



# 福建省重力台网对米娜台风激发的微震信号源定位

韦进<sup>1,2,3</sup> 胡敏章<sup>1,2,3</sup> 韩宇飞<sup>4</sup> 鲁小飞<sup>1,2,3</sup> 江颖<sup>1,2,3</sup>

1 中国地震局地震研究所,湖北 武汉,430071

2 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站,湖北 武汉,430071

3 湖北省地震局,湖北 武汉,430071

4 中国地震台网中心,北京,100045

**摘要:**利用重力台网进行台风激发信号的源区定位研究不仅有助于提高台风监测能力,而且可从台风激发信号中区分出震前与震源有关的信号,促进地震预测研究。以2019年第18号台风米娜(MITAG)为研究对象,基于福建省重力台网观测的1 Hz采样的固体潮观测数据,利用噪声互相关函数的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和归一化噪声能量流方法分析数据质量和微震源区方位,使用 $SNR \geq 25$ 的Rayleigh波互相关信号走时作为定位数据,进行台风4个时段的定位研究。结果表明,在MITAG台风靠近中国大陆的过程中,定位区域能够覆盖台风中心所在位置;地震背景噪声能量辐射模型的微震垂直位移极值区域也和台风靠近中国大陆过程时段一致;通过人工剔除高速波群的互相关信号后,定位区域也能覆盖到转向远离大陆过程时段的台风轨迹。福建省重力台网对台风的追踪提供一类新的数据和方法。

**关键词:**重力台网;微震信号;互相关函数;定位

**中图分类号:**P315;P312

**文献标志码:**A

每年夏、秋季,中国东南沿海会受到台风侵袭,不仅影响人民的正常生活、工作和生产,还会造成巨大的经济损失。目前台风研究与数值预报已取得了长足的进步,但依然无法满足防灾减灾的切实需求<sup>[1]</sup>。提前在海洋上进行大面积的监测仪器布设,开展台风激发信号的定位定向工作,会因极端天气影响仪器正常工作<sup>[2]</sup>;利用卫星遥感技术进行台风定位,会因台风时段的强降雨导致回波信号严重偏离<sup>[3]</sup>。随着陆基地震台空间分辨率的提高,出现了归一化噪声能量流(normalized background energy flux, NBEF)方法<sup>[4]</sup>、频率-波数分析法<sup>[5]</sup>、频率域聚束法<sup>[6-7]</sup>等台风激发信号的源区定位定向方法,还开始利用地震背景噪声能量辐射模型(Ardhuin seismic spectra model, ASSM)模拟源区激发微震信号<sup>[8]</sup>,已有文献证明了微震信号中存在Rayleigh波<sup>[9-10]</sup>和P波<sup>[7]</sup>成分。上述基于陆基台站利用地震学方法进行台风激发信号的研究是对传统方法的补充,有助于提高台风监测能力。

近年来,重力测量技术除了用于地下物质迁移的探测<sup>[11]</sup>以及地球的长周期潮汐信号的观测<sup>[12]</sup>外,还用于分析重力数据高频成分中蕴含和地震震源有关的震前地球物理信号<sup>[13-14]</sup>。然而,台风激发信号的干扰导致这些信号的识别和判定存在疑问<sup>[15]</sup>。因此,直接利用重力观测技术进行台风激发信号的定向和定位工作,有助于区分震前与震源有关信号和台风激发信号的差异,这将会极大促进地震震前异常信号的深入认识。

2008年以来,中国地震局陆续引入美国基于零长弹簧技术研制的1 Hz采样的gPhone重力仪进行地震预测研究。虽然目前配备这些仪器的重力站采样率不及地震计,空间分辨率较低,然而1 Hz数据中不仅存在台风激发的微震信号<sup>[16]</sup>,而且高密度gPhone重力仪组成的重力台网数据可利用扰动源扫描算法(source scanning algorithm, SSA)区分大地震前的异常信号和台风激发信号<sup>[14]</sup>。这为进一步补充和印证传统方法的研究成果,发现和发展新的台风监测数据和方

法,提高该型重力仪对微震信号源的定向和定位能力提供了新的数据和方法。

本文利用中国福建省及其相邻省份的gPhone重力仪1 Hz采样重力固体潮观测数据,采用地震P波震相校时<sup>[17]</sup>、重力台网噪声互相关函数(noise cross-correlation function, NCF)的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)筛选<sup>[4]</sup>和NBEF法估计信号源方位<sup>[5]</sup>,利用NCF矩阵的Rayleigh波互相关信号走时对2019-09-28—2019-10-02的台风米娜(MITAG)运动轨迹进行定位定向的研究。将结果分别与中国气象台实际台风路径和ASSM正演的微震垂直位移空间分布特征进行比较,讨论SNR和高速互相关信号对定位结果的影响,分析总结福建省重力台网对台风的追踪能力。本文研究可为基于重力观测数据的台风定位和定向提供一类新的数据和方法。

## 1 研究数据

本文选取2019年第18号台风MITAG为研究对象,以中央气象台台风网台风路径实时发布系统公布的台风最佳路径数据为参考轨迹(<http://typhoon.nmc.cn/web.html>),数据时间间隔为1 h。MITAG起源于关岛东部海域,在北京时间2019-09-28 8时成长为热带风暴,29日13时在菲律宾以东洋面发展成为强热带风暴,29日16时强热带风暴绕过菲律宾向中国台湾岛推进过程中成长为台风,30日8时台风转为北上,逐渐靠近中国大陆,10月2日3时台风中心到达浙江省舟山群岛附近后,开始转向东北并开始减弱为强热带风暴和热带风暴。台风MITAG轨迹与重力台网空间分布如图1所示。MITAG在其生命周期内穿越开阔的菲律宾海和中国东海,纬度跨度超过20°,经度跨度超过10°,为利用中国大陆东部沿海的gPhone重力仪捕捉其激发的微震信号能力测试提供了良好的试验样本。

