

tomoDD-SE程序包的使用简介

1. 实际数据的反演
2. 合成分辨率测试

讲解：高磊

整理者：郭浩, 莘海亮, 高磊, 陆攀

导师：张海江教授

中科大, 2020.08.06

程序包内容:

- **Src:** 程序源码
 - **tomoDD-SE:** 区域尺度双差层析成像源程序（使用球坐标系）
 - **ph2dt:** 得到走时差数据的源程序(来自hypoDD程序包)
- **Scripts:** 一些可以用到的脚本
- **Doc:** 参考文献以及程序使用手册
- **Example:** 例子（以小部分的四川数据为例）
 - 震相走时数据的预处理以及走时差数据的提取；
 - 反演参数的选择；
 - 实际反演；
 - 数据残差
 - 分辨率测试

例子说明

- 考虑到大家笔记本的内存有限和程序演示的速度，例子只使用了很少的数据。
因此实际数据反演以及棋盘测试都只是为了介绍程序的使用流程，不考虑结果的好坏。

一、数据准备

- 1.需要自己提供震相文件(phase.dat)以及台站文件(station.dat);
- 2.用ph2dt程序包得到绝对走时(absolute.dat),事件对的走时差文件(dt.ct), 地震信息(event.dat);
用法: `./ph2dtN3 ph2dt.inp`

Waldhauser, F. (2001). hypoDD--A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations (hypoDD version 1.0-03/2001). *US Geol. Surv. Open-File Rept. 01, 113.*

- 3.如果有波形, 可以通过一些互相关程序 (本程序包未提供) 提取dt.cc;

数据准备1. 震相数据(phase.dat)的格式 (见Example/phaseSelection)

#开头的行代表事件信息, 非#开头的行代表接收到这个事件的台站

年月日时分秒 纬度 经度 深度(km) 震级 EH EV RMS 事件ID

台站名 走时 数据质量 震相 (数据质量一般在0~3, 若大于3会剔除这个数据)

.....

```
phase.dat_sichuan x
# 2001 1 1 16 2 43.60 29.220 101.070 9.0 0 0 0 0 620002
GDS 19.6 1 P
GDS 32.2 1 S
HMS 52.3917 1 P
HWS 63.1114 1 P
MDS 35.82 1 P
MEK 49.19 1 P
WMP 46.16 1 P
XJP 29.4 1 P
XJP 49.4 1 S
YZP 48.7591 1 P
# 2001 1 5 23 20 10.50 29.230 101.050 0.0 0 0 0 0 620003
EMS 40.6051 1 P
GDS 20.3 1 P
GDS 33.3 1 S
HMS 53.2993 1 P
LZZ 68.4868 1 P
MDS 36.85 1 P
MEK 49.462 1 P
WMP 46.7 1 P
XJP 30.2 1 P
XJP 50.9 1 S
YZP 48.8608 1 P
```

数据准备1. 台站数据(station.dat)的格式 (见Example/phaseSelection)

台站名 纬度 经度 高程(m)

.....

