

Математичка гимназија

Београд, Краљице Наталије 37

Матурски рад из физике

Одређивање положаја извора звука у простору

Ментор:

Јовица Милисављевић

Ученик:

Душан Живковић, IVц

Београд, мај 2011. год

САДРЖАЈ

1. Увод.....	1
2. Звук.....	1
3. Одређивање положаја извора звука.....	3
3.1. Хардвер.....	3
3.2. Софтвер.....	4
4. Реализација проблема.	6
4.1. Аналитички проблем.....	6
4.2. Нумеричко решење.....	7
4.3. Фазне разлике и кроскорелација.....	8
5. Програмирање.....	9
5.1. LabVIEW код.....	9
5.2. MATLAB код.....	10
6. Резултати.....	14
6.1. Оцена грешке.	16
6.2. Простор за напредак и даље истраживање.....	17
7. Опрема.....	18
7.1. Микрофонски предпојачавач РК 3351.....	18
7.2. National Instruments опрема.....	20
7.3. MathWorks - MATLAB.....	21
8. Бумеранг пројекат.....	22
9. Закључак.....	23

1. УВОД

Људски мозак је веома добар процесор који, када је звук у питању, може добро да одреди његов положај и стање помоћу само два уха и могућности да окрећемо главу и тело.

За добијање прецизне нумеричке позиције извора звука у простору, неопходно је укључити технолошка достигнућа. Стога је потребно направити машину која ће детектовати звучне таласе и као резултат његове обраде дати положај извора тог звука.

Овакав систем има широку примену у роботици, а нарочито је примењен у војсци где је уграђиван у војна возила и коришћен за налажење позиције извора хитца ватреног оружја. Предност оваквог система је могућност рада у лошим визуелним условима попут магле, дима или мрака где се звук несметано простире.

2. ЗВУК

Звук је механичка осцилација честица која се кроз средину простире најчешће као талас. Човеков орган слуха може да региструје осцилације у фреквенцијском опсегу од 16 Hz до 20 kHz ако оне имају довољни интензитет. Звук се простире кроз медијуме у сва три агрегатна стања. Под звуком се подразумевају и осцилације изван наведеног фреквенцијског опсега. Под тиме се подразумевају инфразвук испод 16 Hz и ултразвук изнад 20 kHz.

Област физике која проучава звук зове се акустика.

Звук се у ваздуху простире као лонгитудинални талас брзином од $c = 344$ m/s на температури од 20°C при нормалним атмосферским условима.

Брзина звука зависи од карактеристика флуида и може се израчунати по релацији:

$$c = \sqrt{\frac{p_a \chi}{\rho}}$$

где је:

- p_a – атмосферски притисак
- ρ - густина ваздуха и
- $\chi = 1,4$.

Брзина звука у ваздуху зависи и од температуре ваздуха и може се исказати релацијом:

$$c = c_0 + 0,6\Theta$$

где је:

- c – брзина звука на температури Θ у [m/s],
- $c_0 = 330$ m/s – брзина звука на $\Theta = 0^\circ\text{C}$ и
- Θ – температура ваздуха у [$^\circ\text{C}$].

Под дејством звука честице ваздуха осцилују око свог равнотежног положаја стварајући надпритисак у односу на свој равнотежни положај при атмосферском притиску. Промене атмосферског притиска изазване звуком називају се звучни притисак. Ове промене су у односу на атмосферски притисак мале.

Свака периодично или непериодично променљива величина може се, под одређеним условима, Фуријевом анализом и Фуријевом трансформацијом разложити на низ простопериодичних компоненти. Ове компоненте имају учестаност која је целобројни умножак основне учестаности, а њихове амплитуде представљају опадајући низ што даје изузетне могућности за даље проучавање било каквог сложеног звука.

Звук настаје при судару два или више предмета који притом емитују енергетски талас, а он, опет, изазива промене притиска ваздуха који те предмете окружује. Те промене притиска примају наше бубне опне, а мозак их претвара у звук. Звучни таласи се простиру у свим правцима од места настанка, слично таласима који настају када се камен баци у воду.

3. ОДРЕЂИВАЊЕ ПОЛОЖАЈА ИЗВОРА ЗВУКА

Одређивање положаја извора звука је област која је протеклих деценија истраживана у великој мери. Ипак, не постоји опште применљиво решење. Најчешће коришћен метод, неретко у комбинацији са другима, је TDOA (Time Difference Of Arrival). Он подразумева одређивање разлике у времену потребном да звучни сигнал доспе од извора до два сензора звука.

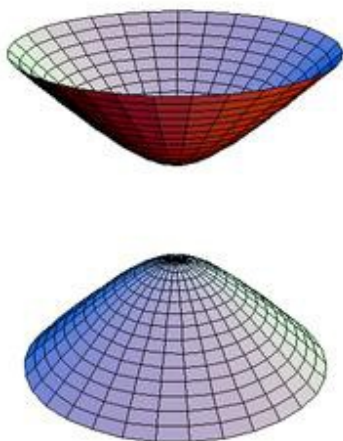
У овом раду развијен је један овакав систем за одређивање положаја извора звука. Систем се може поделити на два дела. Први је хардверски део у коме је на нивоу електронике реализовано прикупљање сигнала, његово појачавање до нивоа потребног за могућност даље обраде као и пренос истог на рачунар. Други је софтверски део у коме је обрада прикупљених података имплементирана у MATLAB и LabVIEW окружењима.

3.1. Хардвер

Најпре је потребно детектовати звук који шаље извор. За решавање тог проблема користе се четири кондензаторска микрофона, постављена у координатном систему на позицијама $(x,y,z)=(0,0,0),(a,0,0),(0,a,0),(0,0,a)$, при чему је a познато растојање.

Четири је најмањи потребан број микрофона за реализацију овог проблема.

Уколико у систем уведемо два микрофона, тачке у простору које имају дату временску разлику пристизања емитованог сигнала описују једну половину хиперboloиде (друга половина одговара негативној временској разлици пристизања) – слика 1.



Слика 1

Уколико се у систем уведе трећи микрофон, сваки од три пара микрофона би одређивао једну половину хиперboloиде, па би пресек све три фигуре представљао тачку, тј. извор

звука. Посматрамо троугао чија темена чине ови микрофони. Права која пролази кроз тежиште посматраног троугла и нормална је на раван троугла садржи тачке које су једнако удаљене од сва три темена. Према томе ако би се извор звука налазио на тој правој решење које чине координате положаја извора звука не би било јединствено одређено. Због постојања више тачака које би у овом случају имале исто временско кашњење, у систем је неопходно увести четврти микрофон. Због могућих грешака при рачунању разлика времена пристизања, али и због могућих грешака друге природе, при практичном раду пресек ових хиперболоида неће представљати јединствену тачку, па се због веће прецизности често користи и већи број микрофона. Због једноставности рачуна микрофони су постављени на поменути координатама, тако да је један микрофон постављен у координатном почетку.