本文收集的重力观测数据是在MITAG台风时段(2019-09-28—2019-10-02),由福建省地震局和中国大陆构造环境监测网络工程安装的7套1 Hz采样gPhone重力仪采集的重力固体潮观测数据。图2为台风时段内各重力站时频分析以及台风距和微震垂直位移时间序列。这些重力仪在MITAG生命周期中观测正常,在台风中心靠近中国大陆过程中记录到台风激发的微震增强能量,在功率谱密度增大变化前,北京时间2019-09-29T10:02:49发生了棉老Ms 6.2地震([http://](http://www.ceic.ac.cn/history)

[www.ceic.ac.cn/history](http://www.ceic.ac.cn/history))。

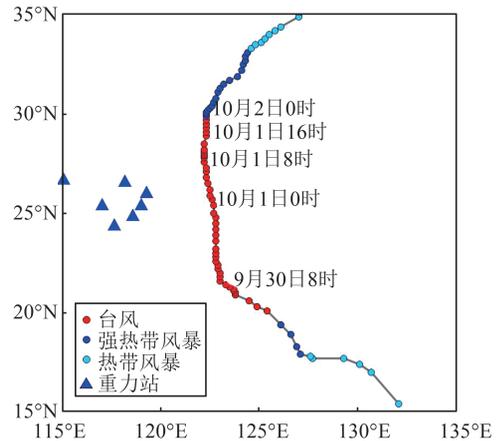


图1 台风米娜轨迹与重力台网空间分布

Fig.1 Path of Typhoon MITAG and Spatial Distribution of Gravity Network

此外,为了模拟台风掀起海浪激发的微震信号能量影响,本文收集法国海洋开发研究院(French Research Institute for the Exploitation of the Sea, IFREMER)采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)开发的第三代海浪模式WAVEWATCH-III计算并发布的ASSM,它包括2个等效压力谱数据模型,分别是考虑海浪相互干涉影响的REF模型和考虑直接入射影响的NOREF模型,模型网格分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,频率范围为0.07~0.55 Hz,上述模型数据可以从IFREMER数据库下载(<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/ww3/HINDCAST/SISMO/>)。

## 2 原理和方法

### 2.1 定位原理

图1中7个重力站组成了站间距为25~450 km的台网,该台网距离台风中心约500~1 500 km。定位基本思想为台风掀起海浪激发的Rayleigh波通过海底传播到中国大陆重力站,由于传播行程和传播介质不同,两个重力站观测的1 Hz采样数据经互相关计算<sup>[18]</sup>可获得源区信号的走时差。本文因为台风和台网间距不远,所以假设信号为直线传播,传播路径只包括海洋和陆地,信号传播初始模型如图3所示。图3中,信号源S发出的信号通过海洋和陆地传播到陆地上的两个重力站 $O_1$ 和 $O_2$ ,在两段传播路径中,海洋路径走时分别为 $t_{s1}$ 和 $t_{s2}$ ,陆地路径走时分别为 $t_{o1}$ 和 $t_{o2}$ ,各路径的走时可通过信号传播的位移和平均速度计算,那

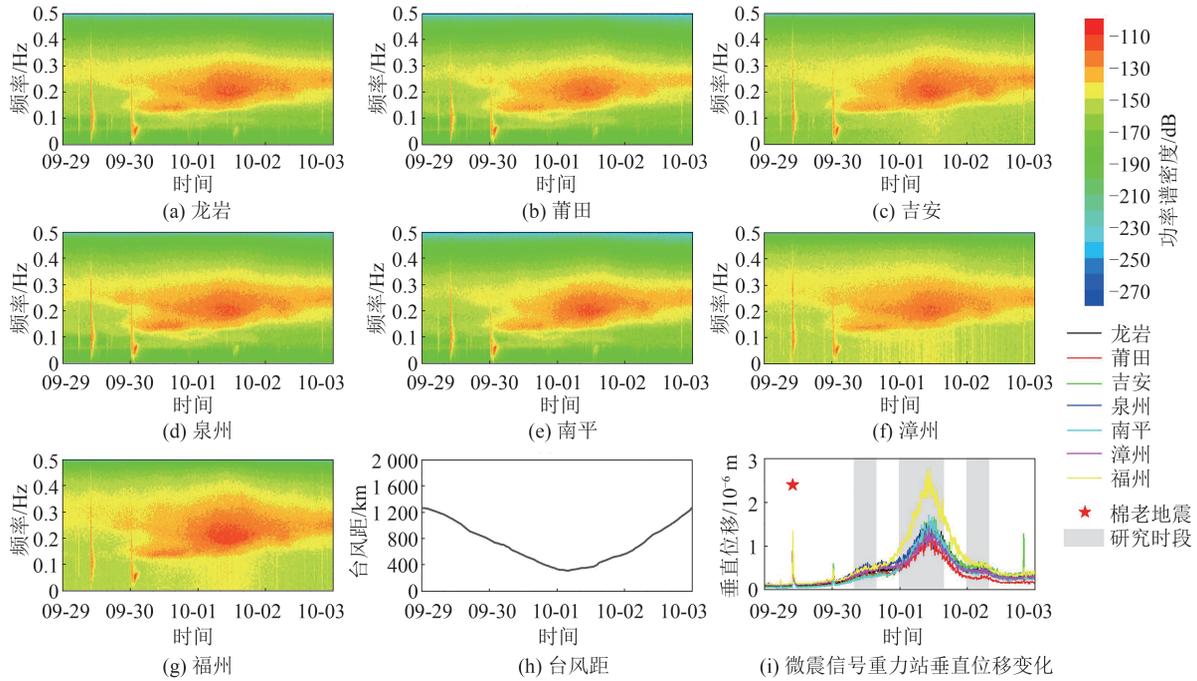


图 2 台风时段重力站时频分析以及台风距和微震垂直位移时间序列

Fig.2 Time-Frequency Analysis, Distance from Hurricane Center to Gravity Station, and Microseisms Vertical Displacement During Typhoon MITAG

