

**Zadání:** Na vybrané geometrii realizujte lineární lokalizaci umělého zdroje akustické emise s využitím tří rozdílných přístupů:

- Přístup 1: Lineární lokalizace na bázi  $\Delta t$  přístupu. Rozdíl v časech příchodu akustické vlny k jednotlivým snímačům je stanoven na základě časových značek, které charakterizují prvotní překročení signálů předem stanovený pevný práh.
- Přístup 2: Lineární lokalizace na bázi  $\Delta t$  přístupu. Rozdíl v časech příchodu akustické vlny k jednotlivým snímačům je stanoven na základě vzájemné korelace signálů (cross-correlation).
- Přístup 3: Lineární lokalizace na bázi známé útlumové charakteristiky signálu pro danou geometrii (Signal Amplitude Measurement, nebo-li tzv. SAM přístup).

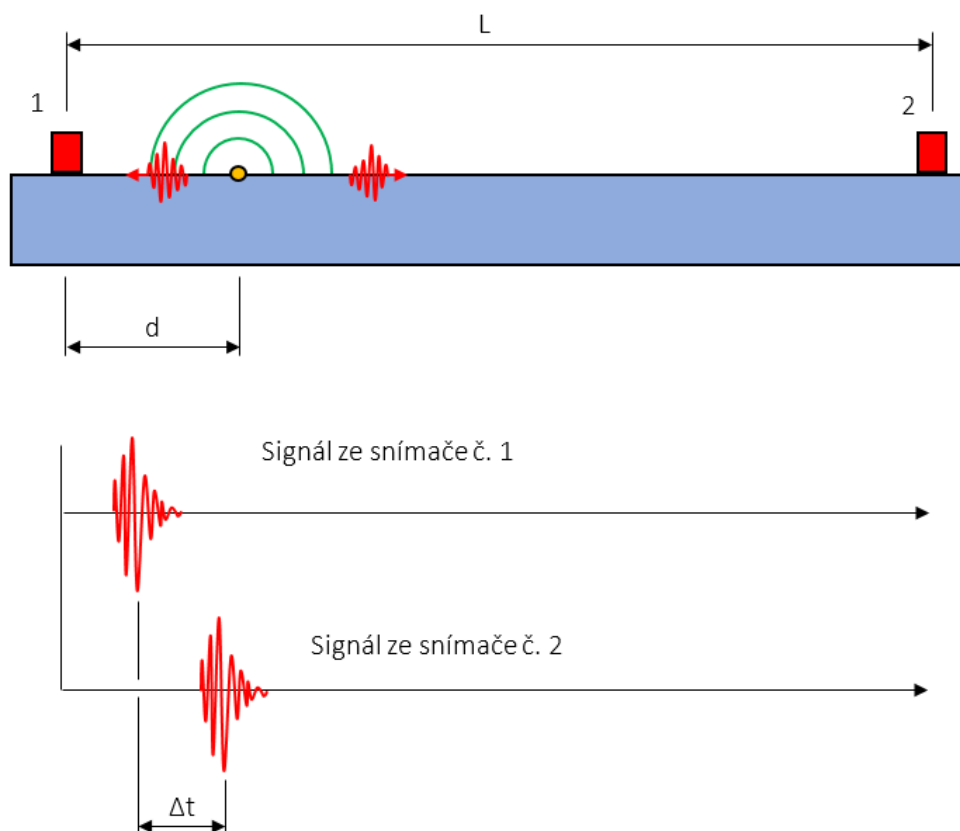
Získané poznatky, závěry a výsledky provedených analýz prezentujte ve formě závěrečné zprávy.

