

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

空间引力波探测
科学数据处理中的新观点

杜明辉

中国科学院力学研究所



中国科学院力学研究所
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

0

空间引力波探测数据处理概述

1

新观点1：从科学数据到原始数据

2

新观点2：从识别信号到识别噪声

0

空间引力波探测数据处理概述

1

新观点1：从科学数据到原始数据

2

新观点2：从识别信号到识别噪声

引力波数据处理概述



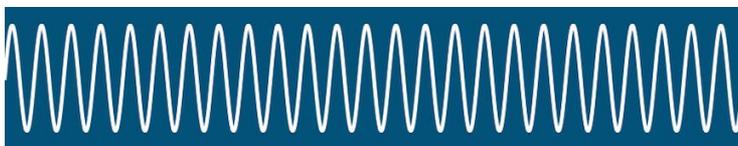
空间引力波探测（LISA、太极、天琴等）的目标波源数量巨大，类型多样，预计将对宇宙学、天文学、基础物理等领域产生深远影响。



超大质量/恒星质量双黑洞



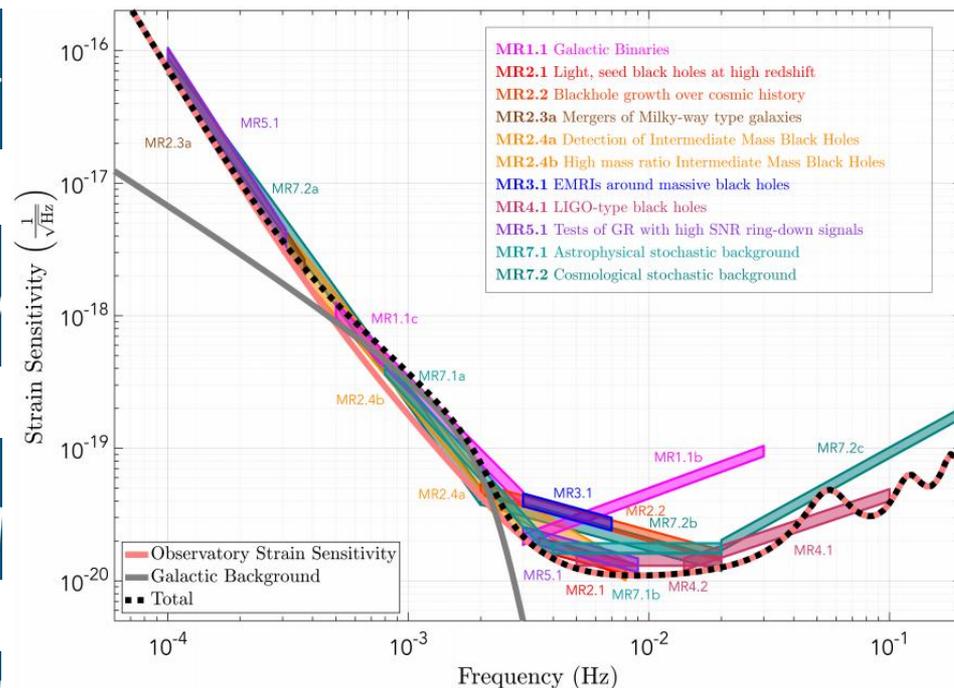
极端/中等质量比旋近



银河系致密双星系统



随机引力波背景



LISA白皮书列出的主要科学目标及任务要求

[LISA White Paper, 1702.00786]

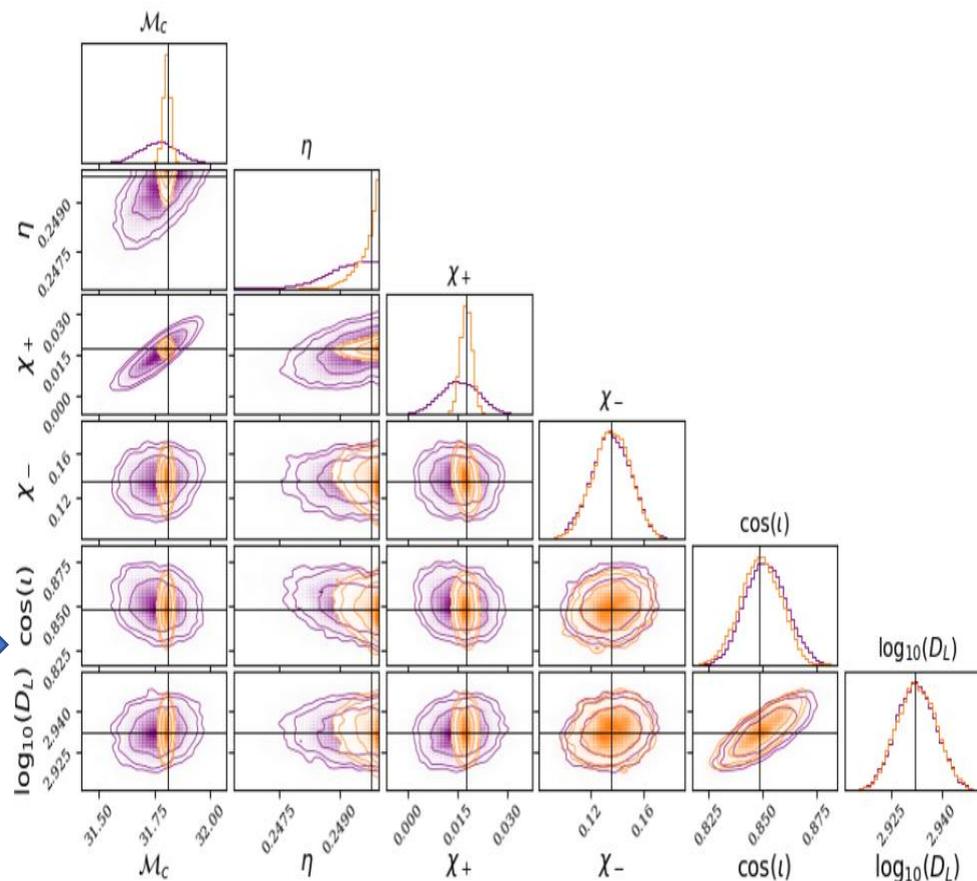
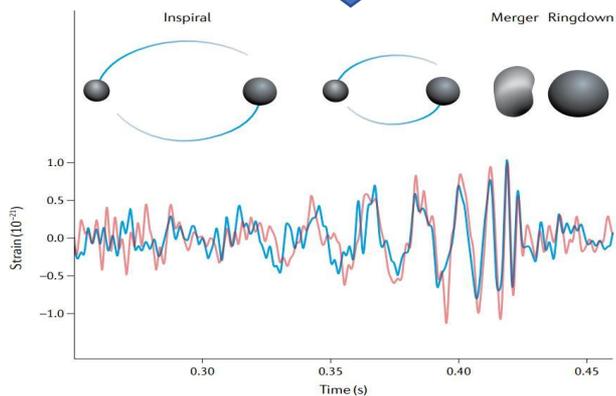
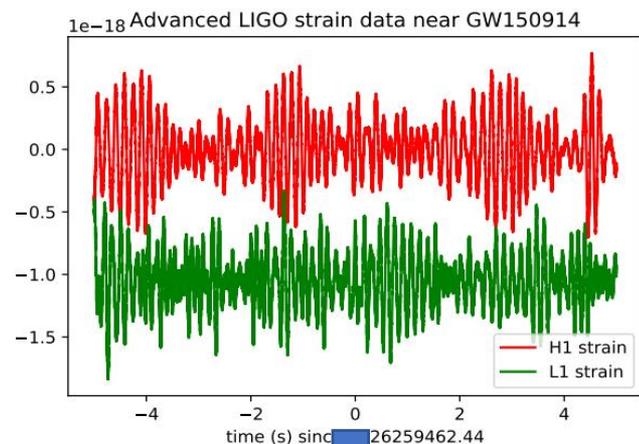
引力波数据处理概述



