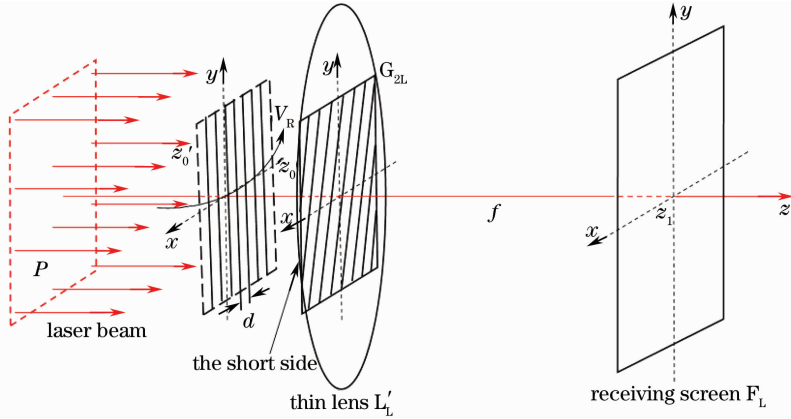


图 5 以 G_{2L} 为光学坐标系基准的左侧衍射系统

Fig. 5 Left-side diffraction system, where G_{2L} is the benchmark of optical coordinate system

$$I(z_0) = \tilde{E}(x, y, z_0) \times \tilde{E}^*(x, y, z_0) = \frac{E_0^2 \omega_0^2}{\omega^2(z_0)} \times \exp\left(\frac{-2k^2 r^2 \omega_0^2}{n^2 k^2 \omega_0^4 + 4n^2 z_0^2}\right), \quad (7)$$

别代表 G_{2L} 的长和宽, M 表示屏幕上振幅透射比极大值与极小值的差, f_0 为光栅的空间频率, 根据旋转平移坐标公式, 分别定义光栅 G_1 和 G_{2L} 的透射比函数:

主光栅和指示光栅均采用光栅常数 d 为定值, 占空比 $D=1/2$ 的薄正弦振幅透射光栅. 令 a, b 分

$$\begin{cases} t_1(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x + x_0)] \right\} \times G(x, y) \\ t_{2L}(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x \cos \theta - y \sin \theta)] \right\} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right) \end{cases}, \quad (8)$$

式中矩形函数 $G(x, y)$ 为主光栅刻划区域, 正常工作时指示光栅完全处于主光栅的投影区域内, 因此可用 $\text{rect}(x/a)\text{rect}(y/b)$ 表示两光栅的公共透射函数. 光栅付间距极小, 可将叠加光栅近似看成在同一平面内的衍射结构, 忽略双光栅之间光的衍射和反射, 从而简化对衍射光场的分析, 用 x_0 表示点 z'_0 在 xz_0y 平面坐标系上投影的横坐标, 则光栅付的透射系数等于各自透射系数的乘积:

$$T(\xi, \eta) = t_1(x, y) \times t_2(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x \cos \theta - y \sin \theta)] \right\} \times \left\{ \frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x + x_0)] \right\} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right), \quad (9)$$

对(9)式各部分进行傅里叶变换:

$$\mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{b}\right)\right] = ab \text{sinc}(af_x) \text{sinc}(bf_y), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\left\{\frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x + x_0)]\right\} &= \\ \frac{1}{2} \delta(f_x, f_y) + \frac{M}{4} [\exp(2i\pi f_0 x_0) \delta(f_x - f_0, f_y) + \exp(-2i\pi f_0 x_0) \delta(f_x + f_0, f_y)], & \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\left\{\frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x \cos \theta - y \sin \theta)]\right\} &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy + \\ \frac{M}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i2\pi y(f_0 \sin \theta + f_y)] \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i2\pi x(f_x - f_0 \cos \theta)] dx dy + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{M}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i2\pi x(f_0 \cos \theta + f_x)] \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i2\pi y(f_y - f_0 \sin \theta)] dy dx = \\ & \frac{1}{2} \delta(f_x, f_y) + \frac{M}{4} [\delta(f_x - f_0 \cos \theta, f_y + f_0 \sin \theta) + \delta(f_x + f_0 \cos \theta, f_y - f_0 \sin \theta)], \end{aligned} \quad (12)$$