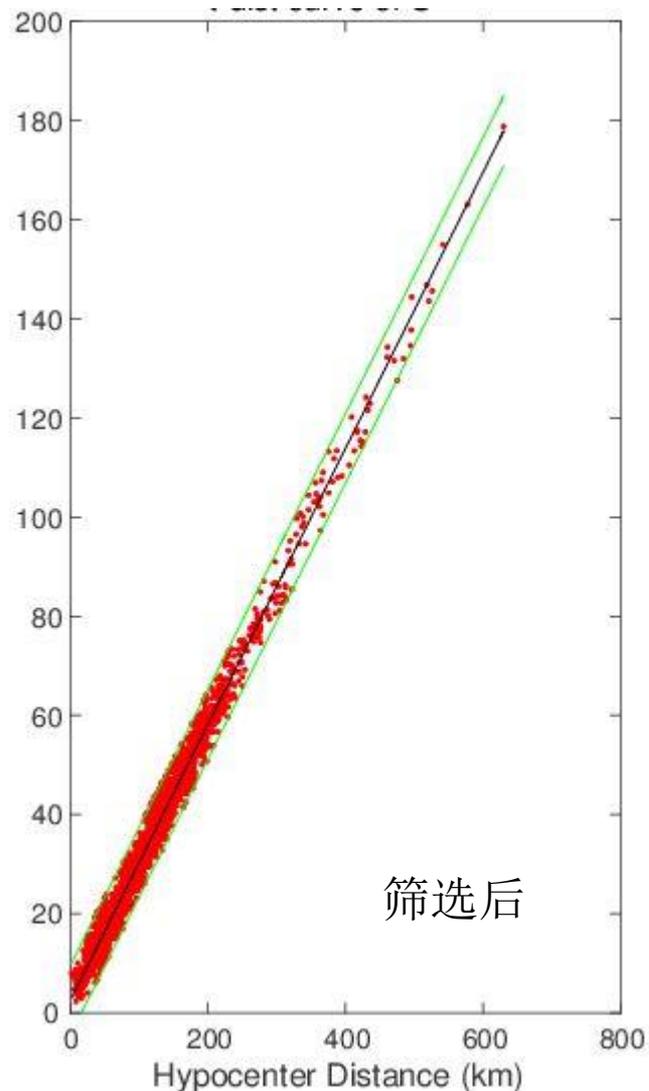
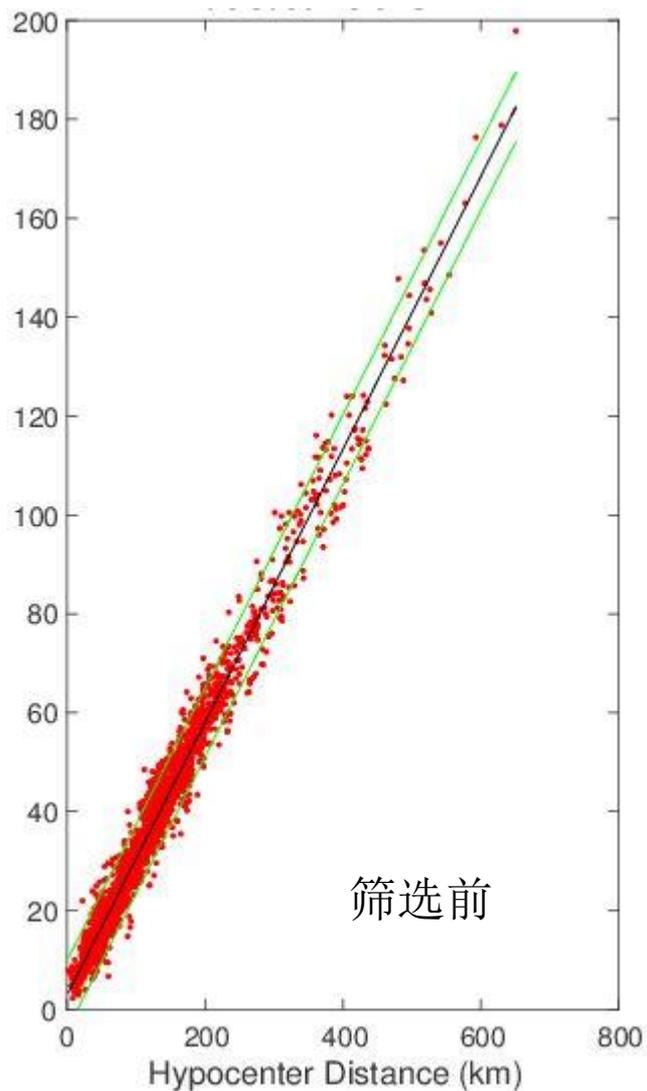
XJI	31.0	102.4	0
GZA	30.1	102.2	0
EMS	29.6	103.5	0
MEK	31.9	102.2	0
CD2	30.9	103.8	0
MDS	30.1	103.0	0
DFU	31.0	101.1	0
SMI	29.2	102.3	0
WMP	29.1	103.8	0
JYA	29.8	103.9	0
YZP	30.9	103.6	0
LYS	31.0	103.6	0
ZDZ	31.0	103.6	0
BAY	30.9	103.5	0
MBI	28.8	103.5	0
JLO	29.0	101.5	0
YJI	30.0	101.0	0
MXI	31.7	103.9	0
WCH	31.5	103.6	0
MNT	28.3	102.2	0

数据准备1. 震相数据(phase.dat)的质量控制 (见Example/phaseSelection)

由于人工或者自动的震相识别和拾取可能会有较大误差，需要在反演前对数据做质量控制：可以根据时距曲线来剔除一些明显的outlier. 程序包提供了几个程序可以使用，使用流程如下：

1. 运行pha_t-dist.awk来输出所有数据的走时和震中距信息(t_dist.dat);
2. 运行t_dist.m来计算P波和S波时距曲线的斜率和时间轴的截断值(即 $t = \text{slope} * \text{dist} + b$)，并且需要根据数据的分布情况来决定有效数据的范围($t = \text{slope} * \text{dist} + b + b1$ 和 $t = \text{slope} * \text{dist} + b - b2$);
3. 确定有效数据范围的相关参数后，运行pha_t-dist_selection.awk来输出最终的震相数据(phase.dat_selection)

数据准备1. 震相数据(phase.dat)的质量控制 (见Example/phaseSelection)



数据准备2. 提取地震目录走时差数据dt.ct (见Example/ph2dt)

需要使用hypoDD程序包的子程序包ph2dt。该子程序的使用手册见Waldhauser, F. (2001). HypoDD-A program to compute double-difference hypocenter locations中的4~6页以及15~16页。

编译程序:

- 在Src/ph2dt/include/ph2dt.inc中:
 - MEV: 最大事件个数
 - MSTA: 最大台站个数
 - MOBS: 对于每一个事件最多的观测到时个数 (P&S)
- 在Src/ph2dt文件夹中编译程序, 得到可执行程序ph2dt:
 - 用法: make clean; make

