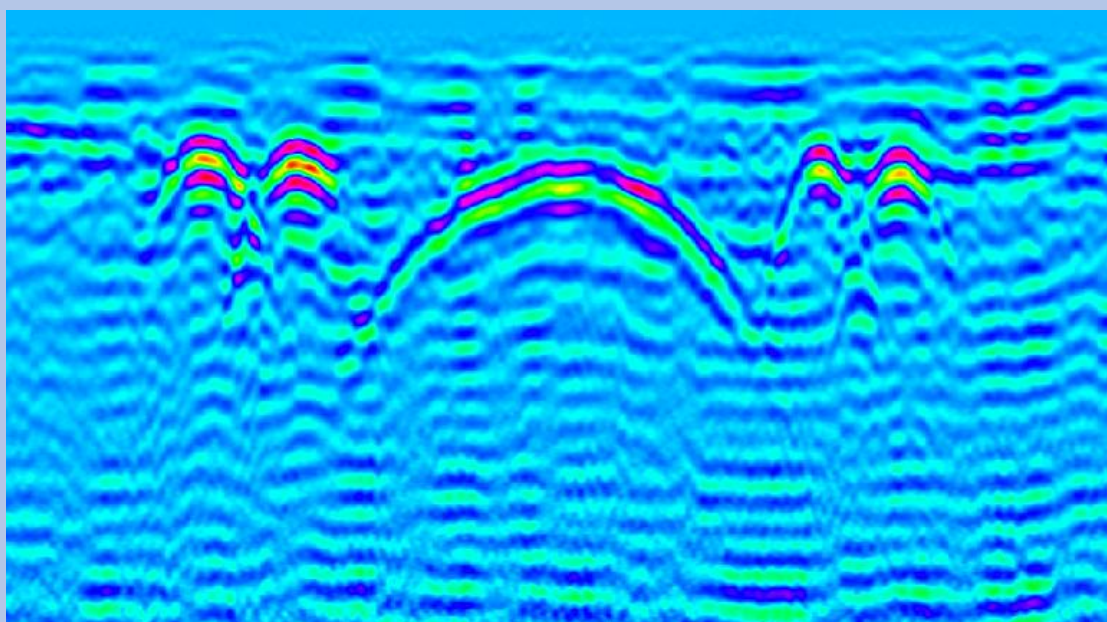


# **GPRlab 探地雷达数据处理分析软件**

## **用户手册**



熊洪强， 张志宇

2023-08-03

## 目 录

1 简介 .....	4
2 软件的安装 .....	5
2.1 在 MATLAB 中安装 GPRlab .....	5
2.2 独立的桌面软件 .....	6
2.3 GPRlab 的卸载 .....	6
3 软件的界面 .....	7
4 Data 模块 .....	8
4.1 读入数据 .....	8
4.2 数据参数设置 .....	9
5 Image processing 模块—探地雷达数据处理 .....	11
5.1 数据流程表 .....	11
5.2 处理流程操作 .....	12
5.3 图像设置和数据保存 .....	13
6 Processing algorithm in menu—功能 .....	15
6.1 R_DC 去直流 .....	15
6.2 R_background 去背景 .....	15
6.2.1 Remove background 常规均值去背景 .....	16
6.2.2 SVD 奇异性分解去背景 .....	16
6.2.3 Dynamic window background 滑动窗口去背景 .....	17
6.2.4 Remove file 文件去背景 .....	17
6.3 Gain 增益 .....	17
6.3.1 Exponent gain 指数增益 .....	18
6.3.2 Automatic gain 自动增益 .....	18
6.3.3 Manual gain 人工增益 .....	19
6.4 Math operations 数学运算 .....	19
6.4.1 Plus 加 .....	20
6.4.2 Multiplication 乘 .....	20
6.4.3 Absolute 绝对值 .....	20
6.4.4 Gradient 梯度 .....	20
6.4.5 Square 开方 .....	21
6.5 Filter 一维滤波 .....	21
6.5.1 Vertical filtering 垂向滤波 .....	21
6.5.2 Horizontal filtering 水平向滤波 .....	23

6.5.3 Predictive deconvolution 预测反褶积 .....	23
6.6 TwoD filter 二维滤波 .....	23
6.6.1 median filter 中值滤波 .....	24
6.6.2 mean filter 均值滤波 .....	25
6.6.3 F-k filter 二维频域带通滤波 .....	25
6.6.4 EMD filter 经验模态分解滤波 .....	25
6.6.5 VMD filter 变分模态分解滤波 .....	26
6.7 Hilbert Analysis 希尔伯特属性分析 .....	26
6.8 Migration 偏移/合成孔径成像 .....	27
6.8.1 SAR 合成孔径成像 .....	27
6.8.2 F-K migration F-K 偏移 .....	28
6.9 Wavelet 小波分析类方法 .....	28
6.9.1 OneD-dwt 一维离散小波去噪 .....	28
6.9.2 TwoD-dwt 二维离散小波去噪 .....	28
6.9.3 OneD-cwt 一维连续小波滤波 .....	29
7 Wave 视图—波形分析视图 .....	30
7.1 波形分析 .....	30
7.2 波形图操作 .....	31
8 Time-frequency analysis 视图—时频分析视图 .....	33
9 Examples 例子 .....	35
9.1 Case1 案例 1 .....	35
9.2 Case2 案例 2 .....	38
9.3 Case3 案例 3 .....	41
10 Version update instructions 版本更新说明 .....	45

## 1 简介

该软件是探地雷达（GPR）数据分析和研究的开源免费软件。软件开发采用 MATLAB 编程语言，编译环境为 MATLAB R2020b。软件之所以命名为 GPRlab，一方面是因为用于 GPR 技术，另一方面是因为该软件的不同于商业探地雷达数据分析软件，它的开发目的是为研究者提供一个研究 GPR 数据的实验室，契合实验室“laboratory”的定义，方便研究者能够自由地将数据进行处理、分发和可视化。

软件可读取 dzt, rd3, DT1 等商业软件格式和矩阵排列的 GPR 数据，可保存处理流程和处理后的数据，并将数据传送至 MATLAB 的工作区。软件可显示雷达图和波形图，软件数据处理功能完备，具有去直流、去背景、信号增益、数学运算、一维滤波、二维滤波、波形分析等算法。软件中的图像中，具有保存图片，直接放大缩小图像，删除数据点，观测数据点，复制保存数据点等功能。

该软件为免费软件，不得用于商业用途。我们也希望您不要将其用于进攻性武器的研究中。如果您在研究中使用了该软件，请注明使用了 GPRlab，以便于软件的传播和共享。GPRlab 所有权利由熊洪强负责解释，如果软件使用中遇到任何困难可通过邮箱 1014007697@qq.com 与软件作者联系。

## 2 软件的安装

我们推荐在 MATLAB 中安装 APP 的方式来安装本软件，尽管 GPRlab 也可以作为独立的桌面软件安装。

### 2.1 在 MATLAB 中安装 GPRlab

(1) 首先确保您的电脑中安装有 MATLAB R2020b 及以上版本。

(2) 如图 2-1，打开 MATLAB，进入 APP 模块，点击安装 App，选择我们提供的 GPRlab.mlappinstall.

(3) 安装完成后，GPRlab 就作为您 MATLAB 中的一个 App (如图 2-2)，点击即可使用。

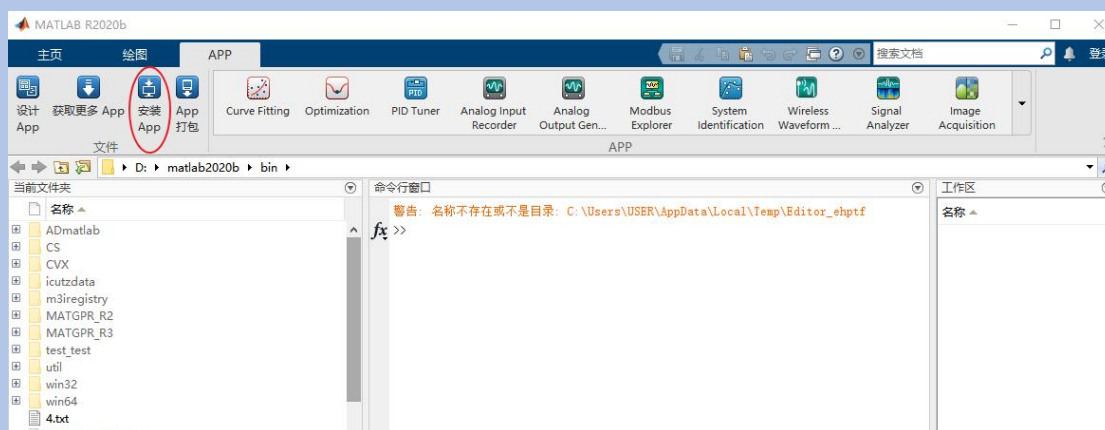


图 2-1 MATLAB 中安装 GPRlab

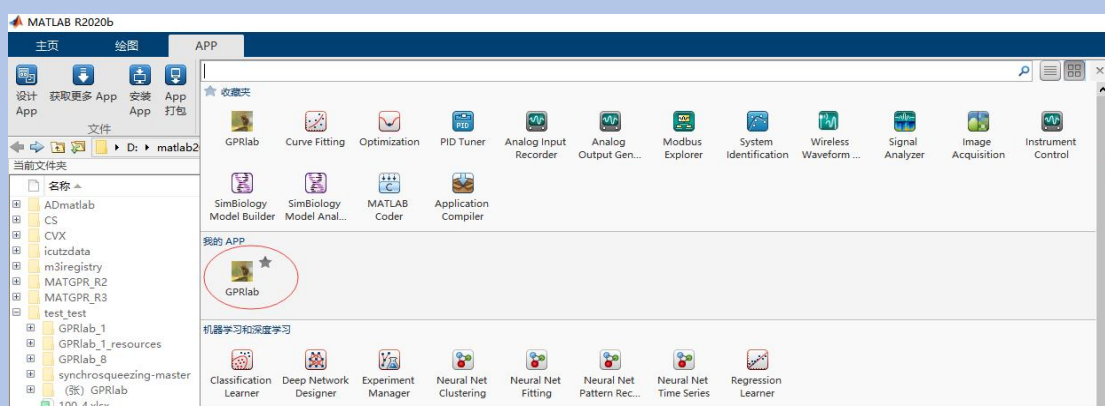


图 2-2 MATLAB 中已安装的 GPRlab

## 2.2 独立的桌面软件

如果您的电脑中已经有 MATLAB R2020b 及以上版本。您可以直接打开 `exe/for_redistribution_files_only` 文件夹. 点击 `GPRlab.exe` 运行 GPRlab, 或者将 `GPRlab.exe` 发送快捷方式到您的电脑桌面。

如果您的电脑中没有 MATLAB R2020b 及以上版本。您可以使用 `exe/for_redistribution` 文件夹下的安装程序 `MyAppInstaller_mcr.exe` 安装 GPRlab.

**注意：**我们建议您使用 2.1 节中的安装方式，独立的桌面软件是我们不推荐的选项，可能会遇到某些未知的问题。

## 2.3 GPRlab 的卸载

在 MATLAB 的 APP 模块中可以右键卸载。作为独立的桌面软件时，GPRlab 的卸载方式和其它任何桌面软件相同。

### 3 软件的界面

软件的界面如图 3-1，软件的顶部为菜单栏，菜单栏中含有 GPRLab 提供的所有算法。菜单栏下面是本软件提供的三个模块窗口：

- (1) Data 模块，GPR 数据读取和参数设置；
- (2) Image processing 模块，GPR 数据处理模块；
- (3) Wave 模块，GPR 波形分析模块，用于分析单道信号的频谱。
- (4) Time-frequency analysis 模块，GPR 时频分析模块，用于分析单道信号时频谱和同步压缩谱。