先考虑单位振幅单色平面波垂直通过衍射系统时的情况,结合(10)~(12)式,应用卷积定理得到光栅付后表面上场分布的傅里叶变换:

$$\begin{aligned} U_G(x, y) = \mathcal{F}[T(x, y)] &= \mathcal{F}\left\{\frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x \cos \theta - y \sin \theta)]\right\} \times \\ & \mathcal{F}\left\{\frac{1}{2} + \frac{M}{2} \cos[2\pi f_0(x + x_0)]\right\} \times \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right)\right] = \\ & \frac{ab}{8} \left\{ \text{sinc}(bf_y) + \frac{M}{2} \text{sinc}[b(f_y - f_0 \sin \theta)] + \frac{M}{2} \text{sinc}[b(f_y + f_0 \sin \theta)] \right\} \times \\ & \left\{ \left\{ \text{sinc}(af_x) + \frac{M}{2} \text{sinc}[a(f_x - f_0 \cos \theta)] + \frac{M}{2} \text{sinc}[a(f_x + f_0 \cos \theta)] \right\} + \right. \\ & \frac{M}{2} \exp(2i\pi f_0 x_0) \left\{ \text{sinc}[a(f_x - f_0)] + \frac{M}{2} \text{sinc}[a(f_0 + f_0 \cos \theta - f_x)] + \right. \\ & \left. \left. \frac{M}{2} \text{sinc}[a(f_x - f_0 + f_0 \cos \theta)] \right\} + \frac{M}{2} \exp(-2i\pi f_0 x_0) \left\{ \text{sinc}[a(f_x + f_0)] + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{M}{2} \text{sinc}[a(f_0 - f_0 \cos \theta + f_x)] + \frac{M}{2} \text{sinc}[a(f_0 + f_0 \cos \theta + f_x)] \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

紧靠指示光栅后表面安置一副透镜是在近距离接收屏上获得夫琅禾费衍射条纹的典型装置。透镜孔径应远大于指示光栅的尺寸,这样光瞳函数 $p(x, y) \approx 1$ 。接受屏 F_L 位于透镜后焦面上,光波从指示光栅后表面传播到接受屏,这属于菲涅耳衍射问题,由透镜透射函数 $\exp[-ik(x^2 + y^2)/2f]$ ^[24],得到 F_L 上的复振幅分布:

$$U_F(x, y) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2f}\right) U_G(x, y) \Big|_{f_x=x/\lambda f, f_y=y/\lambda f}, \quad (14)$$

再考虑高斯光束通过衍射系统的情况。对(14)式平方得到单位振幅平面波的衍射光强 $I_F(x, y)$ ^[25,26]。由于地震勘探高精度检波的要求,系统需采用刻线密度较大的光栅,因此 $f_0 \gg 1/a$ 且 $f_0 \gg 1/b$, $I_F(x, y)$ 中有关 sinc 函数的交叉相乘项可忽略不计,只要对各 sinc 函数的平方求和即可。将(7)式激光强度 $I(z_0)$ 与 $I_F(x, y)$ 相乘便可求出接受屏上衍射光强:

$$\begin{aligned} I(x, y) = I(z_0) \cdot I_F(x, y) &= -\frac{a^2 b^2 E_0^2 \Omega_0^2}{64 \lambda^2 f^2 \Omega^2(z_0)} \exp\left(\frac{-2k^2 r^2 \Omega_0^2}{n^2 k^2 \Omega_0^4 + 4n^2 z_0^2}\right) \times \\ & \left\{ \text{sinc}^2(bf_y) + \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[b(f_y - f_0 \sin \theta)] + \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[b(f_y + f_0 \sin \theta)] \right\} \times \\ & \left\{ \left\{ \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[a(f_x - f_0 \cos \theta)] + \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[a(f_x + f_0 \cos \theta)] + \text{sinc}^2(af_x) \right\} + \right. \\ & \frac{M^2}{4} \left\{ \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[a(f_0 + f_0 \cos \theta - f_x)] + \right. \\ & \left. \left. \text{sinc}^2[a(f_x - f_0)] + \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[a(f_x - f_0 + f_0 \cos \theta)] \right\} + \right. \\ & \frac{M^2}{4} \left\{ \text{sinc}^2[a(f_x + f_0)] + \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[a(f_0 - f_0 \cos \theta + f_x)] + \right. \\ & \left. \left. \frac{M^2}{4} \text{sinc}^2[a(f_0 + f_0 \cos \theta + f_x)] \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