科学目标必须通过**数据处理**实现

强噪声、弱信号：**数据预处理**

波源参数反演：**科学数据处理**



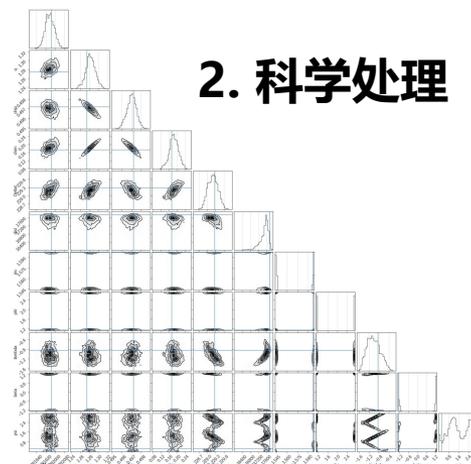
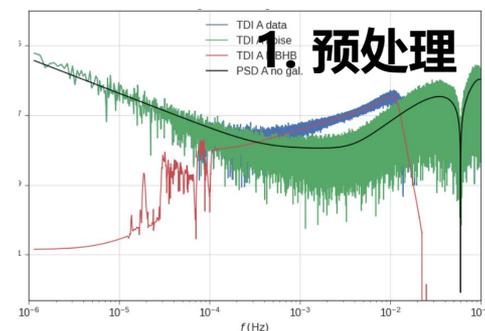
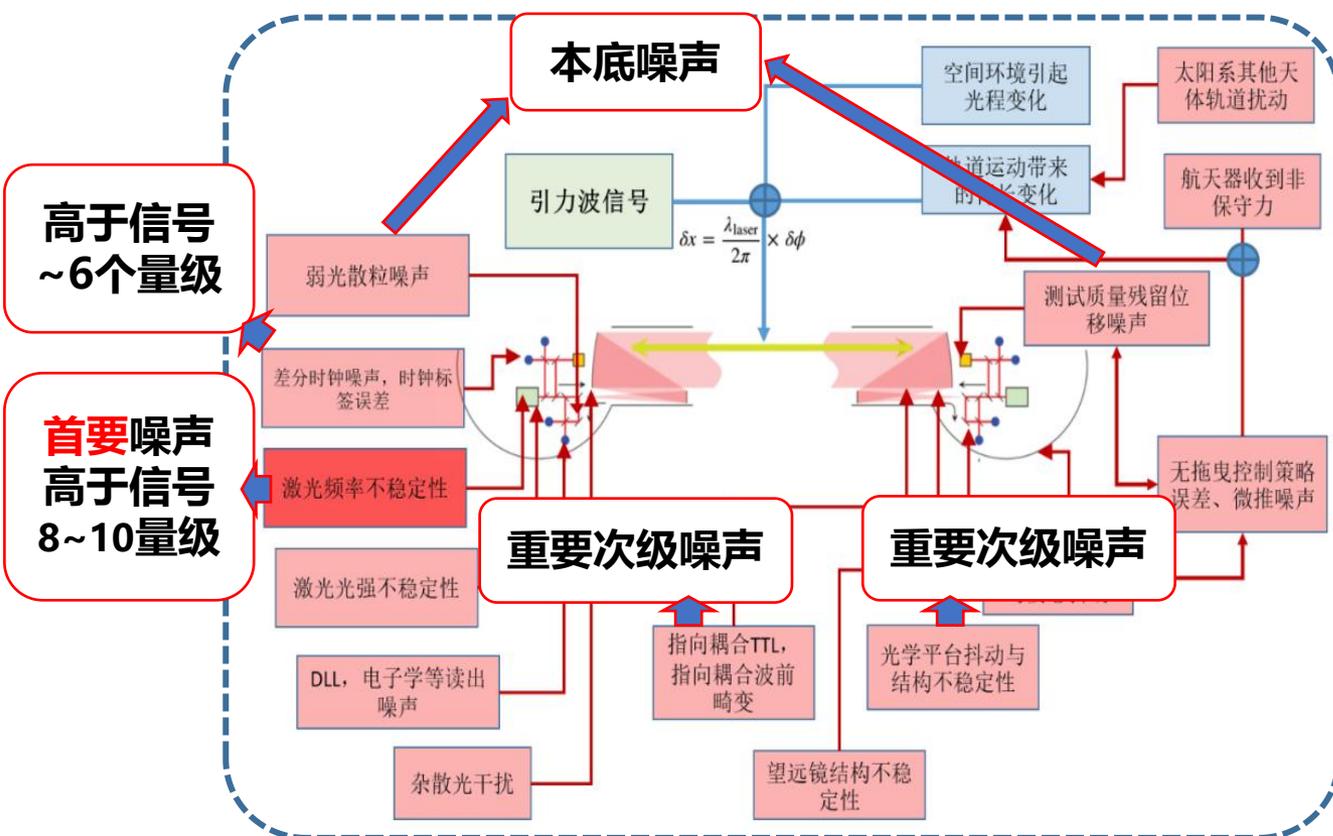
引力波数据处理概述



