

# **TRMLOC**

## wersja -2.2

### dokumentacja techniczna

W. Dębski  
Instytut Geofizyki PAN  
ul. Ks. Janusza 64, 01-452 Warszawa  
e-mail: [debski@igf.edu.pl](mailto:debski@igf.edu.pl)

23 stycznia 2013

#### **Streszczenie**

Opisany w niniejszej nocie technicznej program TRMLOC przeznaczony jest do analizy danych sejsmicznych pod kątem lokalizacji hipocentrów wstrząsów. Wykorzystuje on zaawansowane algorytmy time-reversal-mirroring (TRM) oraz Fast Sweeping Method (FSM) do bardzo szybkiej inwersji probabilistycznej (Bayesowskiej) dostarczającej nie tylko ocenę położenia źródła fal ale także umożliwiającą pełną analizę błędów lokalizacji. Szybkością obliczeń program TRMLOC dorównuje klasycznym algorytmom lokalizacyjnym co pozwala na jego zastosowanie do bieżącej analizy sejsmiczności np. w kopalniach. Niniejsza dokumentacja zawiera szczegółowy opis techniczny programu TRMLOC w wersji 2.2 wraz z przykładami jego użycia.

# 1 Wstęp

Zagadnienie lokalizacji wstrząsów sejsmicznych, zarówno naturalnych jak i wywołanych działalnością ludzką ma kilka bardzo ważnych aspektów i jest jednym z pierwszych i podstawowych zadań wykonywanych w ramach analiz sejsmologicznych. Wielorakość sytuacji spotykanych w praktyce uwzględniająca między innymi takie elementy jak magnituda lokalizowanych wstrząsów, geometrie używanej sieci pomiarowej, rodzaj używanych danych pomiarowych oraz wymagana szybkość i dokładność lokalizacji powoduje, że nie istnieje jeden uniwersalny algorytm lokalizacyjny. Potrzebny jest więc ciągły rozwój metod, które zapewnią optymalne rozwiązanie problemu w każdej konkretnej sytuacji.

Klasyczne podejście do zagadnienia lokalizacji źródła sejsmicznego polega na sformułowaniu problemu jako zadania optymalizacyjnego: szukamy takiego punktu w przestrzeni (zwykle ograniczamy się do wybranego fragmentu kopalni gdzie wstrząs był odczuwany) dla którego modelowane czasy rejestracji fal przez sieć sejsmiczną będą jak najbliższe wartościom zmierzonym. Metoda taka jest bardzo efektywna i szybka, jednakże nie pozwala w wiarygodny sposób ocenić dokładności otrzymanych wyników. Technika bardziej zaawansowana, pozbawioną powyższej wady jest technika oparta na metodach inwersji probabilistycznej. W tym podejściu nie szukamy “optymalnego” położenia, ale budujemy rozkład prawdopodobieństwa (tzw. a posteriori) wyznaczający prawdopodobieństwo lokalizacji wstrząsu w danym punkcie. Metoda ta ma tylko jedną wadę - wymaga złożonych i czasochłonnych obliczeń. Jej praktyczne zastosowanie wymaga bowiem wyznaczenia prawdopodobieństwa a posteriori albo w węzłach zadanej (zwykle regularnej) siatki albo użycia zaawansowanych technik próbkowania probabilistycznego. Oba podejścia są na tyle wolne, że technika taka mimo swych ogromnych zalet nie może być stosowana rutynowo w kopalniach.

Opisany w niniejszej pracy algorytm TRMLOC łączy najlepsze cechy obydwu technik: szybkość klasycznych algorytmów lokalizacyjnych oraz pełny opis rozwiązania charakterystyczny dla techniki inwersji probabilistycznej. W zakresie wykorzystania techniki TRM jest on uzupełnieniem algorytmów lokalizacyjnych stosowanych do analizy wstrząsów o trudnym do zidentyfikowaniu czasie wejści fal (Larmat et al., 2009; Artman et al., 2010; O’Brien et al., 2011). Jednakże, w przeciwieństwie do używanych dotychczas algorytmów, inwersję danych obserwacyjnych wykonuje technika probabilistyczną (Baesowską) a nie w oparciu o algorytmy optymalizacyjne, umożliwiając pełną analizę błędów.

## 2 Algorytm

Program TRMLOC wykorzystuje nowe podejście do problemu lokalizacji źródeł wstrząsów oparte na znanej z innych zastosowań metodyce *Time Reversal Mirroring* (TRM) (Fink, 1997; Sutin et al., 2004; Gajewski and Tessmer, 2010). Opiera się ona na obserwacji, że równanie falowe opisujące propagację fal sejsmicznych posiada dwie ważne symetrie. Pierwsza z nich to symetria związana z zamianą ról źródła i odbiornika. Związana jest ona z faktem, że fale sejsmiczne, akustyczne itp. wyemitowane z punktu A i zarejestrowane w punkcie B wyglądają tak samo jak wymitowane z punktu B i rejestrowane w punkcie A pod warunkiem, że źródło fal było takie samo. Druga ze wspomnianych symetrii to symetria równania falowego względem odbicia czasu  $t \rightarrow -t$  wynikająca z faktu, że w klasycznym równaniu falowym (bez członu

tłumienia) występuje tylko parzysta pochodna czasowa. Wynikiem wykorzystania powyższych cech równania falowego jest między innymi technika analizy akustycznego/sejsmicznego pola falowego polegająca na wstecznej w czasie propagacji zarejestrowanych przez odbiornik fal, które rozchodząc się w ośrodku, odbijając i interferując kolimują się w obszarze ich źródła. W szczególności w ostatnich latach podjęto próbę wykorzystania techniki TRM do analizy własności źródeł sejsmicznych (Kremers et al., 2011; Jakka et al., 2010).