Када се звук снима помоћу микрофона, услед промена ваздушног притиска мембрана микрофона се помера на сличан начин као и наше бубне опне. Ови сићушни покрети се затим претварају у промене електричног напона.

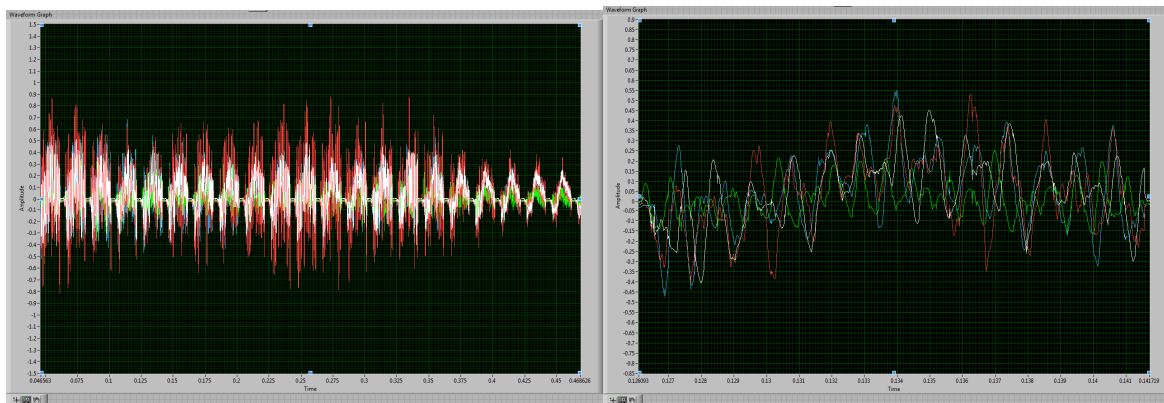
Добијени електрични напон је знатно мањи од 5V који чини ред величина напона са којим рачунар ради, и као такав се не може искористити. Стога, неопходно је напон, који је резултат детекције звука кондензаторског микрофона, појачати. Напон се појачава помоћу четири микрофонска предпојачавача RK 3351. Сваки микрофон је независан и има своји предпојачавач.

Добијени појачани сигнал је затим потребно учитати на рачунар. За комуникацију рачунара и хардверског дела система коришћена је National Instruments (NI) опрема. Излаз микрофонских предпојачивача повезан је са NI cRIO-9215 картицом која има четири независна улазна канала која учитавају податке фреквенцијом од 100 000 Hz. На картици постоје A/D конвертори који преко серијског порта (прикључка) врше пренос података на рачунар конвертујући аналогни сигнал у дигитални.

3.2. Софтвер

LabVIEW је још један од продуката фирме NI па је као такав оптимизован за рад и комуникацију са коришћеним хардвером. Овај програм је коришћен за прикупљање података са серијског прикључка. Подаци су даље представљени на графику као функција јачине напона од времена (слика 2) и уписивани у текстуални фајл као низ вредности напона за сваки микрофон (слика 3). Време протекло између мерења вредности два суседна члана низа одговара фреквенцији хардверске компоненте на којој се налазе А/Д конвертори.

За обраду података поменутог текстуалног фајла, као и за израчунавање решења коришћено је MATLAB окружење.



Слика 2

```
ulazi21.lvm - Notepad
File Edit Format View Help
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator .
Multi_Headings Yes
X_Columns Multi
Time_Pref Absolute
Operator Fizikabr1
Date 2011/03/27
Time 12:50:53.8545020999995603471
***End_of_Header***
Channels 4
Samples 100000 100000 100000 100000 2011/03/27
Date 2011/03/27 2011/03/27 2011/03/27 2011/03/27
Time 12:50:54.8662109375 12:50:54.8662109375 12:50:54.8662109375 12:50:54.8662109375
Y_Unit_Label Volts Volts Volts Volts
X_Dimension Time Time Time Time
Delta_X 1.000000E-5 1.000000E-5 1.000000E-5 1.000000E-5
***End_of_Header***
0.27009 -0.0172871 0.27009 -0.0123433 0.27009 -0.0199945
0.2701 0.00403288 0.2701 -0.0176035 0.2701 -0.0123433 0.2701 -0.0199945
0.27011 0.0030732 0.27011 -0.0166543 0.27011 -0.011706 0.27011 -0.0206271
0.27012 0.00339571 0.27012 -0.0166543 0.27012 -0.0123433 0.27012 -0.0212597
0.27013 0.00435147 0.27013 -0.0172871 0.27013 -0.0123433 0.27013 -0.0206271
0.27014 0.00275854 0.27014 -0.0182363 0.27014 -0.0129805 0.27014 -0.0212597
0.27015 0.0037143 0.27015 -0.0172871 0.27015 -0.0123433 0.27015 -0.0199945
0.27016 0.0037143 0.27016 -0.0179199 0.27016 -0.011706 0.27016 -0.0206271
0.27017 0.0030732 0.27017 -0.0182363 0.27017 -0.0129805 0.27017 -0.0212597
0.27018 0.00403288 0.27018 -0.0176035 0.27018 -0.0113874 0.27018 -0.0199945
0.27019 0.00275854 0.27019 -0.0182363 0.27019 -0.0126619 0.27019 -0.0206271
0.2702 0.00275854 0.2702 -0.0179199 0.2702 -0.0129805 0.2702 -0.0215759
0.27021 0.00275854 0.27021 -0.0185527 0.27021 -0.0129805 0.27021 -0.0218922
0.27022 0.00110561 0.27022 -0.0198183 0.27022 -0.0145737 0.27022 -0.0225488
0.27023 -0.000108735 0.27023 -0.0210839 0.27023 -0.015111 0.27023 -0.0231573
0.27024 -0.00106449 0.27024 -0.0210839 0.27024 -0.0158483 0.27024 -0.0241062
0.27025 -0.00210275 0.27025 -0.0232988 0.27025 -0.0177601 0.27025 -0.0261201
0.27026 -0.00297601 0.27026 -0.0229824 0.27026 -0.0180787 0.27026 -0.0275853
0.27027 -0.00233884 0.27027 -0.0239316 0.27027 -0.0177601 0.27027 -0.0282178
0.27028 0.002098531 0.27028 -0.0248808 0.27028 -0.0177601 0.27028 -0.0288504
0.27029 0.00148419 0.27029 -0.02583 0.27029 -0.0148923 0.27029 -0.0301155
0.2703 0.00275854 0.2703 -0.0235136 0.2703 -0.0110687 0.2703 -0.0297992
0.27031 0.00339571 0.27031 -0.0270956 0.27031 -0.00724513 0.27031 -0.0320132
0.27032 0.00243995 0.27032 -0.0270956 0.27032 -0.00278426 0.27032 -0.0323295
0.27033 0.00148419 0.27033 -0.0270956 0.27033 0.000402083 0.27033 -0.0327882
0.27034 -0.000745907 0.27034 -0.0261464 0.27034 0.00263252 0.27034 -0.0332783
0.27035 -0.00361318 0.27035 -0.02583 0.27035 0.00422569 0.27035 -0.0320132
0.27036 -0.0055247 0.27036 -0.0267792 0.27036 0.00295115 0.27036 -0.0323295
```

Слика 3

4. РЕАЛИЗАЦИЈА ПРОБЛЕМА

Извор звука може да буде мотор аутомобила, уста, музички инструмент, залупљена врата па је неопходно направити такав систем који би детектовао извор било каквог звука. Сам извор емитује звук на мноштво различитих начина; највећи број звукова који се производе у устима простиру се директно од њих, док мотор емитује звук у скоро свим правцима.