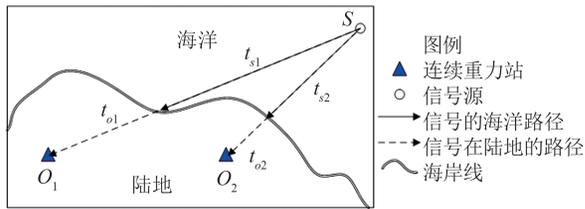


图 3 信号传播初始模型

Fig.3 Initial Model of Signal Propagation

么走时差  $\Delta t$  的计算式为:

$$\Delta t = (t_{s1} + t_{o1}) - (t_{s2} + t_{o2}) \quad (1)$$

不同于地震计或宽频带地震计,重力台网 1 Hz 采样的重力固体潮观测数据优势频段为重力的周日和半日波潮汐频段<sup>[12]</sup>,该频段数据的时间精度还无法达到 1 s 的误差,因此需要进行数据预处理。走时法信号源定位的具体步骤如下:

1) 利用棉老 Ms 6.2 地震的 P 波理论震相<sup>[19]</sup>对 1 Hz 采样的 gPhone 重力仪观测的 P 波观测震相进行时间校准。

2) 对校准后的重力固体潮数据分割为 8 h 一段,每段再细分为 2 h 窗长,首先在窗长内改正固体潮和气压后进行线性零漂改正,以 1 倍中误差为阈值去除地震、不明电子脉冲等因素的影响;然后用 0.10~0.35 Hz 的带通滤波器滤波,生成预处理数据;最后对台网中 7 个重力站的 2 h 窗长预处理数据进行互相关计算,并将 8 h 内的 4 次互相关结果求和,作为本时段的微震 NCF。

3) 选择 NCF 中  $SNR \geq 25$ 、台站间距 (distance between two stations, DS)  $\geq 100$  km 的台站对,建立 NCF 矩阵,并计算矩阵的 Rayleigh 波互相关信号走时。

4) 设置搜索区域,假设信号在陆地传播的速度为 11 km/s<sup>[6]</sup>,在海上传播的速度为 2.9 km/s,根据图 3 的微震信号传播模型和式(1),计算搜索区域到筛选台站对的理论走时差,与步骤 3) 的 Rayleigh 波互相关信号走时作差后,计算累积平方和。

5) 将搜索区域的累积平方和归一化值作为定位区域归一化值,其中极小值区域为台风激发信号的源区位置,本文设定搜索区域范围为 115°E~125°E, 20°N~30°N,利用 NCF 矩阵的 Rayleigh 波互相关信号走时进行信号源定位。

## 2.2 台风激发微震信号源的数值模拟

台风激发的微震信号源可用相向传播的同频率海浪发生非线性相互作用后产生的等效压力场来寻找。文献[8, 20]计算的海浪等效压力场功率谱密度  $F_p(x, f)$  被作为 ASSM 发布,台风掀起海浪形成的压力场区域异常变化就被记录在其中。

将海浪等效压力场作为微震信号源,则海浪作用于海底或海岸的压力能量谱  $S_{DF}(f_i)$  计算式为:

$$S_{DF}(f_s) = \frac{2\pi f_s C'}{\rho_s^2 \beta^5} F_P(x, f) \quad (2)$$

式中,  $x$  表示空间位置;  $f$  为微震信号频率;  $f_s$  为海洋波浪频率,  $f_s = f/2$ ;  $\rho_s$  为岩石密度;  $\beta$  为剪切波波速; 系数  $C'$  取值范围为  $0.05 < C' < 0.84$ , 依赖声波波长和水深的比值。

假设一个重力站的经度为  $\lambda$ 、纬度为  $\varphi$ , 其瞬时微震信号源为  $(\lambda', \varphi')$ , 忽略微震信号在三维地球传播中的影响, 只用一个品质因子  $Q$  代表地震波散射与耗散的影响, 并假设地震台能量衰减是台站到信号源球面距离  $\Delta$  的函数, 得到微震在均质地球模型中传播到空间任意位置垂直方向的微震能量  $F_\delta(\lambda, \varphi, f_s)^{[9]}$ , 计算式为:

$$F_\delta(\lambda, \varphi, f_s) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{S_{DF}(f_s)}{R \sin \Delta} e^{2\pi f_s \Delta R / (UQ)} (R^2 \sin \varphi' d\lambda' d\varphi') \quad (3)$$

式中,  $R$  为地球半径;  $U$  为地震波群速度;  $R \sin \Delta$  为积分核的地震波传播的几何扩散因子;  $R^2 \sin \varphi' d\lambda' d\varphi'$  为地球表面区域元素。

由于微震能量和海浪频率有关, 指定频段的微震能量评估还可以利用微震垂直位移  $X_{mod}$  描述<sup>[15]</sup>, 计算式为:

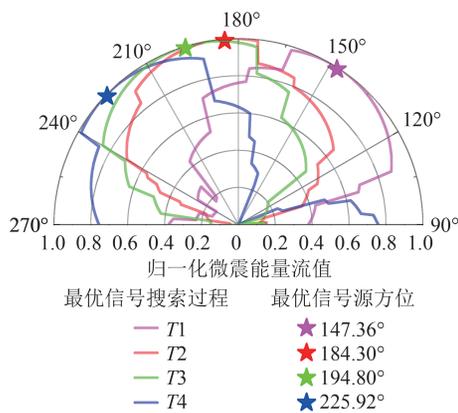
$$X_{mod} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} F_\delta(\lambda, \varphi, f_s) df_s} \quad (4)$$