Algorytm TRMLOC oparty jest na uproszczonej wersji techniki TRM propagując wstecznie niecały rejestrowany sejsmogram a tylko czas rejestracji wejścia pierwszej fali sejsmicznej (czas dotarcia frontu falowego do czujników). Informacje dostarczone przez rejestrację czasu wejścia fali są wystarczające do lokalizacji źródła a równocześnie propagację wsteczną frontu falowego można wykonać numerycznie bardzo łatwo i co najważniejsze szybko. Wykorzystuje się tu fakt, że propagację frontu falowego opisuje równanie eikonalne, które można rozwiązać szybko nowoczesnymi technikami takimi jak Fast Marching Method (FMA), Fast Sweeping Method (FSM) lub pochodnymi. Zastosowanie tych technik do rozwiązywania równania eikonálnego pozwala wyznaczyć rozwój frontu falowego w całej badanej przestrzeni a to umożliwia wyznaczenie rozkładu a posteriori pojawiającego się w kontekście inwersji probabilistycznej bez konieczności dodatkowych, czasochłonnych obliczeń. Propagacja wsteczna zarejestrowanych czasów wejść fal musi być przeprowadzona dla wszystkich odbiorników, a odpowiadające obliczenia są całkowicie niezależne dla każdego z odbiorników, a zatem proponowany algorytm jest "z natury" predysponowany do implementacji równoległych (MPI, MPICH, GPU), co dodatkowo podnosi jego atrakcyjność.

### 3 TRMLOC - Parametry kontrolne

Program TRMLOC wykorzystuje przedstawiony algorytm do lokalizacji lokalnych wstrząsów sejsmicznych. Założenie lokalności przejawia się w użyciu kartezjańskiego układu współrzędnych. Choć zorientowanie osi jest dowolne, przyjmujemy standardowo, że osie X i Y odpowiadają kierunkom horyzontalnym, natomiast oś Z jest kierunkiem pionowym (głębokość). Siatka obliczeniowa oraz rozmiar obszaru wykorzystywanego do obliczeń zdefiniowany jest razem z modelem prędkości w odpowiednim pliku zewnętrznym. W wersji (2.2) siatka ta musi być sześcienna, choć liczba węzłów siatki wzdłuż każdej osi może być inna. Bardzo ważne jest, by rozważany obszar zawierał wszystkie używane do lokalizacji stacje sejsmiczne. Złamanie tego warunku będzie sygnalizowane jako błąd. Natomiast, gdyby hipocentrum znajdowało się poza siatką modelu prędkości, program będzie pracował normalnie pokazując (błędnie) lokalizację na brzegu obszaru.

Program TRMLOC do poprawnej pracy wymaga trzech podstawowych typów danych wejściowych:

1. danych wejściowych którymi są zarejestrowane czasy wejścia pierwszej fali sejsmicznej
2. modelu prędkościowego
3. parametrów kontrolujących proces modelowania i inwersji

Odpowiednie informacje o potrzebnych parametrach, nazwach plików, itp. przekazywane są do programu za pomocą mechanizmu kluczy identyfikacyjnych. Polega on na tym, że z każdym

|                                          |   |                                                    |
|------------------------------------------|---|----------------------------------------------------|
| <code>trmlloc -D:test.dat</code>         | : | nazwa pliku z danymi                               |
| <code>trmlloc -h</code>                  | : | lista wszystkich słów kluczowych                   |
| <code>trmlloc -f</code>                  | : | lista plików z domyślnymi nazwami                  |
| <code>trmlloc -o</code>                  | : | lista wartości ustawionych parametrów              |
| <code>trmlloc Xap=0 Yap=0 Zap=100</code> | : | definicja lokalizacji wstępnej ( <i>a priori</i> ) |

Rysunek 1: Przykłady wywołania programu TRMLLOC z wybranymi słowami kluczowymi

parametrem ustawianym przez operatora związany jest klucz identyfikujący go. Ustawienie oczekiwanej wartości parametru wymaga więc wywołania programu z zadaniem kluczem i przypisaną wartością jeśli dany klucz tego wymaga. Ten ogólny schemat ilustrują poniższe przykłady wywołania programu TRMLLOC z ustawionymi parametrami. Klucze identyfikacyjne mogą występować jako parametry on-line lub być zebrane w zewnętrznym pliku odczytywanym przez TRMLLOC. Kolejność wystąpienia kluczy jest nieważna, zatem wywołania:

```
trmlloc key1 key2
trmlloc key2 key1
```

są równoważne.