科学目标必须通过**数据处理**实现

强噪声、弱信号：**数据预处理**

波源参数反演：**科学数据处理**



0

空间引力波探测数据处理概述

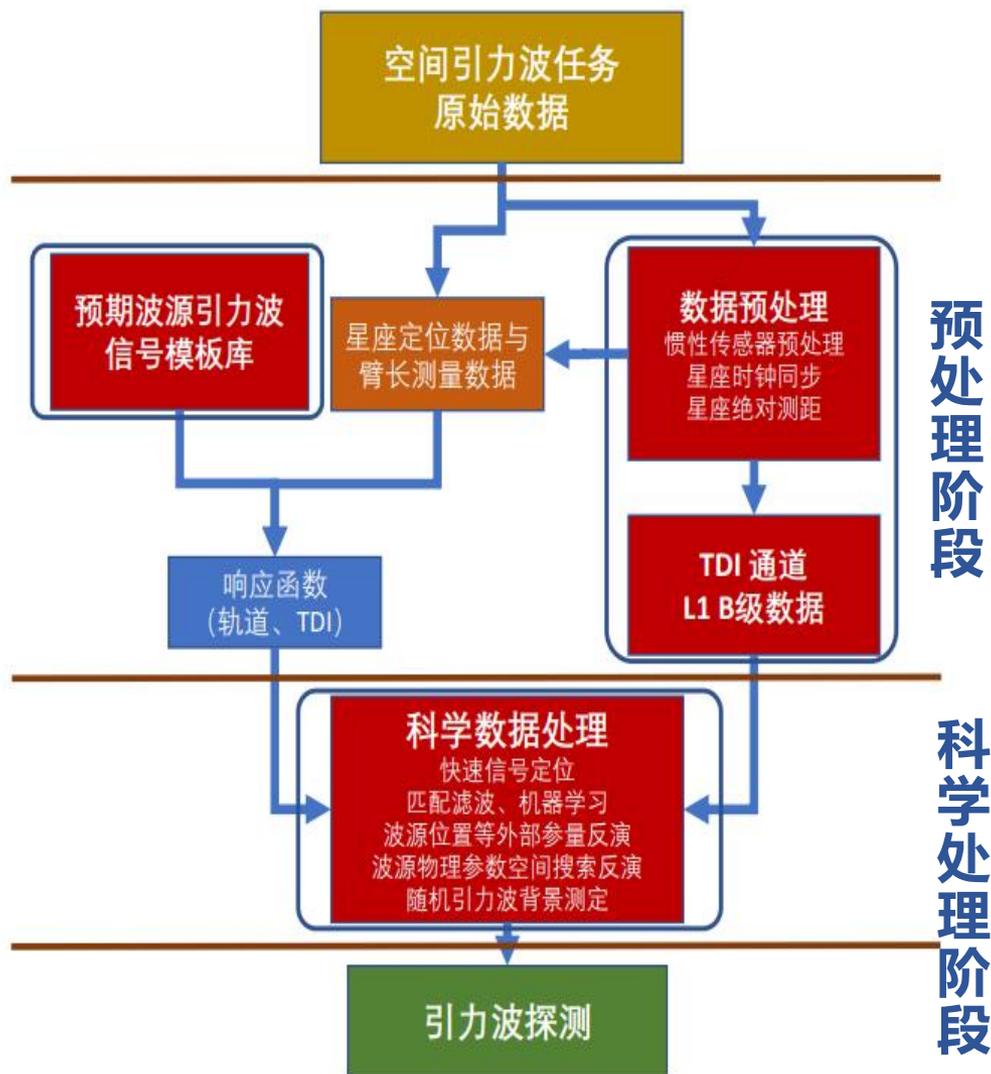
1

新观点1：从科学数据到原始数据

2

新观点2：从识别信号到识别噪声

从科学数据到原始数据

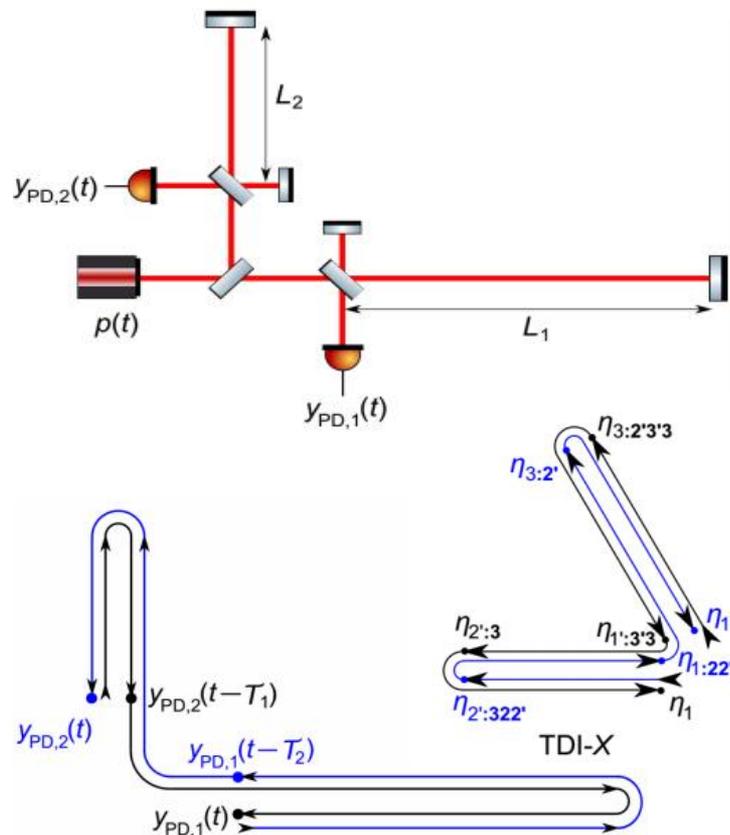


划分数据处理阶段:

- 预处理阶段由引力波探测任务的数据组负责
- 科学处理阶段主要由科学家完成
- 科学家处理“**干净**”的科学数据，便于分析
- 预处理处于**黑箱**状态，在降噪过程中可能**扣除信号**或**引入新噪声**

**打通预处理和科学处理阶段
科学家直接使用原始数据**

传统时间延迟干涉(TDI)技术



TDI-X 观测量 $X(t) = (y_1(t) + y_2(t - l_1(t))) - (y_2(t) + y_1(t - l_2(t)))$;

TDI-infinity

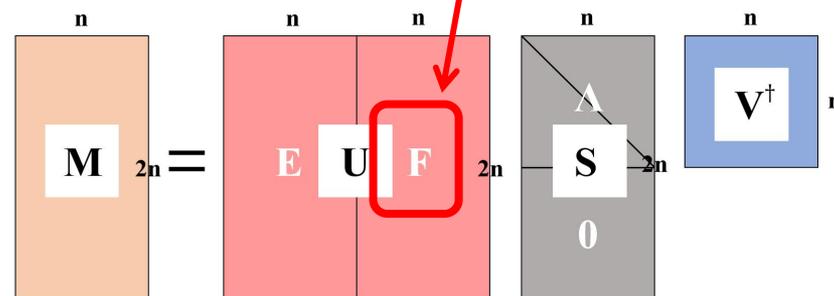
[M. Vallisneri, PRD 103, 082001]

干涉仪 输出 $y_1(t) = c(t - l_1(t)) - c(t) + n_1(t)$
 $y_2(t) = c(t - l_2(t)) - c(t) + n_2(t)$