Data 模块读取数据并设置参数后，可切换至 Image processing 和 Wave 进行数据处理与分析。

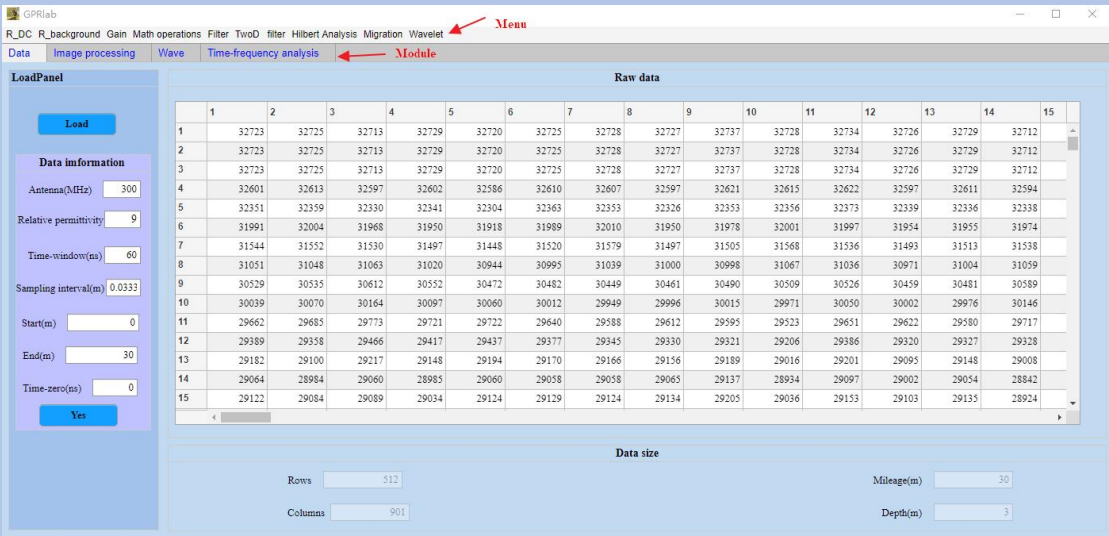


图 3-1 GPRLab 的界面



## 4 Data 模块

Data 模块用于加载数据和设置参数。

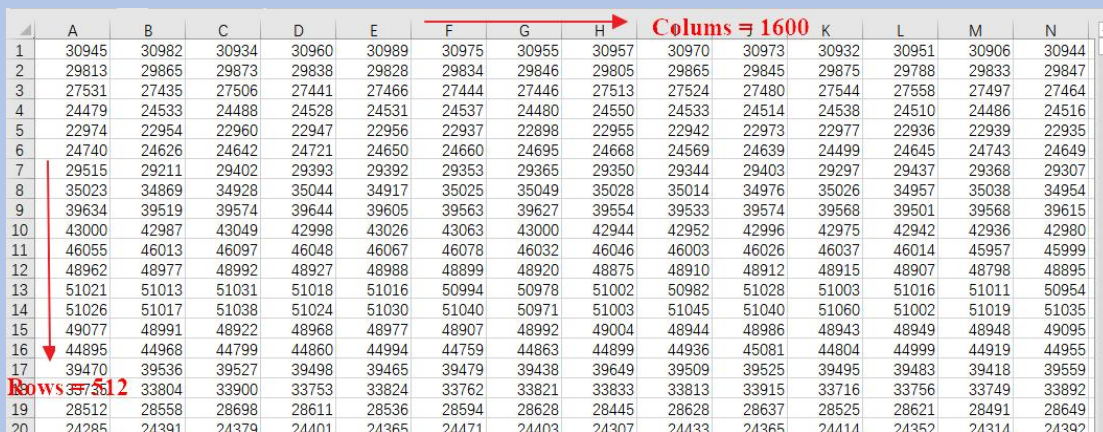
### 4.1 读入数据

GPRLab 读入单通道 DZT 或 dzt (GSSI 设备) 时, 文件头中的时窗会被加载。

GPRLab 读入单通道 rd3 (MALA 设备) 时, 需要将头文件 rd, 放在数据同一目录下, 头文件中的时窗会被加载。

GPRLab 读入单通道 DT1 (EKKO 设备) 时, 需要将头文件 HD, 放在数据同一目录下, 头文件中的时窗会被加载。

矩阵排列的数据 (B-Scan 排列为一个矩阵, 如图 4-1 中是一个 512×1600 的 B-Scan), 可以直接读入。支持格式包括: txt、dat 或 csv (适用于带分隔符的文本文件); xls、xlsb、xlsm、xlsx、xltm、xltx 或 ods (适用于电子表格文件)。不同格式的数据矩阵读入的速度不一样, txt、dat 和 csv 的数据读入最快, 对于电子表格格式一般而言很慢。建议采用 csv 文件, 因为 csv 文件可以用 Excel 打开, 可以直接观察数据。



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	30945	30982	30934	30960	30989	30975	30955	30957	30970	30973	30932	30951	30906	30944
2	29813	29865	29873	29838	29828	29834	29846	29805	29865	29845	29875	29788	29833	29847
3	27531	27435	27506	27441	27466	27444	27446	27513	27524	27480	27544	27558	27497	27464
4	24479	24533	24488	24528	24531	24537	24480	24550	24533	24514	24538	24510	24486	24516
5	22974	22954	22960	22947	22956	22937	22898	22955	22942	22973	22977	22936	22939	22935
6	24740	24626	24642	24721	24650	24660	24695	24668	24569	24639	24499	24645	24743	24649
7	29515	29211	29402	29393	29392	29353	29365	29350	29344	29403	29297	29437	29368	29307
8	35023	34869	34928	35044	34917	35025	35049	35028	35014	34976	35026	34957	35038	34954
9	39634	39519	39574	39644	39605	39563	39627	39554	39533	39574	39568	39501	39568	39615
10	43000	42987	43049	42998	43026	43063	43000	42944	42952	42996	42975	42942	42936	42980
11	46055	46013	46097	46048	46067	46078	46032	46046	46003	46026	46037	46014	45957	45999
12	48962	48977	48992	48927	48988	48899	48920	48875	48910	48912	48915	48907	48798	48895
13	51021	51013	51031	51018	51016	50994	50978	51002	50982	51028	51003	51016	51011	50954
14	51026	51017	51038	51024	51030	51040	50971	51003	51045	51040	51060	51002	51019	51035
15	49077	48991	48922	48968	48977	48907	48992	49004	48944	48986	48943	48949	48948	49095
16	44895	44968	44799	44860	44994	44759	44863	44899	44936	45081	44804	44999	44919	44955
17	39470	39536	39527	39498	39465	39479	39438	39649	39509	39525	39495	39483	39418	39559
18	33804	33804	33900	33753	33824	33762	33821	33833	33813	33915	33716	33756	33749	33892
19	28512	28558	28698	28611	28536	28594	28628	28445	28628	28637	28525	28621	28491	28649
20	24285	24391	24379	24401	24365	24471	24403	24307	24433	24365	24414	24352	24314	24392

图 4-1 矩阵排列的数据

加载数据时点击 Load 按钮。数据量较大时, 加载数据需要一些时间。直到弹出“sucess!”对话框, 数据加载就完成了。数据读入成功后, 右侧 Raw Data 面板中可以查看数据的值。如图 4-2, 我们加载了一个 test.dzt 的文件。



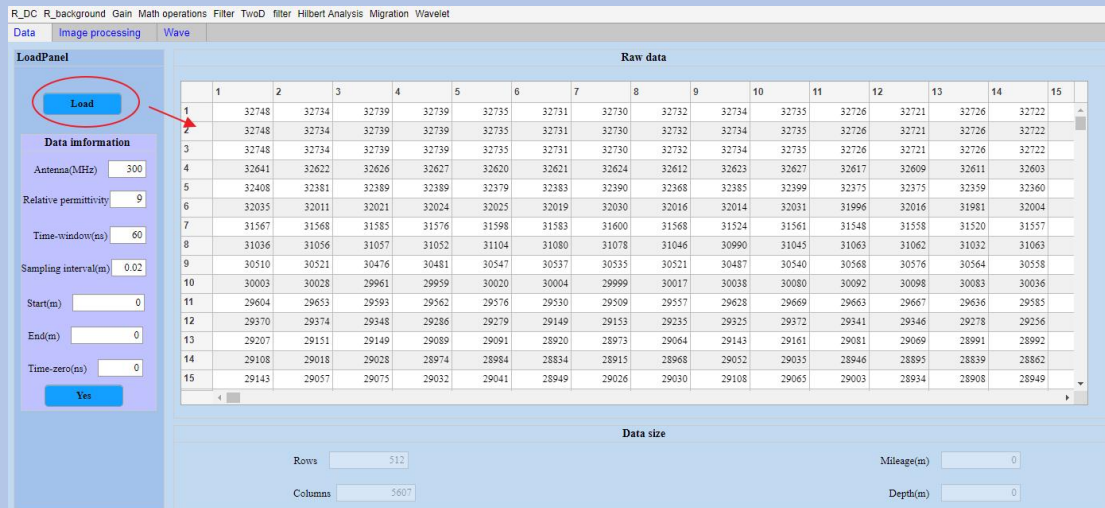


图 4-2 读入数据

## 4.2 数据参数设置

GPR 数据的参数设置是重要的，因为后续的数据处理算法可能会用到设置的参数。GPRlab 读入数据后，在 Data information 面板中必须设置参数。Data information 中包括了以下参数：

Antenna，天线频率（必填）；

Relative permittivity，相对介电常数（必填）；

Time-window，时窗（必填）；

Sampling interval，道间距，（如果等间距采集数据时填写，否则设为 0）；

Start，剖面起点位置，（默认为 0）；

End，剖面终点位置，（默认为 0）。

如果是自由采集（或称时间采集模式），请填写起始点和终止点位置，并将道间距设置为 0，软件在确认后会自动计算道间距。如果是等间距采集（或称距离采集模式），End 设置为 0，软件会自动计算终点的位置。

Time-zero，零点位置，（首界面位于时窗上的 0 点，默认为 0）。

如果是商业软件格式的数据，软件会自动导入 Time-window，其它参数用户自行设置。参数填写完成后，点击 Yes 按钮确认参数。如图 4-3，我们填写了 test.dzt 的参数（这个数据是自由采集的）。

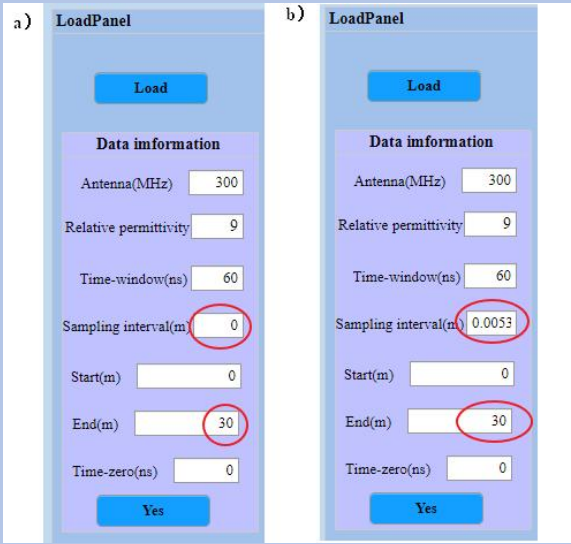


图 4-3 参数设置。a) 填入参数和 b) 确认参数后

当参数数据成功后，会有“Succeed！”对话框弹出，软件的表下方将显示读入数据的大小信息，包括：Rows（行数），Columns（列数），Mileage（里程），Depth（深度）。图 4-4 展示了 test.DZT 设置读入数据并设置参数后 Data 模块的结果。

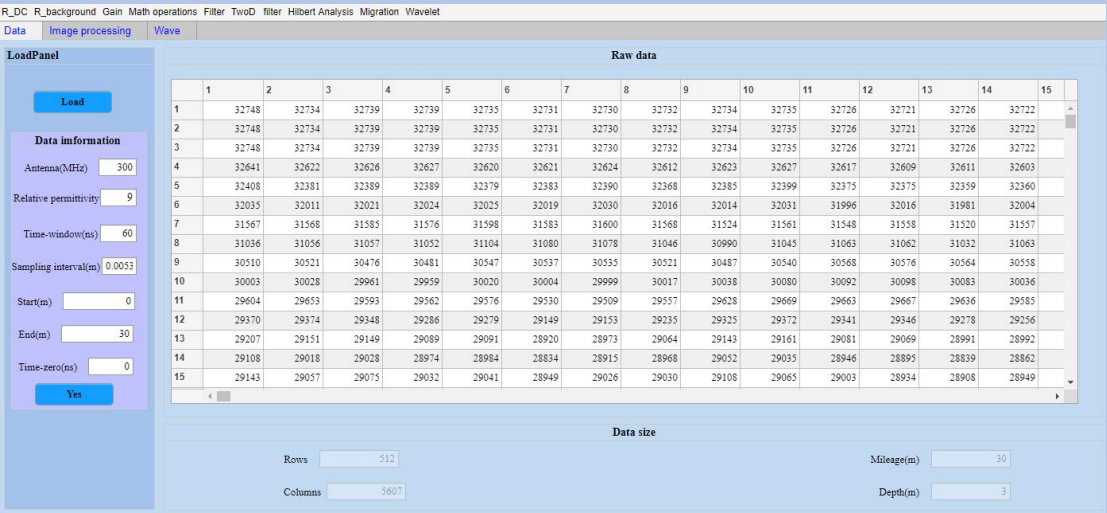


图 4-4 Data 模块设置成功

## 5 Image processing 模块—探地雷达数据处理

Image processing 模块（如图 5-1）用于对 GPR 数据进行处理。在 Data 模块中将数据和对应参数读入后，Image processing 右侧会显示原始数据的图像，其中左右纵坐标是 Time（时间）和 Depth（深度），横坐标是 Mileage（里程），图像中显示了整个剖面。图像区下部是显示设置和数据保存。图像左侧是数据处理流程表和数据流程调整按钮。

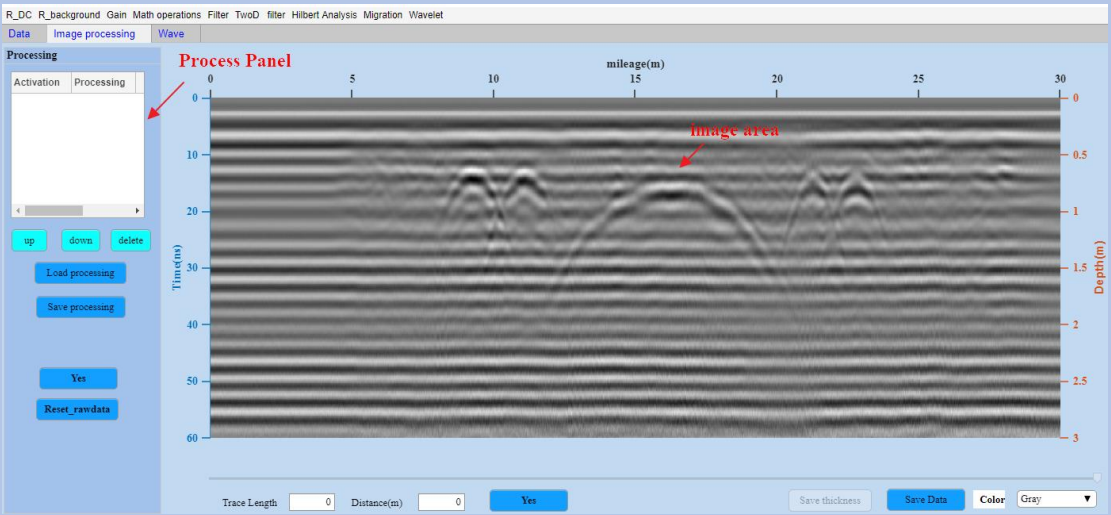


图 5-1 Image processing 模块

### 5.1 数据流程表

数据流程表中将保存处理步骤和对应参数，每个处理流程会占用表中一行。流程表中会显示用户添加的算法。

流程表每行的第一列为 Activation（激活），当添加流程后，该单元格会赋值 1，表示此流程激活。每行的第二列为，Processing（处理算法）。后面的每一列则是处理算法对应的参数。用户可以选中某个算法，用 up（上移），down（下移）和 delete（删除）按钮改变处理算法在流程中的顺序。设置好了流程，点击