式中, 微震信号的起止频率分别为  $f_1$  和  $f_2$ 。在模拟微震信号垂直位移时设置  $f_1 = 0.08$  Hz,  $f_2 = 0.32$  Hz, 在利用 ASSM 模拟微震能量时,  $Q = 180$ ,  $U = 1.8$  km/s<sup>[16]</sup>。由于台风激发信号微震源附近的微震能量最强, ASSM 模拟研究区的微震垂直位移的空间分布特征可表征微震源。

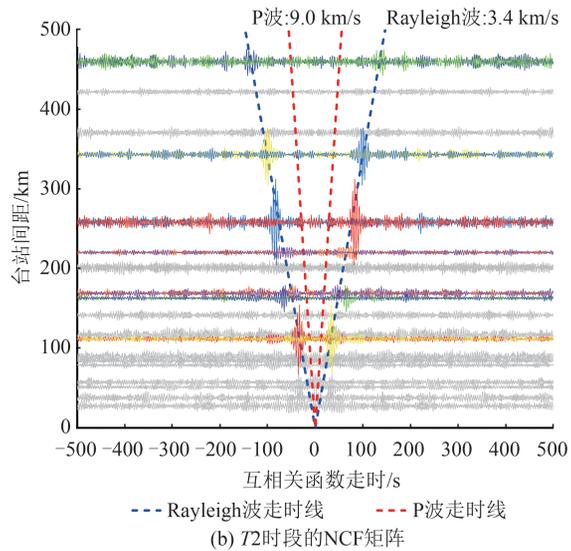
### 3 分析与讨论

#### 3.1 重力台网的噪声互相关函数及微震源定向分析

在微震源定位定向前, 需要筛选和排列重力台网的 NCF, 本文的筛选策略是在估计最优信号源方位后, 将重力台网 NCF 按 DS 由小到大排列建立 NCF 矩阵, 选择 SNR 高、互相关信号走时与 DS 呈线性关系的 NCF 进行信号源定位定向分析, 结果如图 4 所示。本文选取的 4 个时段分别为 2019-09-30 8 时—16 时 ( $T_1$ )、2019-10-01 0 时—8 时 ( $T_2$ ) 和 8 时—16 时 ( $T_3$ ) 以及 2019-10-02 0 时—8 时 ( $T_4$ )。



(a) 4个研究时段计算的NBEF和最优信号源方位



(b) T2时段的NCF矩阵

图4 最优信号源方位和T2时段的噪声互相关函数矩阵

Fig.4 Optimal Azimuth Estimated by NBEF Method and NCF Matrix in T2

本文计算最优信号源方位时采用 NBEF 方法<sup>[4]</sup>, 即遍历 NCF 矩阵中  $SNR \geq 25$  的 NCF, 计算  $90^\circ \sim 270^\circ$  信号源方位的归一化微震能量流, 其值等于 1.0 时, 即为最优信号源方位。图 4(a) 为 4 个研究时段遍历计算的归一化微震能量流和最优信号源方位, 由图 4(a) 可以看出,  $T_2$  与  $T_3$  的最优信号源方位仅相差  $10.50^\circ$ , 而  $T_1$  与  $T_4$  的方位变

化则达到了  $78.56^\circ$ , 这与台风中心在不同时段的空间位置不同有关。

确定了最优信号源方位后, 将 7 个重力站组成的 42 个台站对按照 DS 大小排列为 NCF 矩阵, 矩阵中只有 14 个 NCF 的  $SNR \geq 25$ 。当最优信号源方位为  $184.30^\circ$  时, 这些 NCF 的互相关信号走时和 DS 呈线性关系 (图 4(b) 中的非灰色实线序

列)。其中,满足该线性关系的互相关信号视速度约为  $3.4 \text{ km/s}$ ,该速度属于 Rayleigh 波。本文研究区域与川滇地区台阵的 NCF 矩阵一样<sup>[4]</sup>,两者最为突出的信号都是 Rayleigh 波,只有在台风抵近重力台网后台间距较近的 NCF 会出现速率