Да би систем радио прецизно, потребно је да се звук протире директно од извора до сваког микрофона, тј. без препрека на том путу. Ако би се нешто налазило између микрофона и извора, микрофони не би примили директан сигнал већ одбијени, што би довело до грешке у резултату.

Окружење, тј. простор између извора звука и слушаоца у многоме утиче на звук. Оно што чујемо је мешавина директног и одбијеног звука. Одбијени звук може да дође до наших ушију пошто се одбије о зид или неки други предмет, а материјал од кога су ове препреке направљене апсорбује одређене фреквенције, самим тим умањујући укупну јачину звука. Ово "одбијање првог реда" не само да звучи другачије од директног извора, већ и допире до слушаоца нешто касније од њега. Одбијања другог реда и надаље настављају овај ефекат. Квалитет и кашњење одбијеног звука откривају много тога о окружењу и његовој величини.

4.1. Аналитички проблем

Претпоставимо да се извор звука налази у тачки $A(X,Y,Z)$. Познато је да се микрофони налазе на координатама $M_0(0,0,0)$, $M_1(a,0,0)$, $M_2(0,a,0)$, $M_3(0,0,a)$.

Растојање извора звука и микрофона M_0 је $s_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

Растојање извора звука и микрофона M_1 је $s_1 = \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}$

Растојање извора звука и микрофона M_2 је $s_2 = \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2}$

Растојање извора звука и микрофона M_3 је $s_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2}$

Брзина звука v је позната и износи око 340 m/s. Брзина звука зависи од температуре и притиска па према томе при узимању ове вредности постоји грешка.

Звук се од извора до микрофона креће равномерно праволинијски па важи једначина за пређени пут $s = v \cdot t$, односно $t = \frac{s}{v}$.

Према томе $t_i - t_j = \frac{s_i - s_j}{v}$. Разлог за узимање овакве једначине је могућност налажења временске ралике у стицању сигнала до микрофона M_i и M_j . Дакле $t_i - t_j$ и v су познате. Једначине је могуће направити за свака два пара микрофона.

$$t_1 - t_0 = \frac{\sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - (t_1 - t_0) \cdot v = 0$$

$$t_2 - t_1 = \frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2} - (t_2 - t_1) \cdot v = 0$$

$$t_3 - t_2 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow \sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - (t_3 - t_2) \cdot v = 0$$

$$t_2 - t_0 = \frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - (t_2 - t_0) \cdot v = 0$$

$$t_3 - t_0 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow \sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - (t_3 - t_0) \cdot v = 0$$

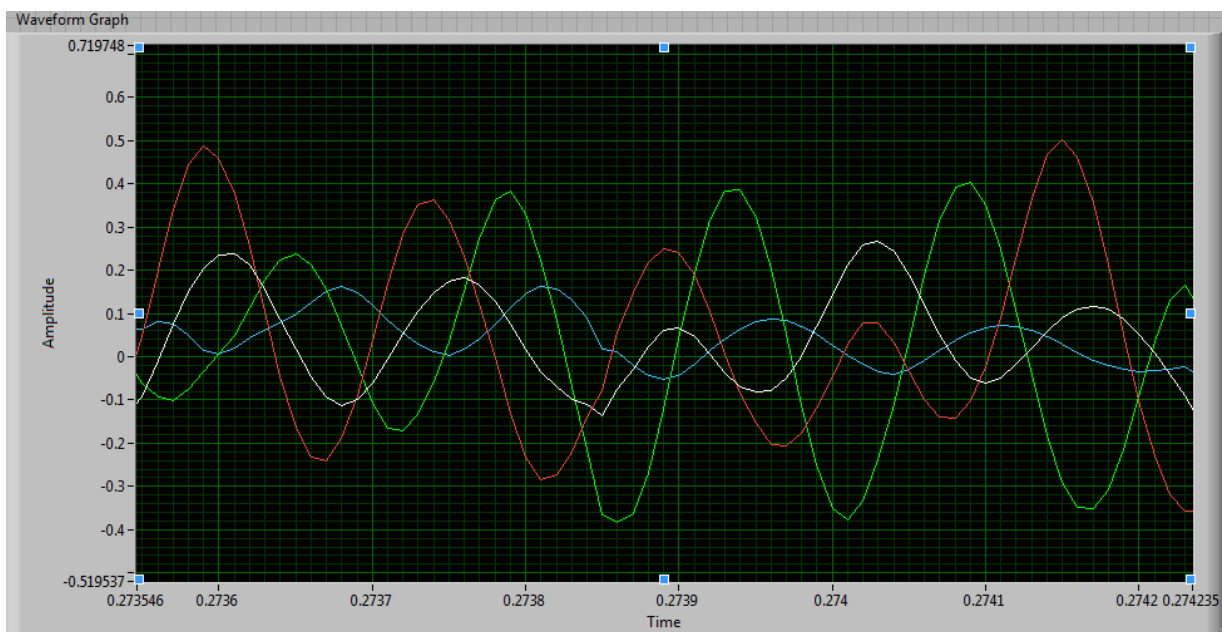
$$t_3 - t_1 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow \sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2} - (t_3 - t_1) \cdot v = 0$$

4.2. Нумеричко решење

Како су непознате x, y, z потребне су најмање три једначине за решавање овог система. Систем се због своје сложености не решава аналитички већ нумеричким методама. MATLAB садржи библиотеке у којима су ове методе примењене. Систем се решава тако што се претпостави нека тачка за решење, затим се њене координате «убаце» у ове једначине и нађе се одступање од нуле, тј. грешка. MATLAB-ов алгоритам предпостави следећу тачку ближу решењу, поступак се понавља док одступање не буде мање од задатог ($1 \cdot 10^{-7}$). На тај начин предпостављена тачка после одређеног броја итерација тежи решењу.

4.3. Фазне разлике и кроскорелација

Први корак потребан за решавање проблема одређивања положаја извора звука у простору јесте управо проналажење временских разлика у стизању звука до два одабрана микрофона, односно кашњење сигнала једног микрофона у односу на други. За читање сигнала са серијског порта, коришћен је LabVIEW који разлике у напону претвара у податке корисне за корисника. У LabVIEW-у је направљен програм за представљање сигнала на графику зависности јачине напона од времена и уписивање истог у текстуални фајл. На графику су истовремено раличитим бојама представљена сва четири сигнала. На тај начин могуће је јасно видети кашњење једног у односу на остале, тј могуће је уочити фазне разлике (слика 4).