Yes 按钮，数据就会被处理。等待一段时间后，处理完成的数据就会显示在右侧图像区域。如图 5-2，我们简单添加了 3 个流程用于处理 test.DZT。

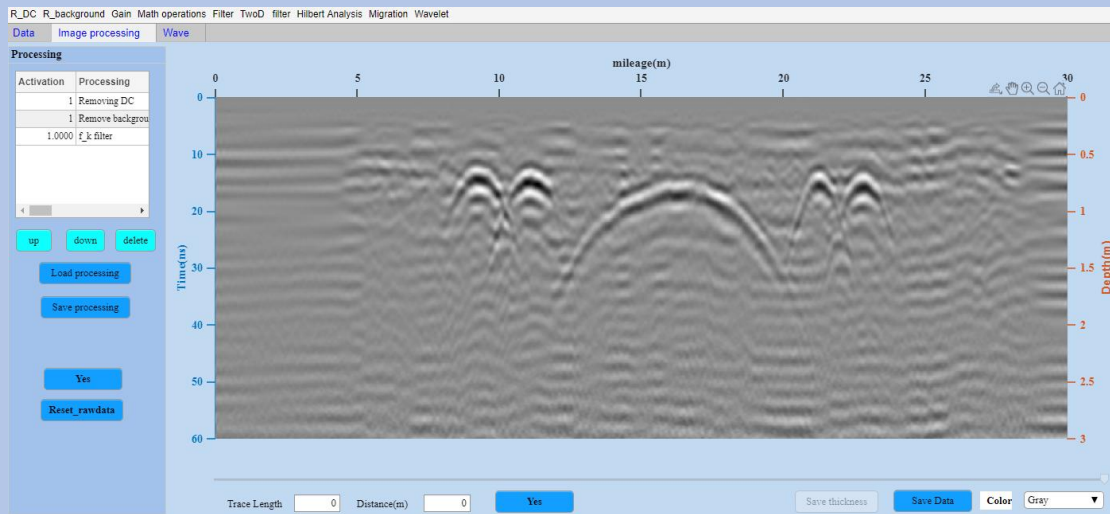


图 5-2 处理 test.DZT

## 5.2 处理流程操作

处理流程的操作主要包括移动处理流程的位置，保存及读入处理流程两类。选中某个流程后可以对该行的流程进行移动，以调整算法的执行步骤。

up，上移选中流程；

down，下移选中流程；

delete，删除选中流程；

Save processing，保存当前处理表中的处理流程，保存的格式有：txt、csv、xlsx、xls 和 dat。我们推荐保存为 csv 格式，方便用户用 office 软件打开。一个保存的流程如图 5-3

Load processing，加载已有的处理流程。

Reset\_rowdata，重置处理后的数据为原始数据。点击该按钮后，将图像区的数据重置为原始数据的整个剖面。这个按钮会使用户使用 GPRLab 非常方便。

Yes，应用流程表中的算法处理原始数据。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		1 Removing DC	0	0	0	0	0	0	0	0	
2		1 Remove background	1	200	0	0	0	0	0	0	
3		1 f_k filter	10	0.2	0	0	0	0	0	0	
4											
5											

图 5-3 保存的流程

**注意：**如果用户采用 **Matlab** 安装 **app** 的形式，那么处理后的数据和原始数据会直接传送到 **Matlab** 工作区，命名为 **Processing\_data** 和 **Raw\_data**。

5.3 图像设置和数据保存

图像默认灰度图显示整个剖面。图像区下部可以设置图像显示的色彩和剖面长度，其中按钮的功能是：

Trace Length，一幅图显示多少道数据，该选项与 Distance 关联变化；

Distance(m)，一幅图显示多少测线长度，该选项与 Trace Length 关联变化；

Yes，确认一幅图显示大小；

Color，色彩模式，GPRIlab 提供 Gray、Parula、Turbo、Jet、HSV 等 5 种色彩模式；

Save Data，保存处理后的数据，可选格式为 txt、csv、xlsx 和 dat。。

点击 Yes 按钮后，图像下的滑块将被激活。此外点击图像区一下，可以用键盘的左右方向键滑动图像，点击一次滑动一幅图的距离。图 5-4 显示了用 HSV 色彩模式的处理数据。图 5-5 显示了一幅图用 1000 道数据。



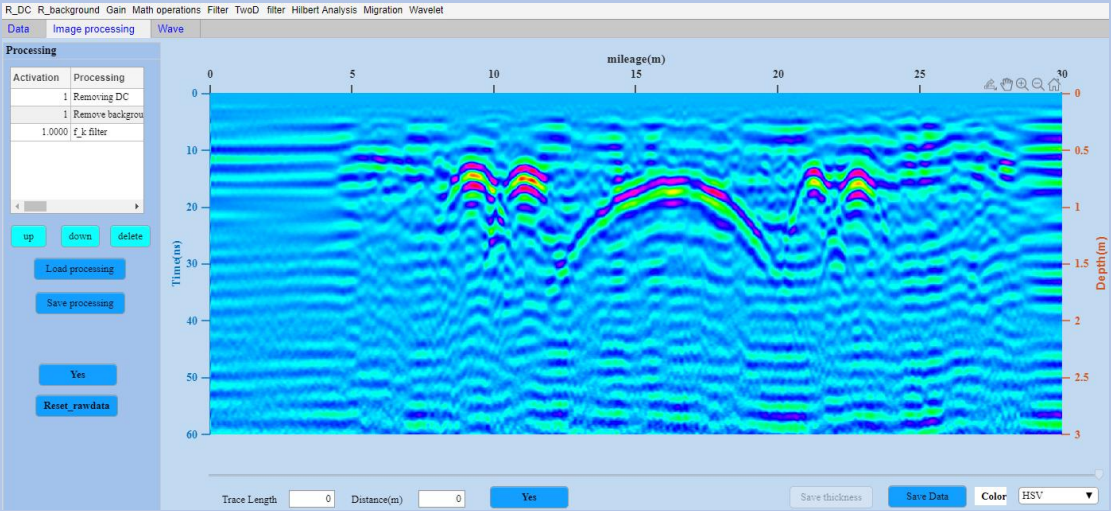


图 5-4 HSV 显示数据

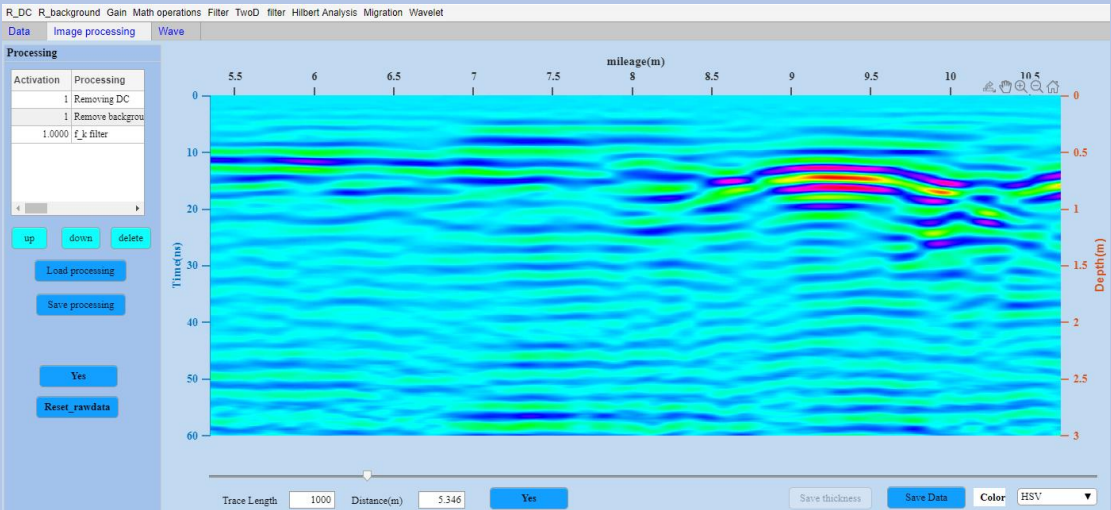


图 5-5 1000 道每幅图显示结果

注意：可以用 **Reset\_rowdata** 按钮重置为整个剖面显示。

## 6 Processing algorithm in menu—功能

### 6.1 R\_DC 去直流

一般情况下，GPR 发射的回波振幅应该是关于平均值对称分布。然而由于接收机电路不稳定，会显示出某些直流偏移，直流偏移是物理现象，与采样门的结构和组成有关。去直流即是去掉信号中的直流成分，当波形线偏移了零基线，将其校正到零基线，如图 6-1。其算法公式为：

$$u_{x,t}^* = u_{x,t} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u_{x,t+i} \quad (0-1)$$

式中： $u_{x,t}^*$  为去直流后的信号， $u_{x,t}$  为去直流前的信号。

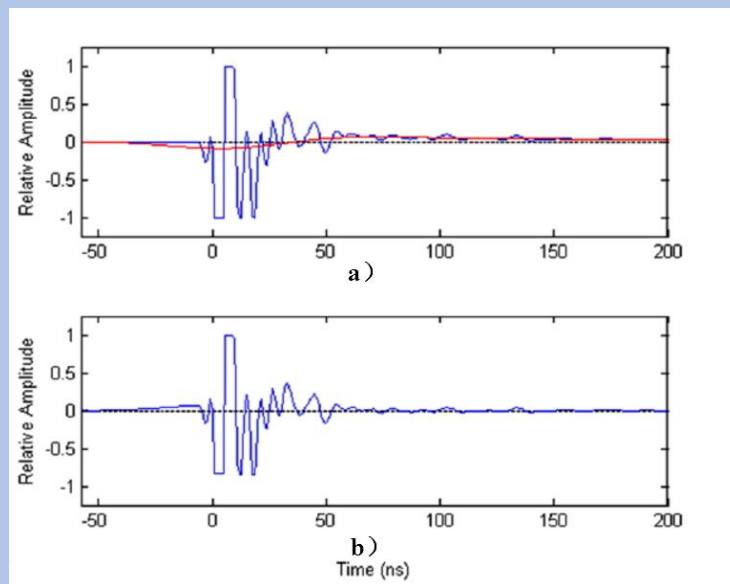


图 6-1 a) 去直流前和 b) 去直流后

### 6.2 R\_background 去背景

如图 6-2，GPRlab 提供了 4 种去背景的方式：Remove background、SVD、Dynamic window background 和 Remove file。



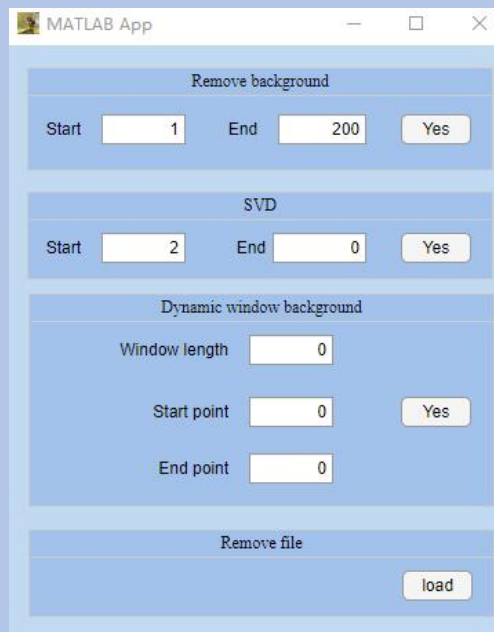


图 6-2 R\_background 去背景

### 6.2.1 Remove background 常规均值去背景

Remove background，选择部分剖面的平均作为每道数据的背景值。设置背景开始的 trace 和结束的 trace。这是最常用的方式。如果将整个剖面的平均作为背景，则 Start = 1，End 设置为整个剖面的总道数。注意：End>Start.

### 6.2.2 SVD 奇异性分解去背景

SVD，奇异性分解去背景。这是一种采用主成分分析方法（PCA）的去背景方法，SVD 将 GPR 数据分解为 N（采样数，例如 512 或 1024）个分量，其中开始的分量是主要信息，然后依次递减。Start 之前的分量被舍去，End 之后的分量被舍去。一般而言，Start 应该大于等于 2，但不要超过 5。End 建议默认为 0。

简单来说，主要分量就是强背景分量。因此被舍去就相当于去除了数据的背景。具体的数学过程，用户可自行查找，本手册不详述。

### 6.2.3 Dynamic window background 滑动窗口去背景

Dynamic window background, 滑动窗口去背景, 选择该道数据周围道平均值作为背景, 相当于有一个滑动的窗口对数据进行背景去除。该方法主要用于高频天线, 或水平向目标异常较多, 并不宜采用其他去背景方法时使用。比如检测钢筋时, 可以使用该方法。注意这种方法也会消除层位信息。

Window length : 滑动窗口的大小。

Start point : 需要处理的开始采样点。如果整道数据都要采用这种方法, Start point = 1.

End point : 需要处理的结束采样点。如果整道数据都要采用这种方法, Start point = N (采样点数)。

### 6.2.4 Remove file 文件去背景

Remove file, 文件去背景。加载一个背景数据, 背景可以通过和数据一样的格式读入, 背景为一单道数据。该处理方法适用与天线测试、数值模拟和空气耦合天线等特殊情况。

注意, 应用该方法时由于需要外部文件, 因此如果保存的处理流程中有该方法, 则保存的处理流程无效。

## 6.3 Gain 增益

增益是采用增益函数曲线, 对数据进行放大的过程。如图 6-3, GPRlab 提供了 5 种增益方式。

The screenshot shows a software interface for configuring gain settings. It consists of five stacked panels, each with a title bar and a 'Yes' button.