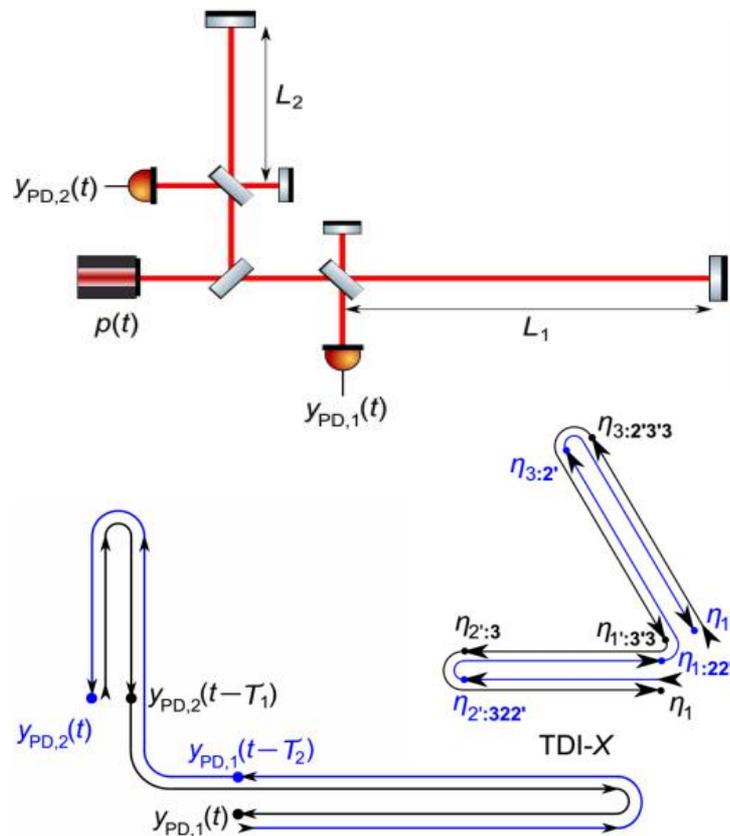
矩阵形式 $y = M c + n$

TDI-X 观测量 $X(t) = (y_1(t) + y_2(t - l_1(t))) - (y_2(t) + y_1(t - l_2(t)))$;

矩阵形式 $X = T y \quad T M \simeq 0$



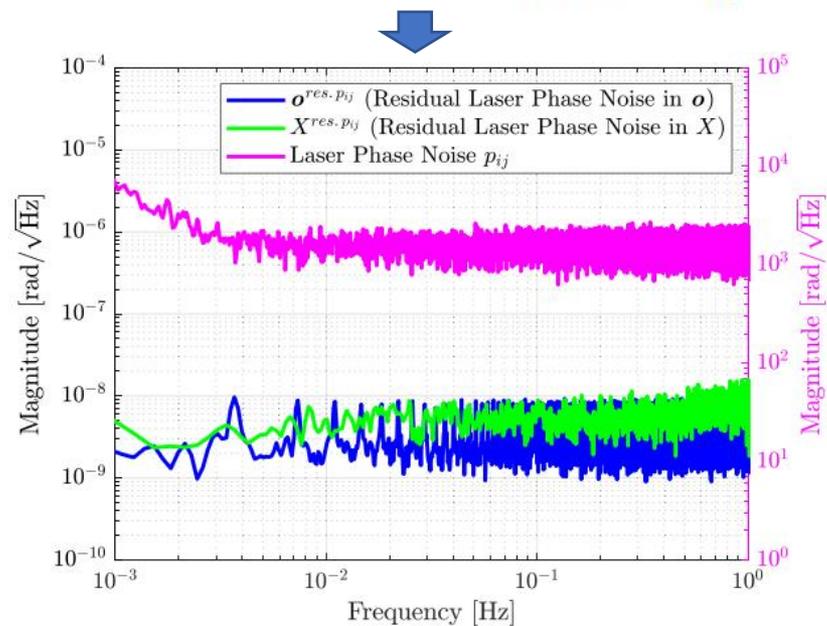
传统时间延迟干涉(TDI)技术



$$X(t) = (y_1(t) + y_2(t - \ell_1(t))) - (y_2(t) + y_1(t - \ell_2(t)));$$

TDI-infinity

自动生成广义TDI方案 $F^\dagger M = 0$



直接利用干涉仪读出构造似然函数，用于参数估计

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} \log p(\Delta \mathbf{y} | \theta) = -\frac{1}{2} \Delta \mathbf{y}^\dagger(\theta) \mathbf{F} (\mathbf{F}^\dagger \mathbf{N} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^\dagger \Delta \mathbf{y}(\theta) - \frac{1}{2} \log |2\pi \mathbf{F}^\dagger \mathbf{N} \mathbf{F}|$$

从科学数据到原始数据

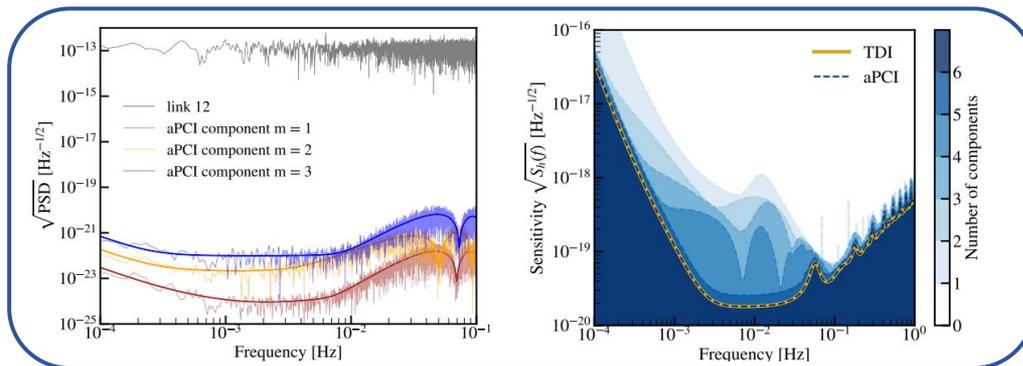
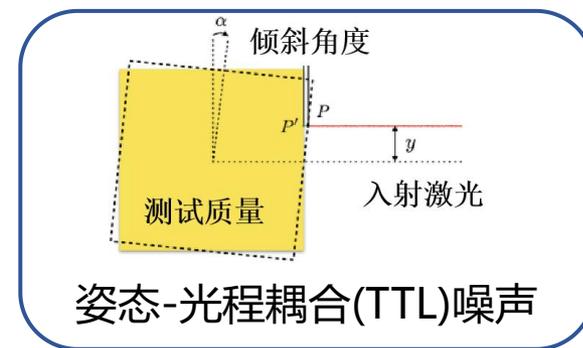
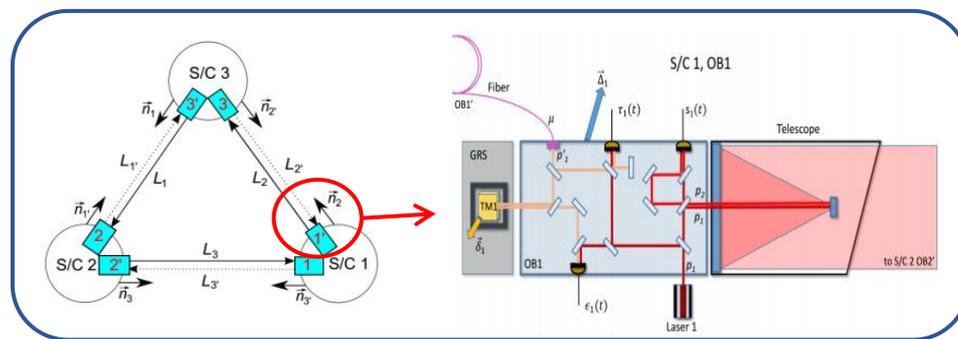