*Přístup 1: Lineární lokalizace na bázi  $\Delta t$  přístupu. Rozdíl v časech příchodu akustické vlny k jednotlivým snímačům je stanoven na základě časových značek, které charakterizují prvotní překročení signálů předem stanovený pevný práh.*

Klasické iterační, či neiterační přístupy určené k lokalizaci zdrojů akustické emise využívají informaci týkající se času příchodu daného signálu k jednotlivým snímačům. V rámci přístupu č. 1 budeme pro získání této informace implementovat nejjednodušší princip, založený na aplikaci pevného prahu. Uvedená metoda spočívá v určení okamžiku prvního nadkročení signálu nad definovaný práh, díky kterému obdržíme příslušnou časovou značku. Aplikujeme-li tento postup pro oba dva detekované signály, je možné na základě rozdílu časových značek stanovit polohu zdroje dle vztahu:

$$d = \frac{1}{2}(L - v\Delta t), \quad (1)$$

kde  $L$  vyjadřuje vzdálenost mezi snímači,  $v$  je rychlost šíření vlny a  $\Delta t$  určuje rozdíl v časech příchodu vlny k jednotlivým snímačům (respektive rozdíl mezi časovými značkami), viz následující obrázek.



Obrázek 1: Lineární lokalizace

Procedura identifikace rozdílu v časech příchodu vlny k jednotlivým snímačům bude provedena v prostředí software MATLAB s využitím experimentálně naměřených dat na cvičení.

```
clear all;
clc

addpath('data-mereni-CZ_AR2022-2023')

t_max=400;%Horni hranice casoveho intervalu v mikrosekundach, ktery slouzi jednak pro
           %vykreslovani vlnovych prubehu a rovnez take pro stanoveni segmentu signalu
           %ktere posleze vstupuji do samotne analyzy

thr_dB=62;%Hodnota prahu v dBAE
Thr_mV=10^(thr_dB/20)*1e-3; %Prepocet prahu na mV

%Nacteni dat, identifikace vzorkovaci frekvence (vyuziti funkce "data_load")
[Ch1,f_s]=data_load('Ch1_test.txt',t_max);
Ch2=data_load('Ch2_test.txt',t_max);
%%
%Full-wave rectification
Ch1_rect=abs(Ch1(:,2));
Ch2_rect=abs(Ch2(:,2));

%Identifikujeme prvnii prekroceni prahu Thr_mV
%Pozn.: Diky rektifikaci dane prekroceni analyzujeme jak pro kladnou, tak i
%pro zapornou cast signalu.
idx1=find(Ch1_rect>Thr_mV,1);
idx2=find(Ch2_rect>Thr_mV,1);

if isempty(idx1)==1 && isempty(idx2)~=1
    warndlg('Nenalezeno prekroceni nastaveneho thresholdu! - kanal 1','Upozorneni')
end
if isempty(idx2)==1 && isempty(idx1)~=1
    warndlg('Nenalezeno prekroceni nastaveneho thresholdu! - kanal 2','Upozorneni')
end
if isempty(idx1)~=1&& isempty(idx2)~=1
    warndlg('Nenalezeno prekroceni nastaveneho thresholdu! - kanal 1+2','Upozorneni')
end

%Zobrazime si signaly vcetne prahu a dale oznacime okamzik prvniho
%prekroceni prahu
figure
subplot(2,1,1)
plot(Ch1(:,1),Ch1(:,2),'b')
xlabel('Cas [\mus]')
ylabel('Amplituda [mV]')
hold on
%Threshold
```

```

line ([Ch1(1,1),Ch1(end,1)], [Thr_mV, Thr_mV], 'Color', 'black')
hold on
line ([Ch1(1,1),Ch1(end,1)], [-Thr_mV,-Thr_mV], 'Color', 'black')
%Prvni prekroceni prahu
plot (Ch1(idx1,1),Ch1(idx1,2), 'ro')
title (['Prekroceni prahu: t_1=', num2str(Ch1(idx1,1)), ' \mus'])
grid on
grid minor

subplot(2,1,2)
plot (Ch2(:,1),Ch2(:,2), 'b')
xlabel('Cas [\mus]')
ylabel('Amplituda [mV]')
hold on
%Threshold
line ([Ch2(1,1),Ch2(end,1)], [Thr_mV, Thr_mV], 'Color', 'black')
hold on
line ([Ch2(1,1),Ch2(end,1)], [-Thr_mV,-Thr_mV], 'Color', 'black')
%Prvni prekroceni prahu
plot (Ch2(idx2,1),Ch2(idx2,2), 'ro')
title (['Prekroceni prahu: t_2=', num2str(Ch2(idx2,1)), ' \mus; ', '\Deltat=', num2str(abs((Ch2(←
    idx2,1)-Ch2(idx1,1))))), ' \mus'])
grid on
grid minor

function [TR_data, f_sampling]=data_load(FileName, t_max)
    %nacteni dat
    fileID = fopen(FileName);
    A = textscan(fileID, '%s ');
    % Zjisteni vzorkovaci frekvence
    f_sampling_index = find(contains(A{1}, 'SampleRate[Hz]:'))
    f_sampling = str2double(A{1}(f_sampling_index+1));
    % Zjisteni pocu pretrigger samplu
    pretrigger_index = find(contains(A{1}, 'PreTriggerSamples:'))
    pretrig_samples = str2double(A{1}(pretrigger_index+1))
    %Urceni pocu bodu s ohledem na f_sampling a t_max
    N_points=round(t_max*1e-6*f_sampling);
    %Prevedeni stringu na cisla
    data_start_index=find(contains(A{1}, '[DATA] '))+1;
    TR_data=[];
    for i=1:(pretrig_samples+N_points)
        TR_data(i,1)=-(pretrig_samples+1+i)*1/f_sampling*1e6;%cas v us
        TR_data(i,2)=str2num(cell2mat(A{1}(data_start_index-1+i))); %U [mV]
    end
    fclose(fileID);
end

