

· 研究简报 ·

中山大学常温共振型引力波探测器

胡思科 管同仁 于 珀
唐孟希 陈树森 黄庆翔
(物理学系)

1. 概述

引力波探测是验证广义相对论以及检验其它与之并行的引力理论正确性的一个重要手段。1976年中山大学引力物理研究室开始了常温共振型引力波探测系统的建设，经过模拟实验、试运转和技术改进等几个阶段，于1984年正式运转(图1)。

目前用于引力波探测的有共振型天线、激光干涉和宇宙飞船多普勒跟踪三大类方法。其中用高Q值材料制成并置于超低温中的共振天线具有最高的灵敏度⁽¹⁾。理论计算表明，只有大质量、高速运动的天体才有可能产生目前技术上可探测的引力辐射，其中最强的引力辐射来源于恒星的引力坍缩。若位于银河系中心、质量为 $8M_{\odot}$ 的恒星发生转换因子为0.01的坍缩，在地球上就产生 $h \approx 2 \times 10^{-17}$ 的时空度规畸变⁽²⁾。

我们的天线系统选上述事件作为探测目标，它是在室温下工作的圆柱形共振天线系统。天线材料是LC4铝合金，化学成份为Cu: 1.66%，Mg: 2.43%，Zn: 5.95%，Mn: 0.25%，Fe: 0.43%，Si: 0.15%，Cr: 0.11%，余量为铝。用超声波探伤仪测得材料声速为 $v_s = 5.0 \times$

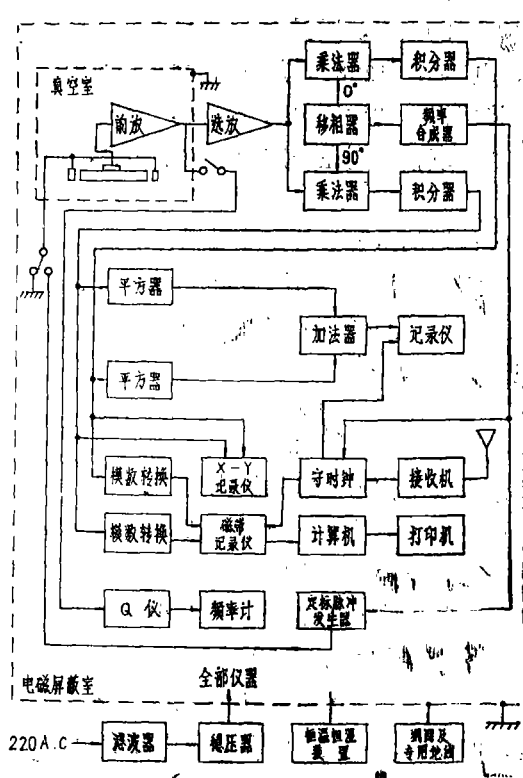


图 1

本文于1985年4月收到

10^5cm/s , 用内耗测试仪⁽⁵⁾测得其空载时的品质因数 $Q = 1.0 \times 10^6$. 天线的长度 $L = 1778.5 \text{mm}$, 直径 $D = 713.8 \text{mm}$, 质量 $M = 1963 \text{kg}$, 纵模振动的基频 $f_m = 1.40 \times 10^3 \text{Hz}$.

圆柱形天线的灵敏度, 主要决定于探测器的热运动噪声, 这种热噪声使天线产生的应变为⁽²⁾ $\frac{x}{L} \approx 3 \times 10^{-21} \left[\left(\frac{f_m}{10^3 \text{Hz}} \right) \left(\frac{10^{17} \text{erg}}{M v_s^2} \right) \left(\frac{10^9}{Q} \right) \left(\frac{T}{1 \text{K}} \right) \left(\frac{\tau_{\text{meas}}}{0.01 \text{sec}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$, (1)

式中 T 为天线的工作温度, τ_{meas} 为测量取样时间. 天线在持续时间为 τ 、强度为 h 的脉冲引力波作用下产生的纵向应变为

$$\frac{x}{L} \approx f_g h \tau, \quad (2)$$

式中 f_g 为引力波的频率. 当(1)、(2)式中的 $\frac{x}{L}$ 相等时, 即信噪比为 1 时对应的 h 就是天线的理论灵敏度. 对于我们的天线, 理论灵敏度为 2.7×10^{-17} .