优势:

- 适用于任意臂长变化，自动化生成TDI方案
- **打通数据预处理与科学处理阶段，科学家可直接使用原始数据**
- 便于处理glitch和gap等数据异常

扩展:

- 至少6台激光器，18路干涉输出
- 引入平台、时钟、TTL噪声 [N. Houba, CQG 2003]
- 灵敏度及参数估计
- 无需臂长的主成分分析方案 [Q. Baghi PRD 104,122001]



0

空间引力波探测数据处理概述

1

新观点1：从科学数据到原始数据

2

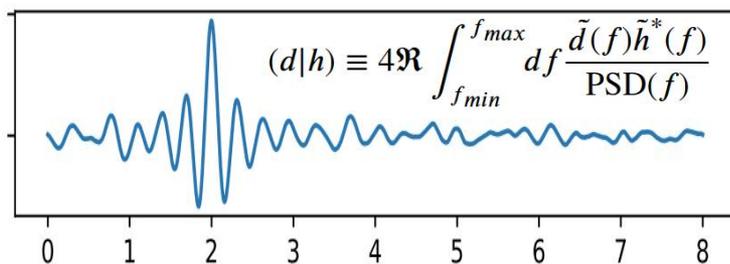
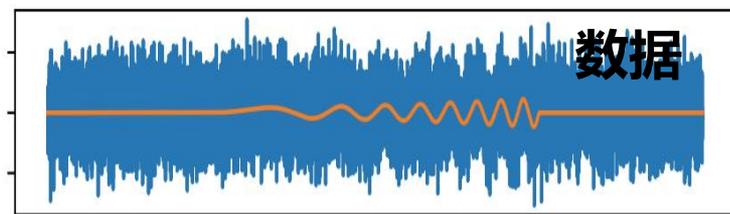
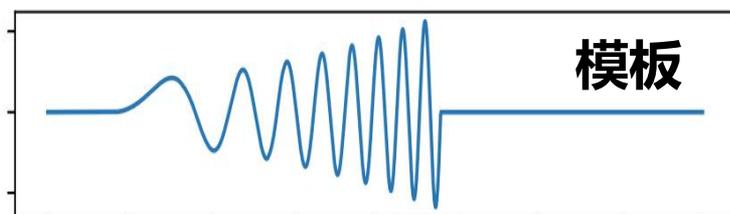
新观点2：从识别信号到识别噪声