图 6 为接收屏上衍射光强分布的三维仿真图。从图中可以看出,无论光强在低值还是高值区域,衍射图案均为近似垂直于 y 轴的条纹分布,且光强沿平行于接收屏 x 轴或 y 轴方向呈波形分布,这对于使用光电探测器将条纹信号转换为电信号非常有利。

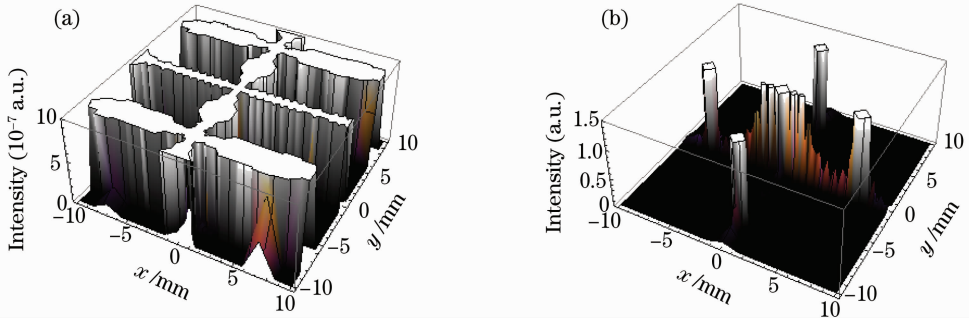


图 6 600 nm 的激光束经衍射系统在 F_1 上产生的光强分布的三维仿真图。(a)低值区的光强分布;(b)高值区的光强分布

Fig. 6 Three-dimensional simulation of diffraction intensity in the reception screen with 600 nm laser beam.

(a) Intensity distribution in low-value range; (b) Intensity distribution in high-value range

5 系统灵敏度和动态范围

仍使用图 3 中的参数值,选用 400 grooves /mm 的光栅并设定摆球球心到主光栅中心的距离 $L_1 = 50$ mm,如图 7(a),则光栅摆固有周期 $T = 2\pi/\omega_0 \approx 1.42$ s,属于短周期地震检波器。由于限振杆的作用,摆球运动时会产生微小的水平旋转角 $\Delta\theta_1$,如图 7(b)。当地面运动的水平振幅为 A 时,对于长达 60 mm 的主光栅, $\Delta\theta_1 < 0.00214$ rad,相当于 G_1 在 xz_0y 坐标平面上的投影长度缩短了不到 $0.138 \mu\text{m}$,不及光栅常数的 5.5%,几乎不会对衍射条纹检测造成影响。

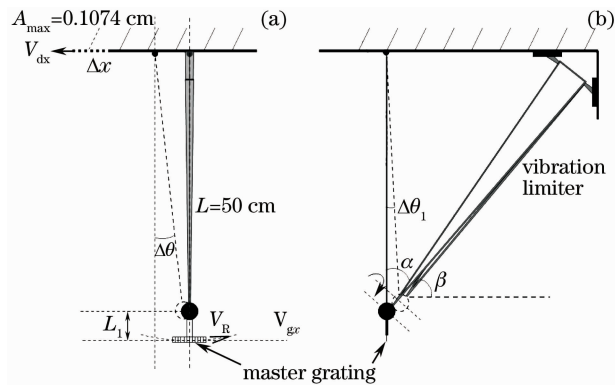


图 7 限制摆引起光栅产生微小角度的旋转

Fig. 7 Small angle rotation of master grating caused by vibration limiter

为提高光电探测器对条纹的分辨力,可采用电子学细分技术^[27~29]。不失一般性,若对衍射条纹进行 4096 倍细分(目前最高细分倍数可达 10000 倍以上),并采用 1800 grooves /mm 的较高密度光栅,计算出系统基本量程为 $4A$ (最大单侧振幅的两倍),灵敏度 $R \approx 136$ pm,动态范围 $D_R = 20\lg(4A/R) \approx 144$ dB。表 1 列出了本系统和几种常用检波器的性