更高的互相关信号。

### 3.2 Rayleigh 波互相关信号走时法的台风定位

NBEF 法仅能计算微震源的最优方位,本文采用 §2.1 描述的走时法,计算重力台网的 NCF 矩阵,并统计视速度,结果如图 5 所示。

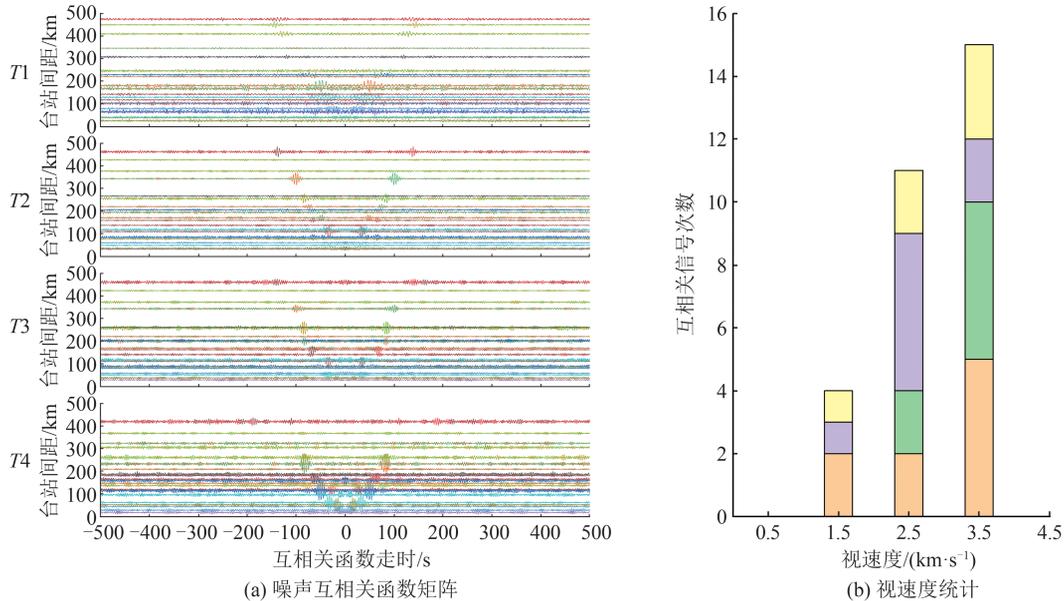


图 5 不同时期的噪声互相关函数矩阵以及视速度统计

Fig.5 NCF Matrix in Different Periods and Statistics of Apparent Velocity

由图 5(a)可以看出,当  $DS \geq 100 \text{ km}$  时,4 个时段 Rayleigh 波互相关信号均比较明显,但 T2 的 Rayleigh 波互相关信号比 T1 时段更清晰,这与台风在 T2 时段更靠近重力台网有关;台风在 T4 时段抵近重力台网后开始北向远离时, $DS < 150 \text{ km}$  的 NCF 中出现了与 Rayleigh 波 SNR 相当的高速互相关信号,因该信号影响了 Rayleigh 波互相关信号走时与 DS 的线性关系,定位计算时可能会影响到信号源定位结果。图 5(b)为 4 个时段 NCF 矩阵的  $SNR \geq 25$  的视速度与互相关信号次数统计。由图 5(b)可以看出,视速度主要分布在  $1.5 \sim 3.5 \text{ km/s}$ ,属于 Rayleigh 信号的范畴。因此本文只选择  $SNR \geq 25$ 、 $DS \geq 100 \text{ km}$  的 NCF 的 Rayleigh 波互相关信号走时,利用走时法进行台风中心定位,并利用 ASSM 的 REF、NOREF 两种模型计算微震垂直位移空间分布数据和最优台风路径数据,检验台风中心定位结果的可靠性,如图 6 所示。

4 个时段的走时法信号源定位结果如图 6(a) 所示。由图 6(a)的 T1 时段可以看出,台风中心从距重力台网较远到开始抵近,定位区域能够覆盖台风中心位置。由图 6(b)、6(c)的 T1 时段可以看出,REF 和 NOREF 模拟同时段的微震垂直

位移,其极值位置不在台风中心的正下方,而是与台风中心保持一定距离,该模拟结果与利用台阵对 2006 年 Ioke 台风定位时台风中心与信号源位置关系的规律一致<sup>[10]</sup>。而且在 T2 和 T3 时段,信号源定位结果与模拟结果也表现出相同的规律。但是在 T4 时段,台风中心从抵近重力台网到转而北上远离台网,台风中心只位于定位区域边缘,REF 和 NOREF 模拟的微震垂直位移极值区域未跟随台风中心北上,而是继续留在中国台湾和琉球群岛间,幅值逐渐减小。从不同时段重力台网 NCF 矩阵差异来看(图 5(a)),信号源最优定位区域与台风中心实际位置的差异应和 NCF 矩阵中出现了信噪比与 Rayleigh 波 SNR 相当的更高速的互相关信号有关。

由此可见,利用福建省重力台网的 Rayleigh 波互相关信号走时与 DS 的线性关系可追踪台风中心的运动轨迹,但当台风中心抵近台网后开始远离时,会因出现和 Rayleigh 波 SNR 相当的高速互相关信号使定位不准确。

### 3.3 信噪比对定向的影响讨论

基于 NBEF 方法确定的最优信号源方位与台风中心位置有关,走时法定位的信号源区域和台风中心位置也是一致的,因此通过比较最

优信号源方位和实际方位可以评估定位的可靠性。本文在未筛选、不同SNR阈值筛选和人为筛选3种情况下,利用NBEF方法计算了5个时段、6种策略的最优方位,结果见表1。为消除由于

DS太小导致Rayleigh波互相关信号无法识别的问题,所有策略筛选NCF时都满足 $DS \geq 100$  km。在上文4个时段的基础上,增加时段T5(2019-10-01 16时—2019-10-02 0时)。