```

*Přístup 2: Lineární lokalizace na bázi  $\Delta t$  přístupu. Rozdíl v časech příchodu akustické vlny k jednotlivým snímačům je stanoven na základě vzájemné korelace signálů (cross-correlation).*

V rámci teorie signálů se můžeme setkat s pojmy korelace či konvoluce. Obě dvě zmíněné operace jsou si velice podobné, avšak každá z nich má poněkud odlišný význam. Konvoluce dvou spojitých funkcí téhož argumentu je definována následovně:

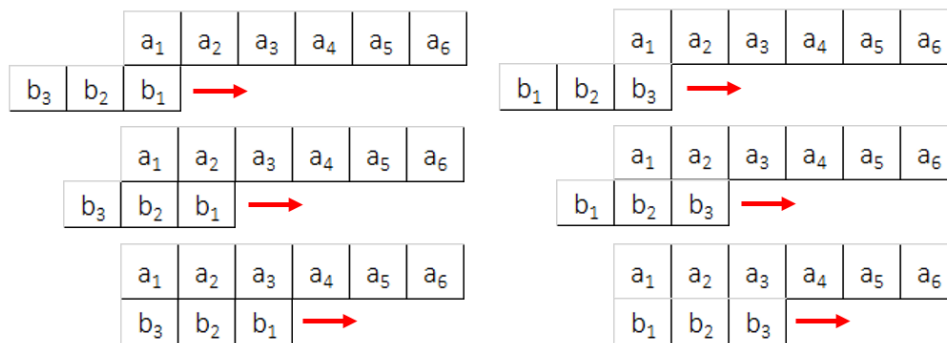
$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)d\tau, \quad (2)$$

přičemž funkce  $g(t)$  se nazývá konvoluční jádro.

V zásadě lze říci, že konvoluce nám poskytuje informaci o tom, jaký vliv má daný signál na signál druhý. Korelace naproti tomu udává míru podobnosti mezi dvěma signály, případně sekvencemi. Definice korelace je následující:

$$f(t) \star g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)d\tau. \quad (3)$$

Z matematického hlediska je jediným rozdílem mezi oběma výše uvedenými operacemi forma, s jakou přistupujeme ke konvolučnímu jádru. V případě korelace se totiž nerealizuje reverzace konvolučního jádra jako tomu je u konvoluce - viz následující obrázek.



