

· 研究简报 ·

多重天线引力波探测器*

管同仁 胡恩科

(物理学系)

摘 要

在材料相同及总质量相等的条件下,由多根小天线组成的符合探测器的灵敏度与单根大天线探测器的灵敏度相同。在机械振动干扰源至各小天线之间的传输通道中人为地引入不同的传输时延后,符合探测器可以辨别干扰信号、实现单机运转独立判断引力辐射脉冲事件的目标。

关键词 引力波,多重天线,传输时延,自符合,干扰鉴别

在引力波探测实验中,通常所用的单天线探测器难以把引力波信号和干扰信号区分开,特别是由地面振动引起的干扰信号就更是如此。这种情况使得各国引力波探测实验室不得不联合起来,采取多地点间的符合测量办法来鉴别干扰事件^(1~3)。但多地点间的符合测量有各探测器灵敏度不一致及运转时间不易全部重合等缺点,至今未能广泛进行。

本文提出一种由多根独立天线组成的符合探测器,这种探测器采取在机械振动干扰源至各天线之间的隔振通道中,人为地引入不同的传输时延的办法,利用到达各天线的干扰信号有时延差别,而到达各天线的引力波信号无时延差别的特点,在不影响天线灵敏度的情况下,把机械振动干扰信号和引力脉冲信号区分开,从而实现单机运转,独自探测和判断引力辐射脉冲的目的。

1 符合天线的灵敏度

通常,Weber型天线都是由高 Q 值材料制成,因此天线热噪声属于高频窄带噪声,噪声包络 ρ 的分布服从Rayleigh分布,若用 σ_s^2 表示天线热噪声的均方值,则 ρ 的概率密度函数为⁽⁴⁾

$$p_s(\rho) = (\rho/\sigma_s^2) \exp(-\rho^2/2\sigma_s^2) \quad (1)$$

利用 $p_s(\rho)$ 可以求出 ρ 超过预定阈值 ρ_0 的概率 P_s

$$P_s = \int_{\rho_0}^{\infty} p_s(\rho) d\rho \quad (2)$$

现在用 m 根长度相同、质量为 M 的天线构成一个多重天线符合探测器。如果在某一

本文1989年3月10日收到

• 国家自然科学基金资助项目

时刻,各天线的输出值同时超过阈值 ρ_0 ,则定义为出现符合事件,探测器给出有信号的判断。

为便于讨论,下面把 m 根天线用一根质量为 M ,热噪声均方值为 σ_c^2 的符合天线来等效。显然,符合天线的噪声包络 ρ 超过阈值 ρ_0 的概率 P_c 为

$$P_c = \int_{\rho_0}^{\infty} (\rho/\sigma_c^2) \exp(-\rho^2/2\sigma_c^2) d\rho \quad (3)$$

由于各天线噪声之间相互无关,所以

$$P_c = P_s^m \quad (4)$$

由(2)~(4)式可求出

$$\sigma_s^2 = m\sigma_c^2 \quad (5)$$

现在假定上述 m 根天线是由一根质量为 mM 、热噪声均方值为 σ_b^2 的大天线沿纵向切割而成。由于天线热噪声均方值与天线质量成反比,所以

$$\sigma_b^2 = (1/m)\sigma_s^2 \quad (6)$$

把(5)式代入上式,得

$$\sigma_b^2 = \sigma_c^2 \quad (7)$$

令 $(S/N)_c$ 和 $(S/N)_b$ 分别代表符合天线和单根大天线的信噪比, E_s 和 E_n 分别表示天线的信号能和噪声能,则把单根大天线改为符合天线后,信噪比的改善系数为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_c / \left(\frac{S}{N}\right)_b = \left(E_s^c/E_s^b\right) \left(E_n^b/E_n^c\right) = \left(M/mM\right) \left(mM\sigma_b^2/M\sigma_c^2\right) = 1 \quad (8)$$

上式表明,把单根大天线改为多根符合小天线后,探测器的天线灵敏度不变,依然等于单根大天线的灵敏度。

2 机械振动干扰信号的鉴别

设 $n_i(t)$ 为符合天线的支路热噪声, $S_i(t+q\tau_i)$ 为支路信号,括号中, τ_i 是机械振动干扰源至小天线之间人为引入的传输时延, q 是识别因子, $q=1$ 代表振动干扰信号, $q=0$ 代表其它信号。

当各支路的输出值同时超过阈值,出现符合事件时,计算如下两个多重相关函数

$$R(o) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^m [S_i(t+q\tau_i) + n_i(t)] dt \quad (9)$$

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^m [S_i(t+q\tau_i - \tau_i) + n_i(t - \tau_i)] dt \quad (10)$$

由于各支路噪声之间相互无关,噪声与信号之间也相互无关,且信号又是接近或超过阈值的高值信号,因此上式中的交叉相关函数值及噪声互相关函数值皆远小于信号间的互相关函数值,上式可被近似为

$$R(o) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^m S_i(t+q\tau_i) dt \quad (11)$$

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^m S_i(t + q\tau_i - \tau_i) dt \quad (12)$$

比较上两式可知,当符合事件是引力脉冲事件时, $R(0) > R(\tau)$,而当符合事件是机械振动干扰事件时,情况正好相反,于是得到鉴别振动干扰事件的判决不等式如下

$$R(0) < R(\tau) \quad (13)$$

3 检测系统

用多天线探测器取代单天线探测器后,电子电路从一路增加至 m 路,以致探测器造价大幅度上升,为了克服这一困难,可采取将各小天线的纵向基模频率互相错开的办法,这样就可以用同一个直流超导量子干涉器(DC SQUID)放大各支路信号。按上述原则构成的检测系统原理方框图如图1所示。

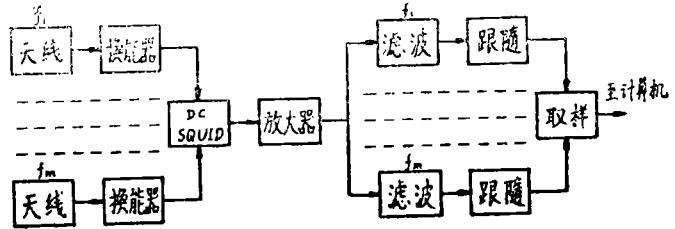


图1 自符合引力波探测器方框图

Fig. 1 Self-coincidence detector of gravitational wave

从检测系统输出的信号经取样后输给计算机,先做最佳滤波运算,然后做符合事件判断,一旦断定出现了符合事件,则进一步做事件种类判断。

参 考 文 献

- [1] Lee M et al., *Phys. Rev.*, D14(1976), 893
- [2] Ferrari V et al., *Phys. Rev.*, D25(1982), 2471
- [3] Hu Enke et al., *Chinese Phys. Lett.*, 3(1986), 12, 529
- [4] 鞠德航等, 信号检测理论导论, 科学出版社, 1977

Multiple Antenna Detector of Gravitational Wave

Guan Tongren* Hu Enke

Abstract

The sensitivity of the coincidence detector consisting of several small antennae is shown to be the same as that of the detector with a single big antenna if the same material and the same total mass are used for the two different detectors. When the different transmission delays are artificially brought into the transmission channels between the antennae and the disturbance source of the mechanical vibration, the disturbance signal can be distinguished by the coincidence detector. As a result, the object that the impulse events of the gravitational radiation are determined independently can be realized.

Keywords gravitational wave, multiple antenna, transmission delay, self-coincidence, distinguishing disturbance

* Department of Physics