Wszystkie parametry definiowane w powyższy sposób, a więc także i wszystkie klucze dzielą się na trzy kategorie:

- klucze z definicjami nazwy plików
- klucze kontrolne umożliwiające zmianę trybu pracy programu
- klucze do przekazania danych numerycznych

i są omówione poniżej.

### 3.1 Klucze wyboru nazw plików

Ta grupa słów kluczowych pozwala zdefiniować nazwy plików z których korzystać będzie program: plików z danymi potrzebnymi do pracy, jak również plików, do których zapisywane są wyniki pracy programu. Odpowiednie klucze mogą występować samodzielnie (bez nazw plików) i wówczas program używa domyślnych nazw plików lub z podanymi (po znaku :) nazwami plików. Należy zwrócić uwagę na to, że klucz i nazwa pliku rozdzielone są znakiem `':'`. Znak ten można opuścić, jeśli klucz używany jest bez podania nazwy pliku. Ich użycie jest następujące:

```
trmlloc -X:[plik]
```

gdzie X to wybrany klucz a nawias [ ] oznacza, że podanie nazwy pliku jest opcjonalne. Pełna lista kluczy tego typu jest następująca:

|    |                                                 |
|----|-------------------------------------------------|
| -L | Plik z danymi logu pracy                        |
| -O | Plik wyjściowy z rozkładami <i>a posteriori</i> |
| -P | Plik z parametrami kontrolnymi                  |
| -D | Plik z danymi wejściowymi                       |
| -V | Plik z modelem prędkości                        |
| -R | Plik wyjściowy z residuami                      |

### 3.2 Klucze do przekazywania danych numerycznych

Drugą grupę tworzą klucze umożliwiające przekazanie programowi potrzebnych danych numerycznych i innych danych kontrolnych, np rodzaju norm. Format użycia odpowiednich kluczy jest następujący:

`trmloc key=wartość`.

Opuszczenie parametru *wartość* lub podanie nieprawidłowej wartości będzie w większości wypadków sygnalizowane odpowiednim komunikatem o błędzie. Pełna lista kluczy tego typu jest następująca:

|      |                             |      |                                 |
|------|-----------------------------|------|---------------------------------|
| Fvi= | Input velocity format       | Xap= | A priori X                      |
| Fdi= | Input data format           | Yap= | A priori Y                      |
| Fpo= | Output PDF format           | Zap= | A priori Z                      |
| Cme= | A priori variance for (X/Y) | Ip=  | A posteriori pdf norm [g/l/m/c] |
| Cmz= | A priori variance for (z)   | Cp=  | A posteriori variance           |
| Ia=  | A priori pdf norm [g/l/m/c] | Omp= | Multi-processing options        |
| Fsc= | Gradient scaling            | Ftm= | TT initialization               |
| Fec= | Convergence criterion       | Fit= | No. of G-S iterations           |

Znaczenie poszczególnych parametrów jest następujące.

- **Fvi** - klucz ten kontroluje format pliku modelu prędkości i w wersji(2.2) może przyjmować wartości **0,1**
- **Fdi** - klucz ten kontroluje format pliku z danymi pomiarowymi i w wersji(2.2) może przyjmować tylko wartości **0**
- **Fpo** - klucz ten kontroluje sposób zapisu rozkładów *a posteriori*. Dostępne wartości to **0,1,2,3,4** (patrz tabela 1)
- **Cme** - kluczem tym ustawiamy wartość błędu (niepewności) dla składowych X/Y modelu *a priori*. Akceptowalne wartości: **liczba rzeczywista, dodatnia**

- **Cmz** - kluczem tym ustawiamy wartość błędu (niepewności) dla składowych Z modelu *a priori*. Akceptowalne wartości: **liczba rzeczywista, dodatnia**
- **Ia** - kluczem tym wybieramy normę generującą rozkład *a priori*. Dostępne opcje **g,l,m,c** generujące następujące rozkłady (Debski, 2010; Debski et al., 1997)

| kyc | norma | Opis                           |
|-----|-------|--------------------------------|
| g   | $l_2$ | norma kartezjańska,            |
| l   | $l_1$ | norma <i>absolute value</i>    |
| c   | $l_c$ | norma Cauchy'ego               |
| m   | $l_m$ | zmodyfikowana norma Cauchy'ego |

- **Ip** - kluczem tym wybieramy normę generującą rozkład *a posteriori*. Opis jak wyżej.
- **Xap** - kluczem tym ustawiamy składową X przyjętej *a priori* lokalizacji hipocentrum
- **Yap** - kluczem tym ustawiamy składową Y przyjętej *a priori* lokalizacji hipocentrum
- **Zap** - kluczem tym ustawiamy składową Z przyjętej *a priori* lokalizacji hipocentrum
- **Cp** - kluczem tym ustawiamy wartość błędu *a posteriori* wyznaczenia czasu wstrząsu
- **Ftm** - parametr inicjalizacji algorytmu FSM. Zwykle nie wymaga ustawiania
- **Fit** - parametr definiującą liczbę iteracji algorytmu FSM. Może wymagać zwiększenia dla skomplikowanych modeli prędkości (jeśli raportowana w logu liczba iteracji osiąga wartość domyślną - 20 )
- **Fsc** - parametr inicjalizacji algorytmu FSM. Zwykle nie wymaga ustawiania
- **Fec** - parametr inicjalizacji algorytmu FSM. Zwykle nie wymaga ustawiania
- **Omp** - parametr kontrolujący wykorzystanie wieloprocusowosci systemu komputerowego. (jeszcze nie zaimplementowane) Możliwe są następujące ustawienia:

| <b>Omp</b> | Opis                                                                                                                                                          |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0          | opcja domyślna, wykorzystane wszystkie zasoby (rdzenie, procesory, itp.) komputera                                                                            |
| $N \geq 1$ | Maksymalnie n-wątków jest używanych. Jeśli N przekracza fizyczną liczbę rdzeni/procesorów itp. jest automatycznie redukowane do liczby dostępnych procesorów. |