- Exponent gain:** Contains input fields for 'scale' (value: 1), 'start(times)' (value: 1), 'exponent' (value: 2), and 'end(times)' (value: 1000).
- Liner automatic gain:** Contains input fields for 'length' (value: 70) and 'Average value' (value: 3000).
- RMS automatic gain:** Contains an input field for 'length' (value: 40).
- GRMS automatic gain:** Contains an input field for 'length' (value: 40).
- Manual gain:** Contains input fields for 'points' (value: 1,512) and 'value(times)' (value: 1,100).

图 6-3 Gain 增益

### 6.3.1 Exponent gain 指数增益

Exponent gain, 指数增益是将原始信号乘对应的指数增益函数。因此参数的设定是为了指定这个增益函数:  $y = scale * x^{exponent}$  .

scale, 指数增益前的倍数, 不可为 0;

exponent, 指数, 不可为 0;

start, 起始采样点增益的倍数, 不可为 0;

end, 结束采样点增益的倍数, 不可为 0。

说明: 算法利用 start 和 end 获取 x 的值。

### 6.3.2 Automatic gain 自动增益

#### 1) Liner Automatic gain 自动增益

线性自动增益, 算法首先计算一定窗口范围内振幅绝对值的平均, 然后根据

设置的“Average value”计算出该窗口内的增益值，使得窗内幅值绝对值的平均达到设定值。窗口的大小即为参数“length”，窗口选取越小，增益曲线越柔和。选定的窗口在在每道数据从开始向末尾滑动的过程中，相邻的两个窗口之间存在重叠，其重叠率为 50%。Length 按照采样点数目确定，一般情况下，可以设置为总采样点数的 1/7。

## 2) RMS Automatic gain 自动增益

均方值自动增益，算法按照当前采样点及增益窗口（当前采样点为中心）计算均方值，然后用当前采样点幅值除以该均方值。窗口的大小即为参数“length”，窗口越小对高振幅约束越强，窗口越大对低振幅约束越强。Length 是窗口含有的采样点数。

## 3) GRMS Automatic gain 自动增益

高斯-均方值自动增益，算法按照当前采样点及增益窗口（当前采样点为中心）计算幅值平方，然后用高斯窗口进行加权，计算均方。最后用当前采样点幅值除以该均方值。窗口的大小即为参数“length”，窗口越小增益越强，窗口越大增益越弱。Length 是窗口含有的采样点数。

### 6.3.3 Manual gain 人工增益

人工增益功能的增益函数为分段线性函数。断点位置“points”和位置对应的增益倍数“value”，用户可自由设置。设置方式为用逗号分隔或空格分隔。

应该注意的是，第 1 点和最后一个采样点一定要设置在数组中。

## 6.4 Math operations 数学运算

如图 6-4，Math operations，数学运算功能将对每道数据提供基本数学运算，包括加、乘、绝对值、梯度和开方 5 种运算。

Plus		Multiplication	
value	0	times	1
Yes		Yes	

Absolute		Square	
times	1	times	1
Yes		Yes	

Gradient			
<input checked="" type="radio"/> down <input type="radio"/> up	scale	1	points
			1
Yes			

图 6-4 Math operations 数学运算

### 6.4.1 Plus 加

Plus，对每个采样数据加一个指定数值“value”。该方法可用于调整数据的大小对比度。

### 6.4.2 Multiplication 乘

Multiplication，对每个采样数据乘一个指定数值“times”（不可设置为0）。该算法属于一种增益方式，对原始数据进行了常数增益。该方法可以配合其它数学运算方法。

### 6.4.3 Absolute 绝对值

Absolute，绝对值，计算每个采样数据的绝对值后再乘以“times”（不可设置为0）。

### 6.4.4 Gradient 梯度

在一道数据中，将每个采样点数据减去距它一定距离（“points”）的采样数据，再乘一个系数“scale”。距离和系数用户可自由设定，分别记为  $r$  和  $a$ ，则该运算表示为

$$F(x) = scale(f(x) - f(x - points))$$

GPRLab 中提供向上或向下进行梯度运算。

### 6.4.5 Square 开方

Square, 开方, 对于每个采样数据, 计算其平方根, 然后乘一个“times”参数 (不可设置为 0)。该运算可削弱较强的反射, 一定程度上增强较弱的反射, 运算后的数据各个反射波幅度差异减小, 可达到数据均衡的目的。

## 6.5 Filter 一维滤波

如图 6-5, GPRLab 中提供的一维滤波包括垂直滤波、水平滤波、反褶积。采用的滤波方法主要为频率域滤波、FIR 等波纹滤波和 IIR 切比雪夫 2 型滤波。反褶积采用预测误差反褶积算法

The screenshot shows the 'Filter' menu in GPRLab, divided into three sections:

- Vertical filtering:**
  - Radio buttons: ☒ Frequency domain filtering, ☐ FIR, ☐ IIR.
  - stop1(MHz): 150
  - pass1(MHz): 300
  - pass2(MHz): 600
  - stop2(MHz): 850
  - Yes button.
- Horizontal filtering:**
  - Radio buttons: ☒ FIR, ☐ IIR.
  - stop1(1): 3
  - pass1(1): 5
  - pass2(1): 10
  - stop2(1): 15
  - Yes button.
- Predictive deconvolution:**
  - Length(ns): 40
  - Lag(ns): 35
  - Yes button.

图 6-5 Filter 一维滤波

### 6.5.1 Vertical filtering 垂向滤波

Vertical filtering, 垂向滤波, 是指对数据的时间方向进行滤波, 这也是一般情况下 GPR 数据处理必须的一步。对于一个信号, 改变其各频率分量的相对大小, 或者全部消除某些频率分量的过程称为滤波。常用的滤波器专门设计成无失真地通过某些频率, 而显著地衰减掉或消除掉另一些频率。无失真通过的频率范

围成为通带,需要衰减或消除的频率范围称为阻带。通带的最低频率为低通频率,通带的最高频率为高通频率。

在实际野外测量中,为了保留尽可能多的信息,常采用全通的记录方式,这样有效波和干扰波就被同时记录下来。为了去除数据中的干扰信号,需要采用滤波的方式,根据数据中有效信号和干扰信号频谱范围的不同来消除干扰波。如果有效信号的频谱分布与干扰信号的频谱有一个较明显的分界,那么可根据具体的干扰信号的分比,将滤波器的通带设计为有效信号主要频谱部分,而将信号频带外的干扰噪声频带滤除,得到滤波以后的结果。在采集数据中,对于每道数据,先对其进行傅里叶变换,选取低通频率和高通频率之间的频谱,即通带频谱,进行反傅里叶变换,得到滤波后的数据。

Frequency domain filtering, 频率域理想滤波,将数据 FFT 转换到频率域,乘上一个矩形窗,然后再 IFFT 得到滤波后的数据。但是注意的是,矩形窗由于在时域的对应 sinc 函数,无限延伸。当在频域加窗后,IDFT 实际上只取了主值上的一部分,这样当滤波后,会在信号的首末位置形成震荡(高频信号不可能直接变为 0),信号首末位置会失真。这对于垂向来说这点影响不大,但是对于水平方向的波数域来说,就会造成前后图像的不连续和突变。

FIR,有限长冲击脉冲滤波,滤波器类型为等波纹,阻带衰减为 40dB,通带增益为 0dB,通带波纹震荡上限为 1dB。

IIR,无限长冲击脉冲滤波,滤波器类型为切比雪夫 2 型,阻带衰减为 40dB,通带增益为 0dB,通带波纹震荡上限为 1dB。

在 FIR 和 IIR 滤波器中,需要设置阻带低频(stop1),通道低频(pass1),通带高频(pass2),阻带高频(stop2),如图 6-6.



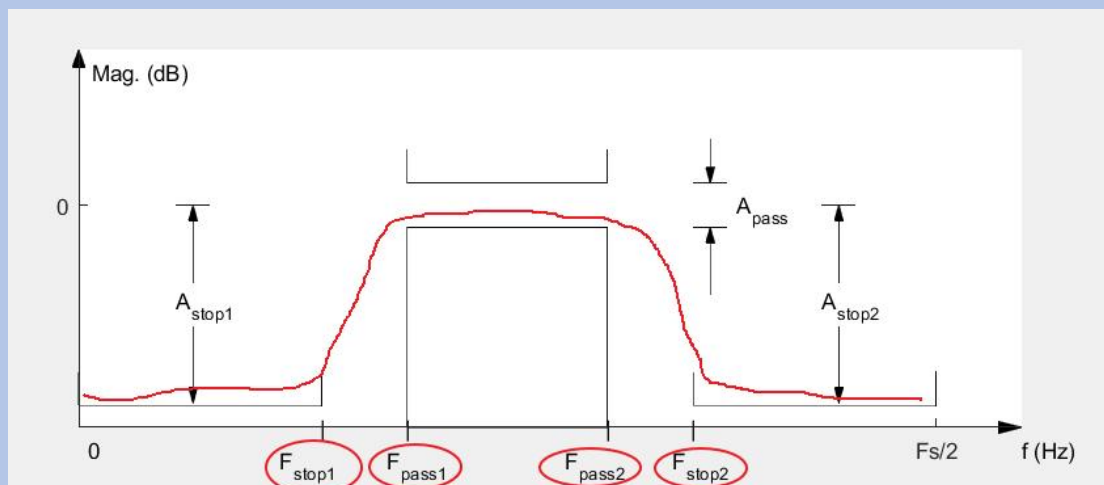


图 6-6 滤波参数示意图

### 6.5.2 Horizontal filtering 水平向滤波

滤波方法同上节一致,方向为水平方向,波数域的频率是指每米的波长个数,频率最大值为:  $0.5/\text{Sampling interval}$ 。需要注意的是,水平向的滤波往往会消除层位信息,而凸显水平向上的变化信息。用户需要理解水平方向的频率的意义才能熟练使用该方法。

### 6.5.3 Predictive deconvolution 预测反褶积

预测误差反褶积,采用维纳滤波的方法提供的一种垂向预测滤波方法。需要设置算子长度  $\text{Length}$ , 预测步长  $\text{Lag}$ , 其中算子长度  $\text{Length}$  应小于  $1/2$  时窗,  $\text{Lag}$  应小于算子长度。作为多次波滤波时,  $\text{Lag}$  应大于一次反射在时窗中的位置。一般情况下,  $\text{Length}$  可以设为天线主频周期的 3 倍。如果数据中含有很强的水平干扰,而又想保留一些层位信息,可以采用该方法。

## 6.6 TwoD filter 二维滤波

二维滤波是针对整个二维数据的操作。GPRlab 提供三种滤波方式: 均值滤波、中值滤波、 $f\_k$  二维带通滤波、EMD 和 VMD 滤波, 如图 6-7 所示。

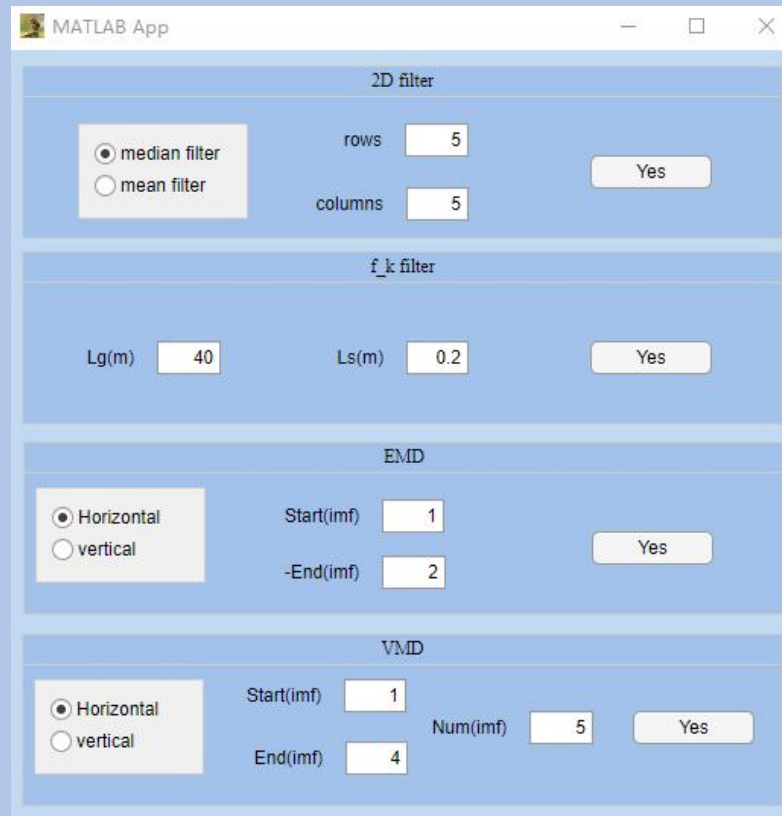


图 6-7 TwoD filter 二维滤波

### 6.6.1 median filter 中值滤波

该方法将 GPR 剖面看作一副二维图像，用图像处理的思想进行滤波。中值滤波对每一点的采样值，将其一定大小邻域窗口内的所有采样点的采样值进行排序，取排在最中间的值作为该点的新采样值。中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术，特别是对于孤立的噪声点。具体方法是用“rows”×“columns”二维滑动模板，对于每个数据点，将二维滑动模板的中心置于该点，对模版内采样值按照大小进行排序，生成单调上升（或下降）的为数据序列，取序列中间位置的值作为该点的值，从而得到最终的滤波后数据。该算法对数据中的高频随机噪声有较好的处理效果，同时能在一定程度上保留图像的细节。