能参数值^[3~5,7,30~32]。

表 1 各种地震检波器的灵敏度和动态范围

Table 1 Dynamic range and sensitivity of different kinds of geophone

Types of geophone	sensitivity	D_R /dB
Moving-coil		50~75
Digital MEMS		115~130
Piezoelectric		80~100
FBG	26 pm/g	94
Grating Doppler	20 nm	100
Double-grating horizontal	136 pm/(pm/s ⁻²)	144

从表中可以看出本文设计的水平向地震检波器在光栅密度和条纹细分倍数有所保留的条件下,动态范围和灵敏度在理论上甚至优于当前最先进的 MEMS 式数字勘探仪(参数值提高了 10% 以上),而与另外几种具有代表性的纵波检波器相比,其动态范围至少超出 50%,明显改善了横波检波的能力。说明此检波器不仅能满足高精度地震勘探,还能提供地震横波所携带的特有信息。

6 衍射条纹频率与地震动水平向速度的关系

图 8 给出了光栅摆经过平衡位置(EP)时,左右两个衍射系统中光栅付的正面俯视图。用 θ, θ' 分别表示光栅 G_1 的刻线与 G_{2L}, G_{2R} 的刻线所成的角,对于左衍射系统, $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$,在图 8(a)所示的四边形 $ABCD$ 中应用平行四边形法^[33],得到条纹间距 s 与光栅常数的关系 $s = d \{ 2 | \sin[(\theta_0 + \Delta\theta)/2] | \}^{-1}$ 。当 G_1 中心相对 G_{2L} 中心移动的路程为 d 时,衍射条纹恰好移动了 s ,因此系统的光学放大倍数:

$$M \approx (L + L_1) (L | \theta_0 + \Delta\theta |)^{-1}, \quad (16)$$

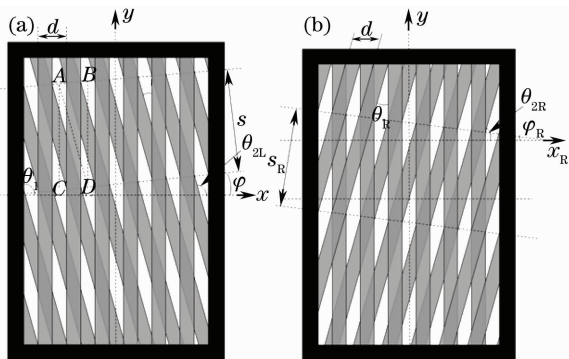


图 8 在地面无震动条件下光栅付的正面俯视图。(a)左衍射系统的光栅对；(b)右衍射系统的光栅对

Fig. 8 Front vertical view of double-grating under no ground motion (EP). (a) double-grating of left diffraction system; (b) double-grating of right diffraction system

G_L 中心相对 G_{2L} 中心在垂直于光轴的平面上的移动速度用 v_R 表示, 其 x 轴分量记为 v_{gx} , 有 $v_{dx} = -Lv_{gx}/(L+L_1)$, 则 F_L 和 F_R 上条纹频率 f_{gL}, f_{gR}

$$f_{gL} = -f_{gR} = -\frac{v_{gx}}{\cos(\Delta\theta)} \cdot (s/d)/s = \frac{-v_R}{d} \approx \frac{(L+L_1)v_{dx}}{dL}. \quad (17)$$

图 9, 给出了在正向匀速地震动的理想条件下, f_{gL}, f_{gR} 与地面水平位移的关系曲线(仍使用图 7 中的参数值)。结合(17)式可以看出由于 v_{dx} 恒定且 $\cos \Delta\theta \approx 1$, 在振幅范围内条纹频率的波动范围小于 0.006 Hz, 不到自身的 0.00007%, 说明在系统固有参数保持不变的条件下, v_{dx} 与条纹频率成近似线性关系且直接决定频率的大小。这样只需测量出 f_{gL} 或 f_{gR} , 便可由(17)式计算出地面运动的水平向速度。