Obrázek 2: Princip konvoluce (vlevo) a korelace (vpravo)

Diskrétní verze konvoluce respektive korelace mohou být definovány v následující formě:

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} * \mathbf{b}, c_n = \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k} \quad (4)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \star \mathbf{b}, c_n = \sum_{k=1}^n a_k b_{N_2-(n-k)}, \quad (5)$$

kde  $n = N_1 + N_2 - 1$ ,  $N_1$  je počet prvků vektoru  $\mathbf{a}$  a  $N_2$  je počet prvků vektoru  $\mathbf{b}$ .

Implementaci korelace v prostředí software MATLAB je možné provést v následující formě:

```
clear all;
clc

addpath('data-mereni-CZ_AR2022-2023')

%Horni hranice casoveho intervalu v mikrosekundach, který slouzi jednak pro
%vykreslovani vlnovych prubehu a rovnez take pro stanoveni segmentu signalu
%ktere posleze vstupuji do samotne analyzy
t_max_ch1=200;
t_max_ch2=200;
[Ch1, f_s]=data_load('Ch1_test.txt',t_max_ch1);
Ch2=data_load('Ch2_test.txt',t_max_ch2);

if length(Ch1)<length(Ch2)
    i0=length(Ch1);
    for i=i0+1:length(Ch2)
        Ch1(i,1)=Ch1(i-1,1)+1/f_s;
        Ch1(i,2)=0;
    end
elseif length(Ch2)<length(Ch1)
    for i=i0+1:length(Ch2)
        Ch2(i,1)=Ch2(i-1,1)+1/f_s;
        Ch2(i,2)=0;
    end
end

%Vykresleni vlnovych prubehu
figure
subplot(3,1,1)
plot(Ch1(:,1),Ch1(:,2),'b')
xlabel('Cas [\mus]')
ylabel('Amplituda [mV]')
subplot(3,1,2)
plot(Ch2(:,1),Ch2(:,2),'r')
xlabel('Cas [\mus]')
ylabel('Amplituda [mV]')

% Vypocet korelacnich koeficientu
%Definice pole do ktereho se budou ukladat jednotlivé korelacni koeficienty.
%Rozmer pole je roven rozmeru pole Ch1 + rozmeru pole Ch2 - 1
Ch1=Ch1(:,2);
Ch2=Ch2(:,2);
corr_coeff=zeros(numel(Ch1)+numel(Ch2)-1,1);
%Implementace vzorce: c_n=sum(k=1 az N)(a_k*b_(N2-(n-k)))
%Mejme napriklad:
%a=[a1 a2 a3 a4]
```

```

%b=[b1 b2 b3]
%c1:      [a1 a2 a3 a4]  ->  c1=a1*b3
%      [b1 b2 b3]
%c2:      [a1 a2 a3 a4]  ->  c2=a1*b2+a2*b3
%      [b1 b2 b3]
%c3:      [a1 a2 a3 a4]  ->  c3=a1*b1+a2*b2+a3*b3
%      [b1 b2 b3]
%c4:      [a1 a2 a3 a4]  ->  c4=a2*b1+a3*b2+a4*b3
%      [b1 b2 b3]
%c5:      [a1 a2 a3 a4]  ->  c5=a3*b1+a4*b2
%      [b1 b2 b3]
%c6:      [a1 a2 a3 a4]  ->  c6=a4*b1
%      [b1 b2 b3]

for n=1:(numel(Ch1)+numel(Ch2)-1)
    for k=1:n
        if (numel(Ch2)-(n-k)>=1) && k<=numel(Ch1)
            corr_coeff(n)=corr_coeff(n)+Ch1(k)*Ch2(numel(Ch2)-(n-k));
        end
    end
end

%Vykreslime korelacni koeficient, horizontalni osa bude o rozmeru: -(N1-1):(N1-1),
%pricemz vydelenim pomoci vzorkovaci frekvence a naslednym vynasobenim hodnotou
% 1e6 ji nasledne prevedeme na mikrosekundy
time_array=(-(numel(Ch1)-1):(numel(Ch1)-1))./f_s*1e6;

subplot(3,1,3)
plot(time_array,corr_coeff./max(corr_coeff),'k')
xlabel('\Delta t [\mus]')
ylabel('Normovany koeficient korelace [-]')

%Nalezneme index, ktery nalezi maximu kor. koeficientu:
idx_max=find(abs(corr_coeff)==max(abs(corr_coeff)));
delta_t=time_array(idx_max);
%Do titulku tretiho grafu vlozime dany udaj:
title(['\Delta t = ',num2str(delta_t), '\mus'])

function [TR_data,f_sampling]=data_load(FileName,t_max)
    %nacteni dat
    fileID = fopen(FileName);
    A = textscan(fileID,'%s ');

    % Zjisteni vzorkovaci frekvence
    f_Sampling_index = find(contains(A{1},'SampleRate[Hz]:'))
    f_sampling = str2double(A{1}(f_Sampling_index+1));

    % Zjisteni poctu pretrigger samplu
    pretrigger_index = find(contains(A{1},'PreTriggerSamples:'))
    pretrig_samples = str2double(A{1}(pretrigger_index+1))