Слика 4

Следећи корак чини рачунање фазних разлика односно прецизно одређивање времена кашњења сваког сигнала у односу на остале. Решење овог проблема имплементирано је у MATLAB окружењу методом кроскорелације. Подаци уписани у текстуални фајл помоћу LabVIEW-а учитају се у MATLAB тако што се за сваки микрофон дефинише једна променљива типа низ, који садржи вредности напона. Први члан низа a_1 садржи вредност напона у тренутку почетка мерења $t_1 = 0$. Сваки следећи члан низа a_i садржи вредност напона у тренутку $t_i = t_{i-1} + 10^{-5} s$.

Метода кроскорелације ради по следећем принципу. За два одабрана низа a и b израчуна се збир производа свих одговарајућих чланова $a_i \cdot b_{i+k}, \forall k \in N, k \in [-n, n]$ где је n задати параметар. k за које је овај збир производа највећи је тражено k које представља фазни

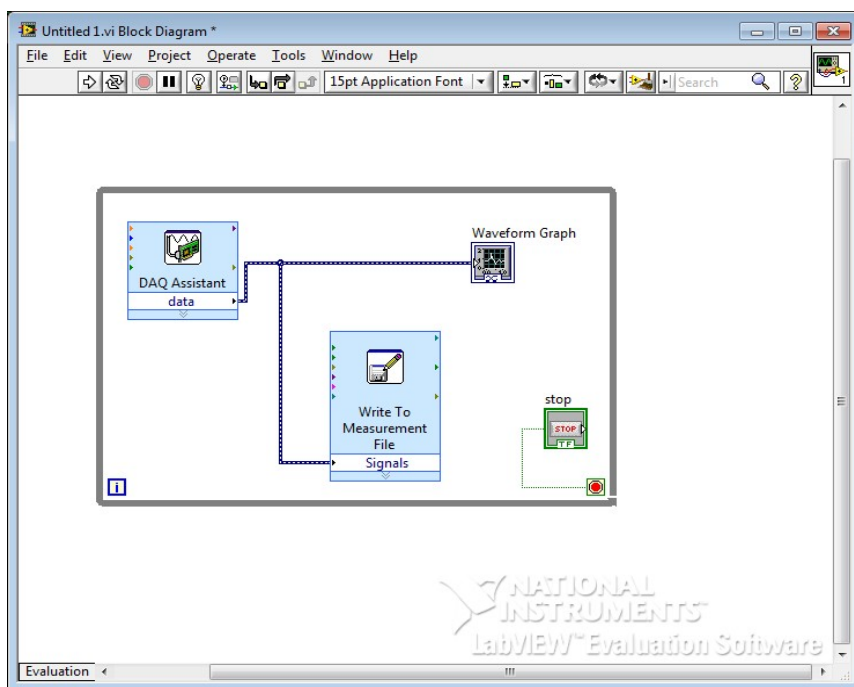
померај. То значи да су два сигнала чије вредности представљају одабрани низови померена k места односно да фазна разлика износи $k \cdot 10^{-5} s$.

Применом кроскорелације на свака два низа добију се све потребне временске разлике $t_i - t_j$. Сада је могуће решити систем по непознатим x, y, z наведеном нумеричком методом. Добијена тројка x, y, z представља координате положаја извора звука.

5. ПРОГРАМИРАЊЕ

5.1. LabVIEW код

На слици 5 приказан је *Block Diagram* LabVIEW окружења на ком се врши графичко програмирање убацивањем објеката и њиховим повезивањем. *DAQ Assistant* је објекат који повезује програм са NI cRIO-9215 картицом учећавајући податке са серијског порта.

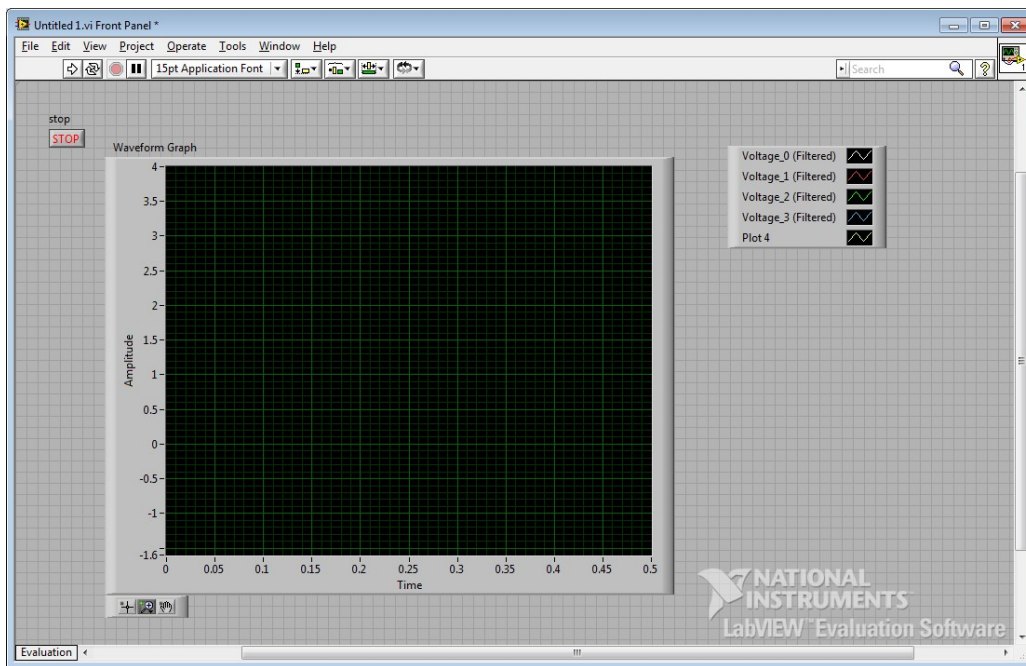


Слика 5

DAQ Assistant је плавим линијама (везама) повезан са *Waveform Graph* и *Write To Measurement File* објектима. На тај начин сигнал је пренет на поменуте објекте. *Waveform Graph* објекат добијени сигнал презентује на график зависности напона од времена који се налази на *Front Panel*-у LabVIEW окружења. *Write To Measurement File* објекат добијени сигнал уписује у дефинисани текстуални фајл. Сиви оквир којим су уоквирени сви објекти

представља *while* петљу којом се обезбеђује непрекидно читање сигнала. Услов за излазак из петље и уједно за заустављање програма је стоп дугме које је повезано са црвеним кругом који означава крај извршавања петље. Дугме је могуће притиснути на *Front Panel*-у.