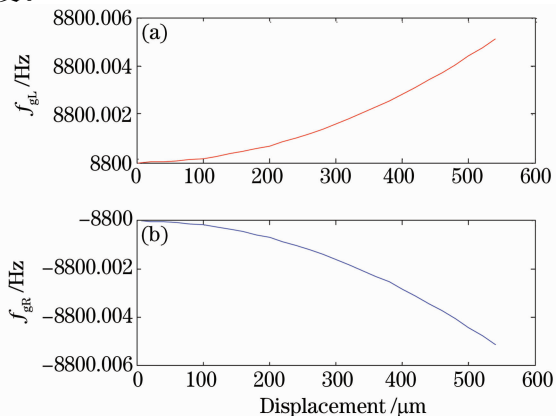


图 9 条纹频率(a) f_{gL} , (b) f_{gR} 与地面水平位移的关系

Fig. 9 Relation between fringe frequency and ground displacement. (a) f_{gL} , (b) f_{gR}

7 地震动速度的辨向与平衡位置时刻的记录

光电探测系统的主要任务是采集条纹频率信号并传输给外接信号处理设备。光栅刻线密度是影响条纹频率大小的一个重要的系统固有参数, 从图 9 不难发现在仅采用 400 grooves/mm 的光栅且地面水平向速度为 0.02 m/s 的条件下, 条纹频率已达 8800 Hz。为满足高频条纹的探测要求, 需使用高速光电转换模块作为探头, 合理布置探头阵列, 并采用一种简单准确的由条纹频率信号辨别地震动速度方向的方法。因此专门设计了对称指示光栅。为了更好的介绍这种辨向方法, 先对地面无震动时, 衍射条纹在光栅摆的一个自由摆动周期内的变化规律作如表 2 所示的分析。

表 2 中的分析建立在 θ_0 小于 $\Delta\theta$ 幅值的基础上, 箭头的指向仅表示条纹移动的大致方向, 其实际斜率的绝对值远大于 1。如图 8 所示, φ, φ_R 分别表示 F_L, F_R 上衍射条纹与 x 轴的夹角, $\theta_1, \theta_{2L}, \theta_{2R}$ 分别为 x 轴正向与光栅 G_1, G_{2L}, G_{2R} 刻线的正向构成的角 [$\theta_1, \theta_{2L}, \theta_{2R} \in (0, \pi)$], s_R 表示接收屏 F_R 上的条纹间距。

结合表 2 和图 8, 不难发现在整个周期内除了两个特殊位置($\theta_1 = \theta_{2L}, \theta_1 = \theta_{2R}$)外, 衍射条纹变化连续。当光栅摆处于特殊位置时, G_{2L} 或 G_{2R} 刻线恰好与主光栅刻线平行, 对应的衍射图案突变成平行多缝衍射条纹。经特殊位置前后, 衍射条纹的斜率和移动方向发生明显改变, 因此将这两个特殊位置定义为衍射条纹的跳变位置。跳变位置的出现破坏了衍射图案的连续性, 使得对条纹频率的辨向和计数变得复杂且容易出错。为尽量避免此现象的发生, 保证条纹探测的效果, 可设定 θ_0 略大于 $\Delta\theta$ 的最大值。

对于检波过程中某个时刻由于偶然因素导致地面水平向振幅超过设定范围, 从而出现 $\Delta\theta = \theta_0$ 引发条纹突变的情况, 专门设计了对称指示光栅。从表 2 可以看出 F_L 和 F_R 上的条纹不会同时突变, 它们中至少有一个能正确反映实际地面运动, 因此只需辨认出那组正确的频率信号, 便可保证检波结果可靠性。对称指示光栅的另一个优势是能产生两组测量值, 通过相互检验有效的降低错误率。

接收屏 F_L 和 F_R 上安装的光电探测器完全相同, 均由沿平行于 x 轴和 y 轴方向排列且两两间距相等的微探头阵列构成。通过判断同列共 n 个探头依次测得同一明条纹或暗条纹极值光强的顺序是

‘+’还是‘-’，结合表 2 判定条纹频率的正负，并根据(17)式得到地面水平向震动的速度。若同一行所有 n 个探头同时或沿 x 轴依次探测到某极值光强，说明所测的是同一个条纹。此时用 Δt 表示第 1 和第 n 个探头测得此极值光强的时间差。从图 8 中发现仅当光栅摆处于平衡位置时 $\varphi = \varphi_R$ ，即 F_L, F_R 上