### 6.6.2 mean filter 均值滤波

该方法将 GPR 剖面看作一副二维图像，用图像处理的思想进行滤波。均值滤波对每一点的采样值，将其一定大小邻域窗口内的所有采样点的采样值进行平均，取平均作为该点的新采样值。具体方法是用“rows” $\times$ “columns”的二维滑动模板，对于每个数据点，将二维滑动模板的中心置于该点，对模版内采样值求平均，取平均作为该点的值，从而得到最终的滤波后数据。该算法应该说对数据具有一定的平滑效果，当然也会使图像变得模糊，失去细节和轮廓。参数设置越大，平滑效果越好，图像越模糊。

### 6.6.3 F-k filter 二维频域带通滤波

F-k 滤波是一种典型的二维滤波方式，通过二维傅里叶变换将图像分解到二维频率域，在二维频域进行带通滤波，由于 GPR 的回波特点，杂波主要表现在横向上的变化。因此一般采用 k 向带通滤波的方式进行滤波设置。

滤波参数为  $L_g(m)$  横向低频信号长度， $L_s(m)$  为系统微震动的最大位移。其中  $L_g$  代表这横向的低频部分，一般可以选择剖面长度的 1/2 附近， $L_s$  在未知的情况下，可以选择一个较小的值，例如 10 倍道间距。

F-k 滤波和水平向滤波的方式相似，会压制水平方向的低频信息，这意味着，该算法会减弱多次波，同时压制层位这种水平方向的低频干扰。

### 6.6.4 EMD filter 经验模态分解滤波

EMD 是一种新的时频分析方法，将信号分解为不同的层次的模态分类 IMF，IMF 区别于基于三角函数的分解方式，不是由基函数来构造分量，而是将复杂信号分解为包含原信号不同时间尺度特征的包络分量。EMD 首先抽取 IMF1 然后逐层分解到 IMF<sub>n</sub>，最后剩下残差。因此浅层的 IMF 代表高频变化，而底层 IMF 代表低频变化。在 GPR 中 EMD 的分解可以朝着水平方向也可以朝着垂直方向。在实际的使用中，我们发现 EMD 在水平方向滤除多次反射的能量要优于 F-k 滤

波。该方法要求设置 3 个参数。

首先用户需要选择水平 Horizontal 或者垂直 Vertical 方向。

Start 代表保留的起始 IMF 分量，Start 不能超过 10。

-End 代表保留的结束 IMF 分量是倒数第几个 IMF。

### 6.6.5 VMD filter 变分模态分解滤波

VMD 是一种比 EMD 更先进的相似方法，VMD 分解获得的 IMF 是有限带宽的信号，。因此 VMD 的分解要比 EMD 更加规范，并且可以指定 IMF 的个数。但是其运算复杂度很高。用户们在运用 EMD 和 VMD 方法的时候，需要事先了解这两种方法的基本理念。VMD 需要设置 4 个参数。

首先用户需要选择水平 Horizontal 或者垂直 Vertical 方向。

Start 代表保留的起始 IMF 分量，Start 不能超过 10。

End 代表保留的结束 IMF 分量。

Num 代表 VMD 分解的 IMF 个数。

注：通常 VMD 耗时较大，建议先使用 EMD 测试信号的处理效果，再用 VMD 方法替换 EMD。

## 6.7 Hilbert Analysis 希尔伯特属性分析

GPR 的 A-Scan 是一个实数信号  $x(t)$ ，它可以用极坐标的形式表示出来：

$$x(t) = A(t) \cos \varphi(t) \quad (0-2)$$

其中  $A(t)$  表示信号的包络瞬时变化（瞬时振幅）， $\varphi(t)$  表示信号的相位变化（瞬时相位）， $\varphi'(t)$  表示信号的频率变化（瞬时频率）。Hilbert Analysis 就是求取这三瞬时属性的方法。要求取瞬时属性，需要构建一个希尔伯特解析函数：

$$X(t) = x(t) + i\hat{x}(t) \quad (0-3)$$

其中  $\hat{x}(t)$  为  $x(t)$  的 Hilbert 变换。根据上式就可以计算出瞬时属性。GPRlab 提供希尔伯特瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率的计算，无需输入参数。

## 6.8 Migration 偏移/合成孔径成像

如图 6-8，Migration 目前提供了 Synthetic Aperture Radar (SAR) 和 FK 偏移算法。

The screenshot shows the 'Migration' menu with two sections: 'SAR' and 'F-K migration'. The 'SAR' section has input fields for 'piont' (512), 'Permittivity\_1' (1), 'alpha' (60), and 'Permittivity\_2' (9), with a 'Yes' button. The 'F-K migration' section has an input field for 'Permittivity' (9) and a 'Yes' button.

图 6-8 Migration 偏移

### 6.8.1 SAR 合成孔径成像

GRPlab 提供合成孔径聚焦算法（SAR）用于偏移处理，算法可用地面耦合天线和空气耦合天线采集数据，该算法类似于时域 BP 算法。在该方法中，介质被分为 2 层进行合成孔径聚焦。其理论部分可参见《车载 GPR 数据合成孔径聚焦成像研究》（熊洪强，2018）。该方法具有较好的成像效果，算法对参数并不敏感。该算法要求输入 4 个参数。

**Point:** 层界面处采样点数，如想要以均质模型处理地面耦合天线数据，可以设置为最大采样点数。对于空气耦合天线数据，则设置为目标界面位置对应的纵向采样点。该参数不可为负数，

**Alpha:** 天线波束角（角度制），该值是孔径长度最重要的控制参数，应根据天线性能设置，在满足性能要求下，该参数越小，边缘效应越小。如天线波束角未知，可尝试变化，得到最佳的图像效果可推测天线波束角。该参数取值范围为（0,360）。

Permittivity\_1:第一层介质的相对介电常数，如为空气则应取 1，该参数取值范围为 [1,81].

Permittivity\_2:第二层介质的相对介电常数，如为空气则应取 1，该参数取值范围为 [1,81].

### 6.8.2 F-K migration F-K 偏移

设置均匀空间的介电常数。该算法的可以作为偏移的常规方法。

## 6.9 Wavelet 小波分析类方法

如图 6-9，本软件 1 维和 2 维的小波分析工具，具体包括 1 维度离散小波去噪、2 维离散小波去噪、1 维连续小波滤波。

The figure displays a software interface for wavelet analysis, organized into three distinct sections within a light blue frame. The top section, titled 'OneD-dwt', contains a single 'Yes' button. The middle section, titled 'TwoD-dwt', also contains a single 'Yes' button. The bottom section, titled 'OneD-cwt', features six input fields arranged in two columns: 'LF (MHz)', 'HF (MHz)', 'LT (ns)', 'HT (ns)', 'Start track', and 'End track'. Each of these fields is currently set to the value '0'. Below these input fields is a 'Yes' button.

图 6-9 Wavelet 小波分析

### 6.9.1 OneD-dwt 一维离散小波去噪

采用 sym4 小波进行一维离散小波去噪。

### 6.9.2 TwoD-dwt 二维离散小波去噪

采用 sym4 小波进行二维离散小波去噪。

### 6.9.3 OneD-cwt 一维连续小波滤波

采用 Morse 小波进行一维连续小波（CWT）分析，并在给定的频率上下限范围内，作用于部分时窗和部分剖面，滤除处于设定频率范围内的信号分量。该方法和带通滤波相反，相当于滤除带内干扰。

LF（MHz）：移除频带的截止低频；

HF（MHz）：移除频带的截止高频；

LT（ns）：起始时间；

HT（ns）：终止时间；

Start track：剖面开始位置的 trace；

Start track：剖面结束位置的 trace。



## 7 Wave 视图—波形分析视图

Wave 波形分析视图, 可以针对探地雷达 A-Scan 进行时域波形分析和频谱分析, 便于用户对原始数据波形, 处理后波形变化有比较直观的了解。波形图具有直接放大、缩小、保存数据, 显示数据点数据等功能。

### 7.1 波形分析

如图 7-1, Wave 波形分析视图上部显示时域信号波形, 下部显示半频谱 (最大频率为  $f_s/2$ )。之所以显示半频谱, 是因为离散傅里叶变换 DFT 是对称的。支持分析波形类型有四种:

Raw data, 原始数据, 绿色线条;

Processed data, 处理后的数据, 红色线条;

Background, 背景数据, 采用均值背景, 黑色线条;

Difference, 原始数据与背景数据的差值, 蓝色线条。

在显示波形之前需要设置参数:

Track number, 道数, 选择观察具体的哪一道数据;

Background start, 背景的起始道;

Background end, 背景的终止道;

DC+YES, 频谱图中保留直流分量;

DC+No, 频谱图中去除直流分量;

注意: 之所以要考虑直流分量是否保留, 是因为原始数据和背景数据可能会有很大的相对直流值, 这样其它部分的频谱对比起来就很弱。这里建议选择

“NO”。GPRlab 不仅可以实现对数据的波形进行分析，也可以保存波形和频谱数据，具体格式和前面其它数据的保存一致，这里不再赘述。

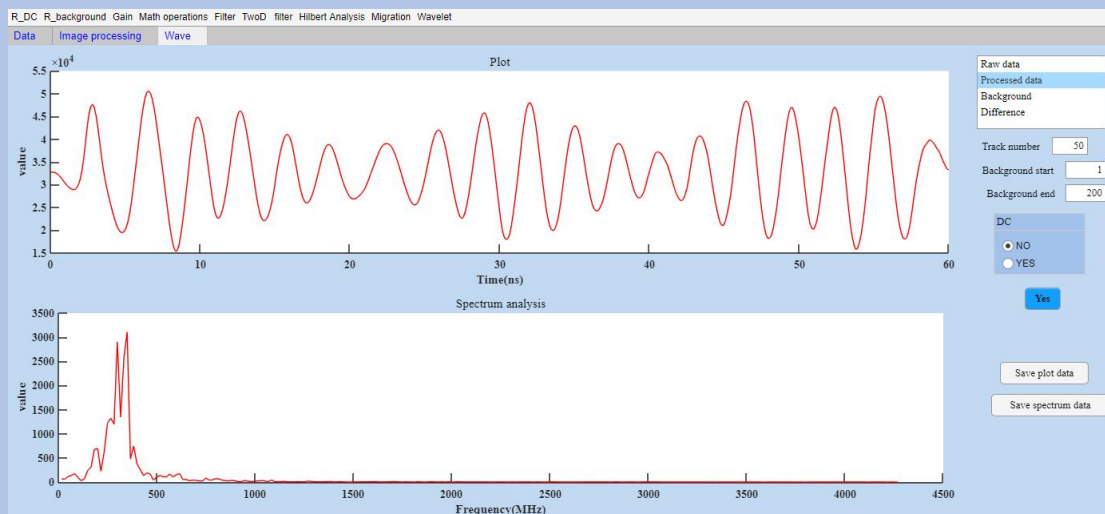


图 7-1 Wave 模块

## 7.2 波形图操作

GPRlab 提供的波形图交互操作是多样化的，鼠标放在对应的波形图或者频谱图上，右上角会出现操作选项，可以选择保存、刷亮（如）、缩小、放大。刷亮是指能够将图像上一部分点刷亮显示，如图 7-2：

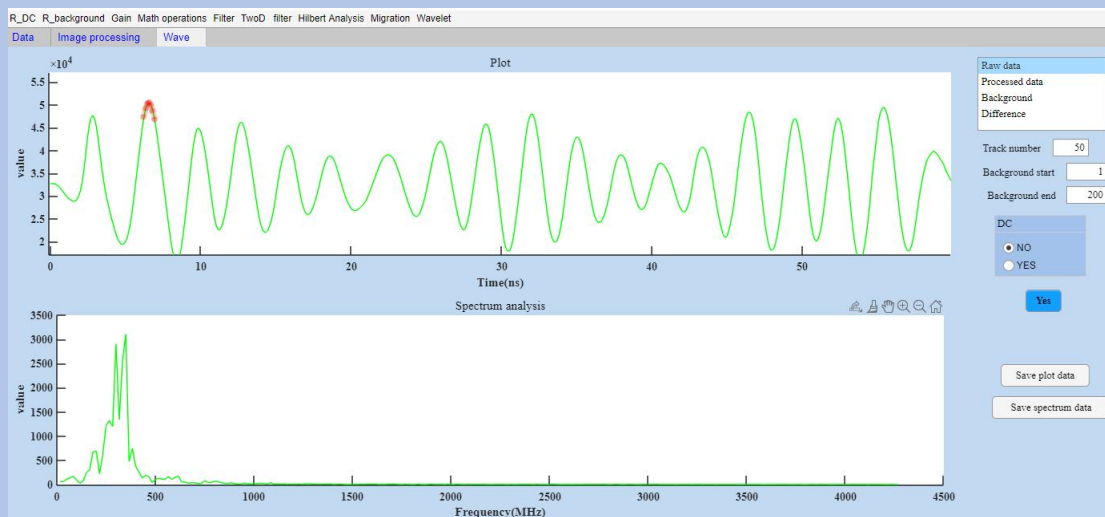


图 7-2 刷亮数据

刷亮后的图像右键可以弹出属性框，还可以执行复制、替换、删除数据等操作

作。将鼠标直接放在图线上点击小灰点，可以将该点的横纵坐标直接显示在一个小方框内，小方框可以用鼠标上下左右改变位置，如图 7-3。

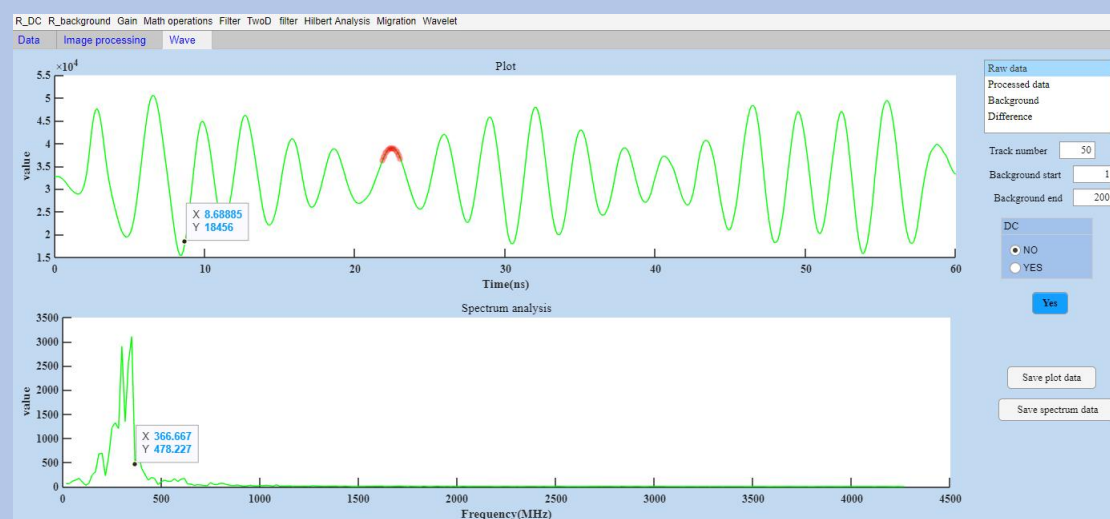


图 7-3 显示数据

## 8 Time-frequency analysis 视图—时频分析视图

Time-frequency analysis 视图，可以针对探地雷达 A-Scan 进行时频分析，该视图的基本设置和 Wave 视图一致。Time-frequency analysis 视图中，我们提供了广义相移 ST 作为常规的时频分析方法，并提供了同步压缩广义相移 ST 作为其在同步压缩域的高分辨率对照。广义相移 ST 和同步压缩广义相移 ST 是我们新提出的时频分析方法，这两种方法可以认为是 ST(S 变换)和 SSST（同步压缩 S 变换），或者 CWT（小波变换）和 SS-CWT(又称为 SST，同步压缩变换)的变体。用户可以根据已经公开的 ST、SSST、CWT，SS-CWT 的经验来使 Time-frequency analysis 视图。需要设置的参数包括保留的频点个数 Num\_Fpoints(<采样数/2)和广义参数 General parameter。