На слици 6 приказан је *Front Panel* LabVIEW окружења. На овој табли налазе се два објекта. Описани *Waveform Graph* објекат на коме је презентован учитани сигнал и стоп дугме којим се прекида рад програма.

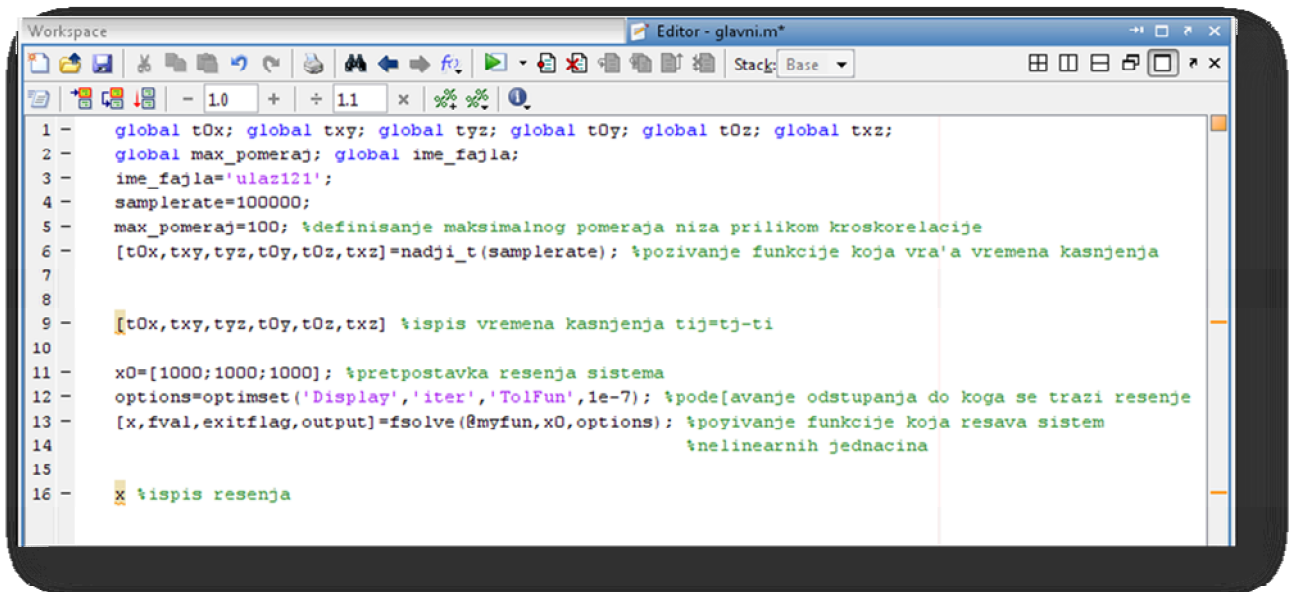


Слика 6

5.2. MATLAB код

На слици 7 приказана је главна функција из које се покреће програм.

Покретањем ове функције покреће се програм, ова функција затим позива функцију за налажење времена кашњења свака два пара микрофона (`nadji_t`), затим позива функцију за решавање система једначина дефинисаног у функцији `myfun` и испишује добијено решење као три вредности које представљају положај извора звука у координатном систему.



```
1 - global t0x; global txy; global tyz; global t0y; global t0z; global txz;
2 - global max_pomeraj; global ime_fajla;
3 - ime_fajla='ulaz121';
4 - samplerate=100000;
5 - max_pomeraj=100; %definisanje maksimalnog pomeraja niza prilikom kroskorelacije
6 - [t0x,txy,tyz,t0y,t0z,txz]=nadji_t(samplerate); %pozivanje funkcije koja vra'a vremena kasnjenja
7
8
9 - [t0x,txy,tyz,t0y,t0z,txz] %ispis vremena kasnjenja tij=tj-ti
10
11 - x0=[1000;1000;1000]; %pretpostavka resenja sistema
12 - options=optimset('Display','iter','TolFun',1e-7); %pode[avanje odstupanja do koga se trazi resenje
13 - [x,fval,exitflag,output]=fsolve(@myfun,x0,options); %pozivanje funkcije koja resava sistem
14 -                                     %nelinearnih jednacina
15
16 - x %ispis resenja
```

Слика 7

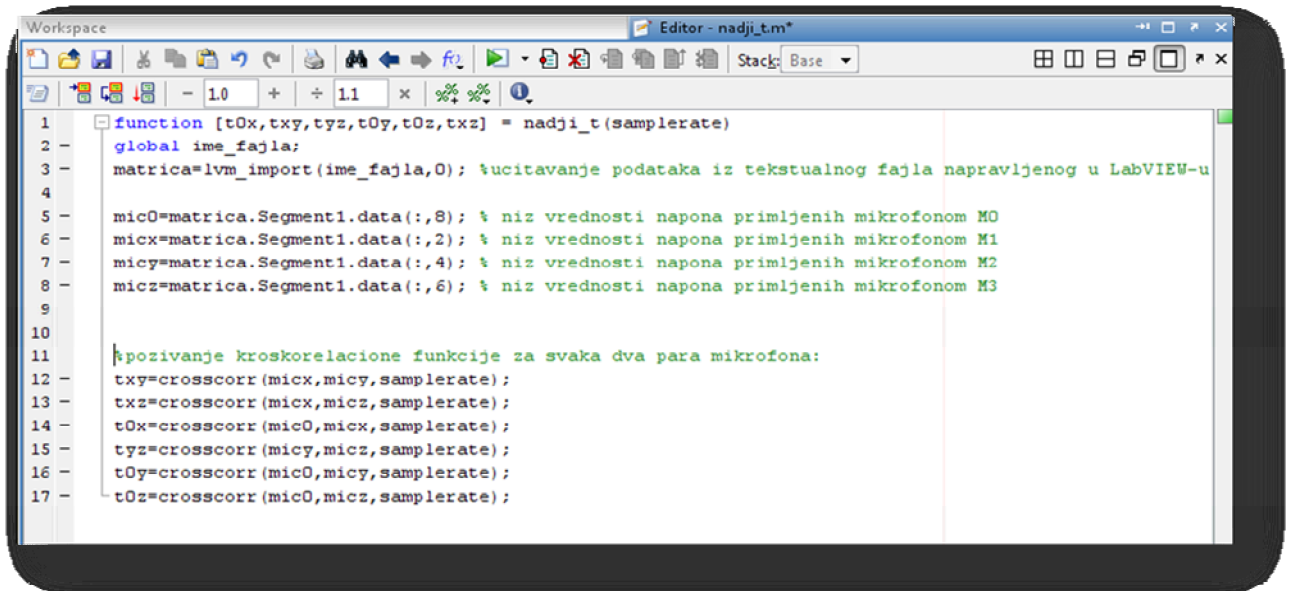
У овој функцији су најпре дефинисане променљиве `t0x,txy,tyz,t0y,t0z,txz`. Ове променљиве се користе у функцији `myfun` и дефинисане су као глобалне, да би се ради ефикасности програма само једном рачунале а не у свакој итерацији када се позива функција `myfun`. Затим су дефинисане константе `ime_fajla` у којој се чува име фајла из ког се читавају подаци снимљени у LabVIEW програму, `samplerate` у коме се чува фреквенција којом се читају подаци помоћу хардвера која износи 100,000 Hz и `max_pomeraj` у коме се дефинише максимално померање једног нiza у односу на други приликом кроскорелације.