所测得的 Δt 相等，将此刻刻标记在地面水平向震动波形图的时间轴上并用 t_b 表示。图 10 给出了对地震动速度辨向和记录 t_b 的具体步骤(以 xz_1y 或 $x_Rz_1y_R$ 坐标系第二象限左上角为起点对探头标号)。

表 2 衍射条纹和光栅对在完整摆动周期内的变化情况

Table 2 Changes of relative position of double-grating and its corresponding diffraction fringe over one period of grating pendulum's free swing

Movement direction of pendulum	φ	θ and s (opposite trends)	Fringe movement direction on F_L	φ_R	θ_R and s_R (opposite trends)	Fringe movement direction on F_R
Moves along positive direction of x -axis from EP	φ increases, except when on the fringe jump position	when $\theta_1 < \theta_{2L}$, θ decreases when $\theta_1 > \theta_{2L}$, θ increases	\searrow \swarrow	decreases increases	θ_R increases, while s_R decreases	\nearrow
Moves along negative direction of x -axis to EP	φ decreases, except when on the fringe jump position	when $\theta_1 > \theta_{2L}$, θ decreases when $\theta_1 < \theta_{2L}$, θ increases	\searrow \swarrow	decreases increases	θ_R decreases, While s_R increases	\swarrow
Moves along negative direction of x -axis from EP	φ decreases when $\theta_1 > \theta_{2R}$ φ increases when $\theta_1 < \theta_{2R}$	θ increases, while s decreases	\swarrow	φ_R increases, except when on the fringe jump position	when $\theta_1 > \theta_{2R}$, θ_R decreases when $\theta_1 < \theta_{2R}$, θ_R increases	\swarrow \nearrow
Moves along positive direction of x -axis to EP	φ increases when $\theta_1 < \theta_{2R}$ φ increases when $\theta_1 > \theta_{2R}$	θ decreases, while s increases	\searrow	φ_R decreases, except when on the fringe jump position	when $\theta_1 < \theta_{2R}$, θ_R decreases when $\theta_1 > \theta_{2R}$, θ_R increases	\swarrow \nearrow

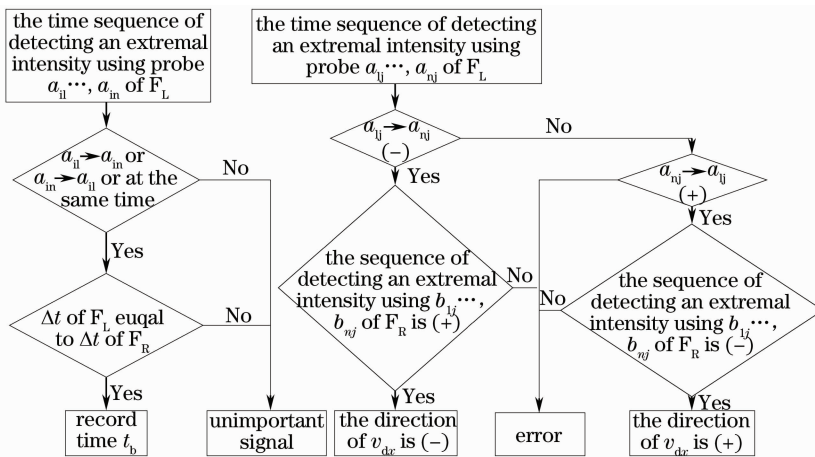


图 10 判断地面水平震动速度方向及记录光栅摆经过平衡位置时刻的流程图

Fig. 10 Flowchart: determine the direction of ground motion speed and record the time when grating pendulum just passes through the equilibrium position

8 结 论

设计了一种基于双光栅衍射的地震横波检波

器。应用改进的地震加速度模拟函数来研究检波器力学部分的运动微分方程和频率特性，结果显示只

需在高值区域内选择合适的阻尼系数并使光栅摆固有频率低于地震波频率,检波器的输出就能很好的反映地震动信息,证明了系统的可行性。推导了接受屏上的动态衍射光强,仿真分析表明沿接收屏坐标轴光强呈近似波形分布,利于信号的转换与处理。在采用 1800 grooves/mm 的光栅及 4096 倍条纹细分技术的保守设计下,计算出系统的灵敏度为 136 pm,动态范围达 144 dB。设计了光电探头阵列和对称指示光栅,用于地震动速度的辨向及标记光栅摆经过平衡位置的时间,并通过地震动水平向速度与条纹频率的关系式,获得地面运动的速度波形。与其它常用检波器的对比显示该系统灵敏度更高,动态范围更大,出错率更低,显著提升了横波检波的质量。