```

```

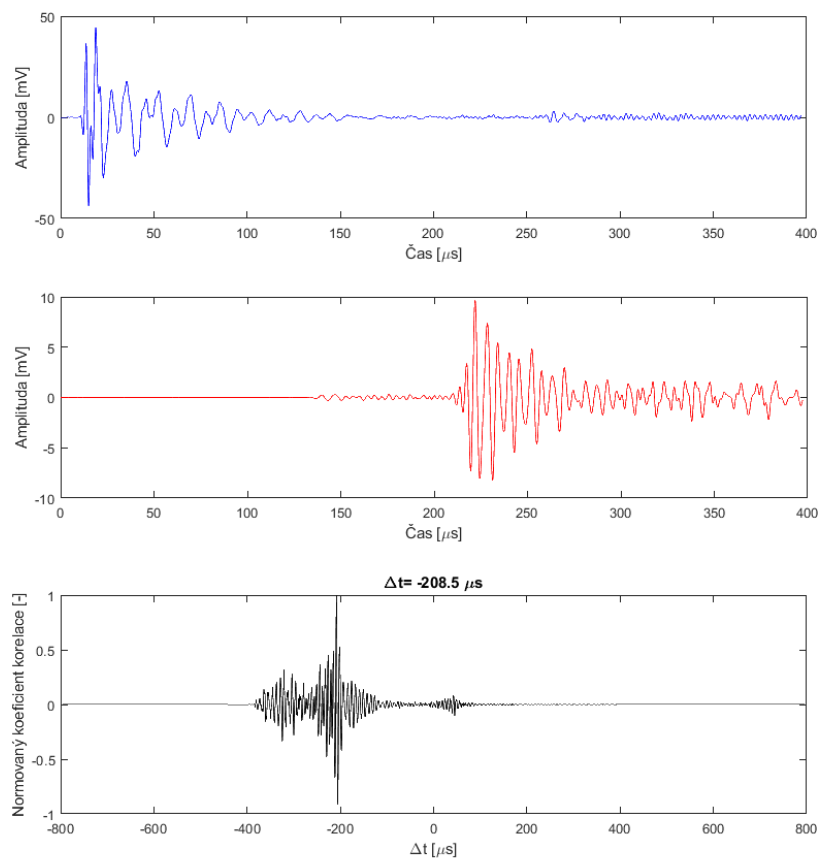
%Urceni poctu bodu s ohledem na f_sampling a t_max
N_points=round(t_max*1e-6*f_sampling);

%Prevedeni stringu na cisla
data_start_index=find(contains(A{1}, '[DATA] '))+1;
TR_data=[];

for i=1:(pretrig_samples+N_points)
    TR_data(i,1)=(-(pretrig_samples+1)+i)*1/f_sampling*1e6;%cas v us
    TR_data(i,2)=str2num(cell2mat(A{1}(data_start_index-1+i))); %U [mV]
end
fclose(fileID);
end

```

Následující obrázek přibližuje korelační analýzu dvou vlnových průběhů, u nichž je vzájemný časový posun výsledkem nestejně vzdálenosti zdroje od jednotlivých snímačů akustické emise.