Предпостави се тачка `X0` за решење наведеног система једначина. Позива се функција `fsolve` имплементирана у MATLAB-у у којој се нумеричким методама решава систем једначина.

Коначно резултат који врати функција `fsolve` се испишује у конзолу MATLAB окружења.

На слици 8 приказана је функција `nadji_t` у којој се рачунају времена кашњења свака два пара микрофона. Најпре се подаци из текстуалног фајла читају у четири променљиве

типа низ. Сваки низ представља вредности напона на одговарајућем микрофону у снимљеном временском интервалу. Свако поље низа представља вредност напона у једном тренутку.



```
1 function [t0x,txy,tyz,t0y,t0z,txz] = nadji_t(samplerate)
2 - global ime_fajla;
3 - matrica=lvn_import(ime_fajla,0); %ucitavanje podataka iz tekstualnog fajla napravljenog u LabVIEW-u
4
5 - mic0=matrica.Segment1.data(:,8); % niz vrednosti napona primljenih mikrofonom M0
6 - micx=matrica.Segment1.data(:,2); % niz vrednosti napona primljenih mikrofonom M1
7 - micy=matrica.Segment1.data(:,4); % niz vrednosti napona primljenih mikrofonom M2
8 - micz=matrica.Segment1.data(:,6); % niz vrednosti napona primljenih mikrofonom M3
9
10
11 %pozivanje kroskorelacione funkcije za svaka dva para mikroфона:
12 - txy=crosscorr(micx,micy,samplerate);
13 - txz=crosscorr(micx,micz,samplerate);
14 - t0x=crosscorr(mic0,micx,samplerate);
15 - tyz=crosscorr(micy,micz,samplerate);
16 - t0y=crosscorr(mic0,micy,samplerate);
17 - t0z=crosscorr(mic0,micz,samplerate);
```

Слика 8

У даљем делу функције позива се кроскорелациона функција за свака два микрофона и решење које она врати се запамти у променљиву дефинисану у главној функцији.

Функција `nadji_t` прослеђује парове свака два низа функцији `crosscorr` (слика 9). У функцији `crosscorr` се позива примењена MATLAB-ова функција за кроскорелацију `xcorr` која враћа низ вредности кроскорелације за сваки померај у затвореном интервалу $[-\text{max_romeraj}, \text{max_romeraj}]$. Затим се нађе померај за који је вредност тог низа максимална и израчуна се временска разлика у стизању сигнала до одабрана два микрофона по формули $\text{romeraj}/\text{samplerate}$. Добијена вредност се врати функцији `nadji_t`.

```

1 function vreme= crosscorr(niz,niz1,samplerate)
2 global max_pomeraj;
3 %niz=double(niz); niz1=double(niz1);
4
5 c = xcorr(niz1,niz,max_pomeraj); %pozivanje kroskorelacione funkcije implementirane u matlabu
6 pomeraj=double(find(c==max(c))-(max_pomeraj+1)); %nalazjenje vrednosti pomeraja za koje je
7 %kroskorelacija dostigla maksimalnu vrednost
8 vreme=pomeraj/samplerate; %racunanje vremenske razlike u stizanju signala do dva mikrofona
9
10

```

Слика 9

У функцији myfun (слика 10) се налази систем једначина чија решења представљају координате положаја извора звука. Ова функција се позива приликом сваке итерације функције fsolve па је због ефикасности неопходно да се времена $t0x,txy,tyz,t0y,t0z,txz$ предају овој функцији као параметри израчунати другом функцијом.

```

1 function F = myfun(x)
2 global t0x; global txy; global tyz; global t0y; global t0z; global txz;
3 a=15; c=34000;
4
5 %zadavanje sistema jednacina cija resenja x(1),x(2),x(3) predstavljaju
6 %koordinate položaja izvora zvuka
7 F = [sqrt((x(1)-a)*(x(1)-a)+x(2)*x(2)+x(3)*x(3))-sqrt((x(1)*x(1)+x(2)*x(2)+x(3)*x(3))-t0x*c;
8 sqrt((x(2)-a)*(x(2)-a)+x(1)*x(1)+x(3)*x(3))-sqrt((x(1)-a)*(x(1)-a)+x(2)*x(2)+x(3)*x(3))-txy*c;
9 sqrt((x(3)-a)*(x(3)-a)+x(1)*x(1)+x(2)*x(2))-sqrt((x(2)-a)*(x(2)-a)+x(1)*x(1)+x(3)*x(3))-tyz*c;
10 sqrt((x(2)-a)*(x(2)-a)+x(1)*x(1)+x(3)*x(3))-sqrt(x(1)*x(1)+x(2)*x(2)+x(3)*x(3))-t0y*c;
11 sqrt((x(3)-a)*(x(3)-a)+x(2)*x(2)+x(1)*x(1))-sqrt(x(1)*x(1)+x(2)*x(2)+x(3)*x(3))-t0z*c;
12 sqrt((x(3)-a)*(x(3)-a)+x(2)*x(2)+x(1)*x(1))-sqrt((x(1)-a)*(x(1)-a)+x(2)*x(2)+x(3)*x(3))-txz*c ];

```

Слика 10

6. РЕЗУЛТАТИ

Зарад прецизнијих резултата потребно је користити прецизне параметре попут брзине звука, која зависи од атмосферског притиска, густине ваздуха и температуре. Због тога је израчуната брзина звука у тестираним условима. У следећим једначинама приказан је поступак односно формула по којој се она рачуна.

$$t_1 - t_0 = \frac{\sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{t_1 - t_0}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}}{t_2 - t_1}$$

$$t_3 - t_2 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2}}{t_3 - t_2}$$

$$t_2 - t_0 = \frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\sqrt{x^2 + (y-a)^2 + z^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{t_2 - t_0}$$

$$t_3 - t_0 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{t_3 - t_0}$$

$$t_3 - t_1 = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}}{v} \Leftrightarrow v = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-a)^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2 + z^2}}{t_3 - t_1}$$

$t_i - t_j$ је разлика времена израчуната кроскорелацијом док су X,Y,Z познате координате на којима је постављен извор звука. Извршено је више мерења и израчуната просечна вредност брзине звука. Рачунање брзине звука у условима у којима се систем користи се сматра калибрацијом, тј. прилагођавањем система у циљу добијања прецизнијих резултата.

