



高频背景噪声面波方法

— 误差校正与信号增强

程逢

浙江大学

Acknowledgement



Prof.
Jianghai Xia

浙江大学



Prof.
Jonathan Ajo-Franklin

Rice University

宓彬彬
浙江大学



席超强
安徽理工



柳亚
浙江工业



庞景尹
成都理工



宁玲
江西师范



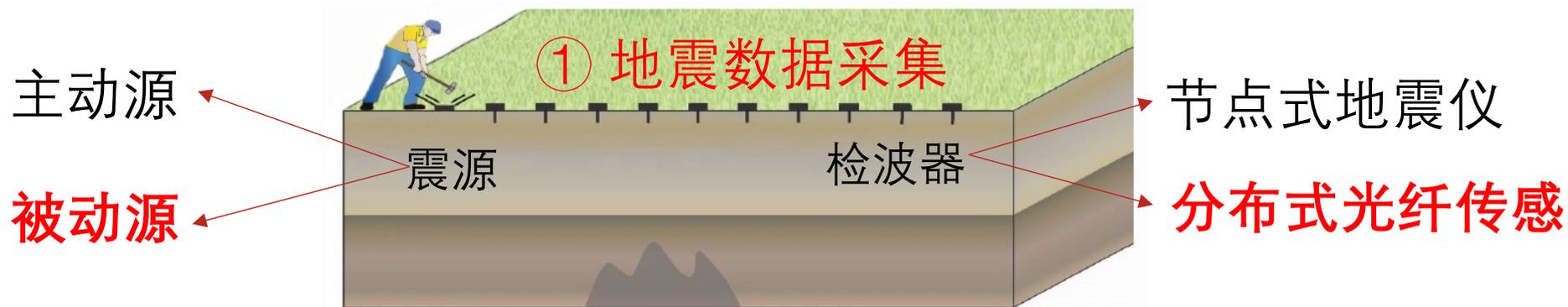
V. Rodríguez Tribaldos
LBNL



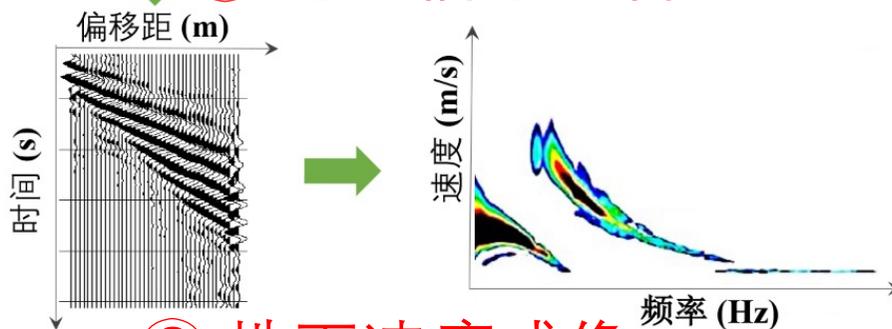
目录

- ① 高频背景噪声面波方法
- ② 误差校正
- ③ 信号增强
- ④ 案例分析
 - DAS – 多尺度多目标地震成像

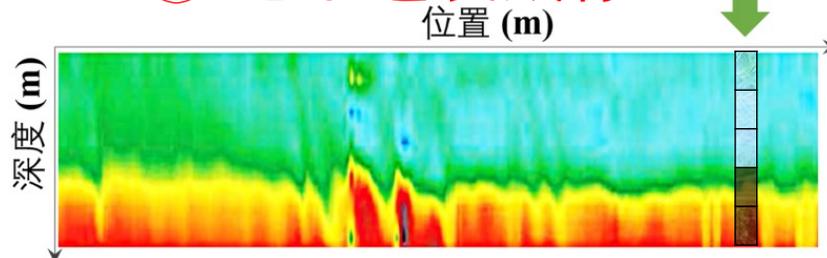
浅地表地震面波方法



② 地震信号分析

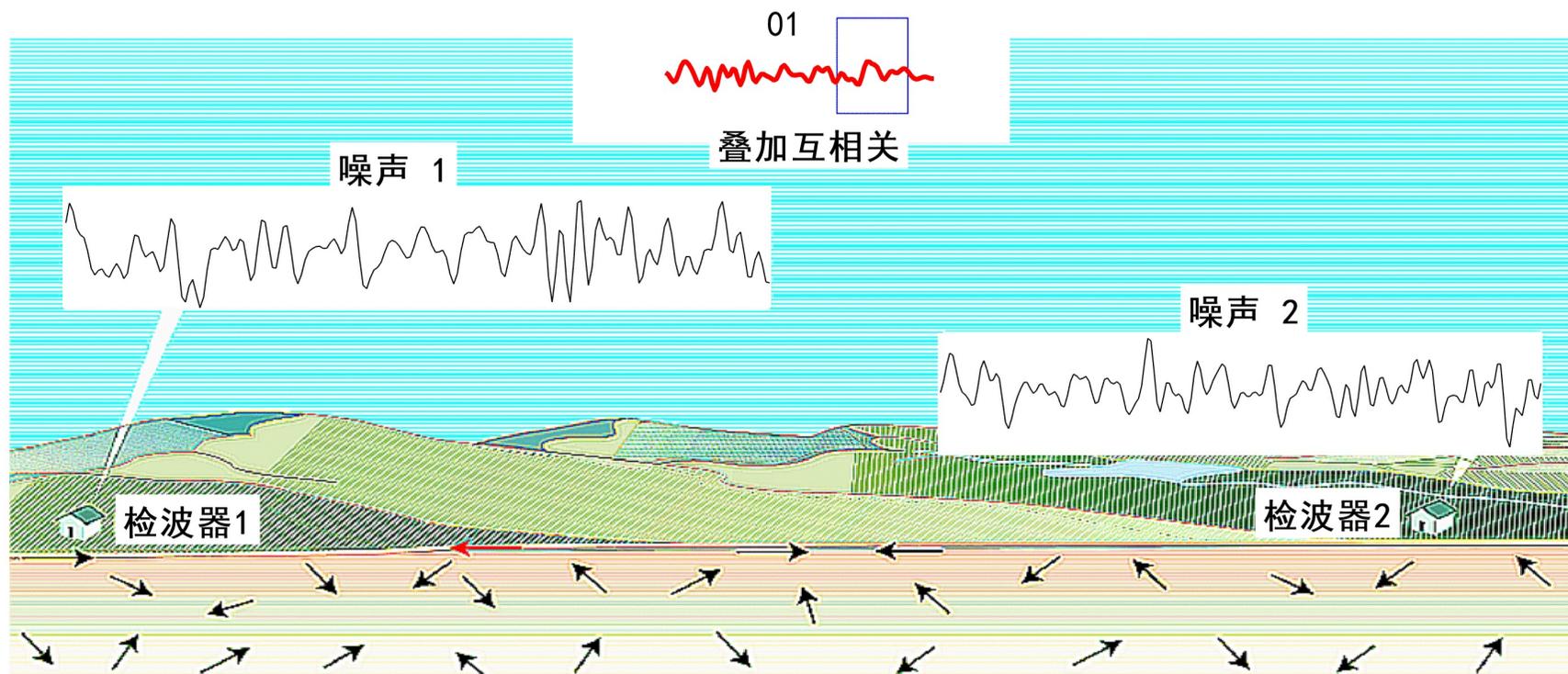


③ 地下速度成像



浅地表地震面波方法

高频背景噪声面波方法：理论基础



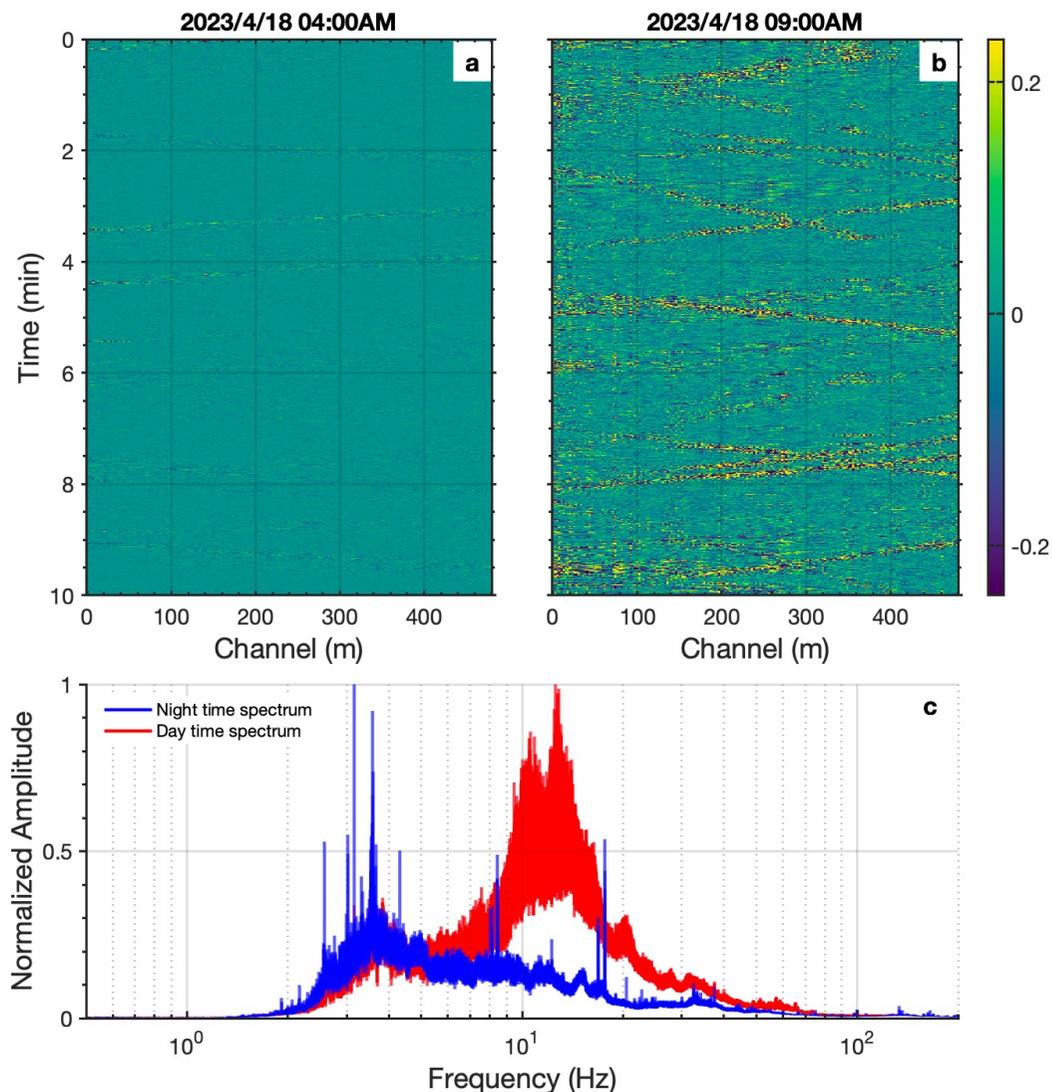
(修改自Weaver et al., 2005)