Obrázek 3: Výsledek korelace dvou časových signálů



*Přístup 3: Lineární lokalizace na bázi známé útlumové charakteristiky signálu pro danou geometrii (Signal Amplitude Measurement, nebo-li tzv. SAM přístup)*

Lokalizace pomocí SAM metody je založena na využití útlumové křivky signálu akustické emise pro danou geometrii respektive použitý typ snímače akustické emise. Uvedme předpoklady aplikovatelnosti dané metody:

- Použití shodných typů snímačů.
- Geometricky jednoduchá geometrie, u níž lze předpokládat "konstantní" útlumové charakteristiky signálu mezi jednotlivými snímači.
- Materiál, ze kterého je zkoušená struktura vyrobena nesmí vykazovat příliš vysoký či nízký útlum signálu se vzdáleností.

Implementace dané metody v prostředí software MATLAB je uvedena na následujících řádcích.

```
clear all;
clc

addpath('data-mereni-CZ_AR2022-2023')

% Konstrukce utlumove krivky
Att_curve=[0.02 83.7;
            0.06 76.7;
            0.12 73.5;
            0.5 66.4]; %Prvni sloupec "vzdalenost", druhy sl. amplituda

D=0.4;%Vzdalenost mezi snimaci v metrech
dist=(0:0.001*D:D);

% f=fit(Att_curve(:,1),Att_curve(:,2),'linearinterp');
%f=fit(Att_curve(:,1),Att_curve(:,2),'smoothingspline')
%Informace o objektu "f"

%*****algorithmus na lin. interpolaci
%Pocet segmentu
N_segment=size(Att_curve,1)-1;
k=[];
q=[];
for i=1:N_segment
    k(i)=(Att_curve(i+1,2)-Att_curve(i,2))/(Att_curve(i+1,1)-Att_curve(i,1));
    q(i)=Att_curve(i,2)-k(i)*Att_curve(i,1);
end

A_lin=[];
```

```

for i=1:N_segment
    if i==1
        %Nalezneme indexy vektoru dist, jejich souradnice je mensi nez
        %souradnice v poradi druheho bodu
        idx=find(dist<=Att_curve(i+1,1));
        A_lin(idx)=k(i).*dist(idx)+q(i);

%         %Pridame puvodni bod
%         A_lin=[A_lin Att_curve(i+1,2)];
%         dist=[dist(1:idx(end)) Att_curve(i+1,1) dist(idx(end)+1:end)];
    elseif i==N_segment
        idx=find(dist>=Att_curve(i,1));
        A_lin(idx)=k(i).*dist(idx)+q(i);
    else
        idx=find(dist>=Att_curve(i,1) & dist<Att_curve(i+1,1));
        A_lin(idx)=k(i).*dist(idx)+q(i);

%         %Pridame puvodni bod
%         A_lin=[A_lin Att_curve(i+1,2)];
%         dist=[dist(1:idx(end)) Att_curve(i+1,1) dist(idx(end)+1:end)];
    end
end

% Kontrola spravnosti algoritmu
% plot(Att_curve(:,1),Att_curve(:,2),'o-')
% hold on
% plot(dist(1:length(A_lin)),A_lin,'o-')
%%
figure
plot(Att_curve(:,1),Att_curve(:,2),'o')
hold on
plot(dist,A_lin)
hold on
line([D D],ylim) %Maximalni vzdalenost mezi snimaci
legend('Body utlumove krivky','Aproximace','Vzdalenost mezi snimaci - D')
xlabel('Vzdalenost od osy snimace [m]')
ylabel('Amplituda [dB_{AE}]')

%Urcime graf difference amplitud v zavislosti na poloze zdroje
%Vzajemne odedcteni puvodni a invertovane utlumove krivky vctne nasledneho
%preklopeni do zapornych hodnot
Amp_diff=A_lin-flip(A_lin);

figure
subplot(2,1,1)
plot(dist,A_lin,dist,flip(A_lin))
legend('Utlumova krivka - snimac c.1','Utlumova krivka - snimac c.2')
xlabel('Souradnice [m]')
ylabel('Amplituda [dB_{AE}]')