数据准备2. 提取地震目录走时差数据dt.ct (见Example/ph2dt)

用法: ./ph2dtN3 ph2dt.inp

参数文件ph2dt.inp:

输入文件: phase.dat, station.dat

控制参数:

minwght: 震相数据最小拾取质量;

maxdist: 事件对 (2个地震) 与台站间的最大距离;

minsep: 事件对之间的最小间距;

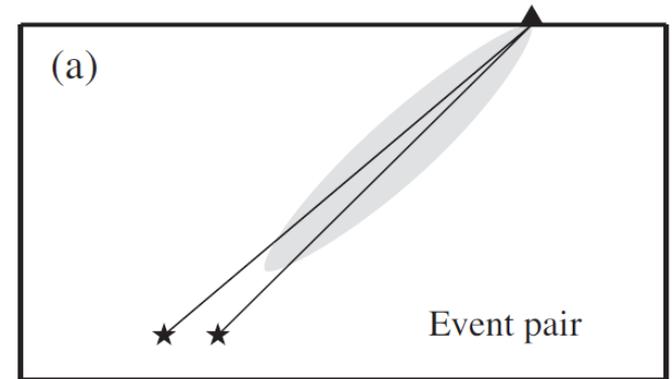
maxsep: 事件对之间的最大间距;

maxngh: 每个事件的最大邻居数;

minlink: 一个事件如果能成为另一个事件的邻居, 那么该事件对需要的相同震相的个数的最小值;

minobs: 每一个事件对所需要的震相数的最小值;

maxobs: 每一个事件对所需要的震相数的最大值;



数据准备2. 提取地震目录走时差数据dt.ct (见Example/ph2dt)

输出文件:

absolute.dat (绝对走时数据)

dt.ct (地震目录走时差数据)

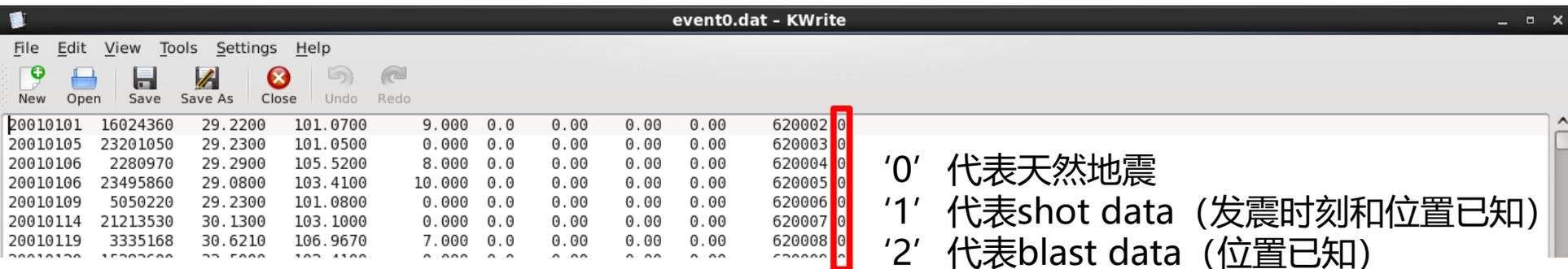
event.dat (地震事件信息文件)

event.sel (挑选的地震事件信息文件)

再将event.sel的格式转换一下:

```
awk -f addEve0.awk event.sel > ../RealData-Inversion/Input_Files/event.dat
```

最后, **absolute.dat, dt.ct, event.dat, station.dat**就是我们需要的数据了。



event0.dat - KWrite

ID	Station	Time	Lat	Lon	Depth	Mag	Mag	Mag	Mag	Mag	
20010101	16024360	29.2200	101.0700	9.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620002	0
20010105	23201050	29.2300	101.0500	0.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620003	0
20010106	2280970	29.2900	105.5200	8.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620004	0
20010106	23495860	29.0800	103.4100	10.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620005	0
20010109	5050220	29.2300	101.0800	0.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620006	0
20010114	21213530	30.1300	103.1000	0.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620007	0
20010119	3335168	30.6210	106.9670	7.000	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	620008	0

'0' 代表天然地震
'1' 代表shot data (发震时刻和位置已知)
'2' 代表blast data (位置已知)