地震干涉技术，从背景噪声记录中提取格林函数！

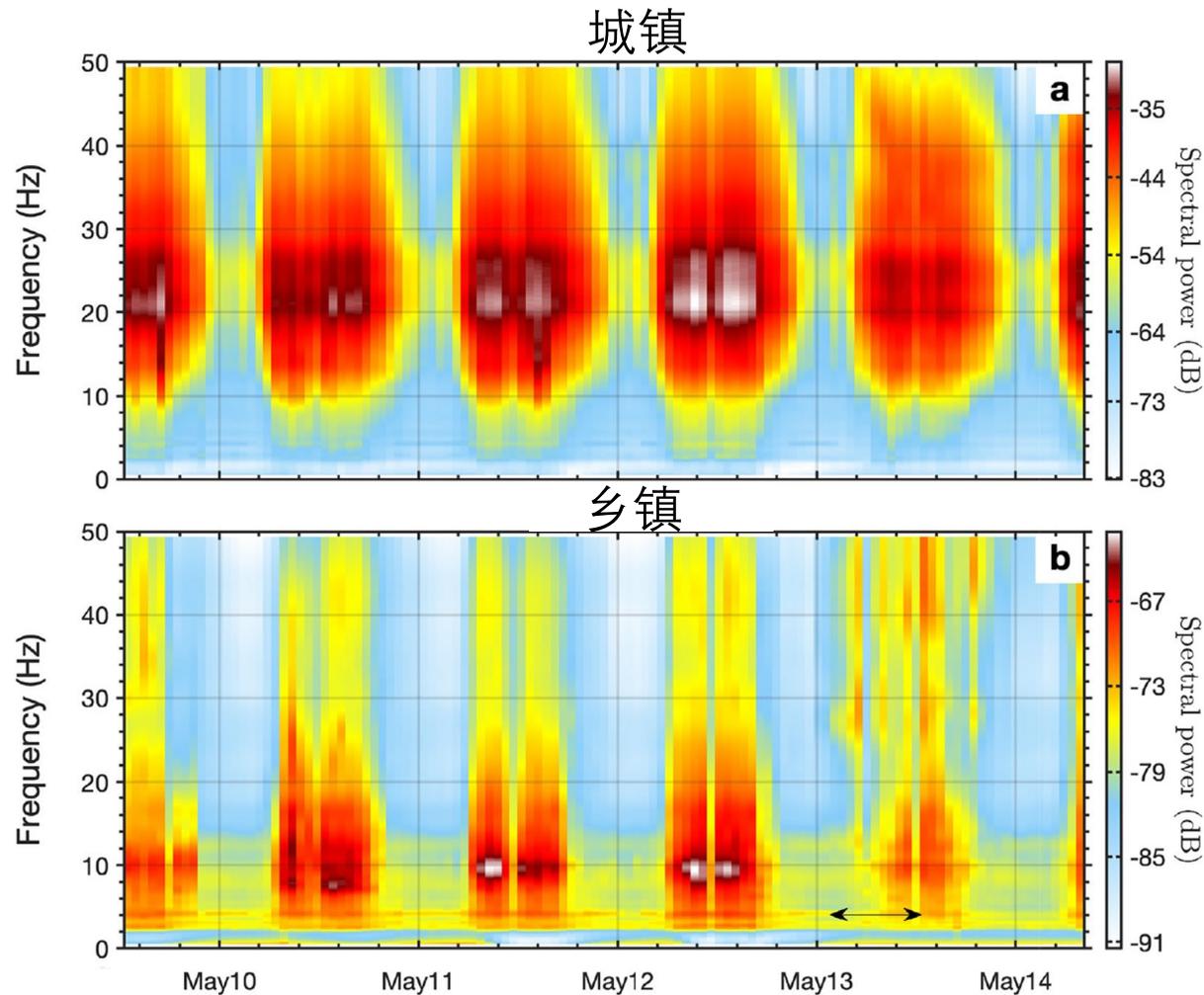
高频背景噪声面波方法：数据特征

高频背景噪声，是指主要与人类活动（如交通活动、工厂等）相关且频率通常高于1 Hz，能够应用于地下3 km以浅**局部尺度地震成像**的背景噪声数据。

“高频”主要是相对于天然地震学中用于深部（如壳幔尺度）构造成像所用的较低频率或者较长周期的背景噪声（如海浪等）而言。



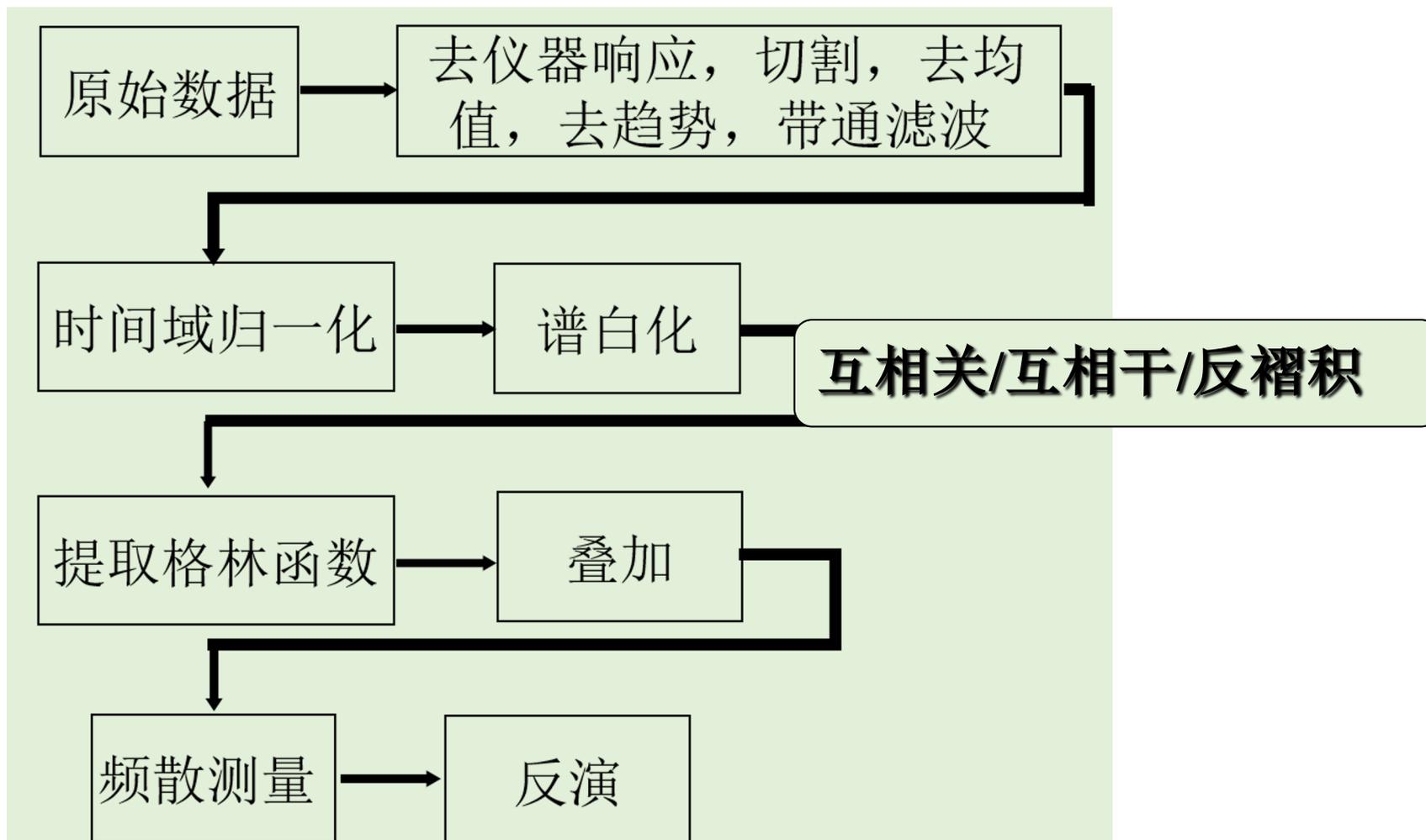
高频背景噪声面波方法：数据特征



高频背景噪声也会表现出与人类活动相关的时空分布特征

噪声源对速度时变监测影响？

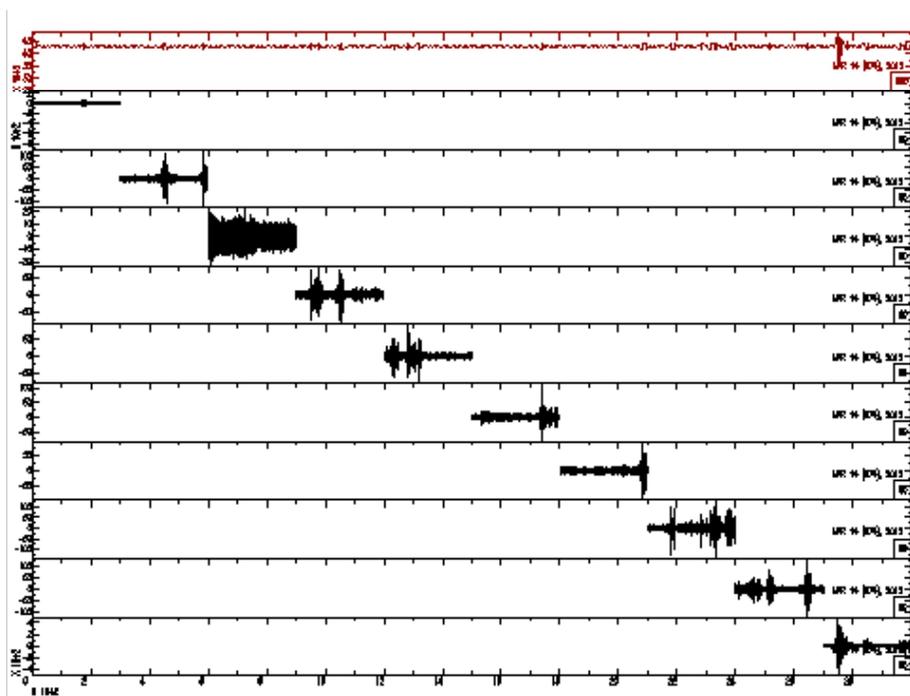
高频背景噪声面波方法：数据处理



高频背景噪声面波数据处理流程

高频背景噪声面波方法：数据处理

分段
segment splitting



集平均
ensemble averaging

如何确定分段时窗？

- 长周期背景噪声面波，1d？
- 高频背景噪声面波，10s？

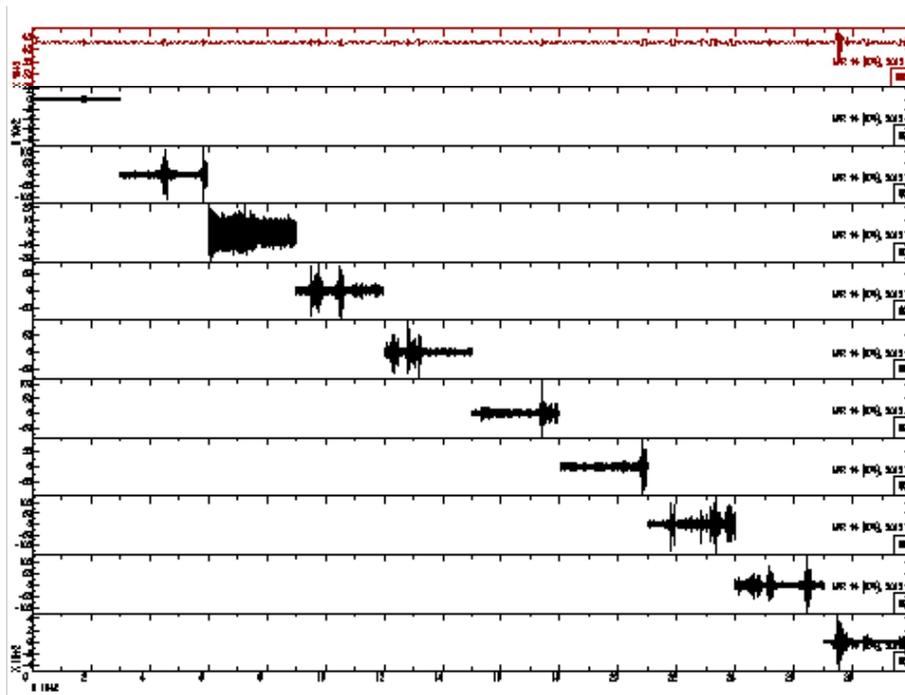
1h噪声数据，在没有预处理的情况下，
10s, 10min, 1h

背景噪声地震干涉，通过分段、叠加（集平均），
提高相干信号信噪比、压制非相干的随机噪声

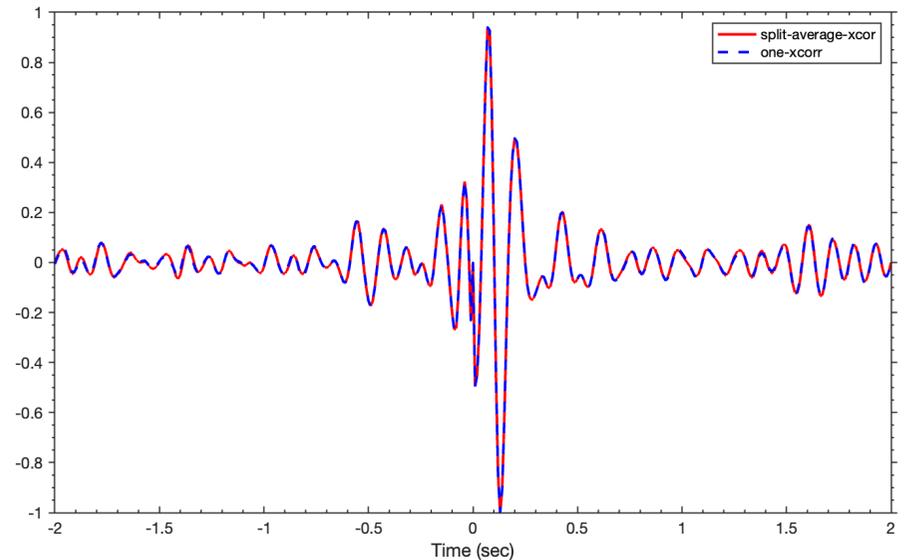
集平均互相关有什么区别？

高频背景噪声面波方法：数据处理

分段
segment splitting



集平均
ensemble averaging



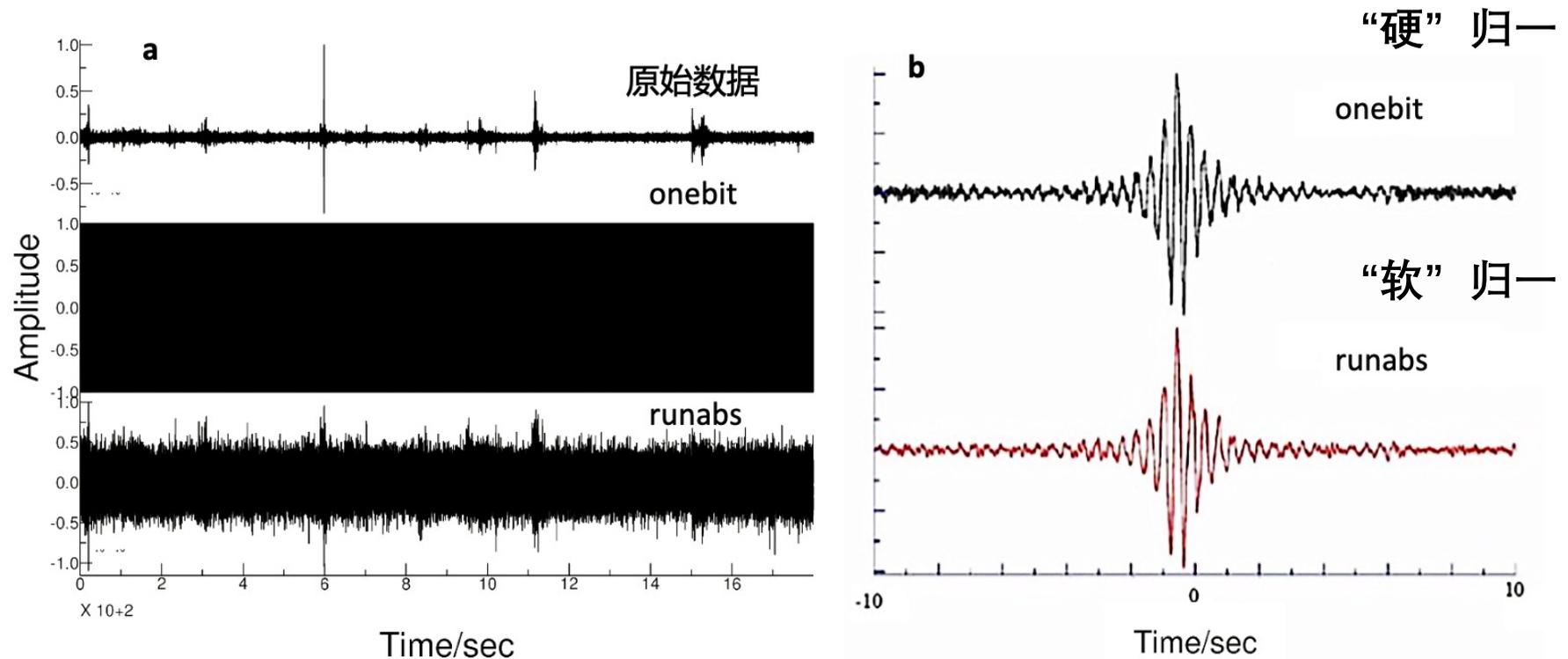
背景噪声地震干涉，通过分段、叠加（集平均），
提高相干信号信噪比、压制非相干的随机噪声