2. 换能器及前置放大器

和其它换能器相比, 压电陶瓷换能器有易于制作以及能在常温和低温下使用等优点. 为了提高灵敏度必须选择低损耗的压电陶瓷和粘胶, 并要求有较高的压电系数. 经实验比较, 我们选用淄博无线电瓷件厂生产的 PZT—F 型压电陶瓷, 单片几何尺寸为 $60 \times 40 \times 20 \text{mm}^3$, 质量为 $m = 363.3 \text{g}$. 谐振频率 $f_m = 26184 \text{Hz}$, 反谐振频率为 $f_n = 26585 \text{Hz}$, 电容 $C_2 = 1298.6 \text{pf}$, 损耗角正切 $\text{tg} \delta = 1.4 \times 10^{-3}$.

换能器由 12 片压电陶瓷组成, 分成两组对称安装于天线中部. 用天津市延安化工厂生产的环氧接着剂在一定预应力下粘合, 加压固化, 并保证各粘合面之间有良好的电接触.

换能器的重要参数是能量耦合系数 β , 它是换能器储存的电能 E_e 与天线储存的机械能 E_m 之比. 我们用并联电容的方法^(4,6)测得

$$\beta = 3.76 \times 10^{-3}.$$

机电耦合常数⁽⁵⁾

$$\alpha = \sqrt{\frac{M \beta \omega^2}{2 C_2}} = 8.3 \times 10^6 \text{v/cm}, \quad (3)$$

它表示天线单位形变时的输出电压.

前置放大器的噪声对引力波探测系统的灵敏度有十分重大的影响, 在低温时它的噪声将成为系统噪声的主要来源. 我们的前置放大器使用 2SK68A 低噪声场效应管组成的共源—共栅输入电路⁽⁷⁾, 在 1.6KHz 处测得的电流噪声 I_n 和电压噪声 v_n 分别为

$$I_n = 5.4 \times 10^{-16} \text{A}/\sqrt{\text{Hz}},$$

$$V_n = 0.83 \times 10^{-9} \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}.$$

在最佳匹配时, 放大器的等效噪声温度为

$$T_N = 0.162 \text{K}.$$

3. 天线等效参数及灵敏度

应用机电类比方法⁽⁸⁾, 天线与换能器可等效为 RLC 电路(图 2), 其中 R_1, L_1, C_1 为

天线及换能器的机电等效参数, $R_2, C_2, \text{tg}\delta_2$ 为换能器的等效电参数。由电路分析可得

$$\omega^2 = \frac{1}{L_1 C_1 (1 - \beta)} \approx \frac{1}{L_1 C_1} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2 (1 + \text{tg}^2 \delta_2)} \approx \frac{C_1}{C_2} \quad (5)$$

$$Q = \frac{\omega L_1}{R_1 + R_2}, \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{\text{tg}\delta_2}{\omega C_2}. \quad (7)$$

由实验测得并经计算所得的天线等效参数如图 2 所示。

根据 S.Hawking 的公式⁽⁸⁾, 天线可检测的引力波无量纲振幅的最小值 $h_{0\min}$ 和最小可检测能量 E_{\min} 为

$$h_{0\min} = \frac{\pi^2}{\omega^2 L \tau} \left(\frac{kT}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{8 \text{tg}\delta_2}{Q\beta} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

$$E_{\min} = \frac{1}{4} kT \cdot \left(\frac{8 \text{tg}\delta_2}{Q\beta} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