数据准备3. 提取波形互相关走时差数据dt.cc

如果有波形数据，我们就可以利用互相关技术提取相邻两个地震到同一个台站的初至P波或者S波的走时差

目前，程序包未提供程序来提取dt.cc.

```
dt.cc - emacs@localhost.localdomain
File Edit Options Buffers Tools C++ Help
# 94000149 94000059 0.0
PBB 0.9830 0.5836 P
SET 0.1640 0.5435 P
SLD 0.0640 0.5440 P
TMP -0.2640 0.5268 P
BAT -0.6280 0.5160 S
SLD 0.0760 0.7519 S
# 94000149 94000129 0.0
BRG 0.9160 0.7927 P
SET 0.8440 0.5677 P
NRA 1.2440 0.5929 S
SET 2.1280 0.6018 S
# 94000149 94000137 0.0
BRG 1.0520 0.7539 P
FWD 1.0760 0.5626 P

B.3.2 Cross correlation differential time input (e.g. file dt.cc)
This file stores differential travel times from cross correlation for pairs of earthquakes.
Each event pair is listed by a header line (in free format)
#, ID1, ID2, OTC
followed by lines with observations (in free format):
STA, DT, WGHT, PHA
```

二、准备初始速度模型MOD

- 1维或者3维的gradient velocity model

bld, nx, ny, nz

xn(1),xn(2), ..., xn(nx)

yn(1),yn(2), ..., yn(ny)

zn(1),zn(2), ..., zn(nz)

Vp(1,1,1), Vp(2,1,1),... .., Vp(nx,1,1)

Vp(1,2,1), Vp(2,2,1),... .., Vp(nx,2,1)

... ..

Vp(1,ny,1),Vp(2,ny,1),... .., Vp(nx,ny,1)

... ..

Vp(1,ny,nz), Vp(2,ny,nz),... .., Vp(nx,ny,nx)

Vp/Vs(1,1,1),Vp/Vs(2,1,1),... ..,Vp/Vs(nx,1,1)

Vp/Vs(1,2,1),Vp/Vs(2,2,1),... ..,Vp/Vs(nx,2,1)

... ..

Vp/Vs(1,ny,1), Vp/Vs(2,ny,1),... .., Vp/Vs(nx,ny,1)

... ..

Vp/Vs(1,ny,nz), Vp/Vs(2,ny,nz),... ..,Vp/Vs(nx,ny,nx)

bld: 1 or 0.1 or 0.01,取决于x,y,z三个方向上的网格点的最小精度。

xn(1),xn(nx); yn(1),yn(ny); zn(1),zn(nz): 分别表示x,y,z三个方向上的网格边界,需要足够大。

三、实际数据的反演

实际数据的反演

(见Example/RealData-Inversion)

- 准备可执行程序: tomoDD-SE
- 参数控制文件: tomoDD-SE.inp
- 输入数据文件夹: Input_Files
- 输出文件夹: Output_Files
- ak135.15.SKs, layer-16.dat是程序需要读取的文件

运行程序: ./tomoDD-SE tomoDD-SE.inp

实际数据的反演：程序准备

- 定义程序所需要的内存
- 编译程序

程序准备1： 所需内存控制文件

见Src/tomoDD-SE/include/tomoFDD.inc & RaySPDR.inc

- 在tomoDD-SE/include/RaySPDR.inc中：
 - maxnx, maxny, maxnz: 为x, y, z方向上的最大网格点数
 - maxpari: 需要反演的参数个数的最大值（设为 $2*(maxnx-2)*(maxny-2)*(maxnz-2)$ ）
 - maxpar: 等于maxpari即可。
- 在tomoDD-SE/include/tomoFDD.inc中：
 - MAXEVE, MAZSTA, MAXDATA: 最大事件数、最大台站数、最大数据量;
 - MAXNODE: 每条射线可能穿过的最大网格数($\sim 4*MAXNZ$);
 - MAXND: 每个数据方程所对应的非零慢度偏导数个数的最大值 ($< 4*MAXNZ$)

程序准备2： 编译程序

- 在Src/tomoDD-SE文件夹中编译得到用于反演的tomoDD-SE:
 - 用法: `make clean; make;`

编译程序报错：问题1

32位的电脑编译程序时请使用：**Makefile.32 & Makefile.32_syn;**

终端运行：**make clean -f Makefile.32; make -f Makefile.32**

以及 **make clean -f Makefile.32_syn; make -f Makefile.32_syn**

64位的电脑编译程序时请使用：**Makefile & Makefile_syn**

终端运行：**make clean; make**

以及 **make clean -f Makefile_syn; make -f Makefile_syn**

编译程序报错：问题2

经过测试，该程序要求gfortran的版本不能太高。如果由于编译器版本过高而导致提供的32或者64的Makefile无法编译通过，请下载旧版本的gfortran编译器，比如gfortran-4.7或更低的版本，然后更新Makefile里的编译器名称（第5行）为新下载的版本，最后重新编译。

（在ubuntu系统，终端运行sudo apt-get install gfortran-4.7即可。如果找不到gfortran-4.7的版本，也可以试试4.6，4.5等版本。）

实际数据的反演： 参数控制文件介绍

(见Example/RealData-Inversion/tomoDD-SE.inp)