分段时窗选择的关键：
数据预处理

高频背景噪声面波方法：数据处理

时域归一化

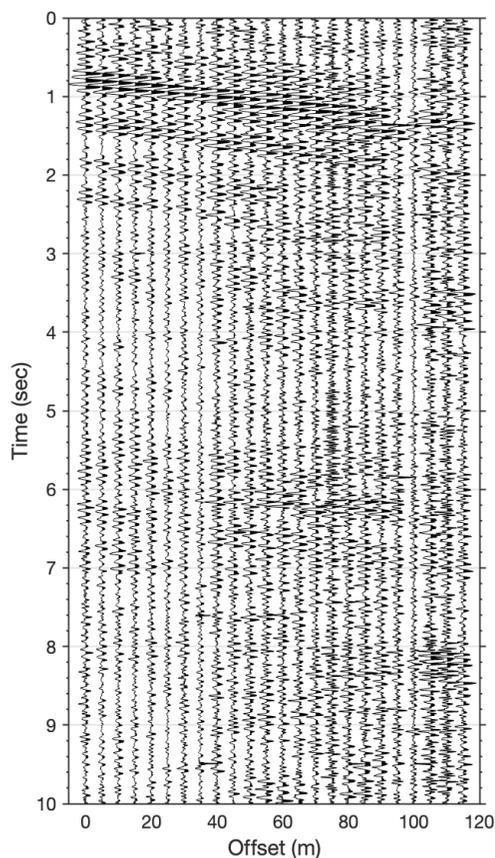
Temporal normalization



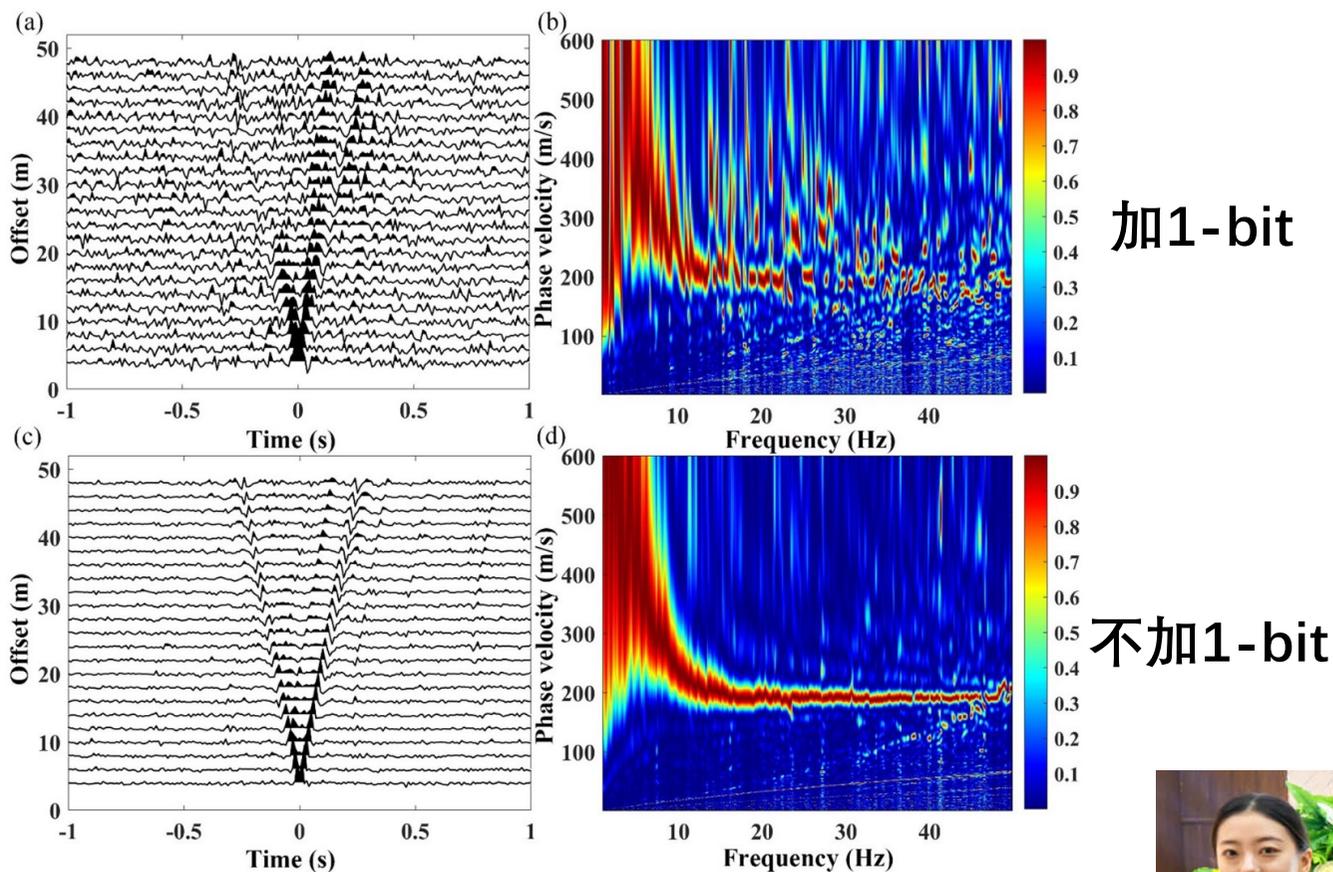
时域归一化，剔除噪声数据中的瞬变噪声，如天然地震信号、人为扰动等

高频背景噪声面波方法：数据处理

时域归一化 Do or do not ?
Temporal normalization



路边沿线观测交通噪声数据



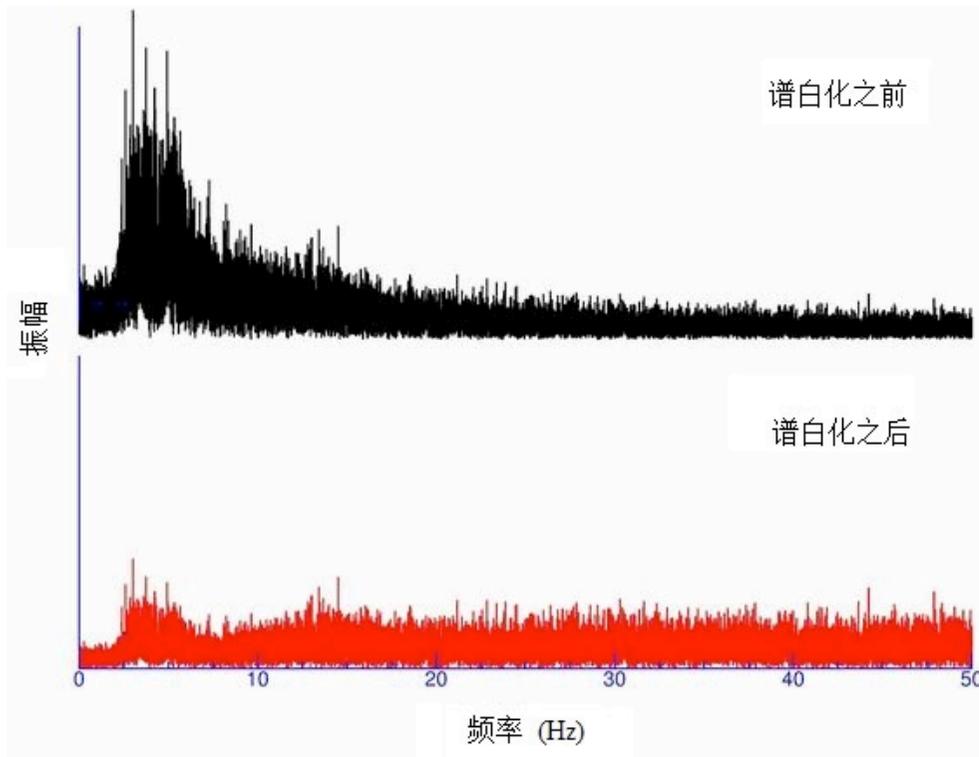
Zhang et al., 2021



高频背景噪声面波方法：数据处理

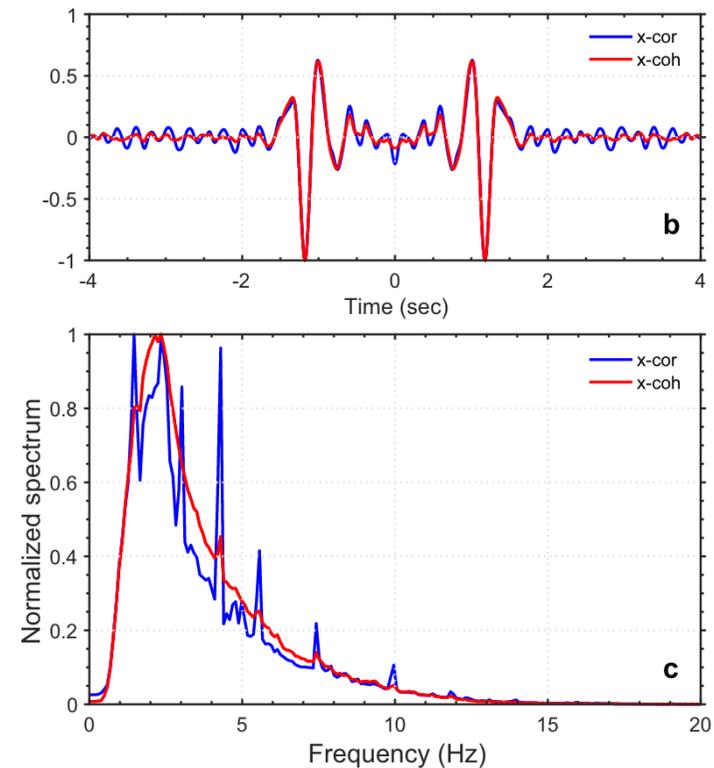
频域归一化

Spectral normalization



互相干

Cross-coherence



谱白化，通过对噪声记录的频谱进行能量均分，
来拓宽频谱、降低频谱毛刺影响。

高频背景噪声面波方法：频散分析

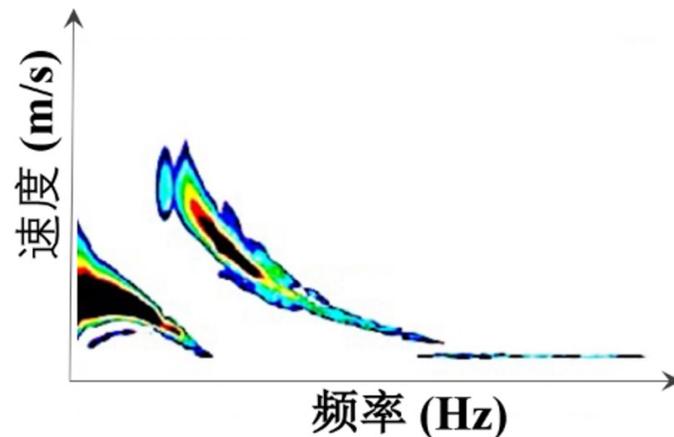
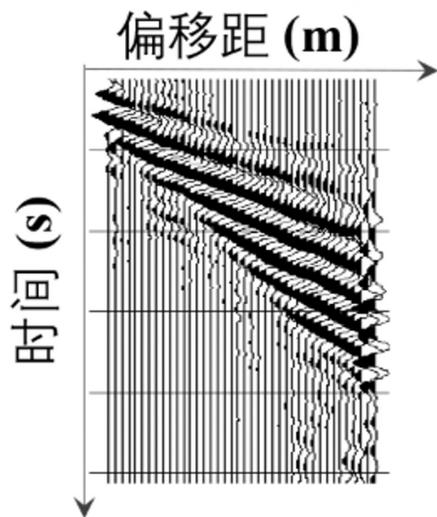
- 干涉类方法

- 被动源面波多道分析方法（MAPS）

- 地震干涉（经验格林函数）+ 频率域倾斜叠加算法

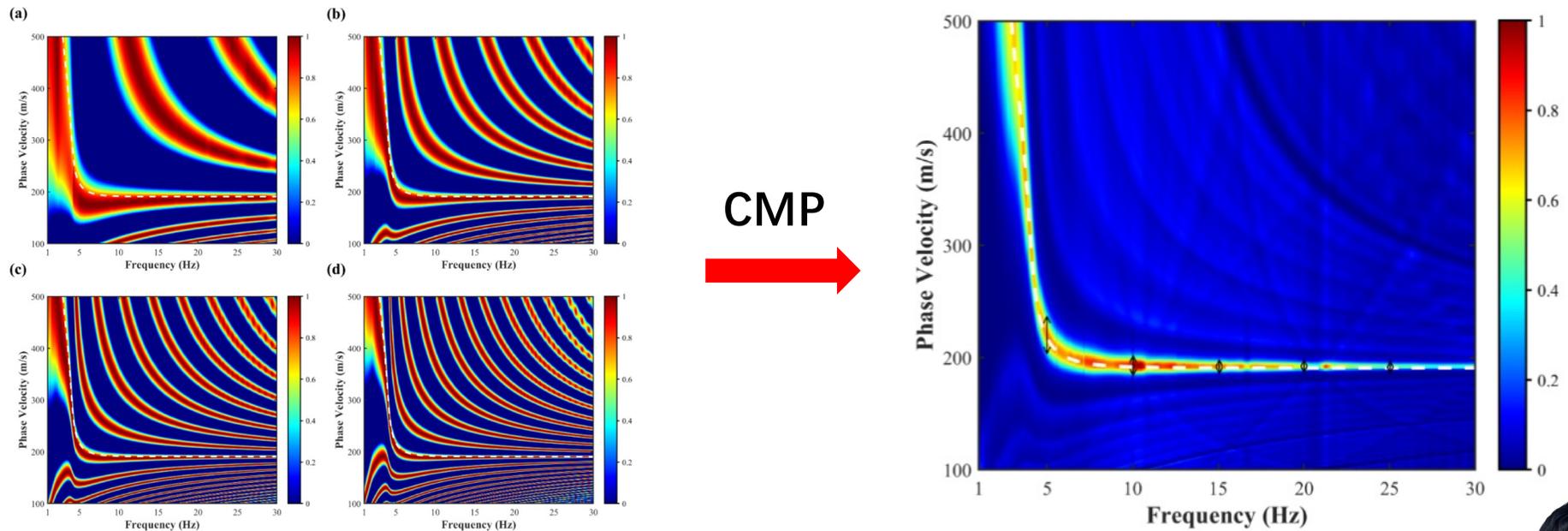
- 空间自相关方法（SPAC）

- 地震干涉（空间自相关系数）+ 贝塞尔函数拟合



高频背景噪声面波方法：频散分析

- 干涉类方法
 - 共中心点双台法 (CMP-TS)
 - 双台法 + 共中心点叠加



Pang et al., 2022



高频背景噪声面波方法：频散分析

- 非干涉类方法

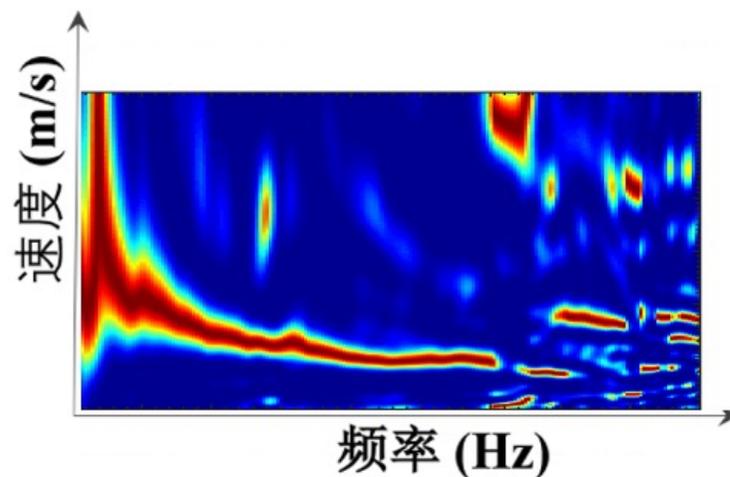
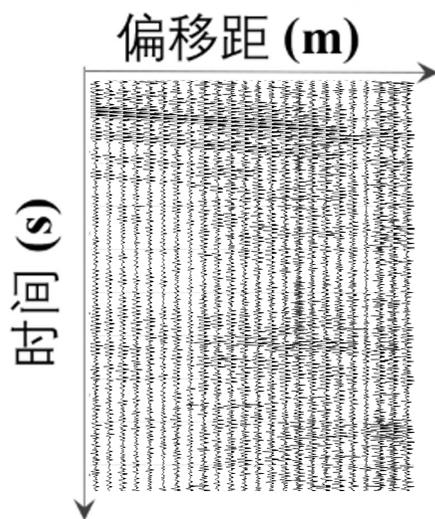
- 路边被动源方法 (roadside MASW)

- 背景噪声 + 频率域倾斜叠加算法

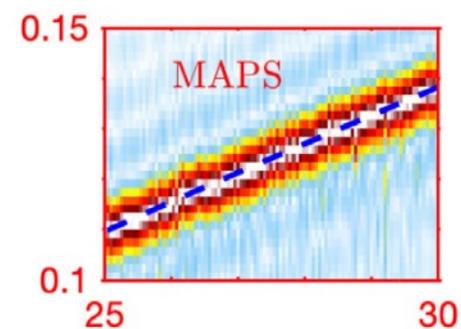
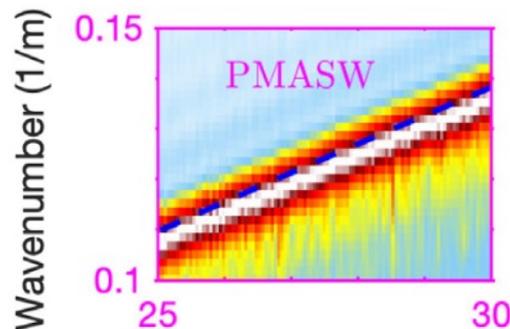
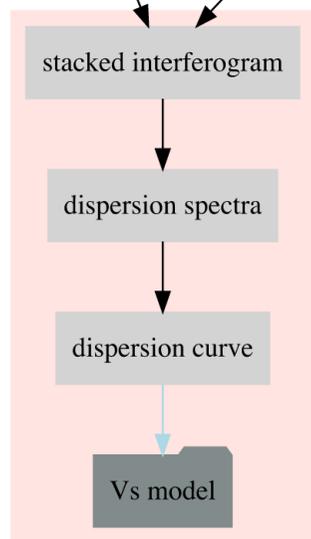
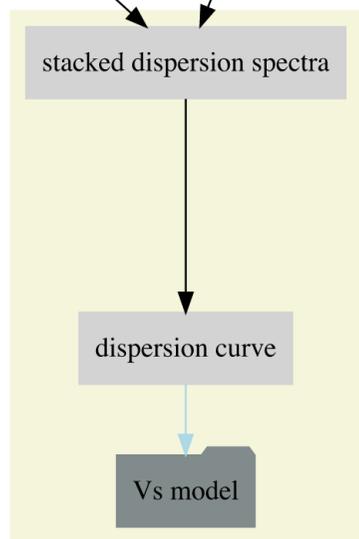
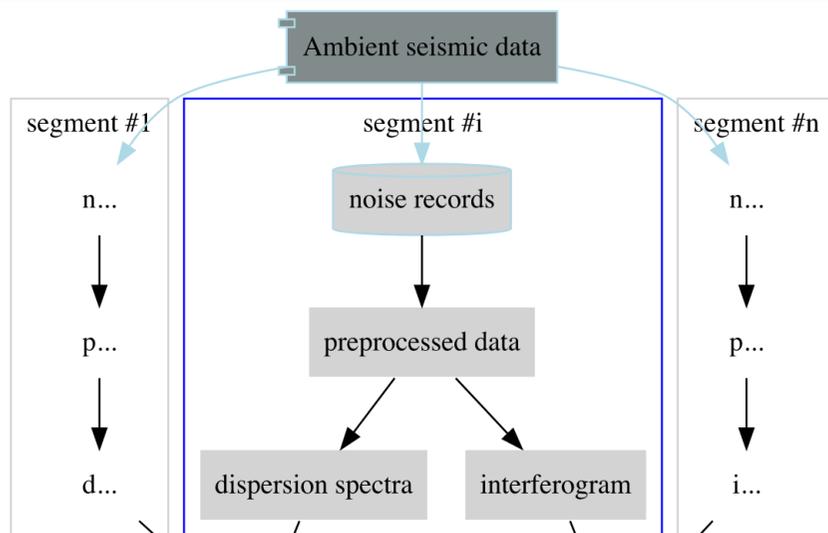
- 微动折射方法 (ReMi)