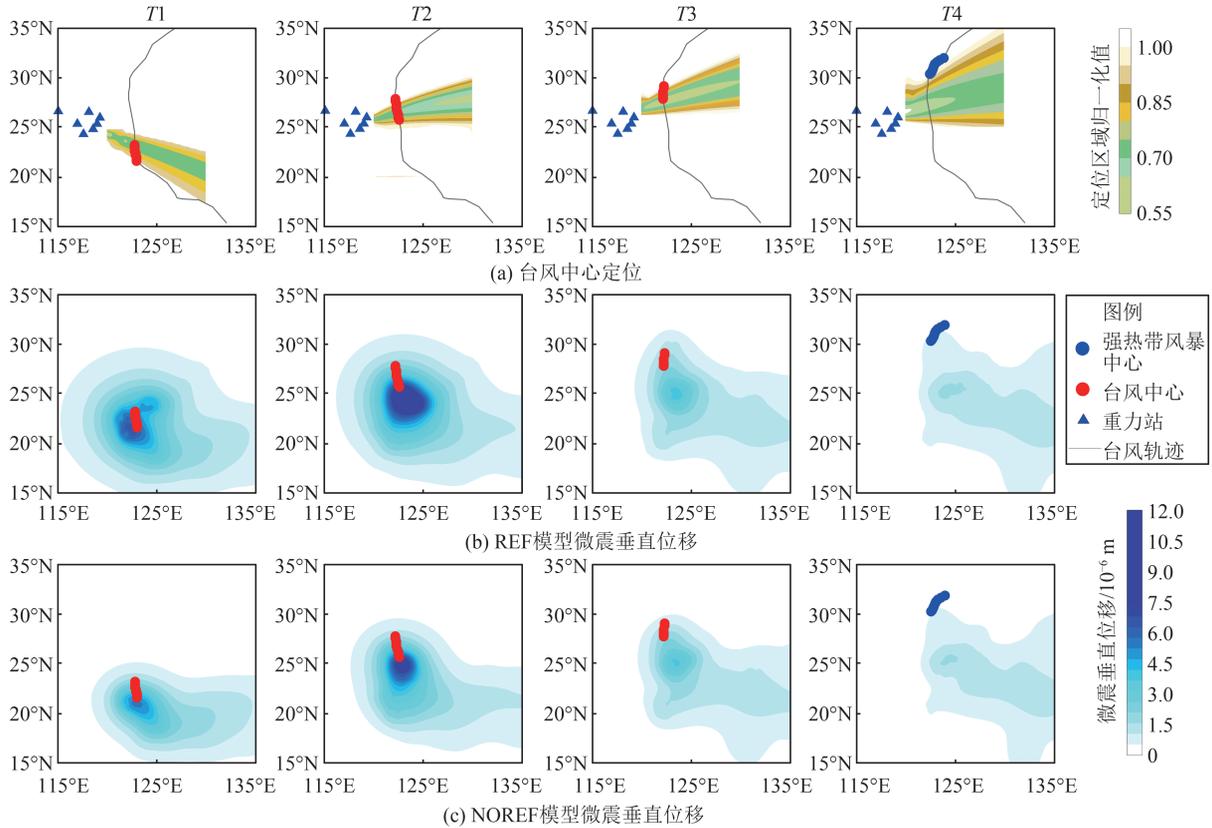


图6 台风中心定位与微震垂直位移的模拟比较

Fig.6 Location of Typhoon Center and Microseisms Vertical Displacement Simulated by ASSM

表1 NBEF方法的最优方位估计 / (°)

Tab.1 Optimal Azimuth Calculated by NBEF Method / (°)

策略	最优方位				
	T1	T2	T3	T5	T4
未筛选	174.74	183.66	184.88	183.66	199.40
$10 \leq SNR < 15$	160.52	191.16	191.16	191.16	196.36
$15 \leq SNR < 20$	145.26	191.16	193.36	203.16	206.98
$20 \leq SNR < 25$	148.22	184.30	194.80	201.46	225.92
$SNR \geq 25$	147.36	184.30	194.80	196.84	225.92
人工筛选	—	—	—	200.06	231.80
路径估值	135.43~141.70	180.12~205.72	205.70~217.27	217.27~224.49	224.57~227.28

由表1中5个时段的分析结果可知,在台风距重力台网最近(T4)和最远(T1)的两个时段,未筛选与筛选策略的最优方位偏差较大( $-27^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ),其他时段的不同策略结果则差异相当( $\leq 15^{\circ}$ )。在不同SNR阈值筛选条件下,最优方位会随着SNR阈值的增大而逐步趋于一个最佳值。 $SNR \geq 25$ 和 $20 \leq SNR < 25$ 与人工筛选策略最优方位的差异较小( $\leq 10^{\circ}$ ),这也接近路径估值策略的结

果,即指定时段台风中心与重力台网的中心方位范围,因此本文把 $SNR \geq 25$ 作为台风定位数据筛选的条件。

### 3.4 高速互相关信号对信号源定位的影响讨论

当台风中心距重力台网较近时,NCF中出现了和Rayleigh波互相关信号信噪比相当的高速互相关信号。当把这些高速信号走时代入走时法信号源定位的计算中,原有的互相关信号走时和DS