```

```

grid on
grid minor

subplot(2,1,2)
plot(dist,Amp_diff)
xlabel('Souradnice [m]')
ylabel('Diference [dB_{AE}]')
grid on
grid minor

%%
%+++++++Overeni programu
%Horni hranice casoveho intervalu v mikrosekundach, který slouzi jednak pro
%vykreslovani vlnovych prubehu a rovnez take pro stanoveni segmentu signalu
%ktere posleze vstupuji do samotne analyzy
t_max_ch1=200;
t_max_ch2=500;

%Nacteni dat, identifikace vzorkovaci frekvence (vyuziti funkce "data_load")
[Ch1,f_s]=data_load('Ch1_test.txt',t_max_ch1);
Ch2=data_load('Ch2test.txt',t_max_ch2);
Ch1_Amax=20*log10(max(abs(Ch1(:,2)))*1e3);%Maximalni amplituda zdroje na snimaci 1 v dBAE
Ch2_Amax=20*log10(max(abs(Ch2(:,2)))*1e3);%Maximalni amplituda zdroje na snimaci 2 v dBAE
[value,index]=min(abs(Amp_diff-(Ch1_Amax-Ch2_Amax)));
AE_source_dist=dist(index)*1e3;%Vzdalenost zdroje od snimace c. 1 v milimetrech

figure
subplot(2,2,1)
%Vykresleni vlnovych prubehu
plot(Ch1(:,1),Ch1(:,2),'b')
xlabel('Cas [\mus]')
ylabel('Amplituda [mV]')
title('Vlnovy prubeh - snimac c.1')
subplot(2,2,2)
plot(Ch2(:,1),Ch2(:,2),'r')
xlabel('Cas [\mus]')
ylabel('Amplituda [mV]')
title('Vlnovy prubeh - snimac c.2')
subplot(2,2,3:4)
plot(dist,Amp_diff)
xlabel('Souradnice [m]')
ylabel('Diference [dB_{AE}]')
grid on
grid minor
%Vykresleni vysledku
hold on
plot(dist(index),Amp_diff(index),'o','LineWidth',2)
text(dist(index),Amp_diff(index),[num2str(dist(index)*1e3),' mm'],'VerticalAlignment','←
bottom','HorizontalAlignment','left')

```

```

function [TR_data, f_sampling]=data_load(FileName, t_max)
    %nacteni dat
    fileID = fopen(FileName);
    A = textscan(fileID, '%s ');

    % Zjisteni vzorkovaci frekvence
    f_Sampling_index = find(contains(A{1}, 'SampleRate[Hz]: '))
    f_sampling = str2double(A{1}(f_Sampling_index+1));

    % Zjisteni poctu pretrigger samplu
    pretrigger_index = find(contains(A{1}, 'PreTriggerSamples: '))
    pretrig_samples = str2double(A{1}(pretrigger_index+1))

    %Urceni poctu bodu s ohledem na f_sampling a t_max
    N_points=round(t_max*1e-6*f_sampling);

    %Prevedeni stringu na cisla
    data_start_index=find(contains(A{1}, '[DATA] '))+1;
    TR_data=[];

    for i=1:(pretrig_samples+N_points)
        TR_data(i,1)=-((pretrig_samples+1)+i)*1/f_sampling*1e6;%cas v us
        TR_data(i,2)=str2num(cell2mat(A{1}(data_start_index-1+i))); %U [mV]
    end
    fclose(fileID);
end

```