- 背景噪声 + 时间域倾斜叠加算法

集平均
ensemble averaging



高频背景噪声面波方法：频散分析



非干涉类方法对偏线噪声源更为敏感，
面波频散成像速度偏高

非干涉类 干涉类

高频背景噪声面波方法：小结

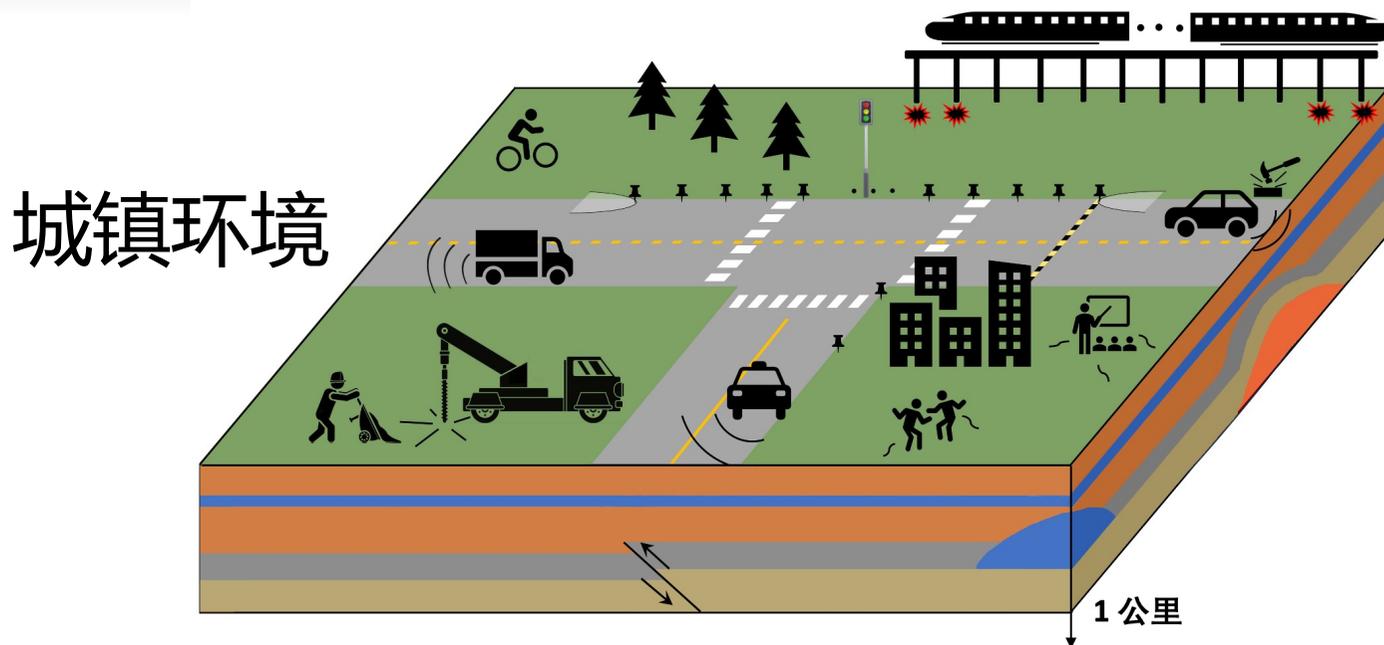
不同于长周期背景噪声面波，高频背景噪声面波独特的震源、频段以及研究目标决定其：

- 数据处理流程的独特性
- 面波成像方法的独特性

目录

- ① 高频背景噪声面波方法
- ② 误差校正
- ③ 信号增强
- ④ 案例分析
 - DAS – 多尺度多目标地震成像

高频背景噪声面波方法：机遇与挑战



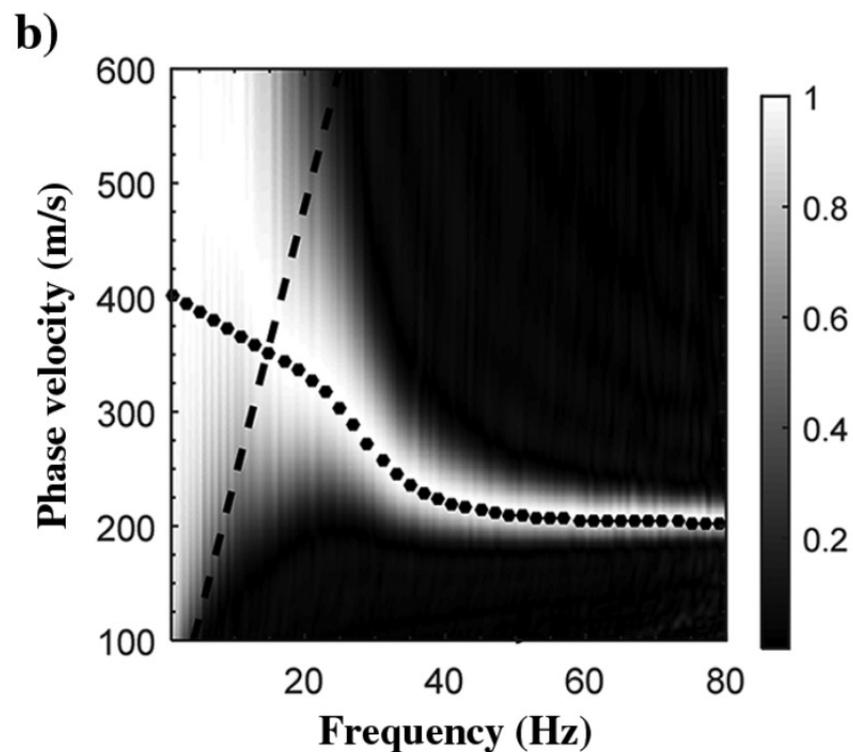
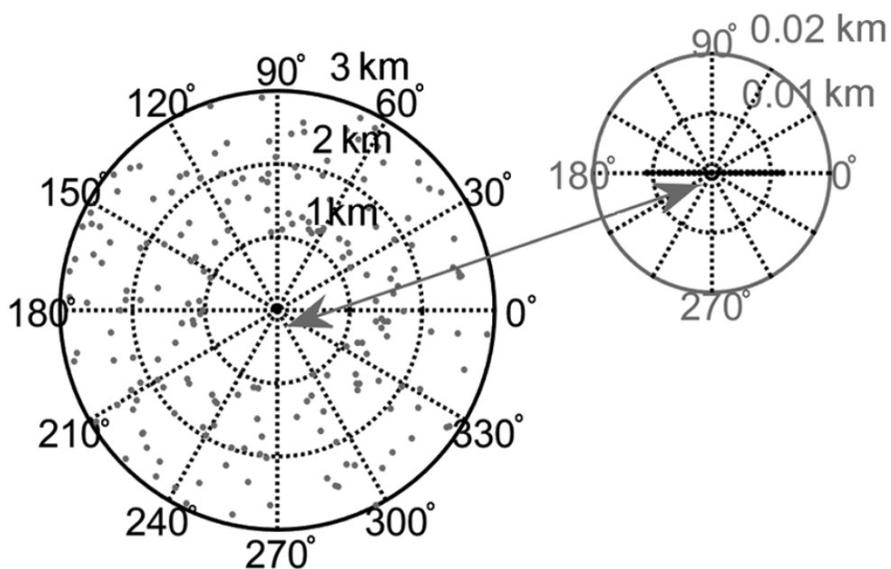
机遇：城镇环境多种多样的振动源为**不同频段**地震信号提取与成像提供了丰富的地震噪声能量

挑战：**时空非随机分布噪声源**会影响有效信号的提取，尤其是制约了**超短时长观测条件**下的快速成像质量

成也‘噪声源’，败也‘噪声源’

偏线噪声源的影响

随机均匀噪声源分布情况下

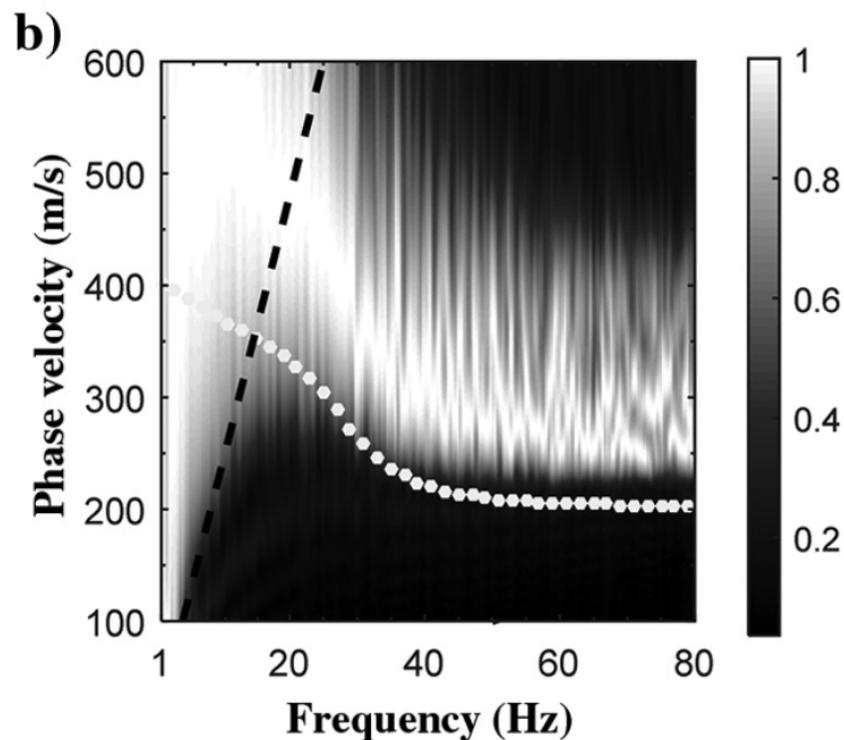
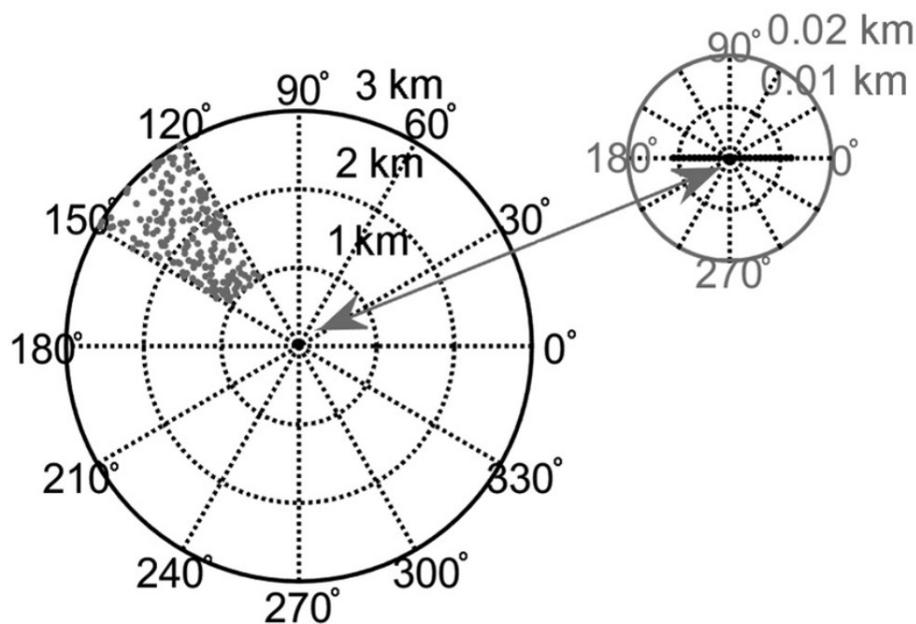


被动源面波成像能准确提取面波相速度

Cheng et al., 2016

偏线噪声源的影响

偏线噪声源分布情况下



被动源面波成像无法准确提取面波相速度

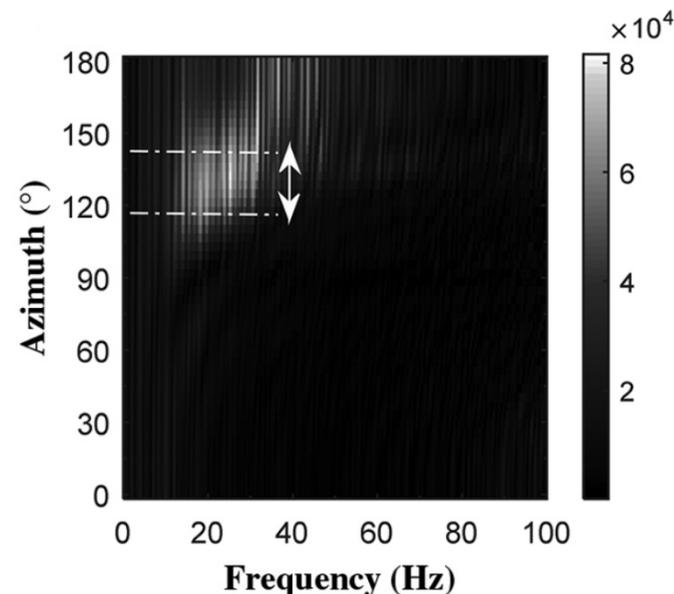
Cheng et al., 2016

偏线噪声源的影响：算法校正

方位角估计

$$E(f, v, \theta) = \left| \sum_{j=1}^N \exp(i2\pi f x_j \cos \theta / v) R_j(f) \right|,$$

$$E(f, \theta) = \left| \sum_{j=1}^N \exp(i2\pi f x_j \cos \theta / \tilde{v}) R_j(f) \right|.$$



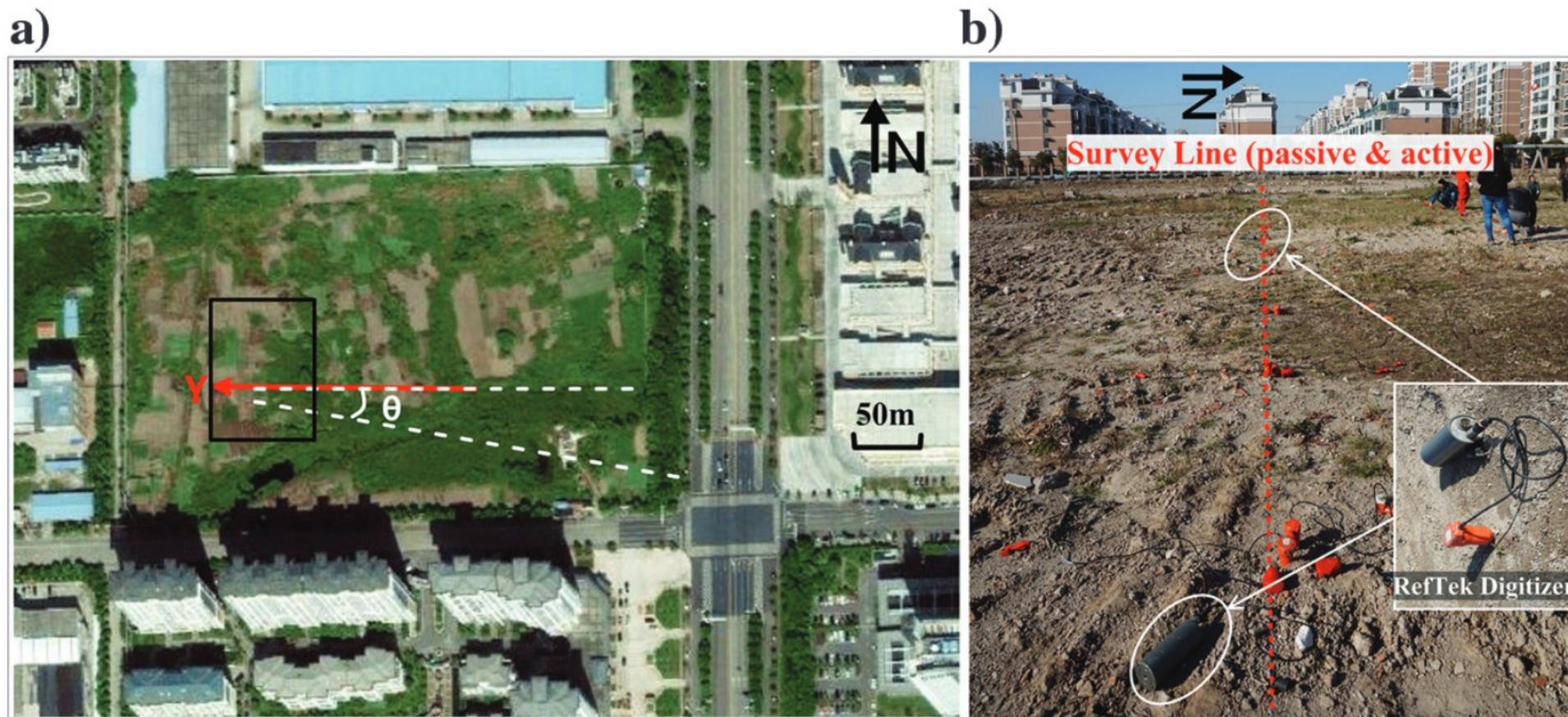
方位角校正速度偏差

$$E(f, v)$$

$$= \begin{cases} \left| \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \exp(i2\pi f x_{jk} \cos \theta / v) C_{jk}^+(f) \right| & \text{if } \theta > 90, \\ \left| \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \exp(i2\pi f x_{jk} \cos \theta / v) C_{jk}^-(f) \right| & \text{if } \theta < 90. \end{cases}$$