如图 8-1 展示了第 500 道数据的时频分析结果。

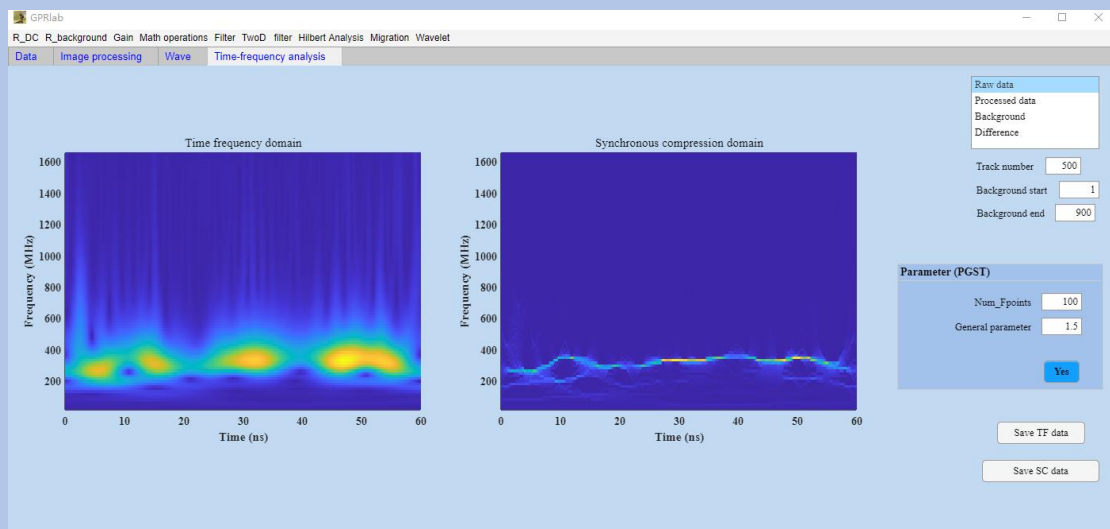


图 8-1 时频分析

如图 8-2 展示了当保留频点为 200 时的时频图。该数据 512 采样。

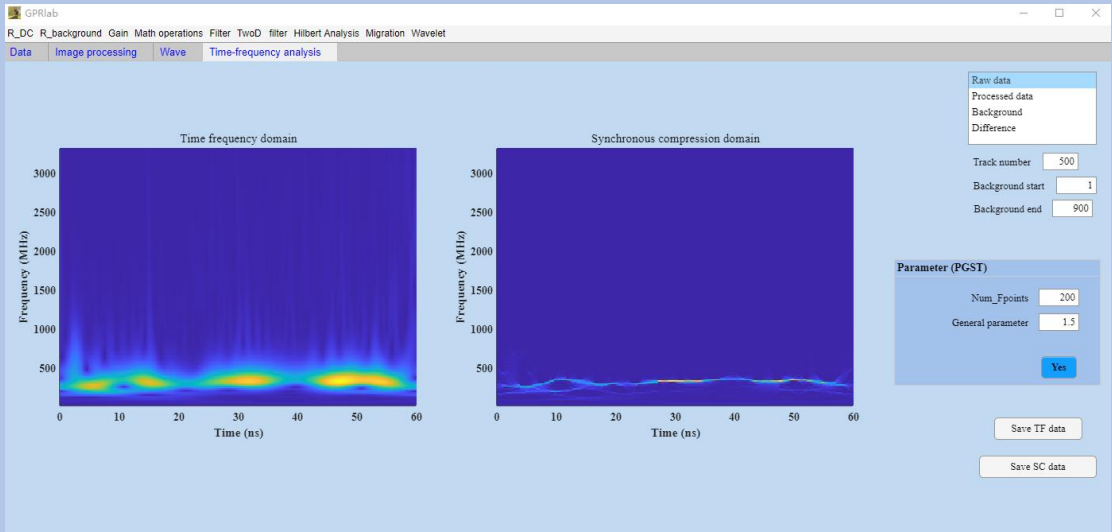


图 8-2 Num\_Fpoints = 200 的时频图

如图 8-3 展示了当 General parameter = 0.6 时的时频图。可以观察到时间分辨率提高而频率分辨率降低。

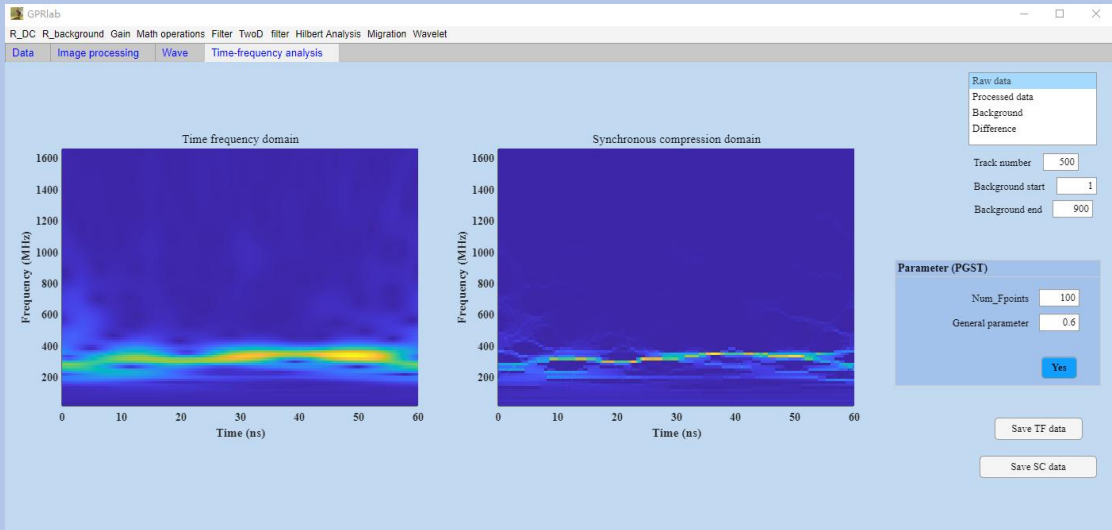


图 8-3 General parameter = 0.6 的时频图

## 9 Examples 例子

### 9.1 Case1 案例 1

案例 1 的数据来自于 GSSI 设备自由采集模式测试一座拱桥（30m）的数据，拱桥有 4 个拱形。

(1) 读入数据，如图 8-1 可以看到该数据是 512 采样的，并且具有 5607 个 traces。

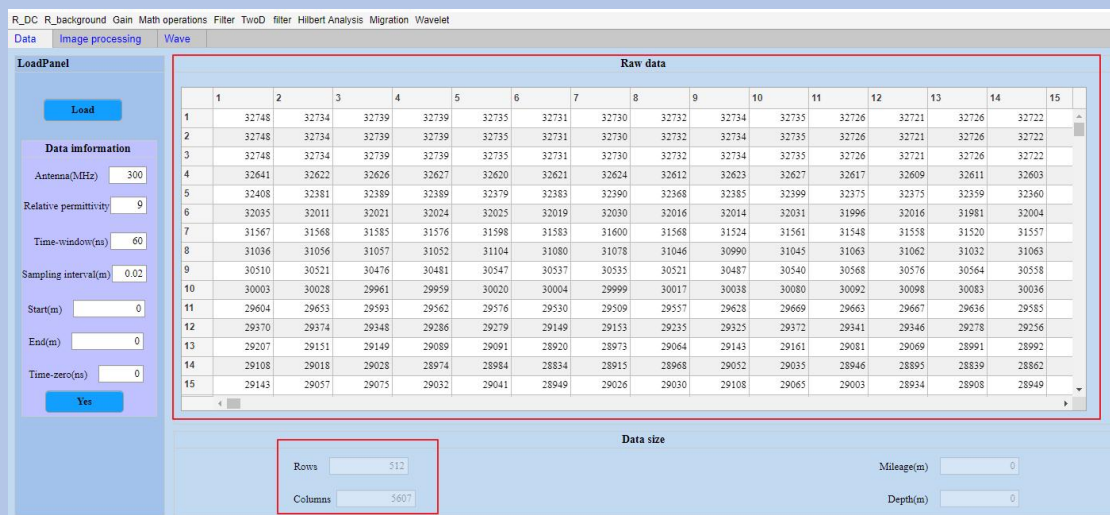


图 9-1 Case1 加载数据

(2) 设置参数，如图 8-2a ,由于采用自由采集，因此 Sampling interval 设置为0,End 设置为30. 点击 Yes 后，GPRlab 自动计算了 Sampling interval 值 0.0053, 如图 8-2b .如图 8-3 之后我们可以看到 Mileage 变为了 30m, 而 Depth 根据介电常数计算出来，为 3.182m。

**a) Data information**

Antenna(MHz)

Relative permittivity

Time-window(ns)

Sampling interval(m)

Start(m)

End(m)

Time-zero(ns)

**b) Data information**

Antenna(MHz)

Relative permittivity

Time-window(ns)

Sampling interval(m)

Start(m)

End(m)

Time-zero(ns)

图 9-2 Case1 设置参数。a)输入参数和 b) 确认参数后

**LoadPanel**

**Data information**

Antenna(MHz)

Relative permittivity

Time-window(ns)

Sampling interval(m)

Start(m)

End(m)

Time-zero(m)

**Raw data**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	32748	32734	32739	32739	32735	32731	32730	32732	32734	32735	32726	32721	32726	32722	
2	32748	32734	32739	32739	32735	32731	32730	32732	32734	32735	32726	32721	32726	32722	
3	32748	32734	32739	32739	32735	32731	32730	32732	32734	32735	32726	32721	32726	32722	
4	32641	32622	32626	32627	32620	32621	32624	32612	32623	32627	32617	32609	32611	32603	
5	32408	32381	32389	32389	32379	32383	32390	32368	32385	32399	32375	32375	32359	32360	
6	32035	32011	32021	32024	32025	32019	32030	32016	32014	32031	31996	32016	31981	32004	
7	31567	31568	31585	31576	31598	31583	31600	31568	31524	31561	31548	31558	31520	31557	
8	31036	31056	31057	31052	31104	31080	31078	31046	30990	31045	31063	31062	31032	31063	
9	30510	30521	30476	30481	30547	30537	30535	30521	30487	30540	30568	30576	30564	30558	
10	30003	30028	29961	29959	30020	30004	29999	30017	30038	30080	30092	30098	30083	30036	
11	29604	29653	29593	29562	29576	29530	29509	29557	29628	29669	29663	29667	29636	29585	
12	29370	29374	29348	29286	29279	29149	29153	29235	29325	29372	29341	29346	29278	29256	
13	29207	29151	29149	29089	29091	28920	28973	29064	29143	29161	29081	29069	28991	28992	
14	29108	29018	29028	28974	28984	28834	28915	28968	29052	29035	28946	28895	28839	28862	
15	29143	29057	29075	29032	29041	28949	29026	29030	29108	29065	29003	28934	28908	28949	

**Data size**

Rows

Columns

Mileage(m)

Depth(m)