从识别信号到识别噪声

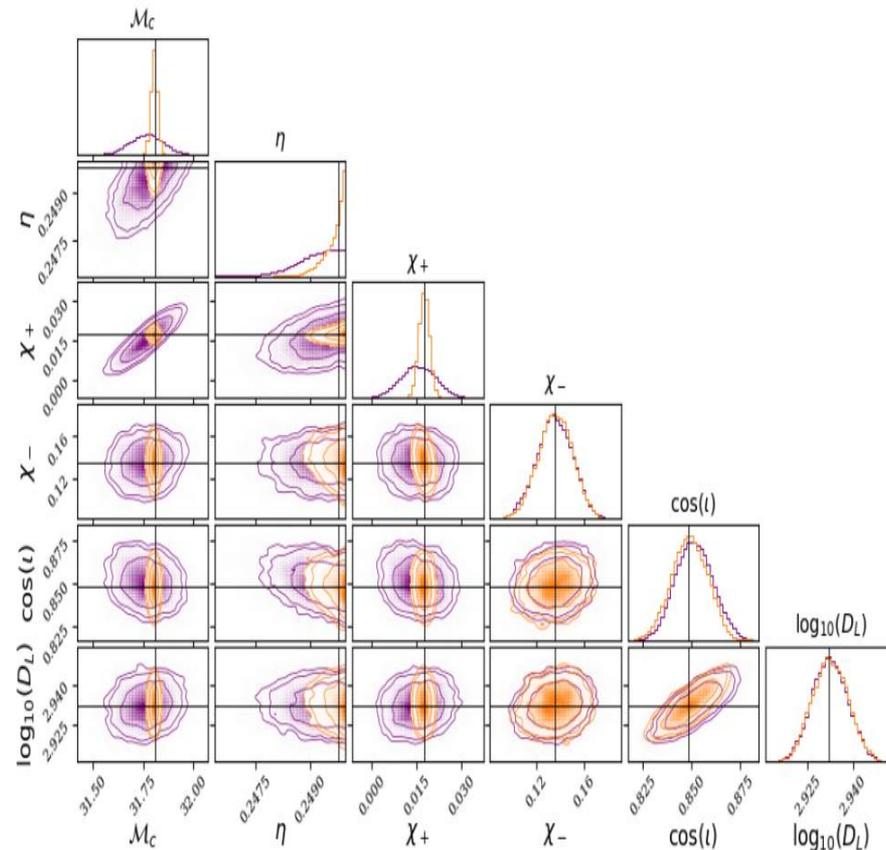


传统科学数据处理方法：

基于**波形模板**，经由**匹配滤波+ Bayes统计推断**，可实现**信号识别、定位**，并反演出**波源类型、质量、自旋、距离、空间方位**等信息。



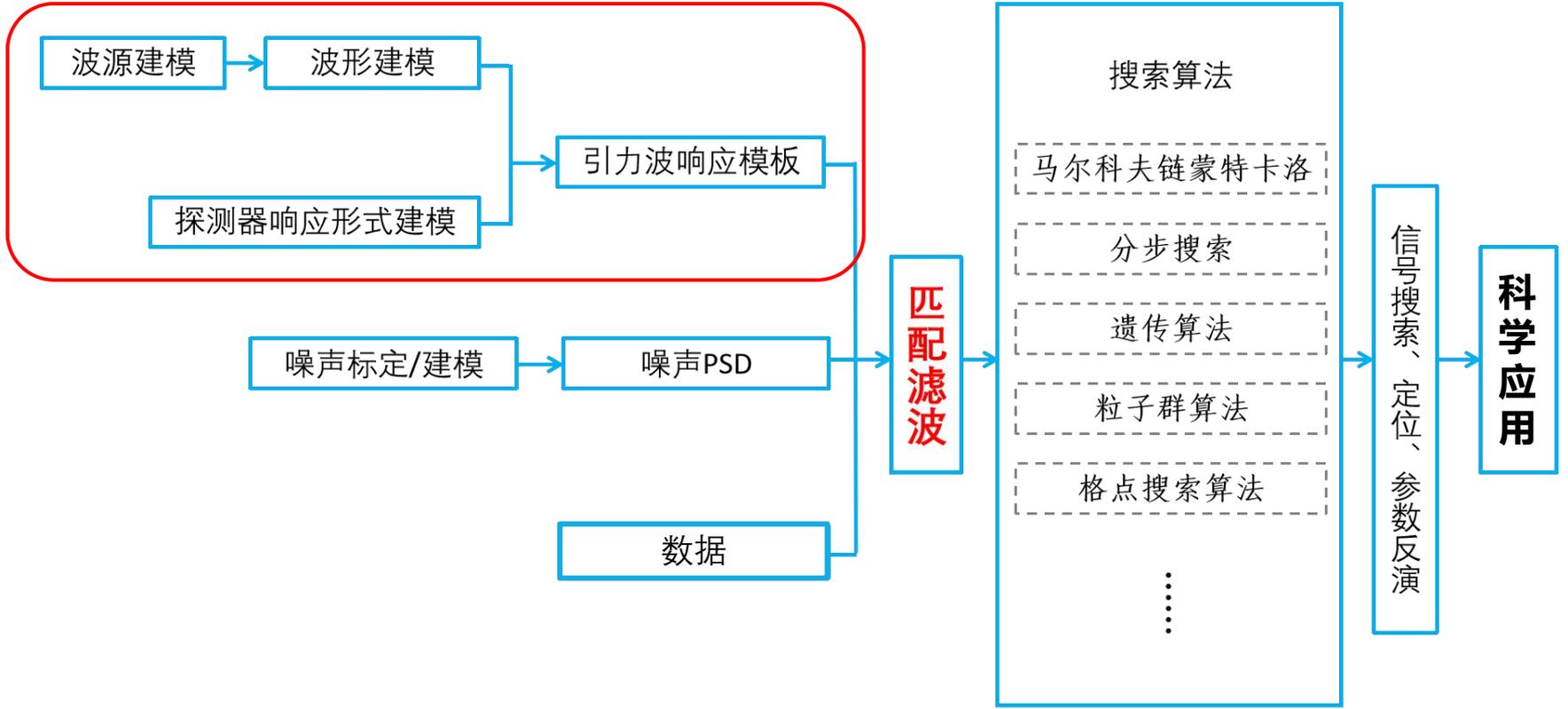
信号定位



波源参数反演



匹配滤波+ Bayes统计推断



机器学习方法： **匹配滤波感知层** [He Wang, Zhoujian Cao, PRD 101, 104003]

单一模型识别多种信号 [T. Zhao, arXiv:2207.07414]

基于信号模板的科学数据处理：从噪声中挖掘信号

- 需要足够精确的信号模板，难以处理未知波源（机器学习的迁移能力）
- 难以处理多个信号并存，波源种类未知的情况（global fit）

基于噪声的科学数据处理：抑制噪声，凸显信号

- 无需信号模板，有可能发现未知波源
- 可以在波源类型未知的情况下抑制随机噪声，方便进一步处理

传统降噪手段：

- 粗差识别、剔除、插值
- 低通滤波、小波变换
- 建模扣除、卡曼滤波、共模抑制

监督学习降噪：

noisy signal \rightarrow clean signal

需要干净信号作为训练集

[J. Lehtinen, arXiv:1803.04189]

Noise2Noise:

noisy signal \rightarrow noisy signal

模型训练无需干净信号

实际观测中无法获取clean signal

构建训练集，N2N仅使用带噪观测

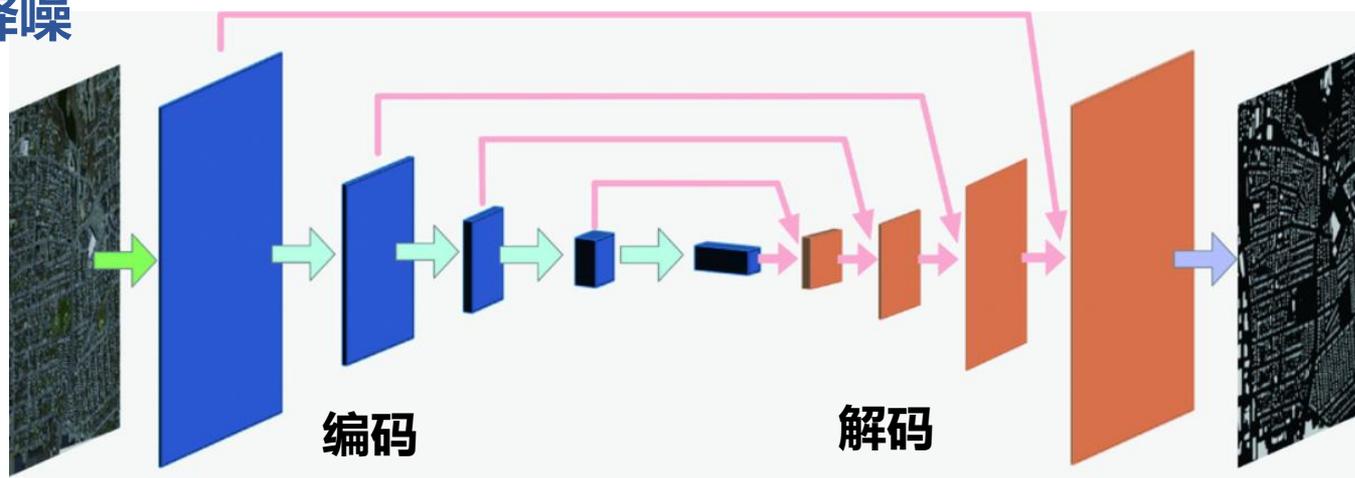
信号进行训练和降噪处理（**自监督**）

从识别信号到识别噪声



N2N应用于图像降噪

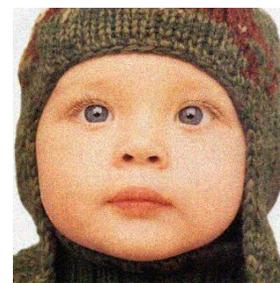
U-Net
网络结构



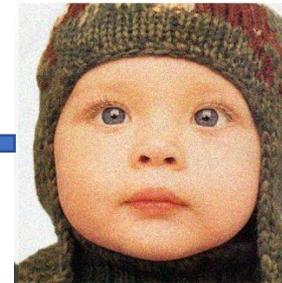
字符覆盖



高斯噪声



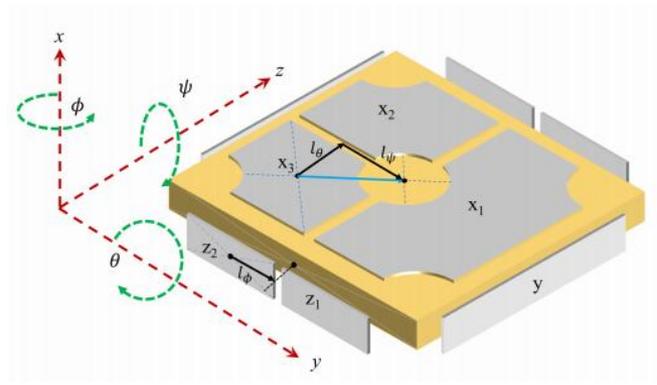
复杂噪声



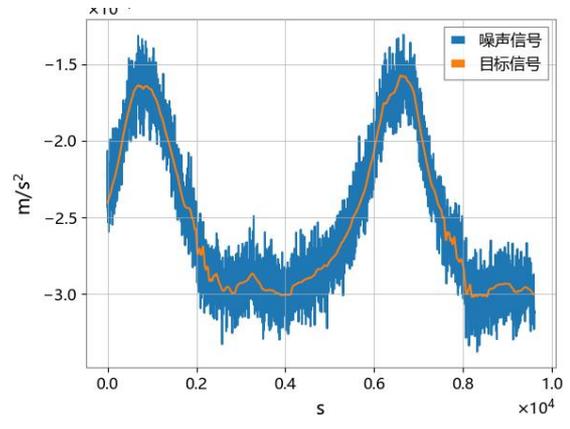
从识别信号到识别噪声



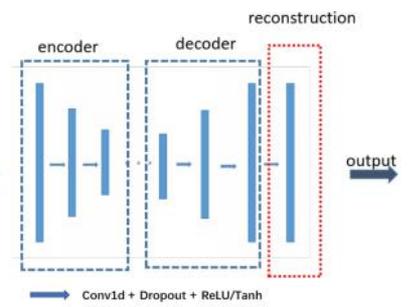
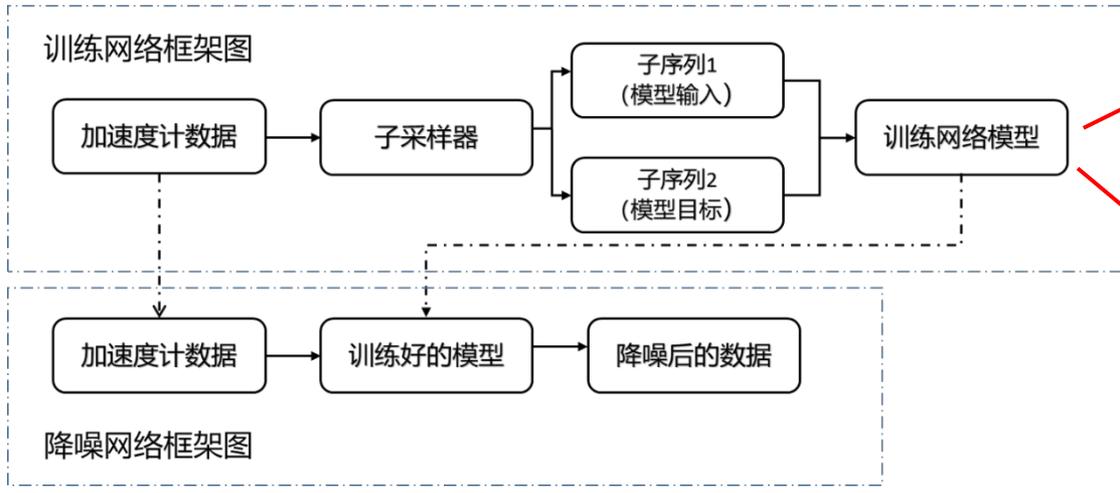
N2N用于GraceFollowOn及太极1号惯性传感器 [Zhilan Yang, 2023]



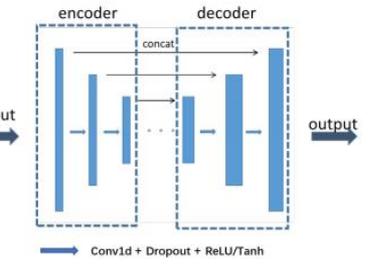
GRS示意图



数据及噪声

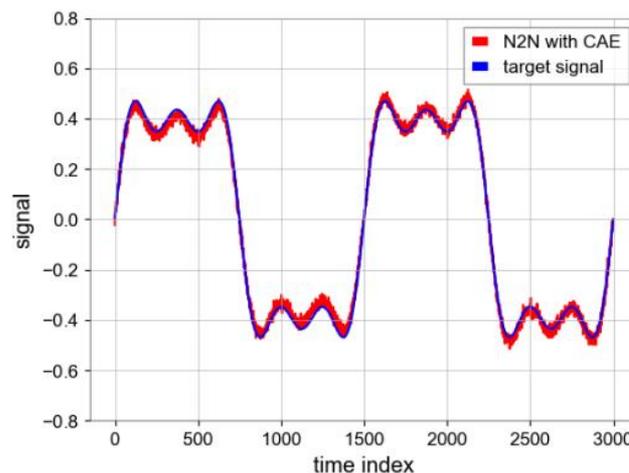
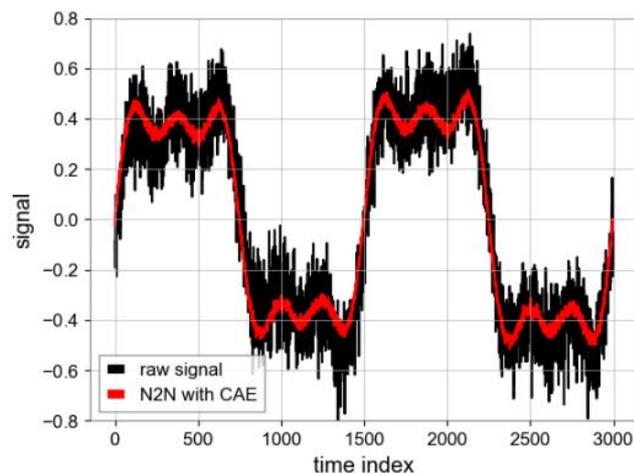