Cheng et al., 2016

偏线噪声源的影响：算法校正

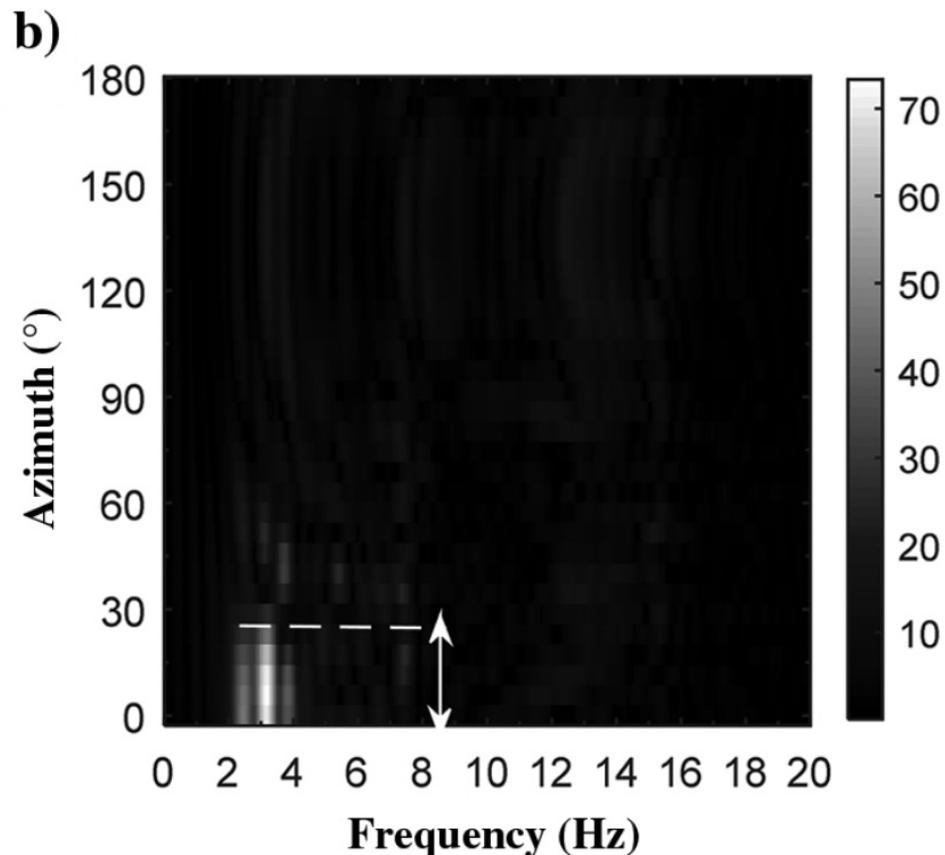
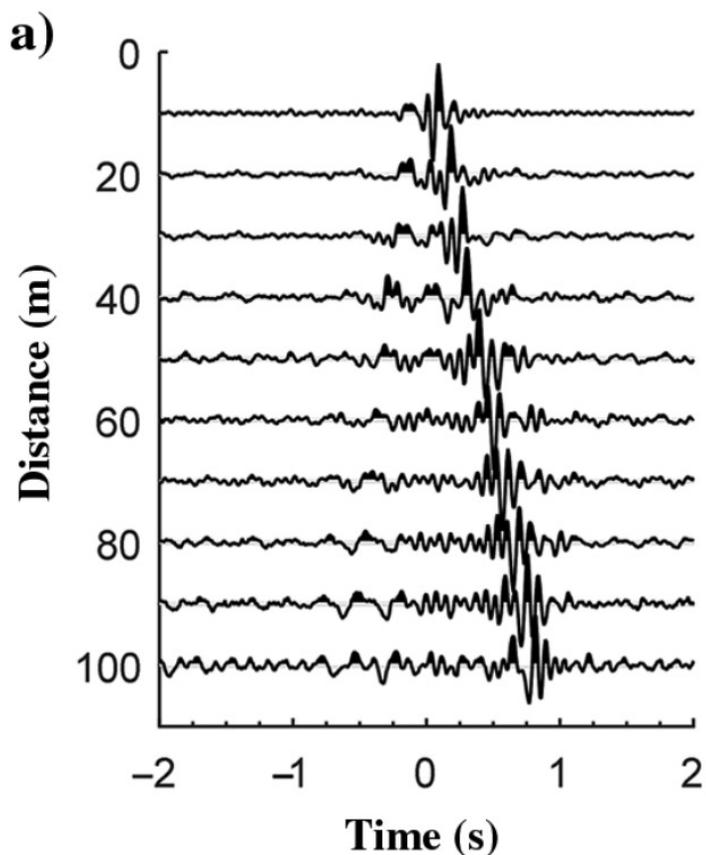


典型应用场景：

交叉路口附近非沿线背景噪声地震观测系统

Cheng et al., 2016

偏线噪声源的影响：算法校正



地震干涉提取相干信号

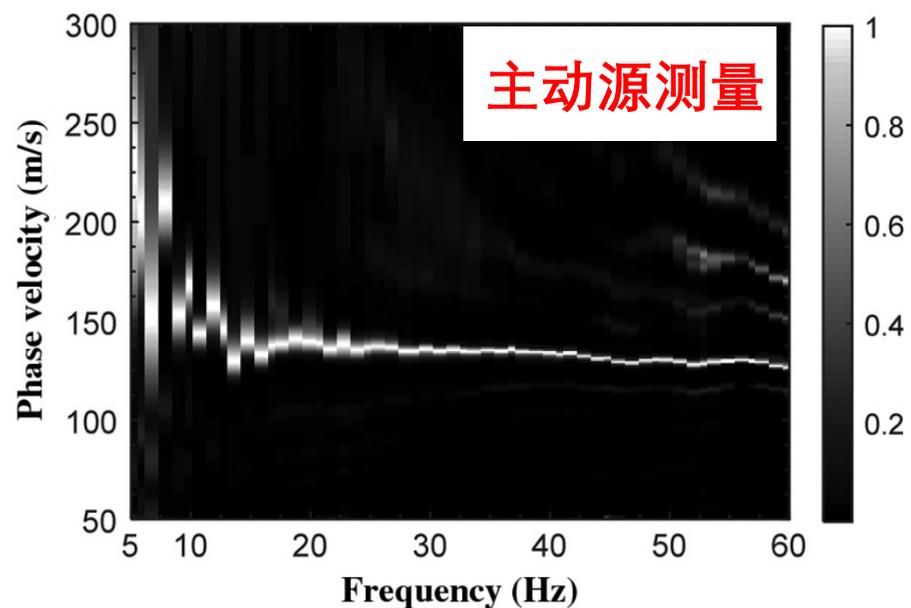
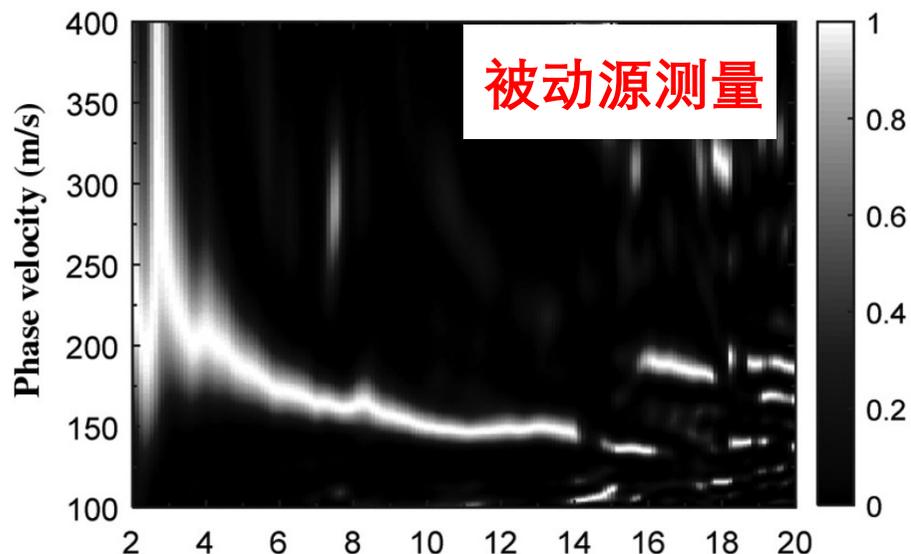
不对称正负半支暗示非均匀噪声源分布

估计方位角

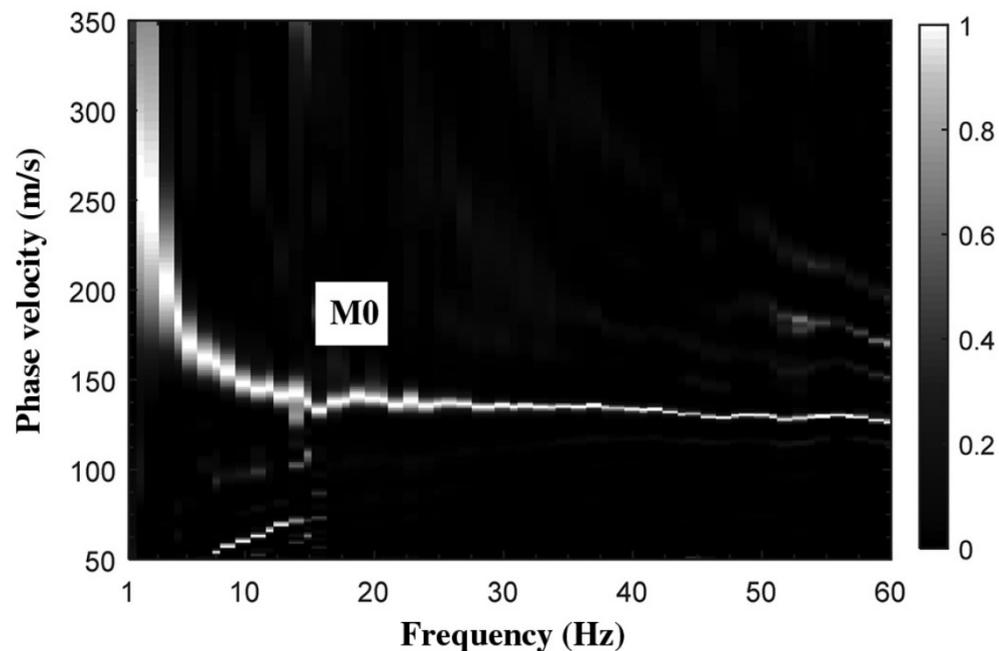
利用主动源面波测量速度来简化方位角聚束分析解

Cheng et al., 2016

偏线噪声源的影响：算法校正



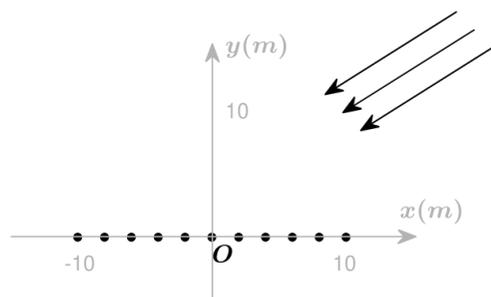
合并主被动源测量结果
频散能量趋势一致



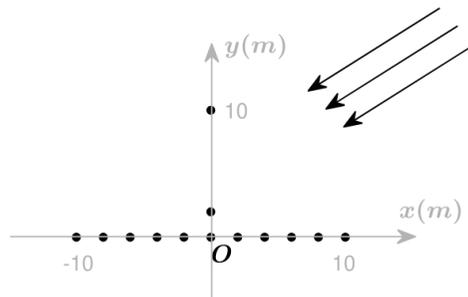
不校正直接合并？
高阶模式误判

Cheng et al., 2016

偏线噪声源的影响：观测校正



a



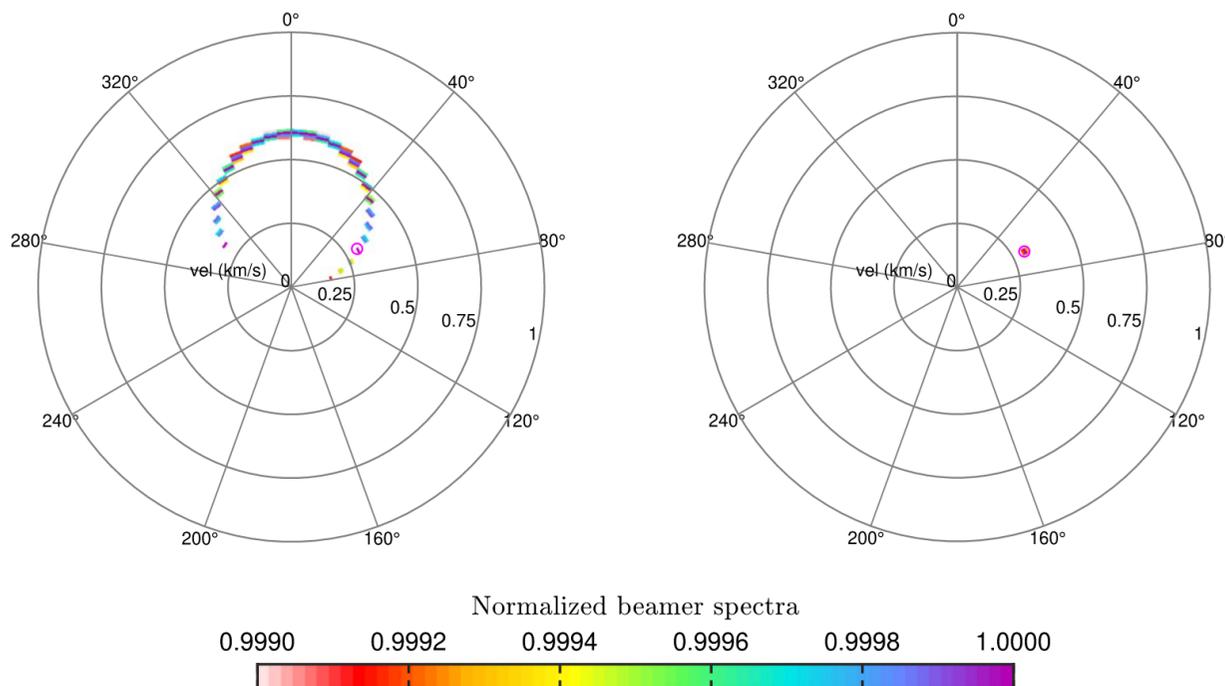
b

算法校正的局限性

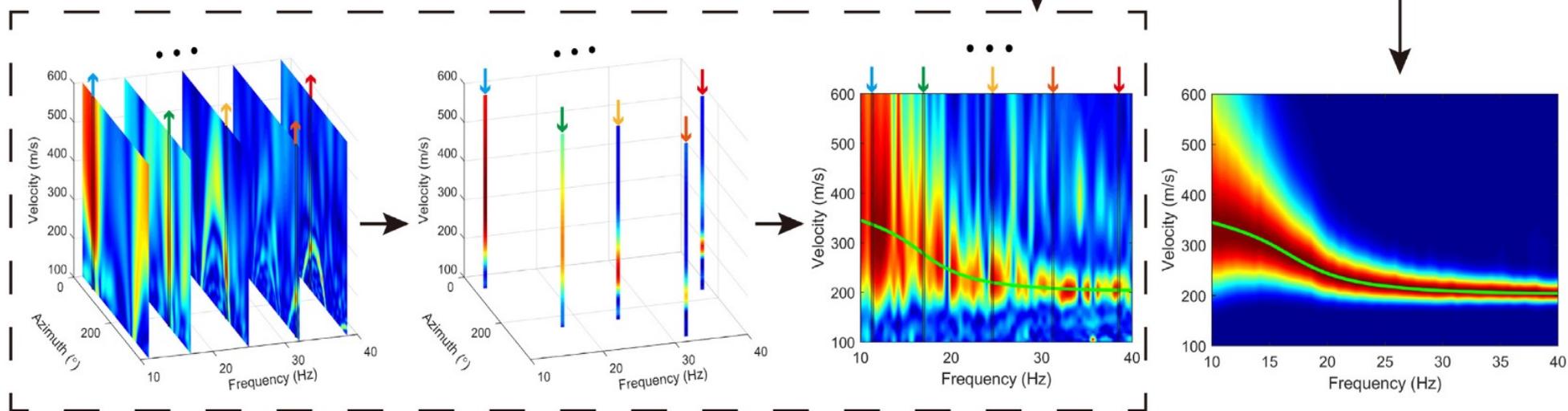
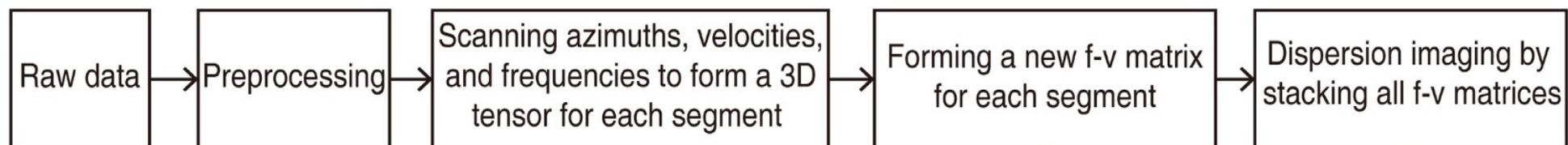
线性观测系统无法有效约束噪声源方位