其中 c 为光速, ω 为天线的共振角频率, k 为 Boltzmann 常数, G 为引力常数。由此求得

$$h_{0\min} = 2.0 \times 10^{-17},$$

$$E_{\min} = 8.7 \times 10^{-3} kT,$$

相应的热噪声温度 $T_N = 2.6\text{K}$ 。

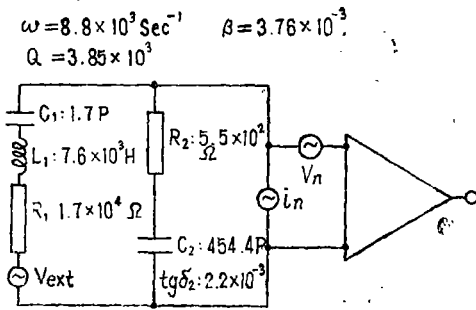


图 2

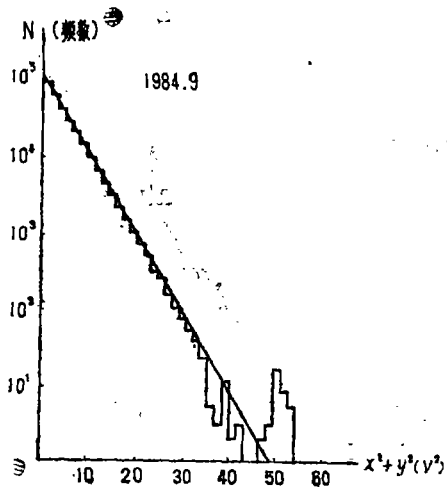


图 3

4. 讨论

(1) 图 1 为探测器系统的方框图。由两路锁相放大器组成正交相关检测, 两路讯号经模数转换后由计算机按要求的取样时间自动记录于磁带上。磁带所记录的讯息可以按不同的方法来处理⁽⁹⁾。图 3 为一组连续记录的天线热噪声数据的频数——能量分布曲线。由曲线可看到, 所得数据符合 Boltzmann 分布。少量偏离直线的点说明还存在干

扰,这可以通过改进滤波的方法使之进一步减少。

(2)由于采用了机械损耗的压电陶瓷,使天线工作时的 Q 值比空载时的 Q 值降低了一个数量级以上。若压电陶瓷损耗较低,则天线 Q 值可以接近 10^6 的理论值,这时灵敏度将可以提高一个数量级。

(3)由于前置放大器的噪声远低于天线的热噪声,所以计算时只考虑了天线的热噪声。但当天线应用于低温时,前置放大器的噪声就不可忽略了。

(4)系统的隔振及真空装置、数据采集与处理将另文叙述。

参 考 文 献

- [1] K.S. Thorne, *Rev. Mod. Phys.*, 52 (1980), 285.
- [2] D.H. Douglass & V.B. Braginsky, In *General Relativity* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, London, New York, 1979).
- [3] 管同仁等,引力波天线 Q 值测试仪,中山大学学报,1980,2.
- [4] H. Billing & W. Winkler, *IL Nuovo Cimento*, 33B (1976), N2, 665.
- [5] G.V. Pallottino & G. Pizzella, *IL Nuovo Cimento*, 45B (1978) N2, 275.
- [6] G.V. Pallottino & G. Pizzella, *IL Nuovo Cimento*, 4C (1981), N3, 237.
- [7] 管同仁等,微弱信号检测动态,1981年,第4、5期。
- [8] S.W. Hawking, *Phys. Rev.*, D4 (1971), 2191.
- [9] P. Bonifazi et al., *IL Nuovo Cimento*, 1C. (1978), N1, 465.

Resonant Gravitational Wave Detector Operating in Room Temperature in Zhongshan University

Hu Enke Guan Tongren Yu Bo Tang Mengxi Chen Shushen Huang Qingxiang

Abstract

This paper gives a brief report on resonant gravitational wave detector operating in room temperature in Zhongshan University. Main parameters of the antenna, the transducer made of piezoelectric ceramics and the preamplifier are shown. A diagram of the system is drawn. As a result of experiments, the sensitivity of the system reaches $h_0 \min = 2.0 \times 10^{-17}$. Correspondently, the thermal noise temperature is $T_N = 2.6\text{K}$.