### 3.3 Klucze kontrolne

Klucze kontrolne umożliwiające zmianę trybu pracy programu i wymagające jedynie podanie odpowiedniego klucza w wywołaniu. Odpowiednie klucze mają postać: - x gdzie x jest małą literą alfabetu. Poniżej zamieszczamy pełną listę kluczy tego typu i ich opis

- a informacje o autorze programu
- f lista plików i ich domyślnych nazw
- h lista wszystkich kluczy
- m wyliczane są wszystkie brzegowe rozkłady *a posteriori*
- o lista użytych parametrów
- q blokowanie wyświetlania informacji o pracy programu na konsoli

### 3.4 Użycie kluczy: On-line i w pliku

Klucze wraz z parametrami przekazywane do programu powyższym mechanizmem mogą występować albo jako parametry wywołania programu TRMLLOC np. przy jego uruchamianiu z konsoli, lub w skrypcie startowym. Wówczas wywołanie programu wygląda następująco:

```
trmlloc key1 key2, ...keyn
```

Klucze mogą być także zdefiniowane w pliku zewnętrznym odczytywanym przez program. Przykładem takiego użycia pliku z parametrami jest wywołanie programu trmlloc

```
trmlloc -P:par.rcp
```

gdzie przykładowy plik par . rcp ma postać:

```
-Dd2.dat      Plik z danymi
-Vv3.vel      Model pr"edko"sci
-L -R -O      Pliki wyj"sciowe z domy"slnymi nazwami

Fdi=0 Formaty plikow
Fvi=0
Fpo=2

Cm=100 Parametry Inwersji
Cp=0.6
Ia=g
Ip=g

Xap=5000 Model a_priori
Yap=4500
Zap=600
```

Rysunek 2: Przykładowy plik z parametrami

Plik taki nie ma określonego formatu a jedynie należy zadbać by wśród komentarzy, którymi

są dowolne teksty w dowolnym miejscu, nie pojawiły się znaki identyczne z jakimkolwiek kluczem.



## 4 Pliki i ich formaty

### 4.1 Dane wejściowe

Danymi wejściowymi używanymi przez TRMLOC są **czasy pierwszych wejść fali P** zarejestrowane przez sejsmometry używanej sieci. Nie ma znaczenia rodzaj zarejestrowanej fazy, tzn. czy jest to fala bezpośrednia, odbita, refragowana, itp. Ze względu na lepszą dokładność odczytu czasu wejścia polecamy zdecydowanie używać fal **P** choć użycie fal **S** (także pierwszych wstąpień) jest dopuszczalne. Zadaniem operatora sieci, lub używanego softwaru do detekcji automatycznej jest wyznaczenie tych czasów z dostępnych sejsmogramów i stworzenie odpowiedniego pliku wejściowego.

Plik z danymi wejściowymi jest identyfikowany przez słowo kluczowe **-D:[fname]**. Formatu pliku z danymi wejściowymi jest kontrolowany za pomocą klucza **Fdi=**. W aktualnej wersji programu (2.2) następujące formaty są akceptowane:

| Fdi | Opis formatu              |
|-----|---------------------------|
| 0   | Kolumny ASCII (N X Y Z T) |

gdzie:

N - numer kanału/stacji rejestrującej,

X, Y, Z - współrzędne sejsmometru, geofonu, itp.,

T - zarejestrowany czas przyjścia fali.

Poszczególne kolumny z danymi muszą być oddzielone jedną lub wieloma spacjami lub tabulatorami.

### 4.2 Model prędkościowy

Model prędkości (przestrzenny, zdyskretyzowany rozkład prędkości fal P) zdefiniowany jest w pliku którego nazwa indentyfikowana jest przez słowo kluczowe **-V:[fname]**. W przypadku braku nazwy pliku **fname** za identyfikatorem **-V**, lub całkowitym opuszczenie klucza **-V**, program będzie automatycznie próbował odszukać w bieżącym katalogu plik `trmlloc.vel` i odczytać jako plik z modelem prędkości. W obecnej wersji TRMLOC obsługuje kilka modeli rozkładów prędkości z których każdy posiada swój własny format zapisu.