图 9-3 Data 模块完成设置

(3) 切换到 Image processing 模块，可以观察到原始数据如 图 8-4。



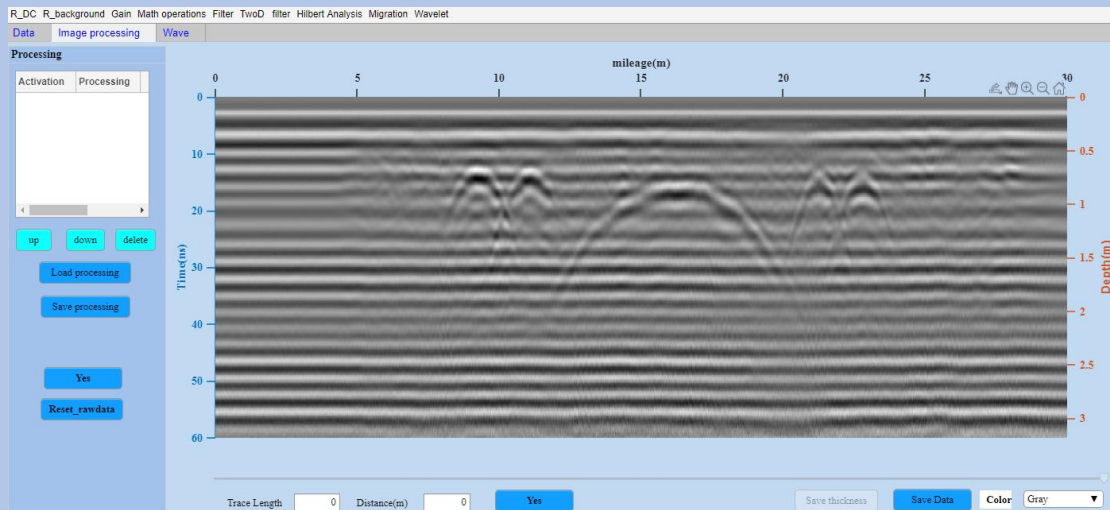


图 9-4 原始数据

(4) 首先我们应用了  $R\_DC$  算法防止设备的直流干扰，然后我们应用  $R\_background$  中的 Remove background 算法，将背景数据设置为 1-800 道。这是因为这段数据是来自于桥头仪器静止状态下的数据。最后，通过我们观察，我们认为搭载的空气耦合天线与地面之间强烈的多次反射干扰了整个剖面，我们选择了 TwoD filter 中的  $f\_k$  filter 方法去除多次波。Lg 设置为 10（剖面的 1/3），Ls 保持默认。处理流程设置如图 8-5。

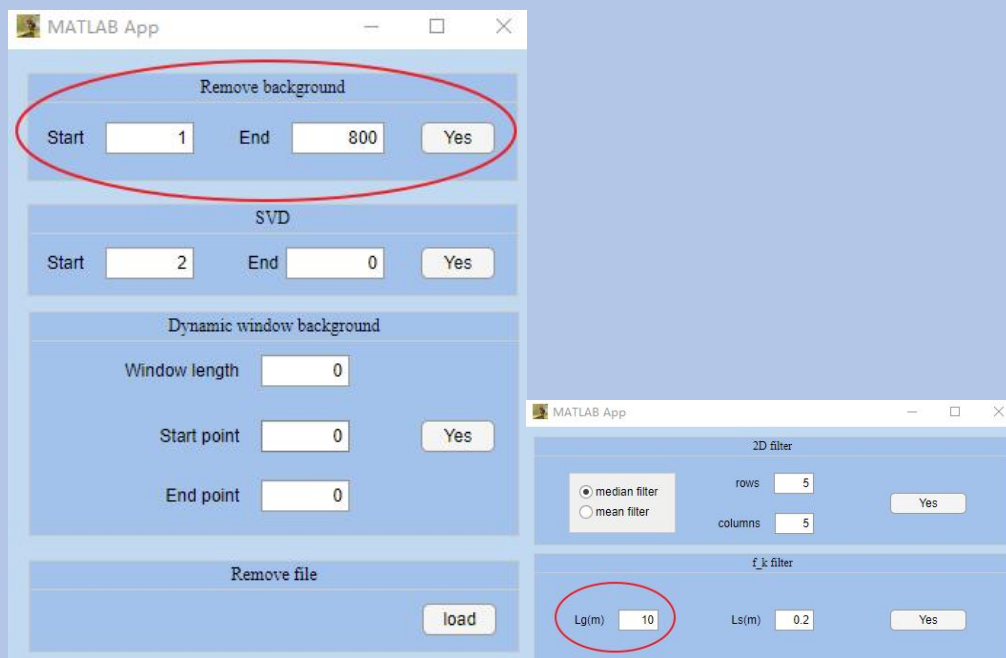


图 9-5 Case1 处理流程设置

(5) 点击 Yes，完成数据处理，调整颜色获得如图 8-6 的处理结果

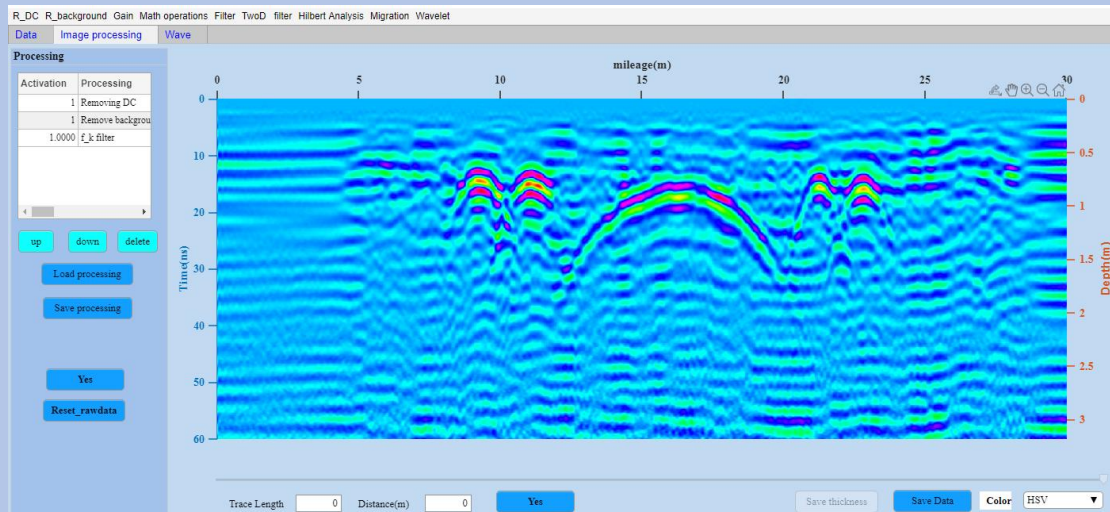


图 9-6 Case1 的处理结果

本案例的数据和处理流程保存在 examples/Case1 中, 用户也可以直接加载或查看我们提供的处理流程。

## 9.2 Case2 案例 2

案例 2 的数据来自于一个 train-mounted GPR 设备距离采集模式在一座高铁隧道中获得的部分数据。

(1) 读入数据, 如图 8-7 可以看到该数据是 512 采样的, 并且具有 1600 个 traces。

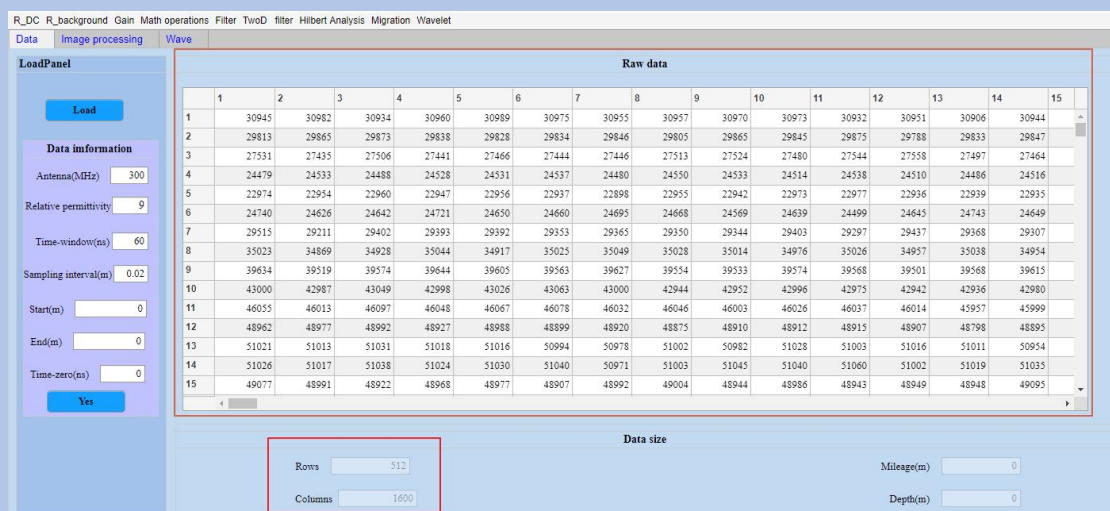


图 9-7 Case2 加载数据

(2) 设置参数, 如图 8-8a, 由于采用距离采集, 因此 Sampling interval 设置为 0.02, End 设置为 0。点击 Yes 后, GPRlab 自动计算了 End 值 31.98, 如图 8-8b。如图 8-9 之后我们可以看到 Mileage 变为了 31.98m, 而 Depth 根据介电常数计算出来, 为 3m。

图 9-8 Case2 设置参数。a)输入参数和 b) 确认参数后

图 9-9 Data 模块完成设置

(3) 切换到 Image processing 模块, 可以观察到原始数据如图 8-10。

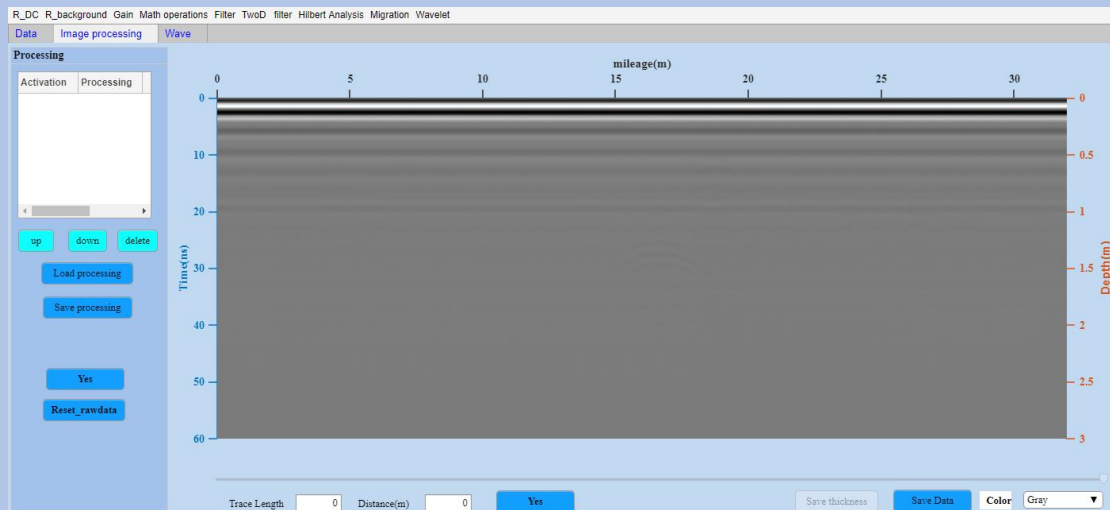
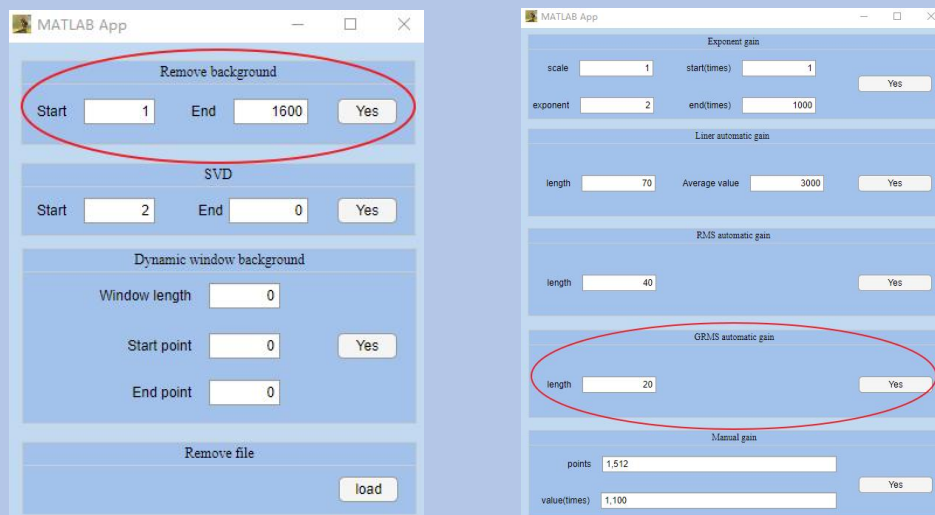


图 9-10 Case2 原始数据

(4) 首先我们应用 R\_background 中的 Remove background 算法，将背景数据设置为全部剖面 1-1600 道。然后我们应用 Gain 中的 GRMS automatic gain 方法增益，length 设置为 20。紧接着我们运用了 TwoD filter 中 f\_k filter 和 media filter，前者是为了去除一些多次波和设备的震动的干扰，后者是为了平滑剖面，。最后我们应用了一个 FIR 滤波器滤除一些噪声。处理流程设置如图 8-11。