Мерења су извршена постављањем извора звука на познате положаје у координатном систему. Добијени резултати одступали су од реалних вредности за мање од 1 cm. Тражење грешке система је веома тешко с обзиром на то да је било немогуће извор звука учврстити на одређеном положају у координатном систему. Због тога није се могло прецизно утврдити положај на којој се налазио извор звука како би се та вредност упоредила са израчунавом вредношћу.

Прецизнији резултати су добијени када је извор звука постављен на координатама ближим координатном почетку.

Резултати су приказани табелом. У првој колони налази се редни број мерења. Другу колону чине вредности координата положаја извора звука док трећу колону чине израчунате вредности системом за одређивање положаја извора звука. Четврта колона представља одступање односно апсолутну разлику одговарајућих вредности друге и треће колоне.

Рб.	(X,Y,Z)[cm]	(X,Y,Z)[cm]	Одступање[cm]	Процент грешке [%]
1	15,15,1	15,15,1	0,0,0	0,0,0
2	15,15,31	15,14,32	0,1,1	0,7,3
3	25,5,30	25,5,31	0,0,1	0,0,3
4	25,5,0	24,5,0	1,1,0	4,0,0
5	25,15,10	25,15,10	0,0,0	0,0,0
6	25,15,30	26,15,33	1,0,3	4,0,10
7	25,15,0	26,15,0	1,1,0	4,7,0
8	10,15,30	10,13,30	0,2,0	0,13,0
9	15,20,10	15,20,11	0,0,1	0,0,10
10	20,10,1	19,10,1	1,0,0	5,0,0
11	15,15,10	14,15,10	1,0,0	7,0,0
12	25,5,10	26,5,11	1,0,1	4,0,10
13	10,15,1	10,14,1	0,1,0	0,7,0
14	10,15,10	9,14,9	1,1,1	10,7,10
15	15,20,1	14,20,1	1,0,0	7,0,0
16	15,20,30	14,21,28	1,1,2	7,5,7
17	20,10,10	19,10,10	1,0,0	5,0,0
18	20,10,30	18,10,31	2,0,1	10,0,3
19	52,44,0	55,45,0	3,1,0	6,2,0
20	52,44,30	50,41,32	2,3,2	4,7,7

Након добијених очекиваних резултата, уређај је тестиран у неповољним условима. Поред извора коме је требало пронаћи положај, на знатно већем растојању од система, у позадини је пуштен други звук који је у овом случају имао ефекат шума. Добијени резултати били су једнаки као и при повољним условима.

6.1. Оцена грешке

Израчуната је просечна грешка за X,Y и Z координату. Она износи 3.9% за X, 2.8% за Y и 3.15% за Z координату. Грешка потиче од шума који мења облик сигнала као и од немогућности да се прецизно измере координате извора звука које се пореде са израчунатим вредностима. Када је било потребно поставити извор звука на координатама X,Y,Z он је у ствари био постављен на координатама $X \pm 1, Y \pm 1, Z \pm 1$. Због тога је уведено најмање и највеће одступање, као и најмања и највећа грешка.

Рб.	(X,Y,Z)[cm]	(X,Y,Z)[cm]	Најмање одступање[cm]	Највеће одступање[cm]	Најмањи проценат грешке [%]	Највећи проценат грешке [%]
1	15,15,1	15,15,1	0,0,0	1,1,1	0,0,0	7,7,100
2	15,15,31	15,14,32	0,0,0	1,2,2	0,0,0	7,13,6
3	25,5,30	25,5,31	0,0,0	1,1,2	0,0,0	4,20,7
4	25,5,0	24,5,0	0,0,0	2,1,1	0,0,0	8,20,100
5	25,15,10	25,15,10	0,0,0	1,1,1	0,0,0	4,7,10
6	25,15,30	26,15,33	0,0,2	2,1,4	0,0,7	8,7,13
7	25,15,0	26,15,0	0,0,0	2,2,1	0,0,0	8,13,100
8	10,15,30	10,13,30	0,0,0	1,3,1	0,0,0	10,20,3
9	15,20,10	15,20,11	0,0,0	1,1,2	0,0,0	7,5,20
10	20,10,1	19,10,1	0,0,0	2,1,1	0,0,0	10,10,100
11	15,15,10	14,15,10	0,0,0	2,1,1	0,0,0	13,7,10
12	25,5,10	26,5,11	0,0,0	2,1,2	0,0,0	8,20,20
13	10,15,1	10,14,1	0,0,0	1,2,1	0,0,0	10,13,100
14	10,15,10	9,14,9	0,0,0	2,2,2	0,0,0	20,13,20
15	15,20,1	14,20,1	0,0,0	2,1,1	0,0,0	13,5,100
16	15,20,30	14,21,28	0,0,1	2,2,3	0,0,3	13,10,10
17	20,10,10	19,10,10	0,0,0	2,1,1	0,0,0	10,10,10
18	20,10,30	18,10,31	1,0,0	3,1,2	5,0,0	15,10,7
19	52,44,0	55,45,0	2,0,0	4,2,1	4,0,0	8,4,100
20	52,44,30	50,41,32	1,2,1	3,4,3	2,4,3	6,9,10

Најмањи проценат грешке износи 0.55% за X вредности, 0.20% за Y вредности и 0.65% за Z вредности. Највећи проценат грешке износи 9.45% за X вредности, 11.15% за Y вредности и 42.30% за Z вредности. Велика грешка за Z вредности потиче од избора тачака блиских координатном почетку по Z оси. Прецизнија грешка се добија ако се игноришу ови драстични случајеви. Тада проценат грешке износи 11.20% за Z вредности.

Грешка мерења система за одређивање положаја извора звука износи 0.55%-9.45% за X координату, 0.20%-11.15% за Y координату и 0.65%-11.20% за Z координату.

6.2. Простор за напредак и даље истраживање

Пројекат је могуће унапредити. Уместо кондензаторских микрофона коришћених при развијању овог система могуће је користити сферне микрофоне, како би био откривен звук који долази са различитих страна.

Микрофони су били постављени на координатама $(x,y,z)=(0,0,0),(a,0,0),(0,a,0),(0,0,a)$, где је $a = 15\text{cm}$. Као даљу анализирање система могуће је испитати зависност грешке од параметра a .

Још једно унапређење било би додавање могућности одабира типа звука за праћење. Тако би систем могао да се усресреди на праћење само пљеска, пуцња, говора или сл. То би било могуће урадити налажењем фреквенције примљеног сигнала.

Фуријеовом трансформацијом се сигнал раздваја на збир синуса различитих фреквенција.