Następujące modele prędkości wybierane kluczem **Fvi=** są obsługiwane w wersji (2.2):

1. **Fvi=0** - model jednorodny o stałej prędkości V
2. **Fvi=1** - model ogólny, blok danych w formacie tablicy ASCII
3. **Fvi=2** - model ogólny, blok danych w formacie binarnym
4. **Fvi=3** - model 1D (płaskie warstwy), format ASCII

W każdym przypadku plik składa się z nagłówka i bloku danych czyli wartości prędkości w poszczególnych węzłach sieci:

|                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| linia nagłówka] | # ....                        |
| blok danych]    | $v_1, v_2, \dots v_{N_{tot}}$ |

Nagłówek zawiera informacje o obszarze modelu oraz używanej siatce i ma następujący format:

|                                              |
|----------------------------------------------|
| # Q xm xM ym yM zm zM dx dy dz Nx Ny Nz Ntot |
|----------------------------------------------|

gdzie:

# - symbol identyfikujący linie nagłówka

Q - wielkość zależna od użytego modelu prędkości xm, ym, zm - współrzędne “lewego dolnego” rogu siatki modelu prędkości

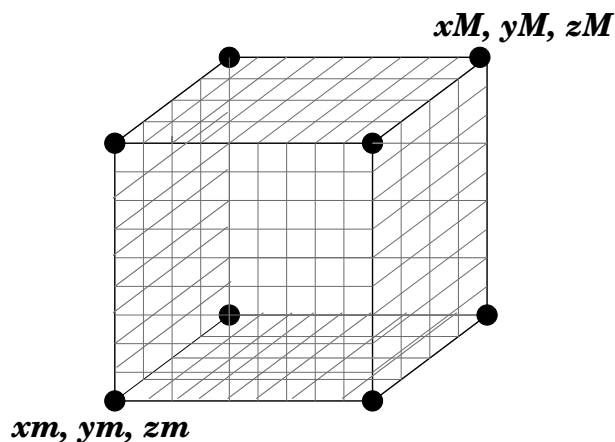
xM, yM, zM - współrzędne “prawego górnego” rogu siatki modelu prędkości

dx, dy, dz - odległość między węzłami siatki wzdłuż osi X, Y, Z

Nx, Ny, Nz - liczba węzłów siatki wzdłuż osi X, Y, Z

Ntot - liczba wszystkich węzłów siatki ( $N_{tot} = N_x * N_y * N_z$ )

Definicje oznaczeń współrzędnych modelu prędkości pokazuje Rys. 3.



Rysunek 3: Ilustracja definicji współrzędnych określających obszar model prędkości oraz sposób numerowania węzłów sieci.

Format bloku danych zależy od wybranego formatu i w obecnej wersji (2.2) obsługiwane są następujące formaty:

1. **Fvi=0** - blok danych jest ignorowany a każdemu węzłowi siatki przypisywana jest wartość prędkości  $V$  określona w nagłówku pliku jako pierwszy liczbowy parametr Q:  $V = Q$ .
2. **Fvi=1** - model ogólny zapisany w formacie tablicy ASCII ASCII, tj.
3. **Fvi=2** - model ogólny z blokiem danych zapisany w formacie tablicy binarnej (format jeszcze nie zaimplementowany). Parametr Q jest ignorowany.

4. **Fvi=3** - model warstwowy 1D: jednorodne warstwy o zadanej miąższości (format jeszcze nie zaimplementowany)

Format bloku danych dla modeli niejednorodnych jest następujący:

#### 4.2.1 Model ogólny: **Fvi=1**, **Fvi=2**

Blok danych dla najbardziej ogólnego modelu prędkości jest tablicą wartości prędkości dla każdego węzła siatki zapisany w postaci ASCII (**Fvi=1**) lub binarnym (**Fvi=2**) i ma postać tablicy

$$\begin{array}{c} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ v_i \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{Ntot} \end{array} \quad \text{lub} \quad \begin{array}{c} v_1, \quad v_2, \quad \dots \quad v_{Ntot} \end{array}$$

przy czym i-ta wartość  $v_i$  przypisywana jest węzłowi o numerze  $i = ix + iy * Nx + iz * Nx * Ny$  gdzie  $ix, iy, iz$  są współrzędnymi węzła na siatce wzdłuż osi X, Y i Z odpowiednio jak pokazuje Rys. 3. Kolejne wartości muszą być oddzielone spacją lub występować w nowych liniach (jeśli używany jest format ASCII). Dla tych modeli parametr Q jest ignorowany.

#### 4.2.2 Model warstwowy 1D: jednorodne warstwy o zadanej miąższości

W tym modelu prędkości format bloku danych jest następujący:

$$\begin{array}{ccc} z_1 & z_2 & V_1 \\ z_2 & z_3 & V_2 \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ z_{i-1} & z_i & V_{i-1} \\ z_i & z_{i+1} & V_i \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ z_{N-1} & z_N & V_{N-1} \end{array}$$

gdzie liczba warstw określona jest w nagłówku jako pierwszy parametr Q. Poszczególne liczby w kolejnych liniach oznaczających głębokość początku warstwy ( $z_i$ ), końca warstwy ( $z_{i+1}$ ) oraz prędkości w warstwie ( $V_i$ ) oddzielone muszą być tylko spacjami.