- Input file selection: 填写之前所准备的相关数据的路径;
- Output file selection:
 - original location: 初始地震位置
 - relocations: 每次成功迭代后以及最终的重定位地震位置
 - station information: 台站的残差统计
 - residual information: 每个绝对走时或者走时差数据的最终拟合残差
 - source parameter information: 地震的离源角信息, 可以选择不输出 (空出该行即可)
 - velocity file: 每次迭代后的速度模型和射线密度分布, 以及最终的Vp, Vs速度模型
- 注意还有一行Absolute file: 输入绝对走时数据的路径

实际数据的反演： 参数控制文件介绍

(见Example/RealData-Inversion/tomoDD-SE.inp)

- 反演时不同数据如何参与：
 - 先给绝对数据较大权重(WTDD)，来反演整体的速度结构；
 - 再给地震目录走时差数据较大权重(WTCTP, WTCTS)，来更好地约束源区结构；
 - 如果有互相关走时差数据，最后给其较大权重(WTCCP, WTCCS)，来进一步约束源区结构；
- 由于联合反演时速度的收敛要快于地震位置，所以建议每次联合反演(JOINT)之后加一次只定位反演(JOINT=0).

```
*--- data weighting and re-weighting:
* NITER:                last iteration to used the following weights
* WTCCP, WTCCS:        weight cross P, S
* WTCTP, WTCTS:        weight catalog P, S
* WRCC, WRCT:          residual threshold in sec for cross, catalog data
* WDCC, WDCT:          max dist [km] between cross, catalog linked pairs
* DAMP:                damping (for lsqr only)
```

联合
只定位
联合
只定位

	--- CROSS DATA				---- CATALOG DATA				WTDD	DAMP	JOINT	THRE
* NITER	WTCCP	WTCCS	WRCC	WDCC	WTCTP	WTCTS	WRCT	WDCT				
3	0.01	0.01	-9	-9	0.1	0.08	6	-9	10	300	1	10
2	0.01	0.01	-9	-9	0.1	0.08	6	-9	10	160	0	10
3	0.01	0.01	-9	-9	1	0.8	5	-9	.1	300	1	10
2	0.01	0.01	-9	-9	1	0.8	5	-9	.1	150	0	10

注意该为绝对数据相对于dt.ct数据的权重，因此绝对权重的真实权重为：
WTCTP*WTDD (P波)，
WTCTS*WTDD (S波)

实际数据的反演： 参数控制文件介绍

(见Example/RealData-Inversion/tomoDD-SE.inp)

- 每组迭代参数中的WRCT,WRCC以及WDCT,WDCR如何选取
 - WRCT, WRCC: 程序会根据每个数据的残差情况对其进行加权, 即某个数据的残差越大, 其权重就会越小, 甚至为0。dt.ct和dt.cc的数据加权会分开实行, 因此有各自独立的参数。这两个参数为该加权函数的阈值, 该阈值越小, 同一残差所导致的权重会更小, 残差大的数据对解的贡献就会更低。
 - WDCT, WDCR: 程序会根据每个数据所对应的地震间的距离, 对数据进行加权, 即某个数据的地震间距离越大, 其权重就会越小, 超过该距离后为0。dt.ct和dt.cc的数据加权会分开实行, 因此有各自独立的参数。这两个参数为该加权函数的阈值, 该阈值越小, 同一地震间的距离所导致的权重会更小, 地震间距离大的数据对解的贡献也会更低。
 - 这四个参数都可以不使用(设为-9即可)。尤其是对于速度与位置的联合反演来说, WDCT和WDCR可以不使用。对于WRCT和WRCC, 除非数据非常理想, 一般建议使用, 并且值逐次降低; 如果数据质量非常差, 建议可以设为3左右

```
*--- data weighting and re-weighting:
* NITER:                last iteration to used the following weights
* WTCCP, WTCCS:        weight cross P, S
* WTCTP, WTCTS:        weight catalog P, S
* WRCC, WRCT:          residual threshold in sec for cross, catalog data
* WDCR, WDCT:          max dist [km] between cross, catalog linked pairs
* DAMP:                damping (for lsqr only)
*
* --- CROSS DATA ----- CATALOG DATA ----
* NITER WTCCP WTCCS WRCC WDCR WTCTP WTCTS WRCT WDCT WTDD DAMP JOINT THRE
  3      0.01  0.01  -9  -9  0.1  0.08  6  -9  10  300  1  10
  2      0.01  0.01  -9  -9  0.1  0.08  6  -9  10  160  0  10
  3      0.01  0.01  -9  -9  1    0.8  5  -9  .1  300  1  10
  2      0.01  0.01  -9  -9  1    0.8  5  -9  .1  150  0  10
```