非线性观测系统



偏线噪声源的影响：观测校正



单个时窗：

1. 对各频率，扫描速度和方位角

2. 对各频率，保留方位角能量峰值所在速度矢量

3. 合并各频率所保留的速度矢量

集平均

Liu et al., 2020



偏线噪声源的影响：观测校正

只有线性地震观测系统，
如何约束噪声源方位角？



三分量观测 + 极化分析

Pang et al., 2023



偏线噪声源的影响：观测校正

- 入射平面波的三分量地震波场

$$u_Z(f) = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi A_R(\varphi, f)$$

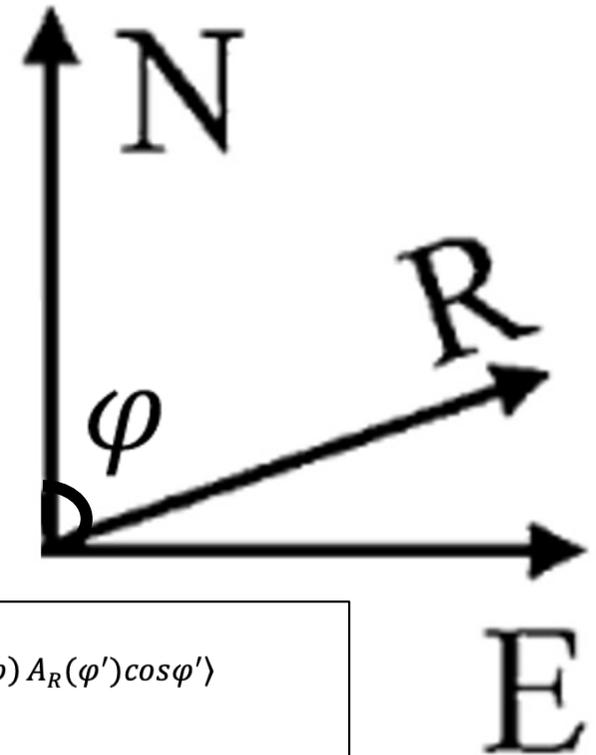
$$u_N(f) = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi iH(f)A_R(\varphi, f)\sin\varphi$$

$$u_E(f) = \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi iH(f)A_R(\varphi, f)\cos\varphi$$

- 计算不同分量之间互相关谱

$$\begin{aligned}\langle u_Z^* u_N \rangle &= \left\langle \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi d\varphi' iH A_R^*(\varphi) A_R(\varphi') \sin\varphi' \right\rangle \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi d\varphi' iH \langle A_R^*(\varphi) A_R(\varphi') \rangle \sin\varphi' \\ &= \frac{iH}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \langle |A_R(\varphi)|^2 \rangle \sin\varphi\end{aligned}$$

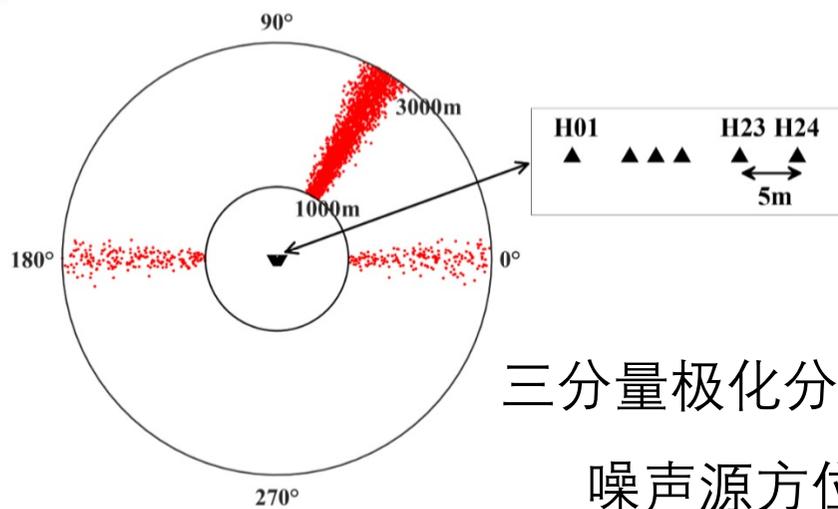
$$\begin{aligned}\langle u_Z^* u_E \rangle &= \left\langle \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi d\varphi' iH A_R^*(\varphi) A_R(\varphi') \cos\varphi' \right\rangle \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi d\varphi' iH \langle A_R^*(\varphi) A_R(\varphi') \rangle \cos\varphi' \\ &= \frac{iH}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \langle |A_R(\varphi)|^2 \rangle \cos\varphi\end{aligned}$$



- 利用不同分量互相关谱比计算主要噪声源方位角

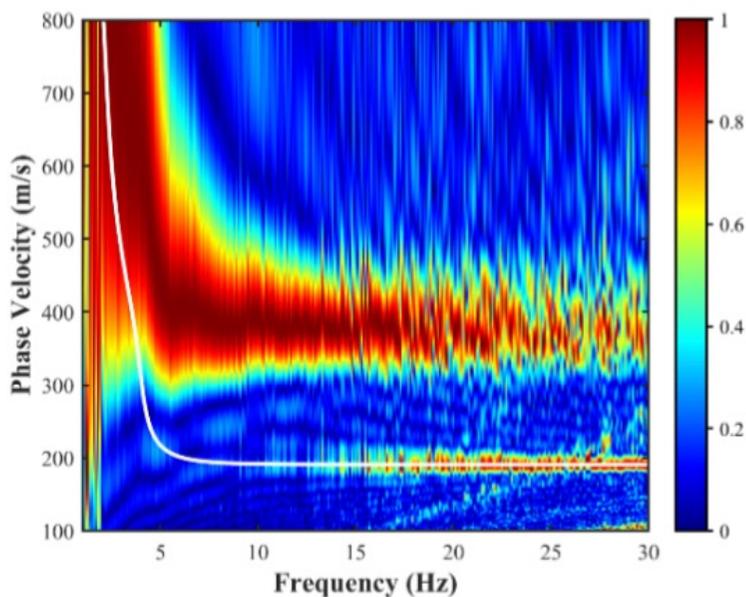
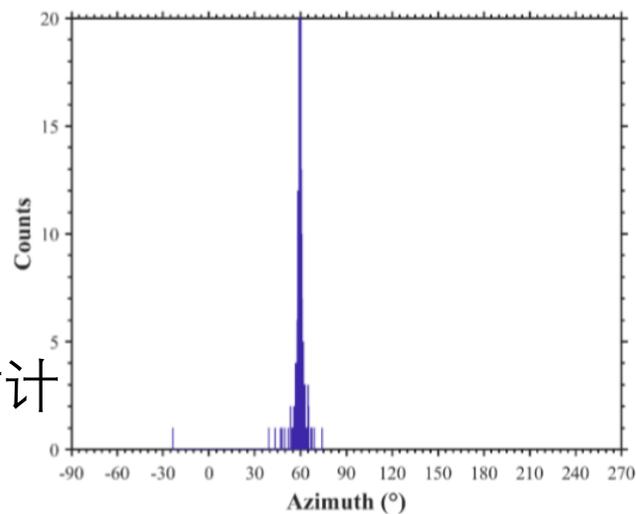
$$\varphi_{R1} = \arctan \left(\frac{\text{Im} \langle u_Z^* u_N \rangle}{\text{Im} \langle u_Z^* u_E \rangle} \right) + \pi$$

偏线噪声源的影响：观测校正

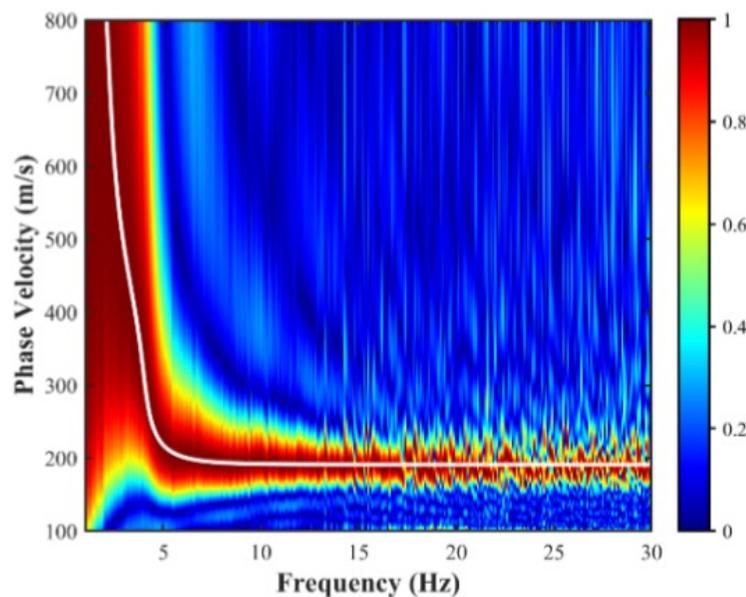


三分量极化分析估计

噪声源方位角



方位角校正之前



方位角校正之后

偏线噪声源的影响：误差校正小结

- 城镇复杂噪声源环境会**影响**背景噪声信号的提取和面波速度频散成像；
- 在典型情况下，误差校正可以解决该问题
 - 【条件】偏线噪声源存在**单一方向**的主要噪声源
 - 【方案1】垂直分量线性观测排列，**需要**先验平均速度信息
 - 【方案2】垂直分量伪线性观测排列，**需要**2个以上偏线检测波
 - 【方案3】三分量线性观测排列，极化分析
- 在非典型情况下，**又该怎么办？**

目录

- ① 高频背景噪声面波方法
- ② 误差校正
- ③ 信号增强
- ④ 案例分析
 - DAS – 多尺度多目标地震成像

复杂噪声源的影响

典型噪声源分布
(偏线单一噪声源)

↓
噪声源方位角
可测且唯一

↓
误差校正

非典型噪声源分布
(复杂噪声源)

↓
噪声源方位角
不可测

↓
信号增强



为什么长周期背景噪声面波成像很少考虑复杂噪声源影响？

- 噪声源相对简单
- 观测周期相对较长

信号增强

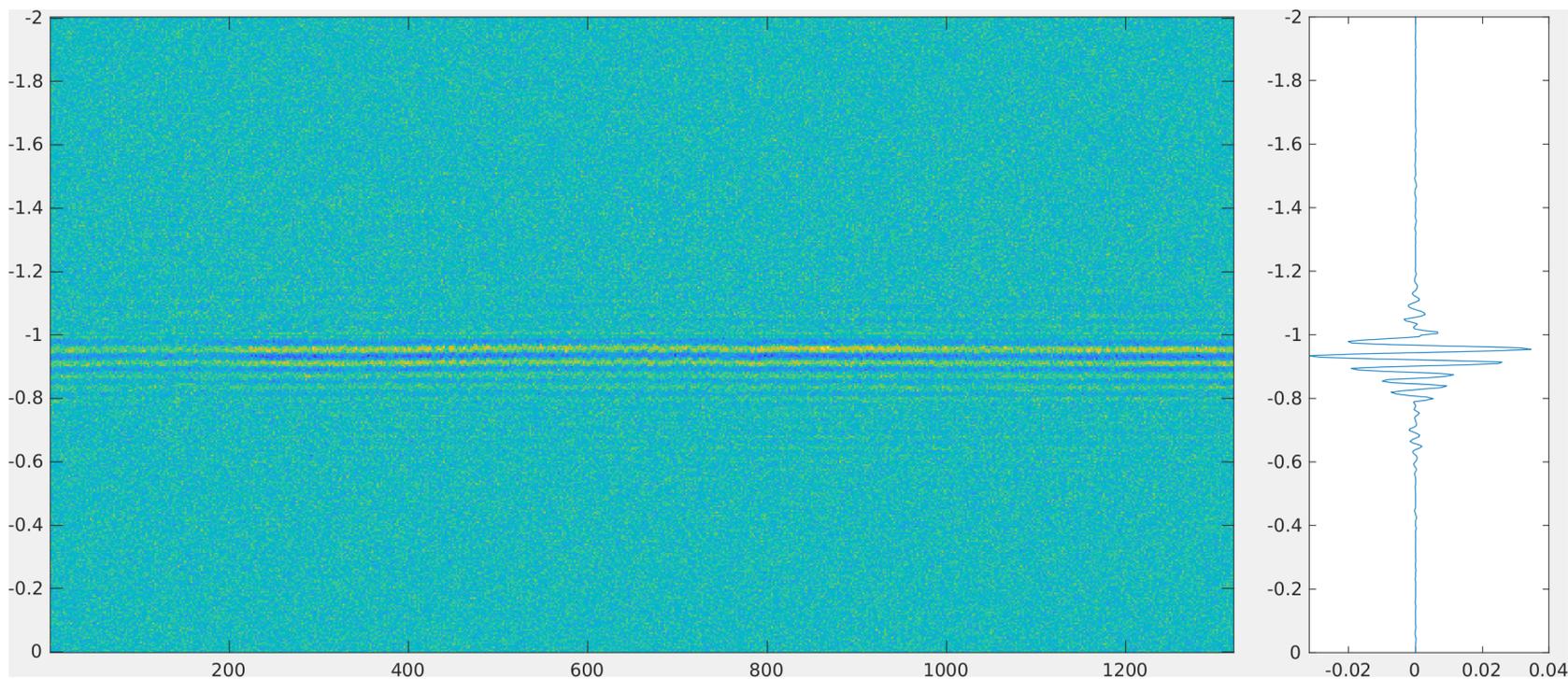
【问题】 有限/超短的时长内，非相干信号无法通过**有效叠加**来消除

【解决】 设定合适质量控制标准，对不同分段时窗的噪声进行**数据筛选**，仅留下高质量数据的时窗

- 波形域数据筛选 [EGF]
- 成像域数据筛选 [Dispersion spectra]
- 噪声源数据筛选 [Source distribution]