### 4.3 Wyniki: rozkłady prawdopodobieństwa

Podstawowym wynikiem działania TRMLOC jest trójwymiarowy rozkład prawdopodobieństwa *a posteriori* lokalizacji hipocentrum wstrząsu sejsmicznego oraz pochodne rozkłady brzegowe. Rozkłady te zapisywane są w pliku wejściowym którego nazwa określona jest słowem kluczowym **-O:[fname]**, gdzie fname jest (opcjonalną) nazwą pliku. Jeśli nazwa pliku jest pominięta lub słowo kluczowe **-O** nie zostało użyte, program automatycznie zapisze wyniki w pliku `trmloc.out` utworzonym w bieżącym katalogu. Format pliku określony jest przez klucz **Fpo=** który w wersji (2.2) przyjmuje wartości przedstawione w tablicy 1.

| Fpo | Opis                                                                                     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0   | rozkłady brzegowe 1D i 2D, tj. $P(x)$ , $P(y)$ , $P(z)$ , $P(x,y)$ , $P(x,z)$ , $P(y,z)$ |
| 1   | rozkłady brzegowe 1D, tj. $P(x)$ , $P(y)$ , $P(z)$                                       |
| 2   | rozkłady brzegowe 2D, tj. $P(x,y)$ , $P(x,z)$ , $P(y,z)$                                 |
| 3   | rozkład 3D, $P(x,y,z)$ (używany domyślnie jeśli klucz <b>-m</b> nie jest użyty)          |
| 4   | wszystkie rozkłady: 1D, 2D, 3D                                                           |

Tablica 1: Rodzaje rozkładów *a posteriori* zapisywanych przez TRMLOC w wersji (2.2).

### 4.4 Wyniki: residua

Kolejnym plikiem z wynikami obliczeń jest plik zawierający residua, tj. różnice zarejestrowanych i wyliczonych czasów propagacji fal sejsmicznych dla różnych oszacowań położenia hipocentrum wstrząsu. W przypadku oszacowań opartych na rozkładach brzegowych, a nie pełnym 3D rozkładzie *a posteriori* współrzędne hipocentrum które nie są wyznaczane bezpośrednio z analizowanego rozkładu brzegowego są przenoszone z rozwiązania najbardziej prawdopodobnego dla rozkładu *a posteriori* 3D. Np. przy wyznaczaniu residuów dla rozwiązania, w którym składowe X i Y wyznaczane są jako najbardziej prawdopodobne z rozkładu brzegowego  $p(x, y)$  jako głębokość rozwiązania przyjmowane jest oszacowanie  $z^{ml}$  z rozkładu 3D.

Residua zapisywane są w pliku wyjściowym, którego nazwa określona jest słowem kluczowym **-R:[fname]**, gdzie fname jest (opcjonalną) nazwą pliku. Jeśli nazwa pliku jest pominięta lub słowo kluczowe **-R** nie zostało użyte, program automatycznie zapisze wyniki w pliku `trmloc.res` utworzonym w bieżącym katalogu. Format pliku jest następujący pokazany w Rys. 4, z tym tylko, że wyniki dla rozkładów brzegowych 1D i 2D zapisywane są tylko wtedy gdy użyty został klucz **-m=**.

| #   | PDF | STC       | Tobs      | Tsyn_ml   | Tsyn_avr  | TT_ml     | TT_avr    | R_ml      | R_avr     | Cd  |
|-----|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
| X   | 1   | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 1   |
| X   | 2   | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 1   |
| ... | ... | ...       | ...       | ...       | ...       | ...       | ...       | ...       | ...       | ... |
| Y   | 10  | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 1   |
| XY  | 1   | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 0.000e+00 | 1   |
| XYZ | 1   | 1.676e-01 | 1.773e-01 | 1.773e-01 | 1.676e-01 | 1.676e-01 | 1.676e-01 | 1.676e-01 | 1.773e-01 | 11  |

Rysunek 4: Format pliku residuów. Tsyn\_avr i Tsyn\_ml to estymaty MLL i AVR czasu wystąpienia wstrząsu, TT\_ml i TT\_avr wymodelowane czasy propagacji fal, R\_ml i R\_av wartości RMS residuów dla estymatorów MLL i AVR

W pliku tym pierwsza linia nagłówka rozpoczyna się znakiem # i służy do opisu kolumn bloku danych. Pierwsza kolumna zawiera identyfikator rozkładu *a posteriori* użytego do estymacji położenia hipocentrum modelu. Ma on charakter tekstu i może przyjmować wartości: X, Y, Z - dla rozkładów brzegowych 1D, XY, YZ, XZ - dla rozkładów 2D oraz XYZ dla pełnego rozkładu 3D. Kolumna druga to numer stacji (kanału odbiorczego), kolumna 3 zawiera czasy rejestracji, kolumny 4 i 5 to oszacowane czasy wystąpienia wstrząsu, kolumny 6 i 7 to wymodelowane czasy propagacji fal od źródła do danej stacji, natomiast kolumny 8 i 9 zawierają residua wyliczone dla rozwiązań najbardziej prawdopodobnego i średniego. Ostatnia kolumna to błędy pomiarowe. W przypadku rozkładów brzegowych (identyfikatory X, Y, Z, XY, YZ, XZ) współrzędne hipocentrum, które nie są wyznaczane bezpośrednio z analizowanego rozkładu brzegowego, są przenoszone z rozwiązania najbardziej prawdopodobnego dla rozkładu *a posteriori* 3D.