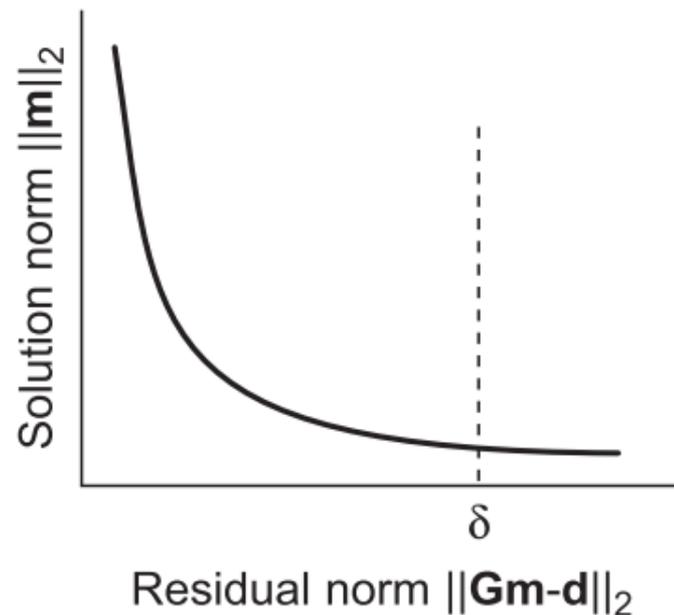
实际数据反演: 正则化参数选择

(见Example/RealData-Inversion-Lcurve)

$$\min \|Gm - d\|_2^2 + \alpha \|L_1 m\|_2^2 + \beta \|m\|_2^2$$

```

* weight1 weight2 weight3 CC_format
  20      20      20      1
*
*--- data weighting and re-weighting:
* NITER:          last iteration to used the following weights
* WTCCP, WTCCS:   weight cross P, S
* WTCTP, WTCTS:   weight catalog P, S
* WRCC, WRCT:     residual threshold in sec for cross, catalog data
* WDCC, WDCT:     max dist [km] between cross, catalog linked pairs
* DAMP:           damping (for lsqr only)
*
* --- CROSS DATA ----- CATALOG DATA ----
* NITER WTCCP WTCCS WRCC WDCC WTCTP WTCTS WRCT WDCT WTDD DAMP JOINT THRE
3|      -9      -9      -9      -9      0.1  0.08   6  -9   10   55   1   10
2       -9      -9      -9      -9      0.1  0.08   6  -9   10   50   0   10
3       -9      -9      -9      -9       1  0.8    5  -9    .1   50   1   10
2       -9      -9      -9      -9       1  0.8    5  -9    .1   50   0   10
  
```



实际数据反演: 正则化参数选择

(见Example/RealData-Inversion-Lcurve)

- L-curve的方法来选择正则化参数: **smooth**和**damp**
 - 在程序的屏幕输出中, 有**smooth, damp, xnorm, xnorm_vel, rnorm, rnorm_wt**.
 - 其中**xnorm**:地震位置和慢度变化量的2范数; **xnorm_vel**: 慢度变化量的2范数;
 - **rnorm**:数据拟合残差的2范数; **rnorm_wt**:加权的数据拟合残差的2范数.
 - **smooth, damp** 分别为本次迭代所使用的平滑和阻尼值.
 - 由于**smooth**是用来约束慢度变化量的, 所以对于**smooth**的选择应该用**xnorm_vel**; 而**damp**同时约束了地震位置和慢度的变化量, 所以对于**damp**的选择应该用**xnorm**.
 - 至于残差, 建议选择**rnorm_wt**.
 - 尝试不同**damp**和**smooth**的组合, 每种组合都只迭代一次即可, 得到相应的**xnorm, xnorm_vel, rnorm, rnorm_wt**值;
 - 用scripts/lcurve_Choose*.m绘制L curve.
 - 关于L-curve方法, 请参考Parameter Estimation and Inverse Problems的5.1, 5.2章节 (Richard C. Aster et al. 2005)

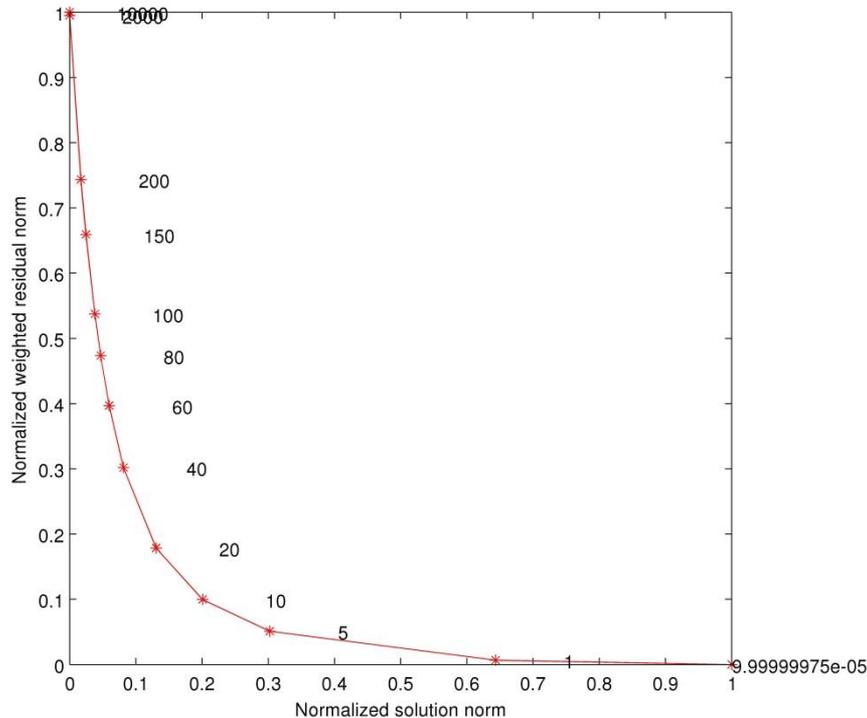
实际数据反演: 正则化参数选择

(见Example/RealData-Inversion-Lcurve)

