

引力辐射探测实验中的非相关检测

管同仁 胡恩科

(中山大学引力物理研究室)

摘 要

相关接收系统在检测随机窄引力辐射脉冲所激发的天线信号时,不仅起不到最佳检测作用,而且还出现天线频率温度漂移影响问题。用简单的非相关检测电路来取代复杂的相关接收系统,既可以解决天线频率温度漂移影响的问题,还可以使电路造价降低 99% 以上。

一、相关检测

在窄引力波脉冲作用下,圆柱型引力波天线输出的纵向基模信号为

$$S_i(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \phi_0) \\ = S_i(t) \cos \phi_0 + S_c(t) \sin \phi_0, \quad (1)$$

式中

$$S_i(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega_1 t, \\ S_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega_1 t.$$

通常采用图 1 所示的双路相关积分系统检测上述信号^[1]。图中 $x(t) = S_i(t) + n(t)$, $n(t)$ 是噪声。

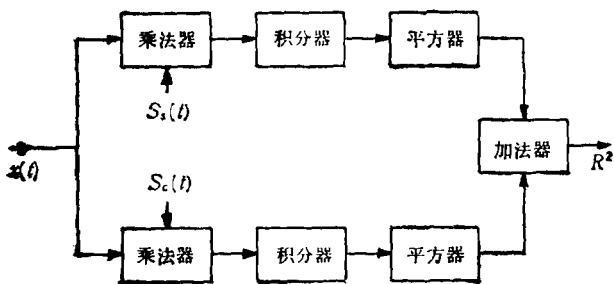


图 1

考虑到引力波天线 Q 值很高,振幅 $Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ 在天线信号的一个振荡周期内变化很小,可分别得到 x 路和 y 路积分器的输出为

$$R_x = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)S_i(t)dt = E_0 \cos \phi_0 + R_{n1}, \quad (2)$$

$$R_y = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)S_c(t)dt = E_0 \sin \phi_0 + R_{n2}, \quad (3)$$

式中

$$E_0 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} (Ae^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt,$$

$$R_{n1} = \int_{-\infty}^{\infty} n(t)S_i(t)dt,$$

$$R_{n2} = \int_{-\infty}^{\infty} n(t)S_c(t)dt.$$

为了消除随机相位 ϕ_0 的影响,将 R_x 和 R_y 平方相加,得

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2 = E_0^2 + E_n^2, \quad (4)$$

式中 E_n 代表各项噪声能量的总和。

上式表明,相关积分系统可以检测到信号能量 E_0 , 而将噪声抑制到最小,因而它是最佳检测系统。正因为如此,世界各国的引力波探测器都广泛地使用这种系统。

二、应用于引力波检测时出现的问题

在实际应用中,相关积分器均用模拟式锁定放大器代替。由于引力脉冲到达天线的时间不确定,因而本地参考信号 $S_i(t)$ 不可能采用天线信号的正交分量 $S_i(t)$ 和 $S_c(t)$, 一般都是简单地用等幅单位方波来代替,即

$$S_i(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)\omega_1 t]. \quad (5)$$

这样一来,实际使用的相关积分系统的输出信号就与(4)式的结果截然不同。

为了简化讨论,设 $\phi_0 = 0$, 并只考虑单路情况。

锁定放大器中的相关器由开关乘法器和有源滤波器组成。其中开关乘法器的输出信号为

$$S_3(t) = S_1(t) \cdot S_2(t), \quad (6)$$

有源滤波器(图 2)的电路方程为

$$\frac{d}{dt} S_4(t) + \frac{1}{\tau_c} S_4(t) + \frac{1}{C_0 R_0} S_3(t) = 0. \quad (7)$$

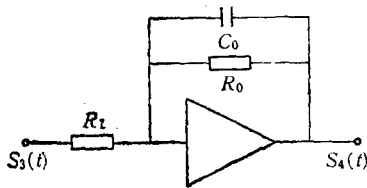


图 2

把(6)式代入(7)式,并令 $\omega_r = \omega_1$, 解方程得到

$$S_4(t) = D \cdot (e^{-\frac{t}{\tau_c}} - e^{-\frac{t}{\tau_c}})$$

$$\approx D \cdot e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (\tau_c \gg \tau_c; t > 3\tau_c), \quad (8)$$

式中 $\tau_c = R_0 C_0$, D 是常数。

比较(1)式和(8)式可知,实用的相关检测系统的作用仅仅是近似地提取信号包络,由于它得不到信号能量,所以并不能起到最佳检测作用。不仅如此,由于它引入了一个与天线谐振频率 ω_1 无关的基准参考频率 ω_r , 反而使得检测系统成为对天线频率温度漂移敏感的系统,以至严重地影响了检测系统灵敏度的稳定性。

三、用非相关电路取代相关检测系统

为了消除检测系统对频率变化的敏感性,我们采用以线性检波电路为核心组成的非相关检测电路,以取代相关检测系统,其造价不到相关检测系统的百分之一。图 3 是非相关检测电路方框图,图中高通滤波器的主要作用是抑制从地面传来的低频振动干扰信号。为了获得最

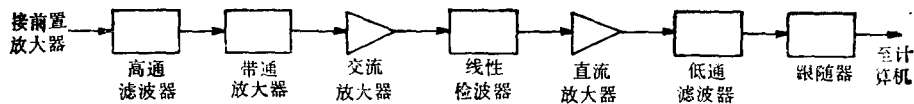


图 3

佳检测效果,检测电路输出的信号仍送到计算机进行最佳滤波运算。

过去,中山大学的常温引力波探测器采用相关检测系统时^[2],虽然采取恒温措施,将天线谐振频率的日变化率控制在 $\pm 0.1\text{Hz/d}$ 以下,小于天线半带宽 0.18Hz ,但仍需每日调节本地参考频率一次,才能维持正常工作。自从改为

非相关电路后,由于不再需要本地参考频率,因而彻底解决了长期以来不容易解决的天线频率温度漂移影响的问题,大大地改善了探测器灵敏度的稳定性。

[1] G. Pizzella, *IL Nuovo cimento*, 2C-2(1979),209.

[2] 胡恩科等,中山大学学报, No.4(1985),97.