CAE网络结构



U-Net网络结构

基于模拟数据的测试结果：



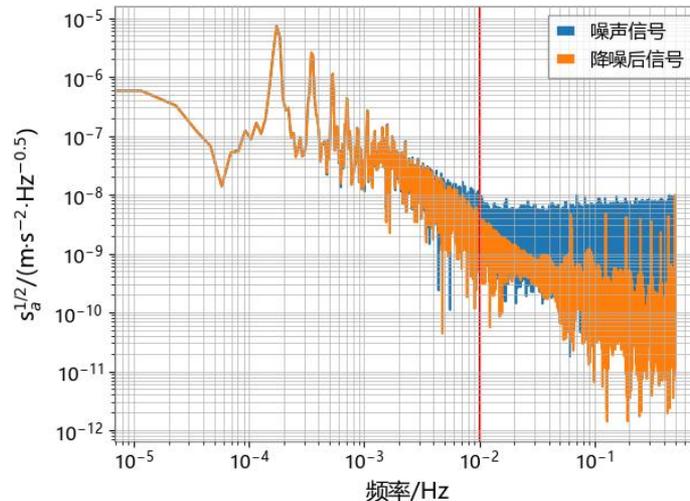
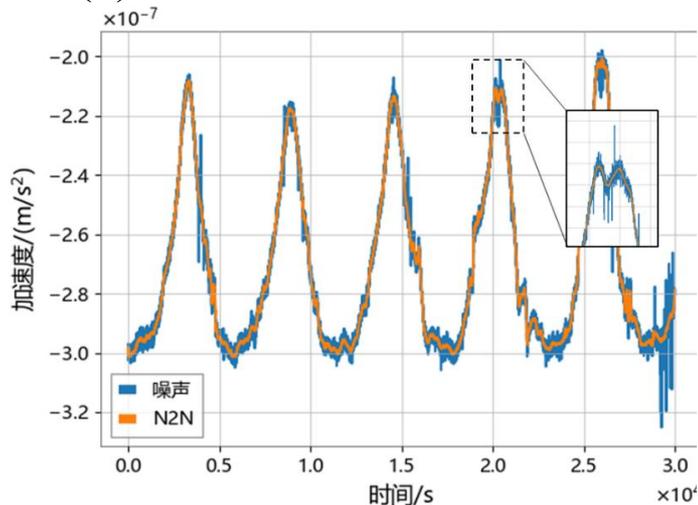
	方法	信噪比 (SNR)	均方误差 (MSE)
传统方法	小波变换	12.64	0.0078
	卡尔曼滤波	16.54	0.0033
	低通滤波	16.58	0.0033
监督学习	N2C (U-net)	20.12	0.0013
	N2C (改进CAE)	42.37	8.4×10^{-6}
自监督学习	N2N (U-net)	17.62	0.0024
	N2N (改进CAE)	23.56	0.0006

从识别信号到识别噪声



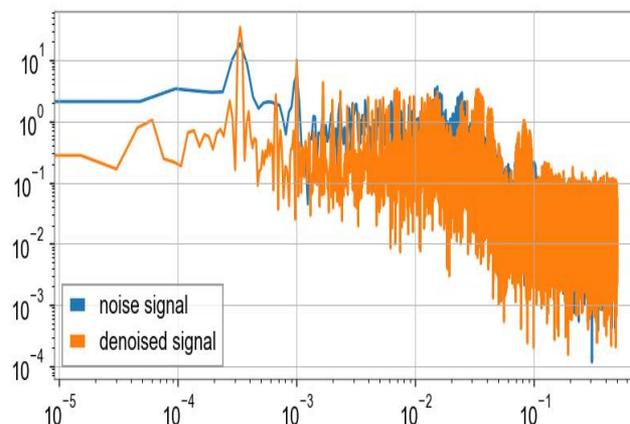
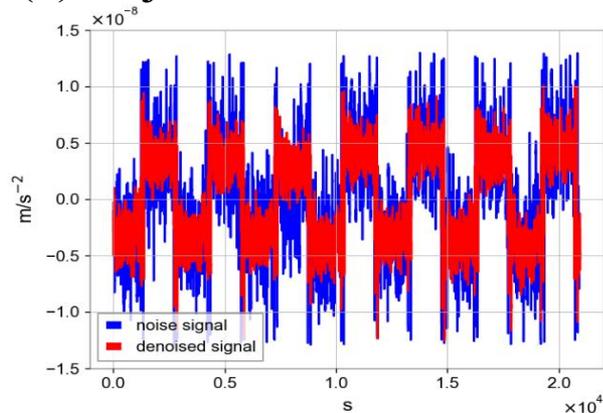
应用于周期信号:

(1) GFO真实数据



对0.01Hz以上的噪声抑制效果显著

(2) Taiji-1真实数据

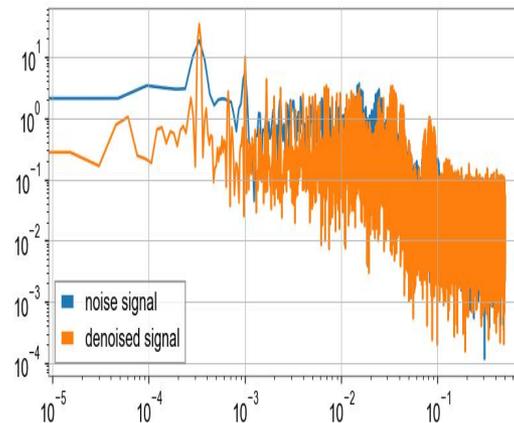


有效抑制低频噪声，凸显出 10^{-4} Hz周期信号

从识别信号到识别噪声



方法	信噪比 (SNR)	均方误差 (MSE)
小波变换	12.64	0.0078
卡尔曼滤波	16.54	0.0033
低通滤波	16.58	0.0033
N2C (U-net)	20.12	0.0013
N2C (改进CAE)	42.37	8.4×10^{-6}
N2N (U-net)	17.62	0.0024
N2N (改进CAE)	23.56	0.0006



经对比, N2N方法:

- 效果优于传统降噪方法
- 能够接近甚至超越监督学习的降噪效果, 具备高度**实用性**
- 尤其适用于周期性信号, 在**引力波数据处理**领域的应用前景

机器学习引力波数据降噪 [Z. Ren, 212.14283]

新观点1：从科学数据到原始数据

- 适用于任意臂长变化，自动化生成TDI方案
- **打通数据预处理与科学处理阶段，科学家可直接使用原始数据**
- 便于处理glitch和gap等数据异常

新观点2：从识别信号到识别噪声

- **不依赖于信号建模**，有可能发现未知波源
- 可以在波源类型未知的情况下抑制随机噪声，方便进一步处理
- 效果优于传统方法，自监督，具备**高度实用性**

A 3D digital illustration of a lunar lander on the moon's surface. The lander is a white, boxy structure with a flat top deck. On the deck, there are several pieces of equipment, including what looks like a small table with a tray of items, and some larger mechanical components. The lander is positioned on the grey, cratered surface of the moon. In the background, the dark blue and black curve of the Earth is visible against the starry space. A bright yellow sun is partially visible in the upper right corner, and a colorful nebula is in the upper left. The text '感谢各位专家!' is written in large, bold, white Chinese characters across the center of the image.

感谢各位专家!