- 在Example/RealData-Inversion-Lcurve中, 给出了用L curve来选择Smooth的过程:
 - tomoDD-SE.inp_smooth*为使用同一damp, 不同smooth值的参数文件;
 - term_smooth*为使用不同参数文件的屏幕输出;
 - 将term_smooth*中首次输出的“smooth, damp, xnorm, xnorm_vel, rnorm, rnorm_wt”汇总至lcurve.dat中;
 - 利用lcurve_ChooseSmooth.m绘图, 建议以 normalizedlcurve_ChooseSmooth_wtres.jpg为准。见下页。
- Damp的选择过程与Smooth一样, 这里不做测试了。

实际数据反演: 正则化参数选择

(见Example/RealData-Inversion-Lcurve)



该测试数据所对应的最优
smooth值约为20。

L 曲线: 不同点为使用不同smooth值
所得到的模型和残差的归一化范数。

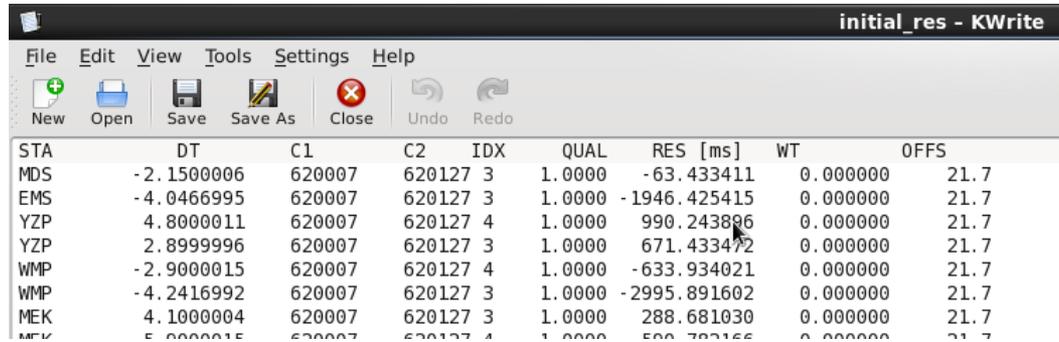
实际数据的反演结果

(见Example/RealData-Inversion)

- 输出结果(reloc & Vp & Vs)在Output_Files中, 可以用该文件夹中的matlab程序来画地震位置以及速度模型在三个方向的切片图;
- 其他输出文件的具体格式可以参考Doc/tomoDD_manual来了解。

四、数据残差

- 初始残差文件 `tomoDD-SE.res.ini` （默认输出在程序运行所在目录）



STA	DT	C1	C2	IDX	QUAL	RES [ms]	WT	OFFS
MDS	-2.1500006	620007	620127	3	1.0000	-63.433411	0.000000	21.7
EMS	-4.0466995	620007	620127	3	1.0000	-1946.425415	0.000000	21.7
YZP	4.8000011	620007	620127	4	1.0000	990.243886	0.000000	21.7
YZP	2.8999996	620007	620127	3	1.0000	671.433472	0.000000	21.7
WMP	-2.9000015	620007	620127	4	1.0000	-633.934021	0.000000	21.7
WMP	-4.2416992	620007	620127	3	1.0000	-2995.891602	0.000000	21.7
MEK	4.1000004	620007	620127	3	1.0000	288.681030	0.000000	21.7
MEK	5.0000015	620007	620127	4	1.0000	500.702166	0.000000	21.7

其中，**IDX**表示数据类型 (**1=P**波互相关数据; **2=S**波互相关数据; **3=P**波目录数据; **4=S**波目录数据), **RES**表示残差 (ms)。

反演获得的结果 `Output_Files` 文件夹中有生成的 `tomoDD.res` 数据文件
该文件里面数据格式与初始残差格式一样
`tomoDD.res` 数据表示最终反演后的数据走时残差