参 考 文 献

- 1 Y. Zhang, Z. Yin, S. Li *et al.*. Fiber-Bragg-grating-based seismic geophone for oil/gas prospecting[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(8): 084404-1~084404-4
- 2 Ma Chao, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Research and application of fiber Bragg grating geophone [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, **23**(2): 622~626
马 超, 乔学光, 贾振安等. 光纤布拉格光栅地震检波器的研究与应用[J]. *地球物理学进展*, 2008, **23**(2): 622~626
- 3 Gao Hua, Li Shuqing, Nan Zhongliang *et al.*. Study of grating geophone[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2003, **39**(1): 40~42
高 华, 李淑清, 南忠良等. 光栅地震检波器的研究[J]. *航空精密制造技术*, 2003, **39**(1): 40~42
- 4 Zhou Xuefang, Liang Lei. The structure design and emulation of characteristics of fiber Bragg grating geophone[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, **25**(3): 177~180
周雪芳, 梁 磊. 光纤光栅地震检波器结构与性能仿真研究[J]. *地震工程与工程震动*, 2005, **25**(3): 177~180
- 5 Du Zhenhui, Li Zhigang, Gao Hua *et al.*. Novel seismometer based on grating Doppler effect[J]. *J. Tianjin University*, 2005, **38**(5): 391~394
杜振辉, 李志刚, 高 华等. 光栅多普勒效应新型地震检波器[J]. *天津大学学报*, 2005, **38**(5): 391~394
- 6 G. Tao, X. Zhang, X. Liu *et al.*. A new type of fiber Bragg grating based seismic geophone [J]. *Appl. Geophys.*, 2009, **6**(1): 84~92
- 7 Lü Haibao, Cao Juliang, Su Shaojing *et al.*. Displacement measurement with nonsymmetrical double gratings [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, **21**(4): 331~333
吕海宝, 曹聚亮, 苏绍景等. 非对称双光栅位移测量研究[J]. *兵工学报*, 2000, **21**(4): 331~333
- 8 Lü Haibao, Xu Tao, Yang Huayong *et al.*. Fourier analysis for precision displacement measurement with a doubly blazed reference grating [J]. *J. National University of Defense Technology*, 2000, **22**(3): 96~99
吕海宝, 徐 涛, 杨华勇等. 双极闪耀光栅位移精密测量的傅里叶分析[J]. *国防科技大学学报*, 2000, **22**(3): 96~99
- 9 Chen Xiangfu, An Xifeng. Application of seismic shear wave detection in dividing shallow strata of rock and soil[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, **22**(5): 1655~1659
陈相府, 安雪峰. 地震横波勘探及其在浅层岩土分层中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2007, **22**(5): 1655~1659
- 10 T. S. Yun, F. M. Francisca, J. C. Santamarina *et al.*. Compressional and shear wave velocities in uncemented sediment containing gas hydrate[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**: L10609-1~L10609-5
- 11 Wang Daxing, Xin Kefeng, Li Youming *et al.*. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. *Chinese J. Geophysics*, 2006, **49**(3): 908~914
王大兴, 辛可峰, 李幼铭等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2006, **49**(3): 908~914
- 12 Zhao Fuyou, Wang Shiyu, Wang Dian. Application of seismic shear wave prospecting in detection of active faults in Changchun city[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, **23**(1): 284~288
赵富有, 王世煜, 王 典. 横波地震勘查技术在长春市活断层探测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2008, **23**(1): 284~288
- 13 Xiu Baishan, Wang Ende, Tian Gang *et al.*. Detecting underground water-bearing caves by seismic transverse wave reflection method [J]. *J. Northeastern University(Natural Science)*, 2006, **27**(1): 84~87
徐白山, 王恩德, 田 钢等. 地震横波反射法探测含水洞穴的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, **27**(1): 84~87
- 14 R. H. Scanlan, K. Sachs. Earthquake time histories and response spectra [J]. *J. the Engineering Mechanics Division*, 1974, **100**(4): 635~655
- 15 Chen Guoxing. Geotechnical Earthquake Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2007, 73-85
陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 73~85
- 16 Hu Yuxian, He Xun. Phase angle consideration in generating response spectrum-compatible ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1986, **6**(2): 37~51
胡聿贤, 何 训. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J]. *地震工程与工程振动*, 1986, **6**(2): 37~51
- 17 Lin Jiahao, Zhang Yahui, Sun Dongke *et al.*. Fast and precise computation of structural responses to non-uniformly modulated evolutionary random excitations [J]. *Chinese J. Computational Mechanics*, 1997, **14**(1): 2~8
林家浩, 张亚辉, 孙东科等. 受非均匀调制演变随机激励结构响应快速精确计算[J]. *计算力学学报*, 1997, **14**(1): 2~8
- 18 M. Amin, A. H. S. Ang. Nonstationary stochastic models of earthquake motions [J]. *J. the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 1968, **94**(2): 559~583
- 19 Zhang Wei. The Experiments of Using Small Artificial Seismic Sources to Explore Regional Deep Structure of The Earth [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008, **3~7**, 16~18
张 尉. 利用小当量人工震源进行区域性深部探测的试验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008, **3~7**, 16~18
- 20 Peter M. Shearer. Introduction to Seismology [M]. University of Cambridge, 1999, 166~175
- 21 Institute of Geophysics of China Administration. China Seismograph Network Observation Report [M]. Beijing: Earthquake Press, 1973-1989
国家地震局地震物理研究所. 中国地震台网观测报告[M]. 北京: 地震出版社, 1973-1989
- 22 Guo Fuyuan, Li Lianhuang, Wang Minghua. Gaussian approximation for mode field distribution of dielectric planar waveguide TE₀ mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 235~239
郭福源, 李连煌, 王明华. 介质平面光波导 TE₀ 模模场分布的高斯近似[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 235~239
- 23 Lu Yaxiong, Yu Xucai, Zhang Xiaoxia. Laser Physics [M]. Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005, 11~15
卢亚雄, 余学才, 张晓霞. 激光物理[M]. 北京邮电大学出版社,