信号增强：波形域数据筛选

目标：提升单道EGF波形的SNR



传统相位加权叠加（PWS）等技术，
SNR提升有赖于叠加次数N

$$\text{SNR} \sim 1.x * N \text{ (or } \sqrt{N})$$

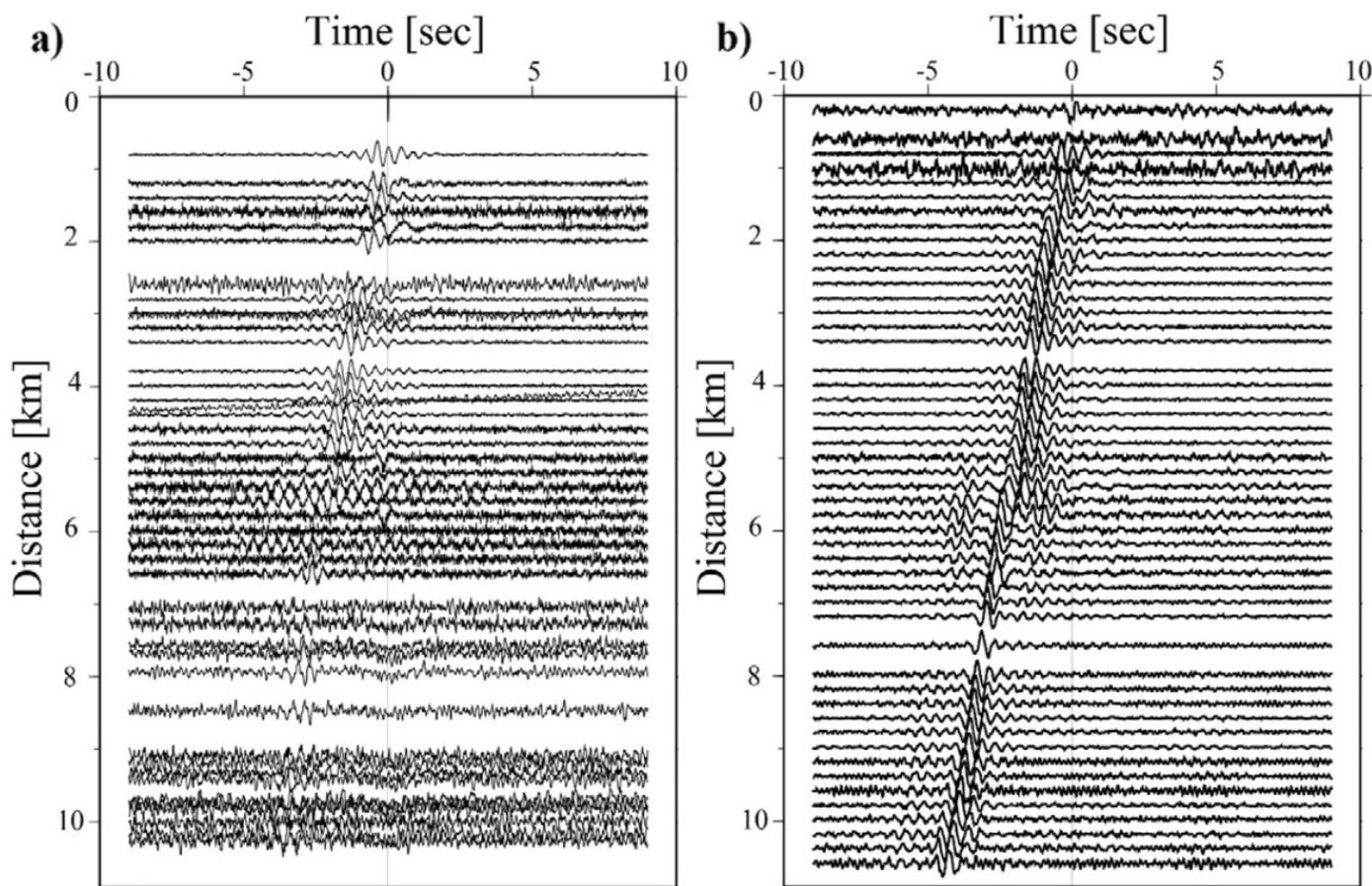
长观测周期

信号增强：波形域数据筛选

短观测周期，

信噪比加权叠加技术

直接以SNR为目标进行数据筛选

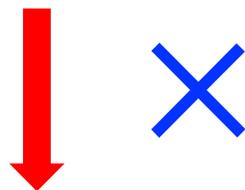


Cheng et al., 2015

信号增强：成像域数据筛选

单道波形SNR高

【时间相干性】

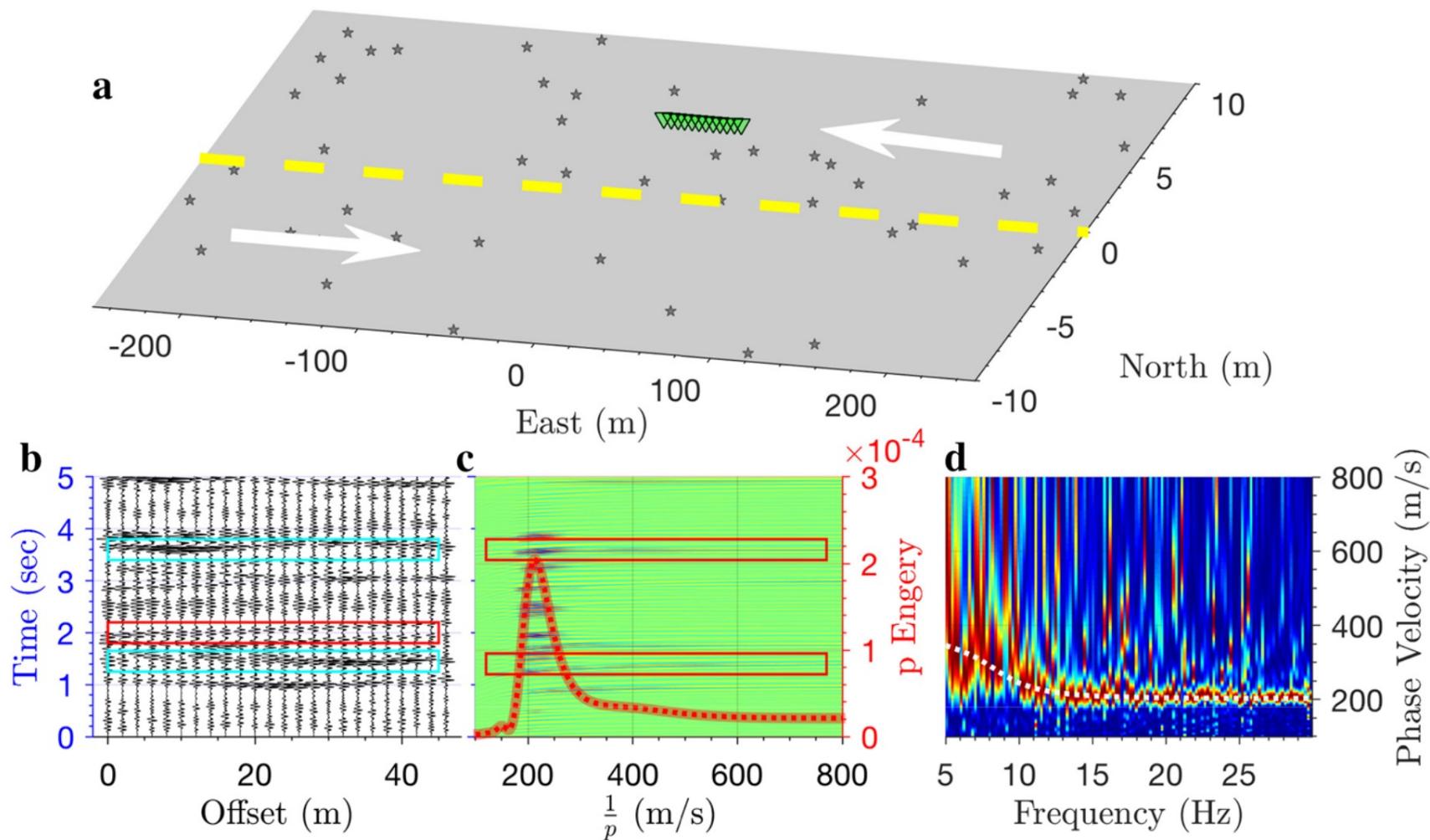


多道面波频散成像质量高

【空间相干性】

信号增强：成像域数据筛选

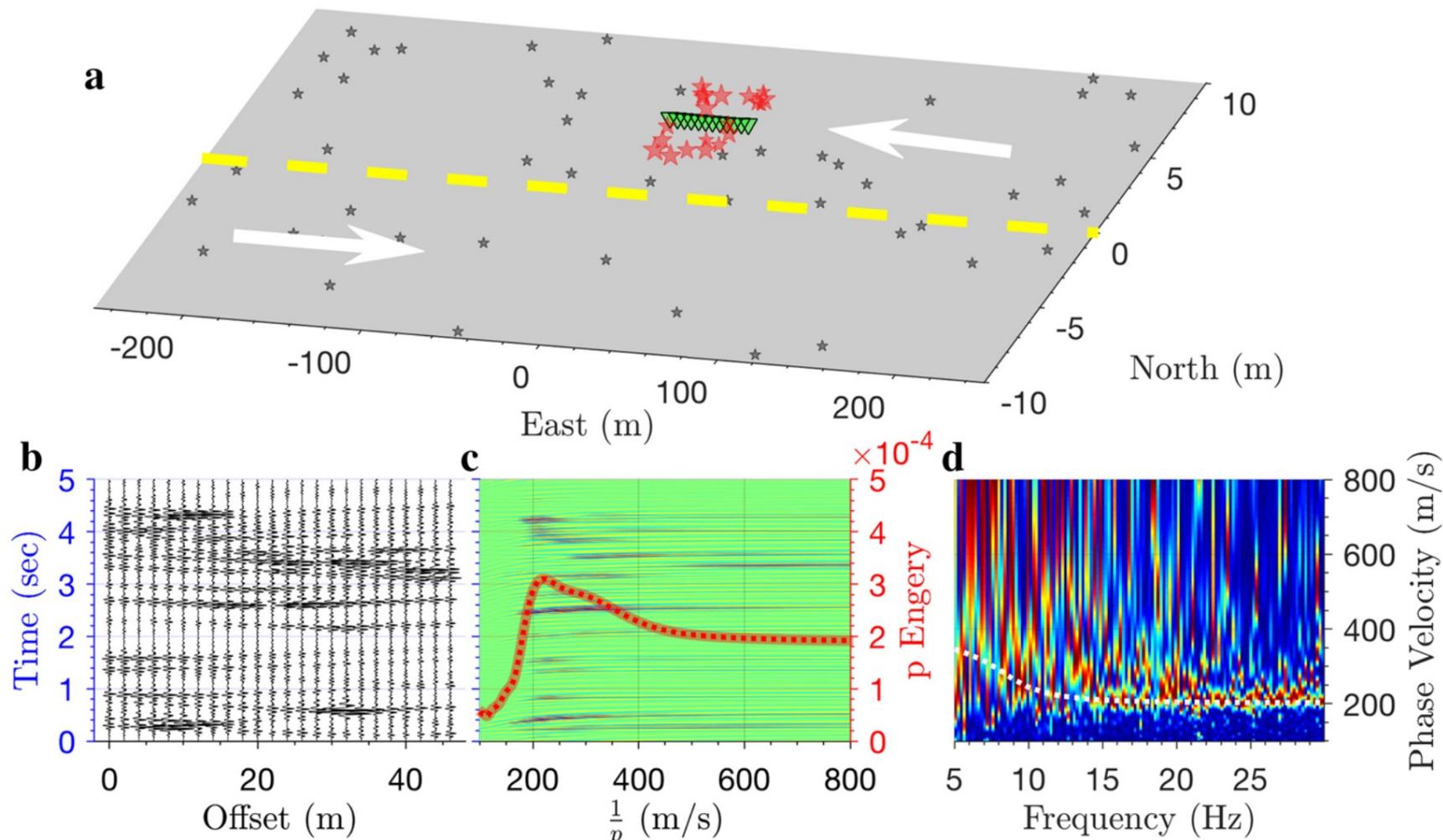
单时窗，空间随机均匀噪声源分布



Cheng et al., 2019

信号增强：成像域数据筛选

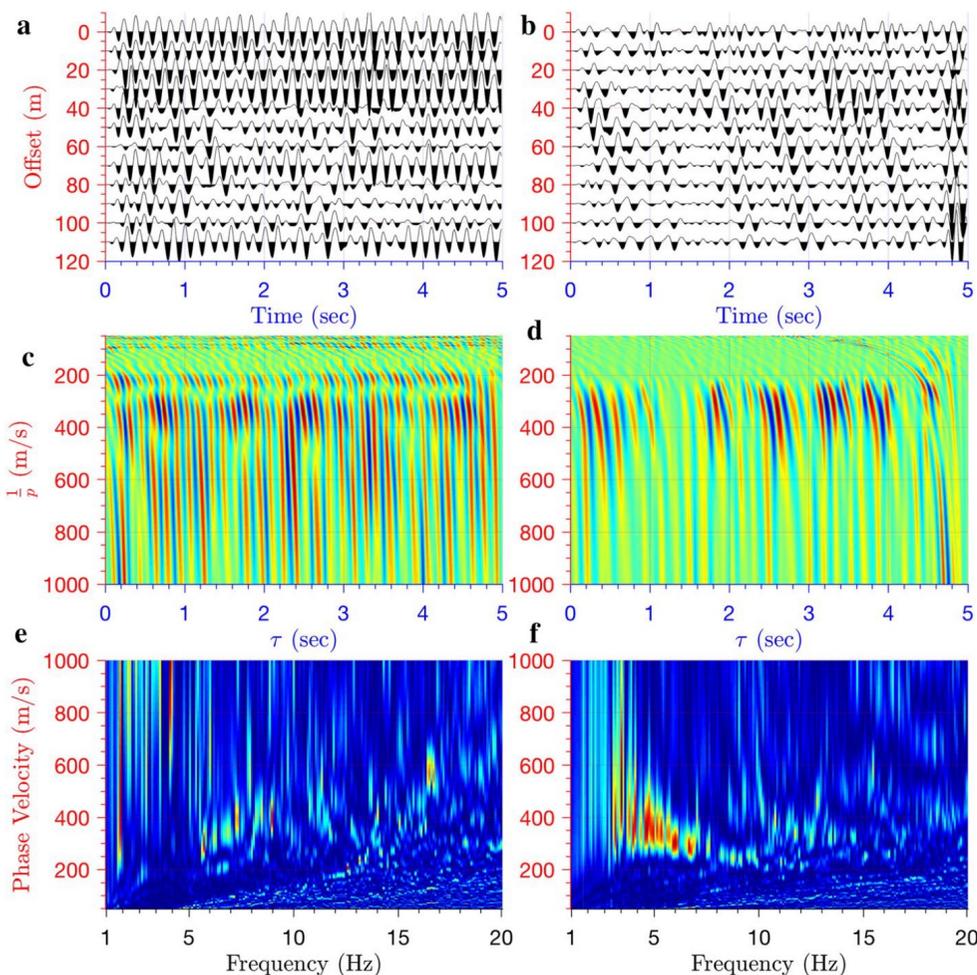
单时窗，空间非随机非均匀噪声源分布



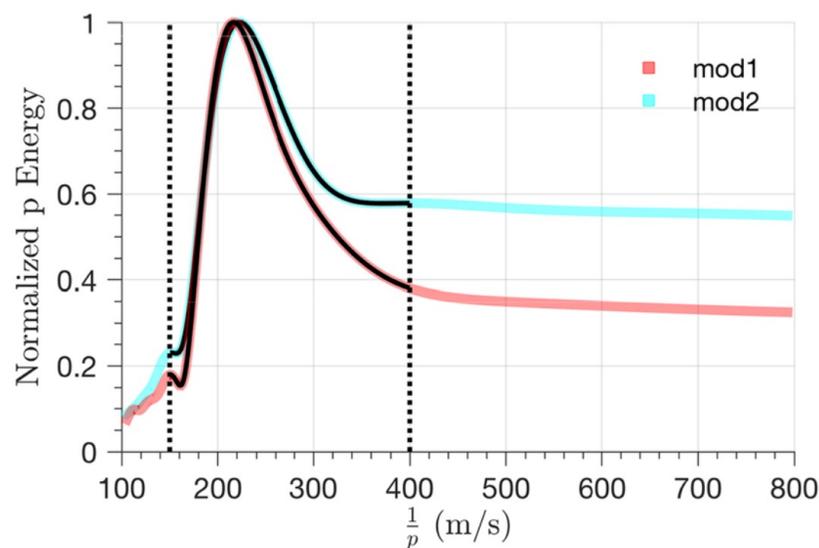
Cheng et al., 2019

信号增强：成像域数据筛选

定义噪声时窗 “信噪比” 标准

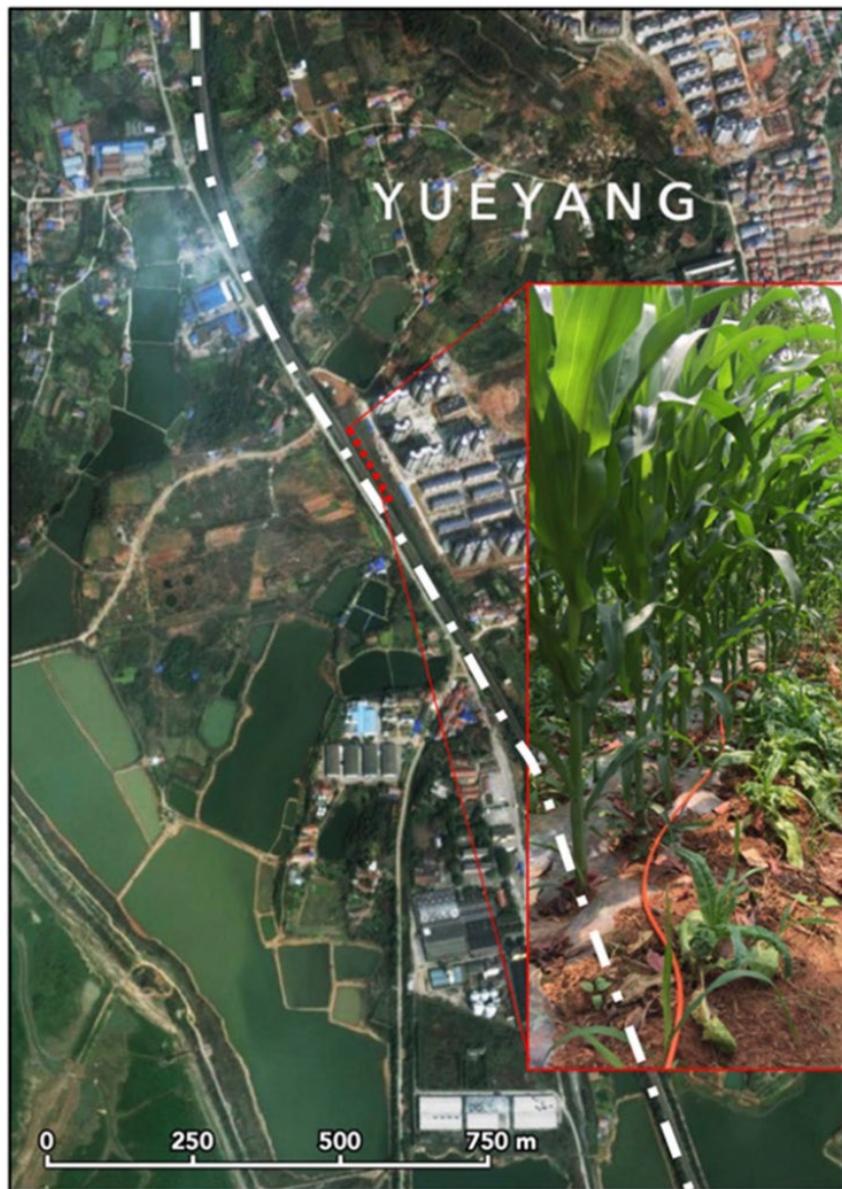


$$\phi = \frac{\max \{ \Delta(p) |_{v_1 < 1/p < v_2} \}}{\text{rms} \{ \Delta(p) |_{1/p < v_1, 1/p > v_2} \}}$$