可以利用以上两个数据文件绘制反演前后数据走时残差的变化，例如下图：

- 反演后的数据残差文件（`tomoDD-SE.inp`可以选择输出该文件），该文件的格式与初始残差文件相同。

反演前后数据走时残差图

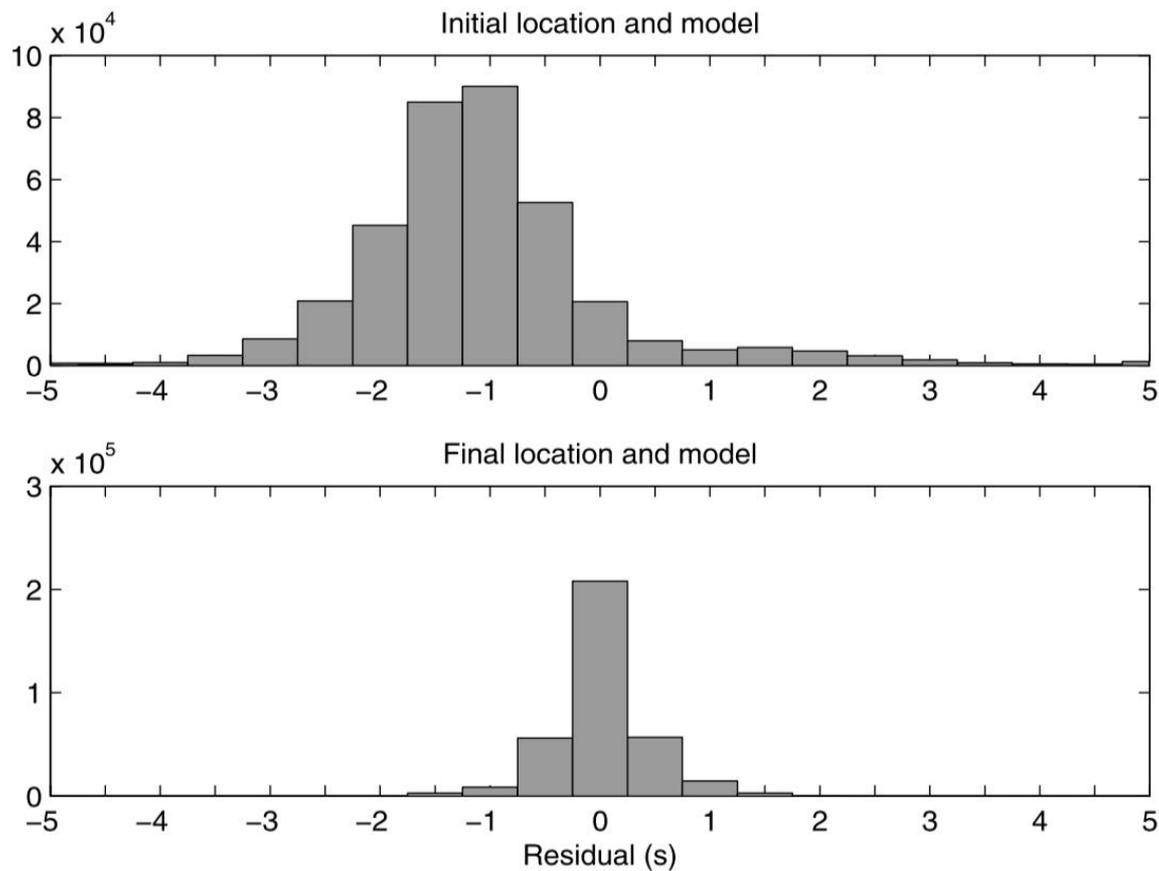


Figure A5. Residual misfit improvement. Compilation of overall number of earthquakes with root-mean-square misfit in bins with widths of 0.5 s, comparing (top) the starting 1D model to (bottom) the final 3D model.

五、模型分辨率

- 射线分布密度
 - 可以用extract_DWS.awk来从tomoDD.vel中提取每个网格点的射线密度(DWS_P, DWS_S);
 - usage: awk -f extract_DWS.awk tomoDD.vel
 - Output Files: DWS_P, DWS_S
 - DWS_P, DWS_S与Vp_model.dat, Vs_model.dat格式一样
- 合成分辨率测试

合成分辨率测试

(以棋盘测试为例，见Example/checkerboard)

- 除了之前已经准备好的tomoDD-SE以外，还需要在Src/tomoDD-SE/中编译用于单独正演走时数据的程序tomoDD-SE_syn
 - 用法： `make clean -f Makefile_syn; make -f Makefile_syn`

合成分辨率测试

(以棋盘测试为例, 见checkerboard)

- 流程:
 - 使用棋盘速度模型和实际数据来正演初至波的走时数据 (合成数据放在**Syn**中)。
 - 用正演得到的走时数据以及初始模型来反演 (反演结果放在**Vel**中)
- 只需在本目录下运行**checkerboard.pl**即可
用法: `./checkerboard.pl MOD`

合成分辨率测试

(棋盘测试的结果, 见checkerboard/Vel)

- 输出结果可以用Vel中的一些画图程序来看一下。
- 还可以用resolution.m来提取反演后棋盘模型的恢复度(res_P, res_S);

最后建议您在使用程序之前，先理解双差定位，双差成像的原理，阅读hypoDD和tomoDD的使用手册。

如果有问题，可以给我发邮件gaoleibo@mail.ustc.edu.cn