的线性关系被打破,势必影响信号源定位的准确性。因此,本文选取 T4 时段,人工剔除这些

影响互相关信号走时和 DS 线性关系的 NCF 后再再次进行定位,结果如图 7 所示。

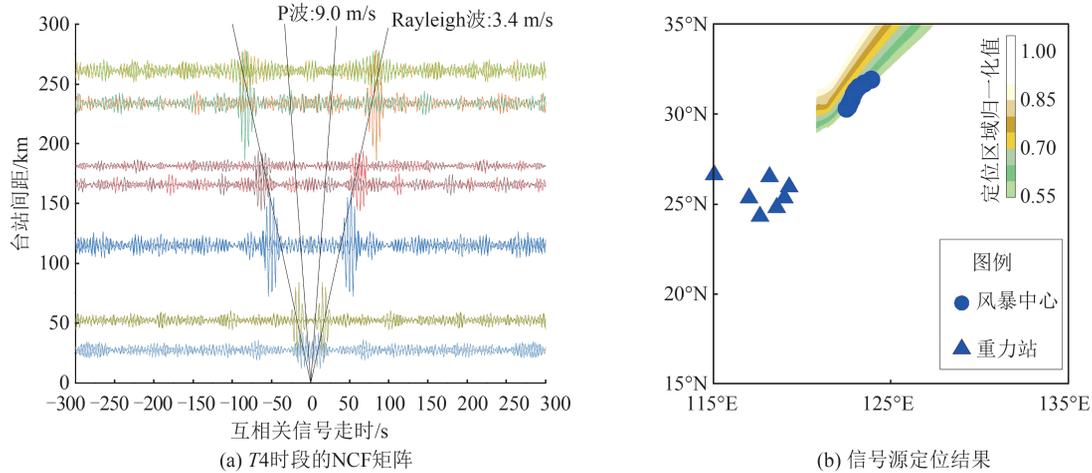


图 7 人工筛选互相关函数矩阵和信号源定位结果

Fig.7 NCF Matrix with Manual Selection Strategy and Source Location Result

针对图 6(a)中 T4 时段的结果,经过人工筛选后获得 NCF 矩阵(图 7(a)),根据筛选后数据,利用走时法获得台风中心再次定位结果(图 7(b))。对比图 6(a)与图 7(b)可知,在 T4 时段人工筛选后的结果从原来的定位区域边缘移至定位区域内部,印证了当台风中心抵近重力台网后转向远离时, NCF 中的高速波群影响了本文方法的定位结果。

## 4 结 语

本文基于福建省及其邻区 7 套 gPhone 重力仪组成的重力台网 1 Hz 采样的重力固体潮数据,利用 2019 年台风米娜激发的 Rayleigh 波互相关信号走时,进行信号源的定位研究。结果表明,当台风中心从远处抵近重力台网时,走时法的定位区域能覆盖到对应时段的台风轨迹,也能覆盖 ASSM 模拟的微震垂直位移极大值区附近。当台风中心从抵近重力台网到转而北上远离台网时,人工剔除台站对中有高速互相关信号的 NCF 后依然可追踪台风轨迹。可见福建省及其邻区的重力台网观测的 Rayleigh 波互相关信号对台风中心具有追踪能力。由于重力台网空间分辨率不足,本文所选资料仅能追踪而无法精确定位台风中心。为进一步提升自然灾害源的定向定位能力,下一步希望在本文建立模型和 NCF 质量评估的基础上,联合福建省地震台网的地震计数据,利用台风激发的微震信号进行高精度的台风追踪和定位工作。

致谢:感谢中国大陆构造环境监测网络、国家重力台网中心和福建省地震局提供 1 Hz 采样

的重力固体潮记录数据,中国地震局提供的地震目录,中央气象台提供的台风最佳路径数据,以及法国海洋开发研究院提供的微震信号源区等效压力谱数据以及微震垂直位移的正演程序。

## 参 考 文 献

- [1] Hu Zihé, Liu Po, Gong Jianhua, et al. Design and Implementation of Multidimensional and Animated Visualization System for Typhoon on Virtual Globes [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(10): 1299-1305 (胡自和, 刘坡, 龚建华, 等. 基于虚拟地球的台风多维动态可视化系统的设计与实现[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(10): 1299-1305)
- [2] Lin Jianmin, Fang Sunke, Ni Sidao. Investigation of Typhoon Kalmaegi-Induced Microseism Source Regions Using Combined Seismic Arrays [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(12): 4341-4354 (林建民, 方孙珂, 倪四道. 台风“海鸥”激发地脉动源区的联合台阵定位研究[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(12): 4341-4354)
- [3] Gao Chaoqun, Yang Dongkai, Qiu Xuejing, et al. Constructing LEO-R Ocean Remote Sensing Constellation Using BeiDou System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1342-1348 (高超群, 杨东凯, 裘雪敬, 等. 利用北斗系统构建 LEO-R 海洋遥感星座的理论研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(9): 1342-1348)
- [4] Wang Weitao, Ni Sidao, Wang Baoshan. Study on the Characteristics of Microseisms in the Yunan Region, China [J]. *Earthquake*, 2011, 31(4): 58-67