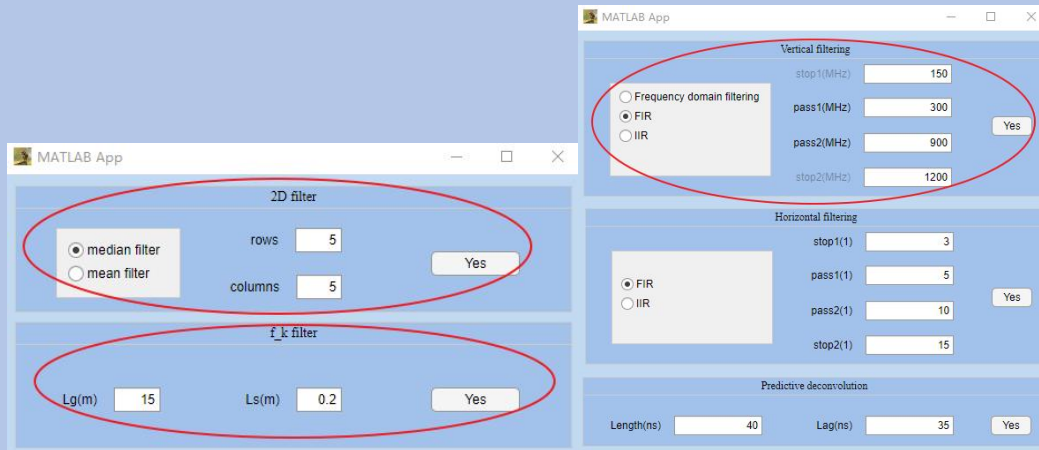


图 9-11 Case2 处理流程设置

(5) 点击 Yes，完成数据处理，如图 8-12 的处理结果

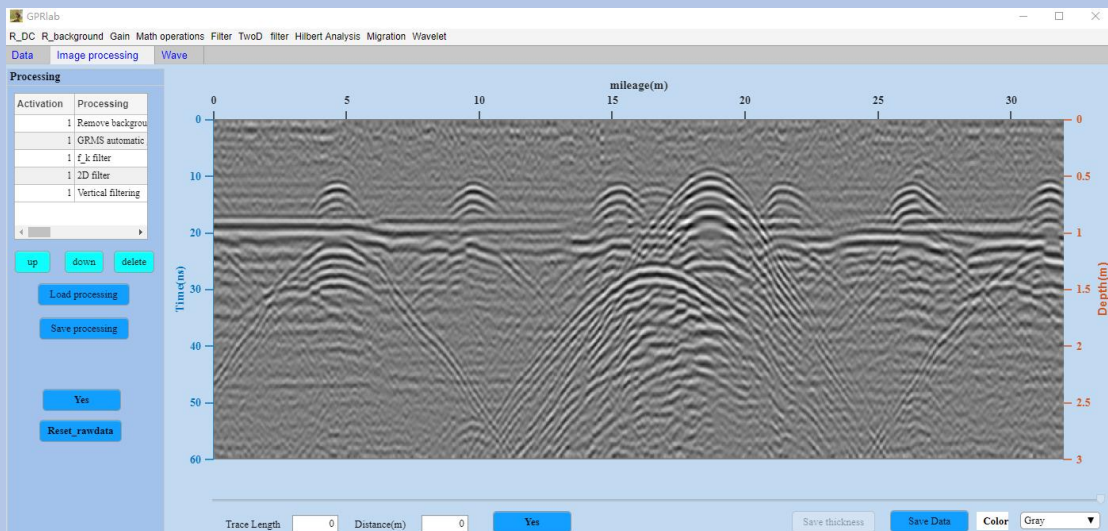


图 9-12 Case2 的处理结果

本案例的数据和处理流程保存在 examples/Case2 中，用户也可以直接加载或查看我们提供的处理流程。

### 9.3 Case3 案例 3

案例 3 的数据来自嫦娥 4 号 500MHz 高频通道 GPR 在月球冯卡门陨石坑前两个月昼收集的数据，该数据约 105m，采集模式未知（这里我们看作自由采集）。

(1) 读入数据，如图 8-13 可以看到该数据是 2048 采样的，并且具有 9032 个 traces。

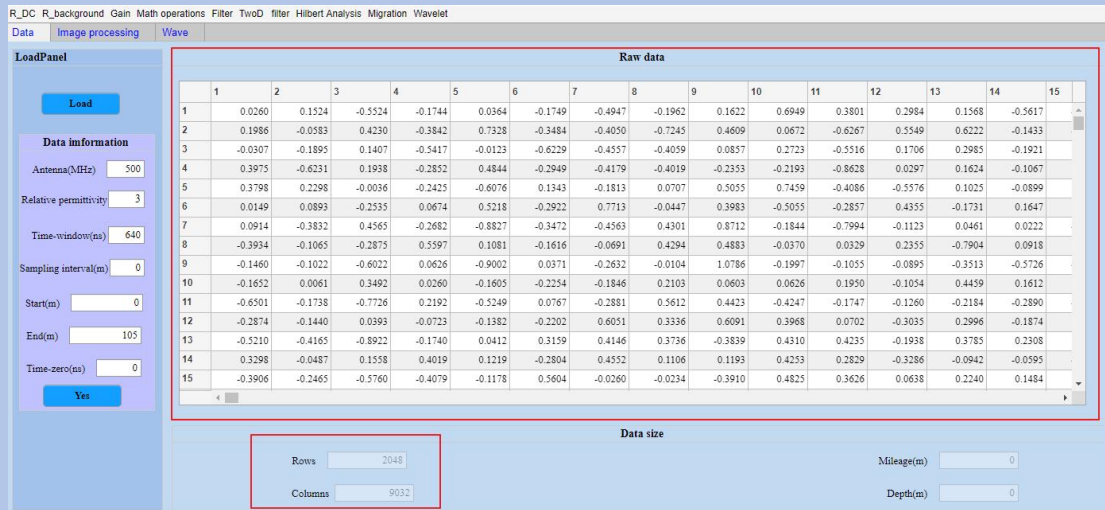


图 9-13 Case3 加载数据

(2) 设置参数, 如图 8-14a, 由于采用自由采集, 因此 Sampling interval 设置为 0, End 设置为 105. 点击 Yes 后, GPRlab 自动计算了 Sampling interval 值 0.0116, 如图 8-14b. 如图 8-15 之后我们可以看到 Mileage 变为了 105m, 而 Depth 根据介电常数计算出来, 为 55.43m。

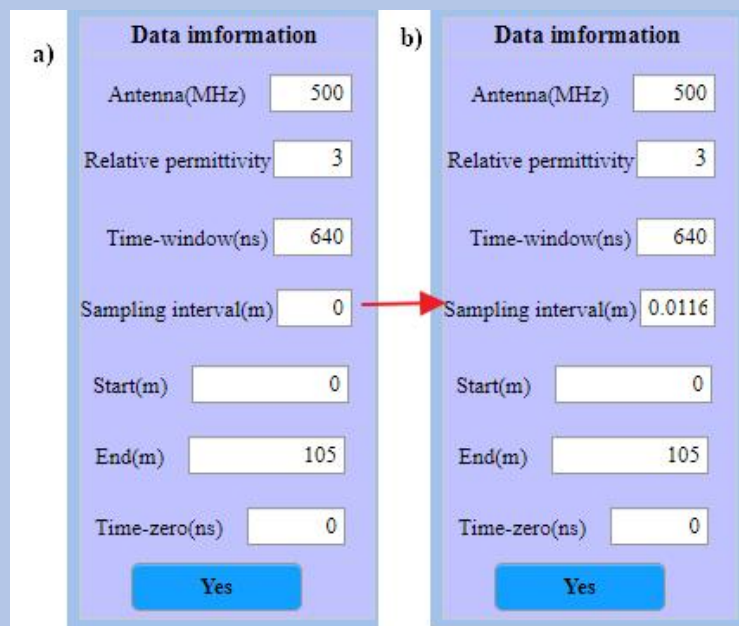


图 9-14 Case3 设置参数。a) 输入参数和 b) 确认参数后

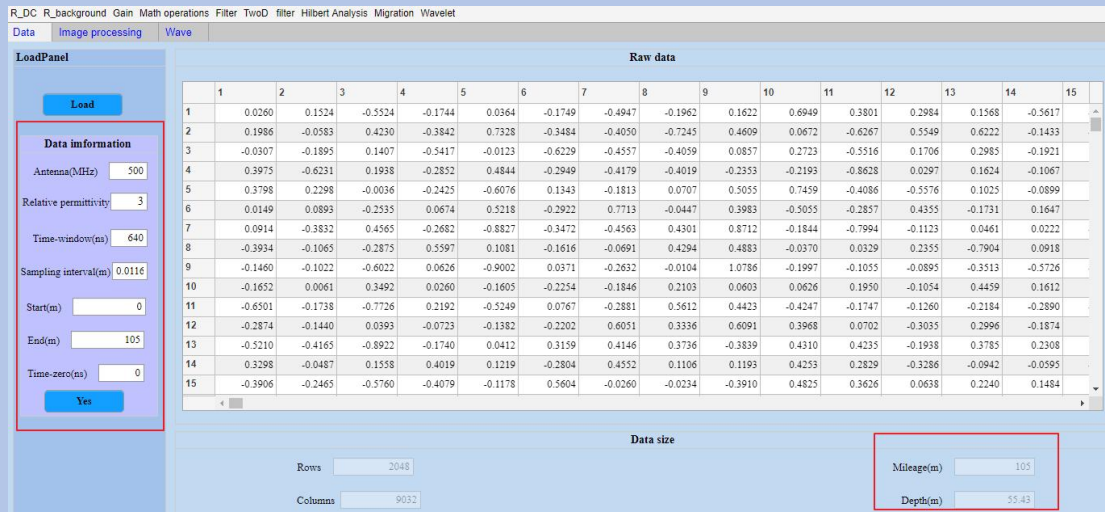


图 9-15 Data 模块完成设置

(3) 切换到 Image processing 模块，可以观察到原始数据如图 8-16。

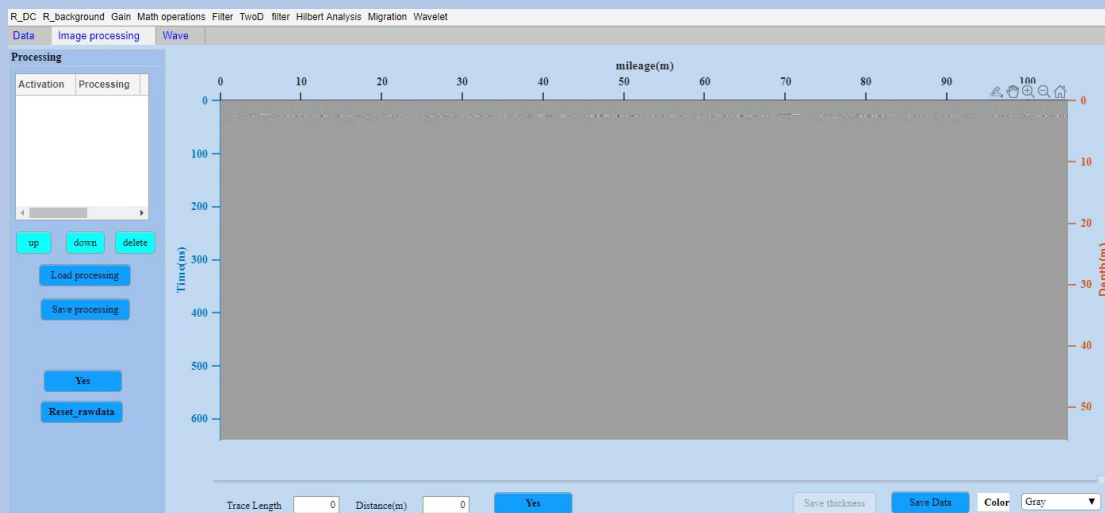


图 9-16 Case3 原始数据

(4) 不同于 Case1 和 Case2，Case3 中加载了一个提供的处理流程（含 7 种算法），该流程包括参数可以显示在 Processing 面板中，如图 8-11。

Processing										
Activation		Processing								
1	Removing DC	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	1 SVD	2	0	0	0	0	0	0	0	
3	1 Vertical filtering	FIR	50	260	500	700	0	0	0	
4	1 Liner automatic gain	300	3000	0	0	0	0	0	0	
5	1 Absolute	0.2	0	0	0	0	0	0	0	
6	1 Square	1	0	0	0	0	0	0	0	
7	1 2D filter	mea	15	15	0	0	0	0	0	
8										

图 9-17 Case3 加载的处理流程



(5) 点击 Yes，完成数据处理，然后将 Color 设置为 Jet，获得如图 8-18 的处理结果

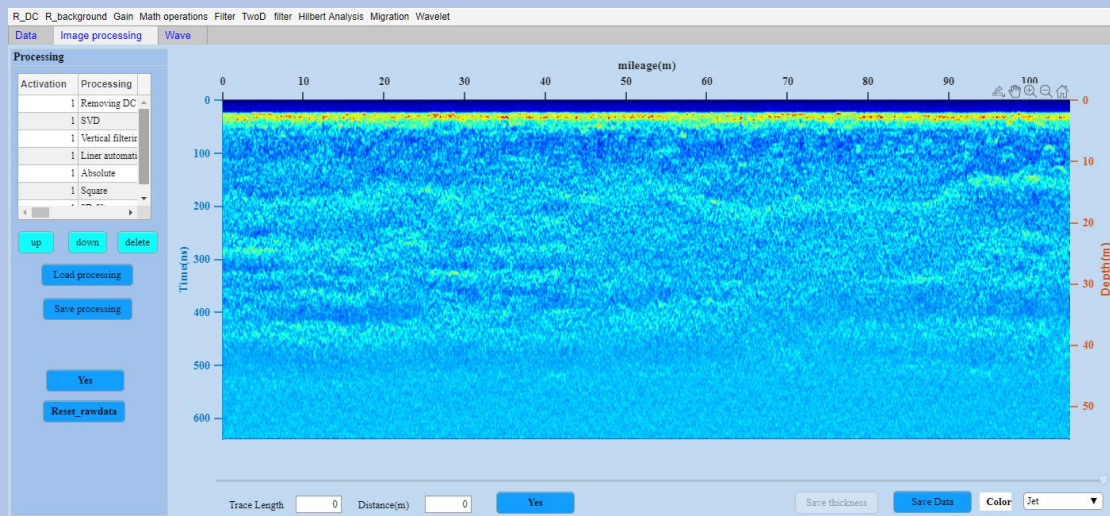


图 9-18 Case2 处理结果

## 10 Version update instructions 版本更新说明

Version9.0 更新内容：

- 1、增加了 EMD 和 VMD 算法。
- 2、增加了 Time-frequency analysis 视图。
- 3、更改了一些默认设置和提示。

本次更新主要提供了信号分析领域最先进的一些时频分析算法，模态分解类和同步压缩类。  
需要注意的是这些方法还尚未广泛应用在 GPR 领域的实际工作中。