#### 4.5 Wyniki: log pracy i estymatory punktowe

Głównym wynikiem działania TRMLOC jest trójwymiarowy rozkład prawdopodobieństwa *a posteriori*. Charakterystyki tego rozkładu, jak również pochodnych rozkładów brzegowych, takich jak lokalizacja najbardziej prawdopodobna, lokalizacja średnia i macierz kowariancji, residua itp. zapisywane są wraz z informacjami o pracy programu w pliku wyjściowym którego nazwa określona jest słowem kluczowym **-L:[fname]**, gdzie fname jest (opcjonalną) nazwą pliku. Jeśli nazwa pliku jest pominięta lub słowo kluczowe **-L** nie zostało użyte, program automatycznie zapisze wyniki w pliku `trmloc.log` utworzonym w bieżącym katalogu. Plik podzielony jest na sekcje, a jego format jest skomplikowany i zamiast opisywać go przedstawiamy poniżej przykładowy wydruk pliku (logu). Sekcje MARGINAL SOLUTIONS i MARGINAL ERRORS pojawiają się gdy użyty został klucz **-m**. Warto zwrócić uwagę, że każda linia zawierająca informacje o użytych wartościach parametrów lub otrzymanych wynikach ma jednoznaczny identyfikator zaczynający się symbolem #.

## Podziękowania

Projekt TRMLOC, w tym niniejsza dokumentacja powstała dzięki finansowemu wsparciu przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego 2011/01/B/ST10/07305. Chciałbym serdecznie podziękować wszystkim, którzy wsparli rozwój projektu przez testowanie oprogramowania i pomoc w przygotowaniu niniejszej dokumentacji, a w szczególności dr D. Garus. i mgr K. Waśkiewiczowi.

FSM TRM MODELLING

| #M0  | V_SRC | Iter. | RMS_CONV |
|------|-------|-------|----------|
| #M-0 | 1     | 3     | 9.15e-03 |
| #M-1 | 2     | 3     | 4.44e-03 |
| #M-2 | 3     | 3     | 1.00e-02 |
| #M-3 | 4     | 3     | 7.77e-03 |

### 3D Solution Characteristic

```
#C1 Evidence : 2677.64
#C2 Residua_ml : 0.13974
#C3 Residua_av : 0.147998
#C4 P_max_ml : 0.000373463
#C5 P_max_avr : 0
#C6 I_Sh post/prior : 14.6211
#C7 I_Sh post/noninfo : 18.5588
#C8 X_ml : 5151500
#C9 X_av : 5151791.9
#Ca Y_ml : 1613250
#Cb Y_av : 1612875.8
#Cc Z_ml : 900
#Cd Z_av : 995.33796
#Ce To_ml : 45.395
#Cf To_av : 45.415
```

COVARIANCE

```
#E1 E_xx : 269.899
#E2 E_yy : 399.151
#E3 E_zz : 421.125
#E4 R_xy : -0.00439781
#E5 R_xz : -0.0409985
#E6 R_yz : 0.0240211
#E7 D_To_m1 : 0.13974
#E8 D_To_av : 0.147998
```

### MARGINAL SOLUTIONS

| ID    | PDF    | MLL     | Avr       | Disp  | Rml_rms | R_av_rms |
|-------|--------|---------|-----------|-------|---------|----------|
| #S1_x | p(xyz) | 5151500 | 5151791.9 | 16.43 | 0.1397  | 0.148    |
| #S2_y | p(xyz) | 1613250 | 1612875.8 | 19.98 | 0.1397  | 0.148    |
| #S3_z | p(xyz) | 900     | 995.33796 | 20.52 | 0.1397  | 0.148    |
| #S4_x | p(x)   | 5151500 | 5151791.9 | 16.43 | 0.1406  | 0.152    |
| #S5_y | p(y)   | 1613250 | 1612875.8 | 19.98 | 0.1406  | 0.152    |
| #S6_z | p(z)   | 900     | 995.33796 | 20.52 | 0.1397  | 0.148    |
| #S7_x | p(xy)  | 5151500 | 5151791.9 | 16.43 | 0.1393  | 0.152    |
| #S8_y | p(xy)  | 1613200 | 1612875.8 | 19.98 | 0.1393  | 0.152    |
| #S9_x | p(xz)  | 5151500 | 5151791.9 | 16.43 | 0.1397  | 0.148    |
| #Sa_z | p(xz)  | 900     | 995.33796 | 20.52 | 0.1397  | 0.148    |
| #Sb_y | p(yz)  | 1613250 | 1612875.8 | 19.98 | 0.1397  | 0.148    |
| #Sc_z | p(yz)  | 900     | 995.33796 | 20.52 | 0.1397  | 0.148    |