- (王伟涛, 倪四道, 王宝善. 云南地区地脉动噪声特征分析研究[J]. 地震, 2011, 31(4): 58-67)
- [5] Wang Fang, Wang Baoshan. The Improvement of Frequency-Wavenumber Analysis Methods and Its Application in Array Data Processing[J]. *Earthquake Research in China*, 2017, 33(2): 191-202 (王芳, 王宝善. 频率-波数域方法的发展及其在台阵数据分析中的应用[J]. 中国地震, 2017, 33(2): 191-202)
- [6] Lin J M, Wang Y T, Wang W T, et al. Seismic Remote Sensing of Super Typhoon Lupit (2009) with Seismological Array Observation in NE China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 235
- [7] Fang S K, Lin J M, Ni S D, et al. Improving Seismic Remote Sensing of Typhoon with a Three-Dimensional Earth Model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(2): 478-491
- [8] Ardhuin F, Lavanant T, Obrebski M, et al. A Numerical Model for Ocean Ultra-Low Frequency Noise: Wave-Generated Acoustic-Gravity and Rayleigh Modes[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(4): 3242-3259
- [9] Chen Donglu, Lin Jianmin, Ni Sida, et al. Characteristics of Seismic Noise on Ocean Islands in Northwest Pacific and Its Oceanographic Interpretation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(1): 230-241 (陈栋炉, 林建民, 倪四道, 等. 西北太平洋海岛地区地震背景噪声特征及海洋学解释[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 230-241)
- [10] Retailleau L, Gualtieri L. Toward High-Resolution Period-Dependent Seismic Monitoring of Tropical Cyclones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1329-1337
- [11] Hu Minzhang, Hao Hongtao, Han Yufei, et al. Gravity Flexural Isostasy Background of the 2021 Madoi (Qinghai) Ms 7.4 Earthquake and Gravity Change Before the Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3135-3149 (胡敏章, 郝洪涛, 韩宇飞, 等. 2021年青海玛多 Ms 7.4 地震的重力挠曲均衡背景与震前重力变化[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3135-3149)
- [12] Wei Jin, Hao Hongtao, Zhang Xiaotong, et al. Accuracy Estimation of Global Tide Models Using Continuous Gravity Observation Data in Northern China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2021, 43(1): 84-99 (韦进, 郝洪涛, 张晓彤, 等. 利用中国北部连续重力站资料评估全球潮汐模型精度[J]. 地震学报, 2021, 43(1): 84-99)
- [13] Zhang K L, Ma J. Superconducting Gravimeters Detect Gravity Fluctuations Induced by Mw 5.7 Earthquake Along South Pacific Rise Few Hours Before the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2014, 25(4): 471
- [14] Yang Jinling, Li Zuning, Guan Yumei, et al. Study on Gravity Disturbance Before the Yutian Ms 7.3 Earthquakes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 3844-3852 (杨锦玲, 李祖宁, 关玉梅, 等. 于田 Ms 7.3 地震震前重力扰动信号研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3844-3852)
- [15] Wei Jin, Lü Pinji, Hao Hongtao, et al. Study on the Anomalies of the Double Frequency Microseisms Before Yingcheng Ms 4.9 Earthquake [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, 42(1): 88-95 (韦进, 吕品姬, 郝洪涛, 等. 应城 Ms 4.9 地震前第二类地脉动信号异常分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(1): 88-95)
- [16] Wei Jin, Hao Hongtao, Yang Jinling, et al. Detecting DF Microseisms by gPhone Gravimeter on Fuzhou Seismic Station During Dujuan Typhoon [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(6): 2107-2115 (韦进, 郝洪涛, 杨锦玲, 等. 利用福州 gPhone 重力仪检测杜鹃台风激发的第二类脉动信号[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2107-2115)
- [17] Wei J, Zhao B, Tan H B, et al. Detection of a Half-Microgal Coseismic Gravity Change After the Ms 7.0 Lushan Earthquake [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2013, 4(3): 7-11
- [18] Shapiro N M, Ritzwoller M H, Bensen G D. Source Location of the 26 Sec Microseism from Cross-Correlations of Ambient Seismic Noise [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L18310
- [19] Myers S C, Simmons N A, Johannesson G, et al. Improved Regional and Teleseismic P-Wave Travel-Time Prediction and Event Location Using a Global 3D Velocity Model [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(3): 1642-1660
- [20] Farra V, Stutzmann E, Gualtieri L, et al. Ray-Theoretical Modeling of Secondary Microseism P Waves [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(3): 1730-1739

## MITAG Typhoon Location Based on Microseismic Signal of Gravity Network in Fujian Province

WEI Jin<sup>1,2,3</sup> HU Minzhang<sup>1,2,3</sup> HAN Yufei<sup>4</sup> LU Xiaofei<sup>1,2,3</sup> JIANG Ying<sup>1,2,3</sup>

1 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2 National Observation and Research Station of Gravitation and Earth Tide, Wuhan 430071, China

3 Hubei Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

4 China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract: Objectives:** With the development of gravity observation technology, the typhoon tracking research by gravity network composed of gPhone with 1 Hz sampling rate can not only improve the ability of typhoon monitoring, but also distinguish the pre-earthquake anomalous signals related to earthquake hypocenters from typhoon excitation signals, thereby improving the ability of earthquake prediction. **Methods:** Firstly, the original gravity earth tide data are pre-processed and cross-correlated as the ambient noise cross-correlation function(NCF) matrix from the gravity network in Fujian Province and its adjacent areas. Secondly, by selecting the NCF with signal-to-noise ratio (SNR) $\geq 25$  as NCF matrix and calculating the optimal azimuth of the signal source by the normalized background energy flux (NBEF) method, the NCF matrix is sorted by the distance of gravity station pairs and the travel time of the Rayleigh wave cross-correlated signal is confirmed. Assuming that the speed of microseisms is 2.9 km/s in the ocean, and 11 km/s in the land, the normalized value in the location area is calculated by the difference of travel time from a signal source to the gravity station pairs in research region. The minimal normalized value in locating area is the typhoon center or the excited signal source. Meanwhile, the microseisms vertical displacement simulated with the Arduin seismic spectra model (ASSM) and the optimal path of MITAG typhoon(2019) has been used to check the reliability of the locating results. Finally, the 7 optimal azimuth estimated strategies have been used for comparison of typhoon orientation, and the influence of the high-speed cross-correlated signal has been discussed to verify the reliability of the location method. **Results:** When the MITAG typhoon is approaching the gravity network, the locating area can cover the location of the typhoon center. The extreme value region of the microseism vertical displacement simulated by the ASSM model is also consistent with the typhoon path during the period of approaching the gravity network. After eliminating the NCF with high-speed cross-correlated signals, the location area can also cover the typhoon trajectory during the period of turning away from the gravity network. **Conclusions:** By specifying SNR and distance of gravity station pairs and excluding NCFs with high-speed cross-correlated signal, the Raleigh wave cross-correlated signal travel time locating method can be used to trace the typhoon based on Fujian Province gravity network. The study can provide new data and methods for tracking typhoons by gravity network.

**Key words:** gravity network; microseismic signal; cross-correlation function; localization

**First author:** WEI Jin, PhD, associate professor, specializes in analysis and application of continuous gravity observation data. E-mail: pierce212@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41204058); Open Fund of Wuhan, Gravitation and Solid Earth Tides, National Observation and Research Station (WHYWZ202106).

**引文格式:** WEI Jin, HU Minzhang, HAN Yufei, et al. MITAG Typhoon Location Based on Microseismic Signal of Gravity Network in Fujian Province[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6):955-963. DOI:10.13203/j.whugis20220172(韦进, 胡敏章, 韩宇飞, 等. 福建省重力台网对米娜台风激发的微震信号源定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6):955-963. DOI:10.13203/j.whugis20220172)