- 2005, 11~15
- 24 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Roberts and Company Publishers, Inc, 2006, 51~88
- 25 Liang Quanting. Physical Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008, 245~260
梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008, 245~260
- 26 Wan Lingyu, Zhang Weiping, Chen Maoxin *et al.*. Intensity of combined beams in bi-grating imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1096~1100
万玲玉, 张卫平, 陈茂鑫 等. 双光栅成像中的汇合级光能量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1096~1100
- 27 Wang Junli, Li Dayi, Liu Lin. Rapid-subdivision method of Moire fringe and its applications on the photoelectric rotary encoders[J]. *Microfabrication Technology*, 2005, (4): 16~20
王君立, 李大一, 刘琳. 莫尔条纹快速细分在光电轴角编码器中的应用[J]. *微细加工技术*, 2005, (4): 16~20
- 28 Tang Xiaoqi, Liu Shifeng, Wang Pingjiang *et al.*. Error analysis for amplitude segmenting subdivision of Moire fringe[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(3): 220~223
唐小琦, 刘世峰, 王平江 等. 正切法莫尔条纹信号幅值分割细分的误差分析[J]. *计量学报*, 2007, **28**(3): 220~223
- 29 Luo Hua, Gao Shan, Li Xianglong. Realization of high division number of coarse grating signals by fully digital processing method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 283~288
罗华, 高山, 李翔龙. 粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 283~288
- 30 H. Goldberg, J. Gannon, J. Marsh. An extremely low-noise micromachined accelerometer with custom ASIC circuitry [J]. *Sensors, Applied MEMS Inc*, 2001, 5
- 31 Fang Bing. Research of the performance improvement of coil-moving geophone[D]. Jilin University, 2009, 1~4
方兵. 动圈式地震检波器性能优化研究[D]. 吉林大学, 2009, 1~4
- 32 Liu Shenghu, Xing Yamin. Design and research of piezoelectric acceleration geophone [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(8): 29~34
刘升虎, 邢亚敏. 一种压电加速度地震检波器的设计与研究[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(8): 29~34
- 33 Wu Guoguang, Zhan Yuanling. Optics[M]. Beijing: People's Education Press, 1980, 359~361
毋国光, 战元令. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980, 359~361