MARGINAL ERRORS

|     |        | Cxx     | Cyy     | Czz     | Rxy    | Rxz    | Ryz   |
|-----|--------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|
| #B1 | p(x)   | 269.898 | ---     | ---     | ---    | ---    | ---   |
| #B2 | p(y)   | ---     | 399.151 | ---     | ---    | ---    | ---   |
| #B3 | p(z)   | ---     | ---     | 421.125 | ---    | ---    | ---   |
| #B4 | p(xy)  | 269.899 | 399.151 | ---     | -0.004 | ---    | ---   |
| #B5 | p(xz)  | 269.899 | ---     | 421.125 | ---    | -0.041 | ---   |
| #B6 | p(yz)  | ---     | 399.151 | 421.125 | ---    | ---    | 0.024 |
| #B7 | p(xyz) | 269.899 | 399.151 | 421.125 | -0.004 | -0.041 | 0.024 |

---

14

# Literatura

- Artman, B., I. Podladtchikov, and B. Witten (2010). Source location using time-revers imaging. *Geophys. Prosp.* 58, 861–873.
- Debski, W. (2010). Probabilistic inverse theory. *Adv. Geophys.* 52, 1–102.
- Debski, W., B. Guterch, H. Lewandowska, and P. Labak (1997). Earthquake sequences in the krynica region western carpathians 1992 - 1993. *Acta Geophys. Pol.* XLV(4), 255–290.
- Fink, M. (1997). Time reversed acoustic. *Physics Today* 50, 34–40.
- Gajewski, D. and E. Tessmer (2010). Reverse modelling for seismic event characterization. *Geophys. J. Int.* 163, 276–284.
- Jakka, R., E. Cochran, and J. Lawrence (2010). Earthquake source characterization by the isochrone back projection method using near-source ground motions. *Geophys. J. Int.* 182(2), 1058–1072.
- Kremers, S., A. Fichtner, G. Brietzke, H. I. C. L. L. Huang, and M. Kaser (2011). Exploring the potentials and limitations of the time-reversal imaging of finite seismic sources. *Solid Earth* 2, 95–105.
- Larmat, C., R. Guyer, and P. A. Johnson<sup>1</sup> (2009). Tremor source location using time reversal: Selecting the appropriate imaging field. *Geophys. Res. Lett.* 36(L22304), L22304.
- O’Brien, G., J. Lokmer, L. D. Barros, C. Bean, G. Saccorotti, J.-P. Metaxian, and D. Patane (2011). Time reverse location of seismic long-period events recorded on mt etna. *Geophys. J. Int.* 184, 452–462.
- Sutin, A., J. TenCate, and P. Johnson (2004). Single-channel time reversal in elastic solids. *J. Acoust. Soc. Am.* 116, 2779.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998). New improved version of the generic mapping tools released. *EOS* 79, 579.

## **A Warunki użytkowania i dystrybucji programu TRMLLOC**

Program komputerowy TRMLLOC w wersji 2.2 opisany w niniejszej dokumentacji dystrybuowany jest jako Open Source zgodnie z licencją GPL. Może on być bezpłatnie używany w pracach badawczych, naukowych i edukacyjnych. Jego zastosowanie komercyjne jest również bezpłatne jednakże autor oprogramowania bardzo prosi o informacje o fakcie takiego wykorzystania (pisemnie lub poprzez rejestrację na stronie ....), oraz zamieszczenie odpowiednich informacji, w tym informacji o finansowaniu projektu przez Narodowe Centrum Nauki oraz informacji o autorze. Równocześnie autor prosi potencjalnych użytkowników o niedystrybowanie niniejszego oprogramowania osobom trzecim lecz wskazywanie strony domowej autora jako aktualnego repozytorium dla projektu. Wszystkie rysunki zamieszczone w niniejszej pracy wykonane zostały przy użyciu oprogramowania GMT Wessel and Smith (1998).



## B Lista Kluczy dla programu TRMLLOC

```
=====
*** TRMLLOC ver 2.2 ***
=====
----- Input/Output files -----
-L    Log file
-O    Output PDF
-P    Parameter file
-D    Data
-V    Velocity model
-R    Residua
----- Switching controls -----
-a    authors info
-f    default file names
-h    syntax of parameters
-m    calculate all marginal distributions
-o    lists of set parameters
-q    no messages to stderr
----- Inversion controls -----
Fvi=  Input velocity format
Fdi=  Input data format
Fpo=  Output PDF format
Err=  Error message types
Cme=  A priori variance for (X/Y)
Cmz=  A priori variance for (z)
Ia=   A priori pdf norm [g/l/m/c]
Xap=  A priori X
Yap=  A priori Y
Zap=  A priori Z
Cp=   A posteriori variance
Ip=   A posteriori pdf norm [g/l/m/c]
----- FSM modeler -----
Ftm=  TT initialization
Fit=  No. of G-S iterations
Fsc=  Gradient scaling
Fec=  Convergence criterion
=====
```

## C Domyślne nazwy plików

```
=====
*** TRML0C ver 2 ***
=====
I/O file structure:
key  type  mode/auto  [default]  name
.....
-L   ASCII  W/+         [trml0c.log]  trml0c.log
-O   ASCII  W/+         [trml0c.out]  trml0c.out
-P   ASCII  R/+         [trml0c.rcp]  trml0c.rcp
-D   ASCII  R/-         [trml0c.dat]  ---
-V   ASCII  R/+         [trml0c.vel]  trml0c.vel
-R   ASCII  W/+         [trml0c.res]  trml0c.res
=====
```

## **D   Licencja GPL**