Cheng et al., 2019

信号增强：成像域数据筛选

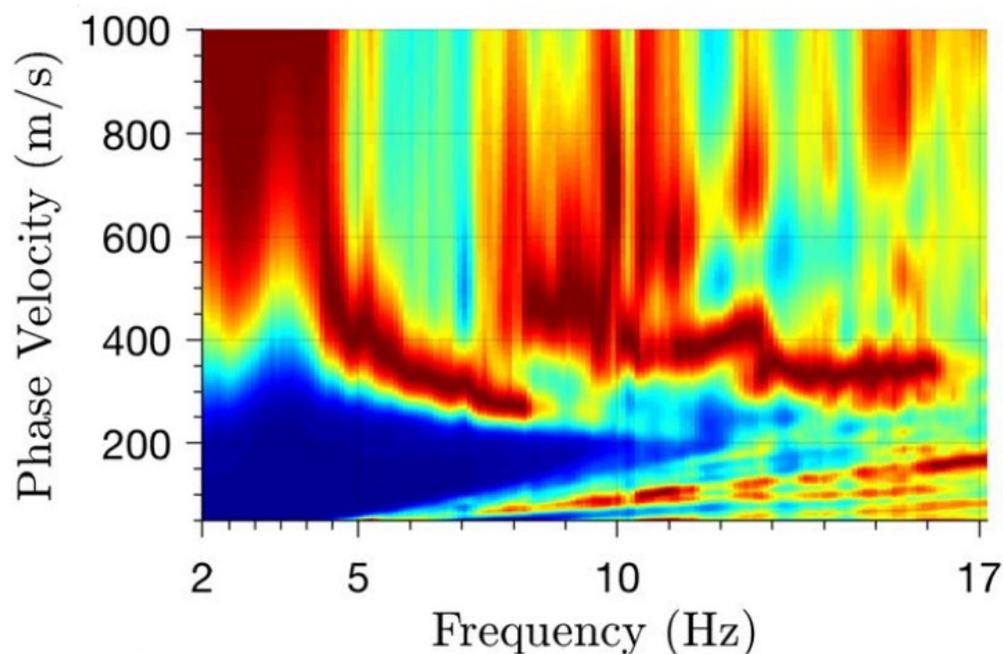


岳阳段京广铁路交通噪声观测

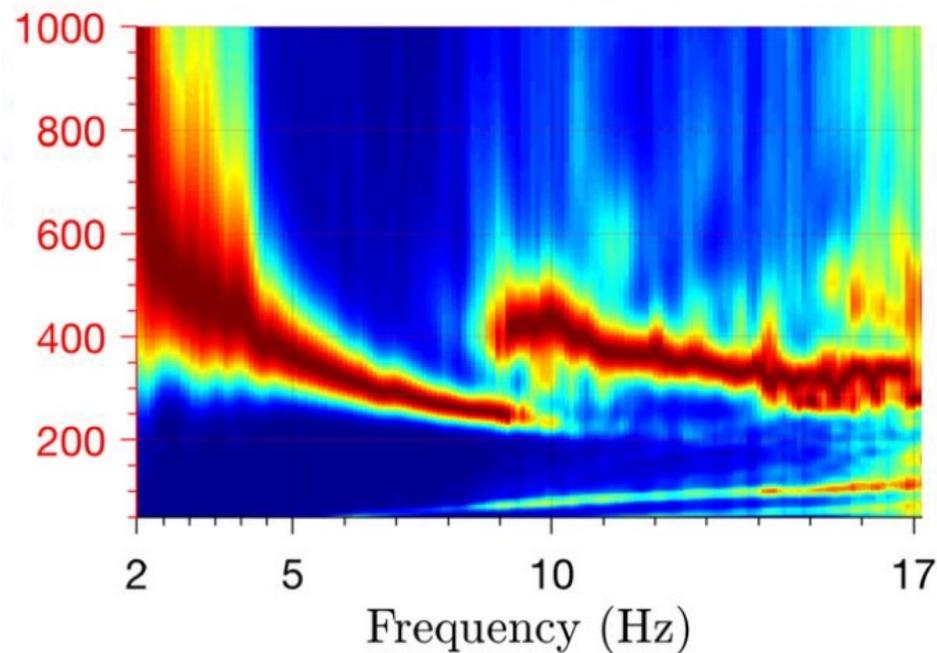
- 2016/05
- 24-ch 4.5Hz Geophone
- dt 2ms
- dx 10m
- 观测时长30min



信号增强：成像域数据筛选



数据筛选前

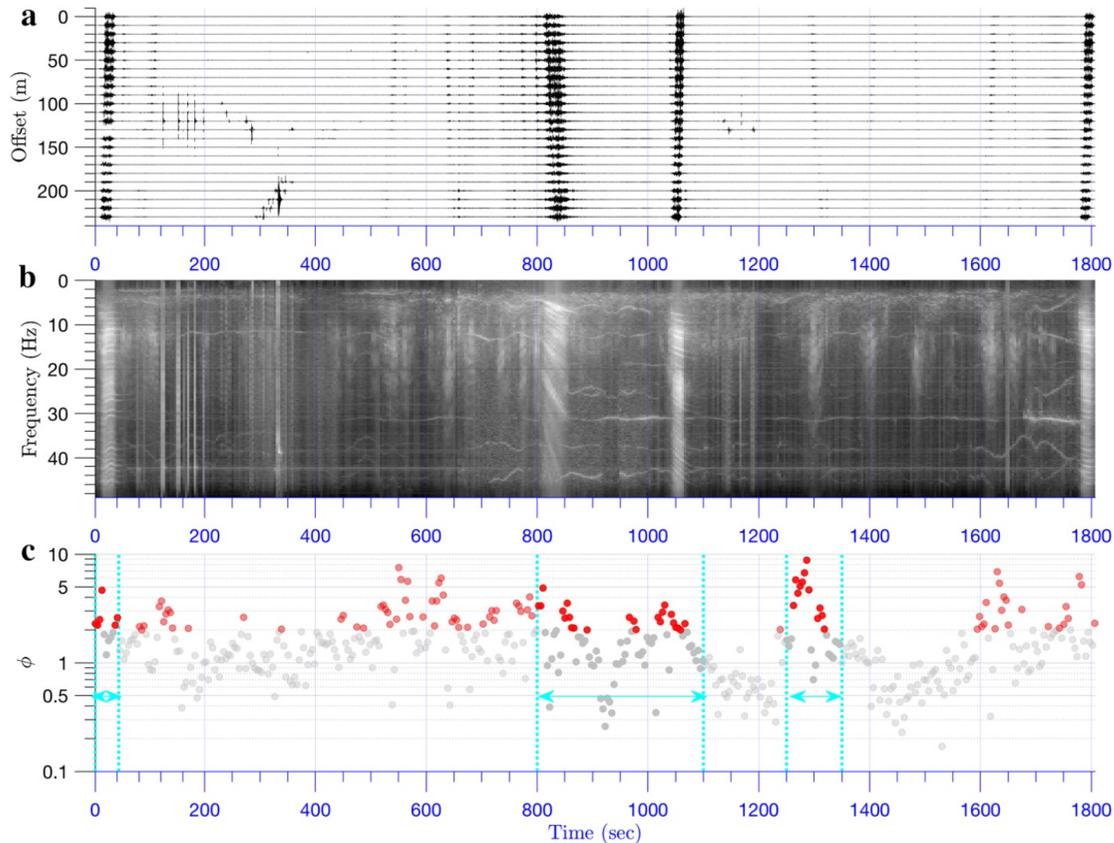


数据筛选后

噪声数据筛选之后，频散能量频段明显被拓宽、高阶的扰动被明显压制

Cheng et al., 2019

信号增强：成像域数据筛选



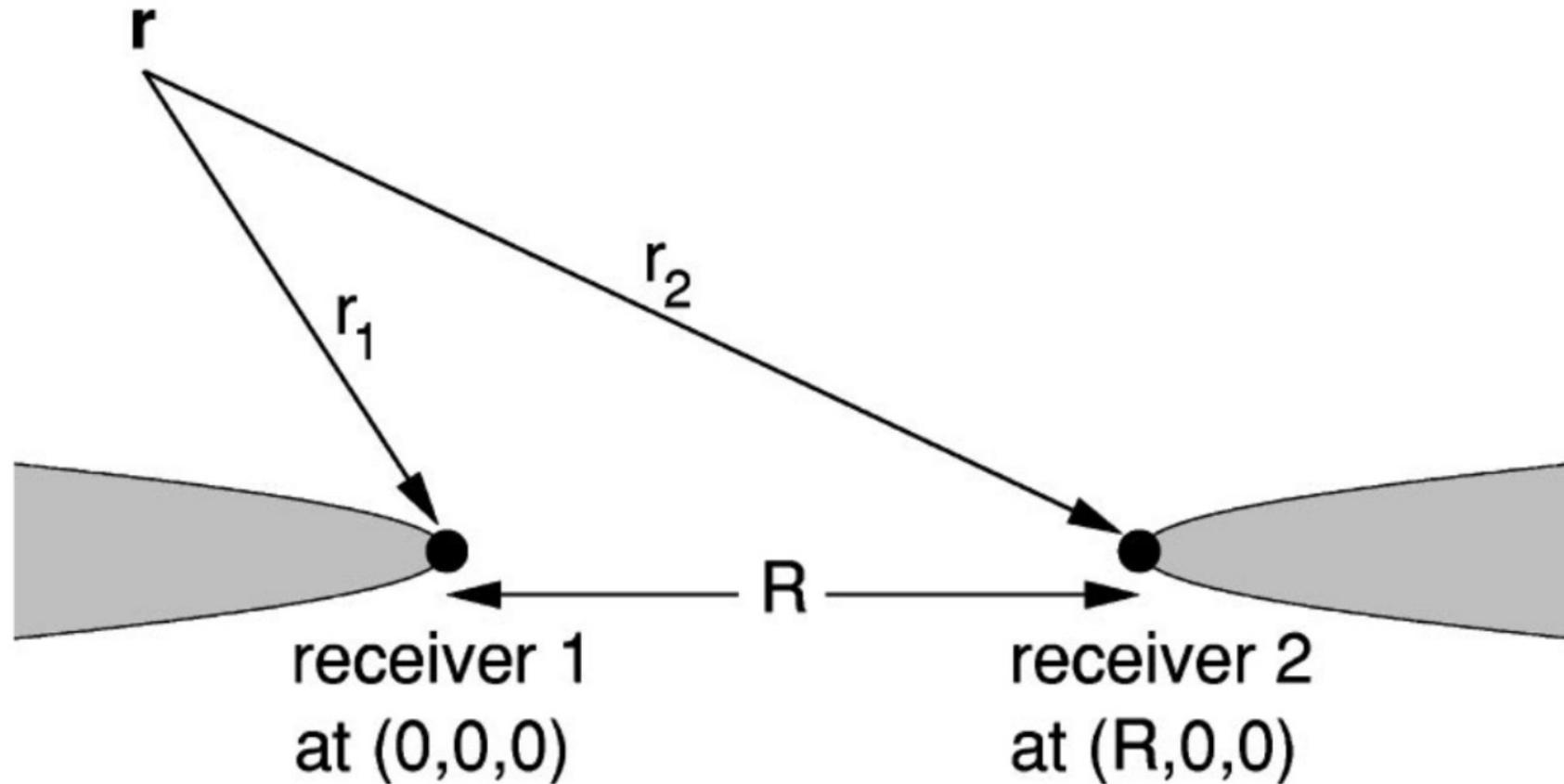
- 火车靠近，SNR增高
弥散coda波场能量增强
- 火车驶离，SNR降低
弥散coda波场能量减弱
- 火车太近，SNR低
干扰ballistic波场能量太强
- 火车太远，SNR低
弥散coda波场能量太弱

噪声数据筛选为研究噪声源时空分布变化提供新视角！

Cheng et al., 2019

信号增强：噪声源数据筛选

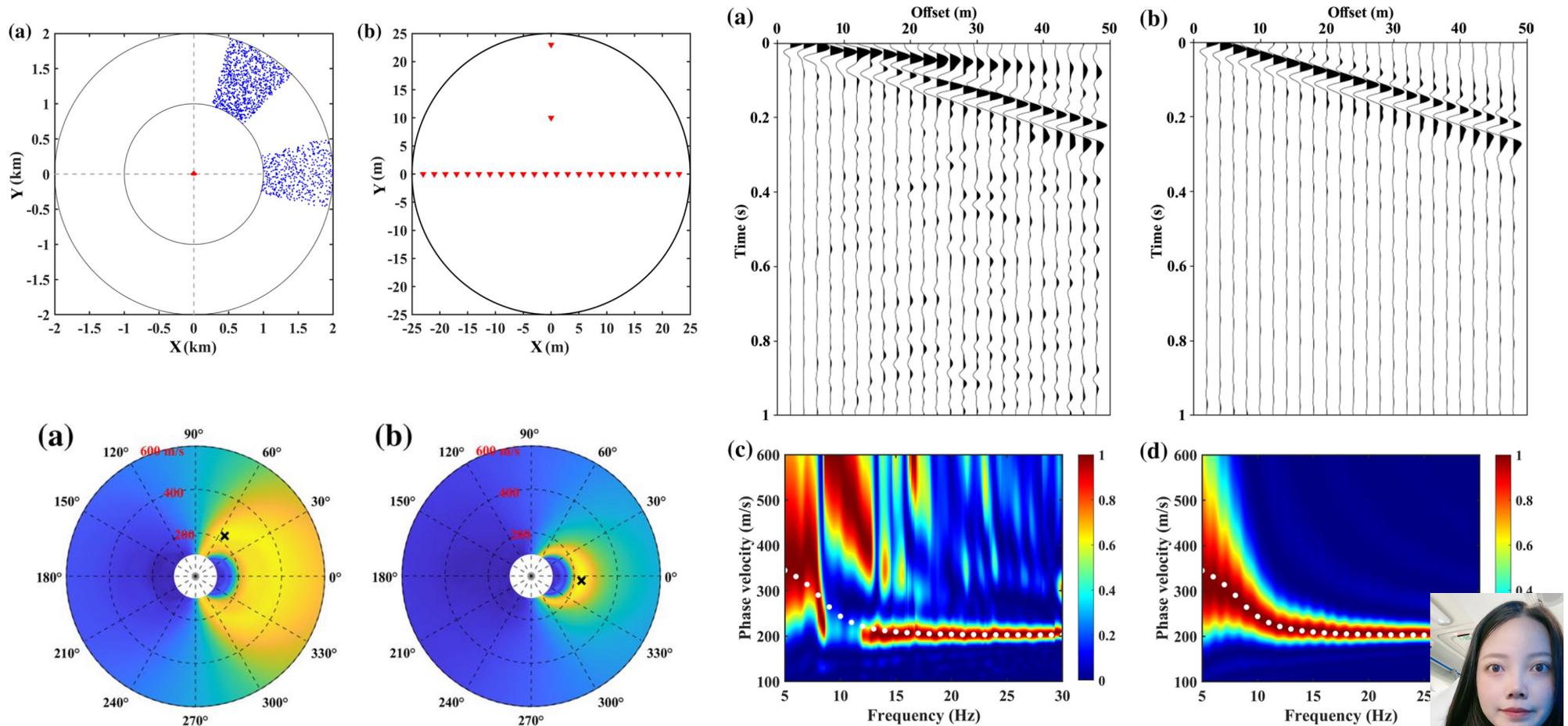
稳相区内噪声源对地震干涉信号提取贡献最大



Snieder 2004

信号增强：噪声源数据筛选

利用聚束分析筛选稳相区远场噪声源时窗



Ning et al., 2022

复杂噪声源的影响：信号增强小结

- 城镇复杂噪声源分布影响背景噪声地震干涉的信号提取与面波成像
- **超短时长观测条件下**，非相干信号无法通过有效叠加来消除，且无法通过简单的误差校正来弥补
- **对“噪声”直接进行数据筛选**，能有效增强信号与成像质量，为高频背景噪声面波成像提供了新思路，为研究噪声源时空分布变化提供了新视角。

目录

- ① 高频背景噪声面波方法
- ② 误差校正
- ③ 信号增强
- ④ 案例分析
 - DAS – 多尺度多目标地震成像

Thanks For Listening!



个人主页