7. ОПРЕМА

7.1. Микрофонски предпојачавач RK 3351

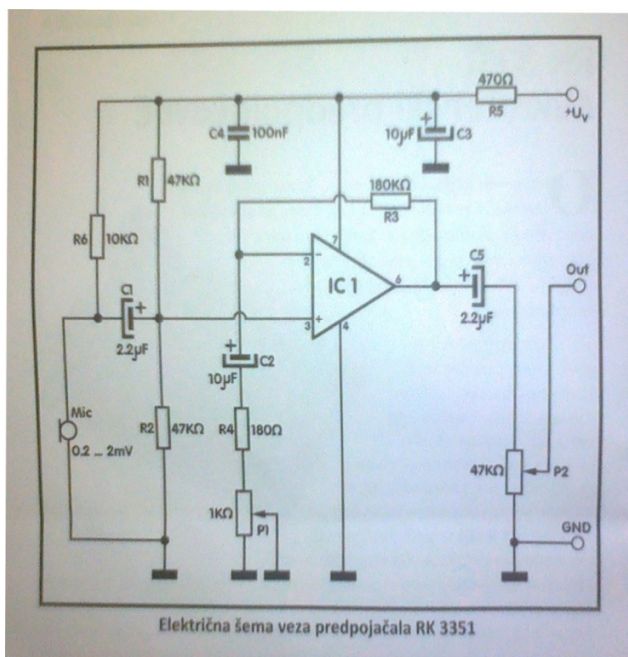


Основне карактеристике:

Радни напон:	9-15V
Потрошња електричне струје:	2.5mA
Улазна осетљивост:	0.2mV-2mV
Подесиво појачање:	150-1500-пута
Фреквентни опсег:	50Hz-20kHz

Овај предпојачавач је посебно конструисан за кондензаторске микрофоне са повољним односом сигнал-шум. Његов квалитет је појачавање изузетно малих нискофреквентних напона (0.2mV-2mV) на неопходни ниво.

Електрична шема веза предпојачала:



У зависности од типа, микрофон даје излазне напоне у опсегу од неколико стотина микроволти, до неколико десетина милivolти. Међутим за даљу обраду нискофреквентног (НФ) сигнала, поред корисног напона, одлучујућа је пре свега импеданса извора тј. импеданса микрофона. Високоомски микрофон се не сме оптеретити нискоомским улазом појачавача, јер се у том случају прекида напон сигнала. Нискоомски микрофон се једноставно подешава, али му је због малог напона сигнала потребно знатно веће појачање. Томе служи овај микрофонски предпојачавач. За прављење истог користи се интегрисано коло LF351, J-FET широкопојасни малешумни операциони појачавач.

Предпојачавач треба да производи што је могуће мање сопственог шума, јер се шум поставља преко корисног сигнала и било би несврхисходно да и он буде појачан. Наиме, када је у питању шум, наилази се на следећу ситуацију: самим кретањем молекула настаје шум, који се појачава са растућом температуром и пружа се широкопојасно преко укупног фреквентног опсега. Зато се код операционих појачавача веома често наводи улазни напон шума $U_{ir} [nV/\sqrt{Hz}]$ са којим настају следећи односи: еквивалентни напон шума

$U_R = U_{ir} \cdot \sqrt{B}$, где је B ширина опсега у Hz. Употребљени операциони појачавач има U_{ir} од $5nV/\sqrt{Hz}$. Код ширине опсега од 20Hz, $U_R = 5nV \cdot \sqrt{20,000} \approx 0.7\mu V$. Овај нежељени напон шума се исто тако појачава као и корисни сигнал. Он не смета све док је однос између корисног сигнала и сигнала шума довољно велики. Ако предпоставимо да коришћени микрофон има ниво од 0.7mV излазног напона, онда је то 1000 пута веће (око 60dB) од шума. Размак од корисног сигнала до шума износи 60dB у укупној фреквентној области до 20kHz. Истовремено се види да повећање ширине опсега под аспектом растућег напона шума није уопште бесмислено. Оно што је изнад 15kHz се ионако више готово и не чује.

На електричној шеми се види да се операциони појачавач (IC1) активира са једноставним напоном напајања. Његова радна област (опсег) мора стога да се помери отприлике у средину $+U_v$, што се дешава са делитељем напона састављеног од отпорника R1 и R2. Он поставља неинвертован улаз $+In$ сходно једносмерном напону „високо“ (на пола напона напајања).

Преко улазног електролитског кондензатора C1, врши се повезивање сигнала. Прикључењем кондензаторских микрофона без сопственог напајања струјом, коришћених у овом раду, преко отпорника R6 им се одводи екстерно напајање. У овом случају се C1 супротно поларизује (окрене се за 180° у односу на шему).

Појачање се утврђује са гране повратне спреге, састављене од R3, C2, R4 и P1. Меродавно за фактор појачања је однос R3 према збиру $(R4+P1+X_c)$, при чему је X_c фреквентно зависни реактивни отпор електролитског кондензатора C2. Он се израчунава из броја π , фреквенције f и капацитета C према следећем односу: $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} [\Omega]$ и највећи је код ниских фреквенција. Ако се 50kHz узме као доња гранична фреквенција, онда за $C = 100\mu F$ ($100 \cdot 10^{-6}$) произилази реактивни отпор $X_c = 30\Omega$ и тако остаје још знатно мањи од преосталог омског удела из $R4+P1$.

Због фазног помака између струје и напона, који се јавља код кондензатора, повећава се привидни отпор огранка $C2/R4$ на основу реактивног удела X_c , највише за 5Ω , тј. од улаза $-In$ према маси је минимално 105Ω (ако је $P1=0$). Из тога произилази да је максимално појачање $180K\Omega/105\Omega = 1700$.

Искључење сигнала врши се такође капацитивно преко C5. Жељени ниво се може подешавати преко P2 и прилагодити стању следећег појачавача. Кондензатор за искључење C5 може бити знатно мањи од C2 јер је његов отпор при наизменичној струји још увек знатно мањи од $47K\Omega$ са пример потенциометра P2.

Серијски отпорник R5 у напајању струјом раздваја електрично коло од осталих подсклопова који су евентуално прикључени на исти напон $+U_v$. Тиме се избегавају узајамни утицаји. Отпорник R5 образује заједно са кондензатором C3 филтрирајући елемент за напон напајања.

Високофреквентне сметње, које су евентуално настале преко напајања струјом, се са С4 кратко спајају према маси, јер би се у супротном негативно одразиле на карактеристике операционог појачавача.

7.2. National Instruments опрема

NI cRIO-9215 картица

NI cRIO-9215 картица омогућава везу за четири аналогна улазна канала. Сваки канал има прикључак или пин за који се може прикачити позитивни напон сигнала, AI+, и прикључак на који се може прикачити негативни напон сигнала, AI-. cRIO-9215 такође садржи *com* прикључак који је унутрашње повезан са изолованом „земљом“ (нултим напоном система) модула. Канали деле заједничку „земљу“ која је изолована од осталих модула cRIO система. Подржани опсег напона на улазу је $\pm 10V$. cRIO-9215 штити сваки канал у случају довођења прејаког напона до границе од $\pm 30V$.

NI cRIO-9215 омогућава истовремено повезивање четири мерна уређаја, као и читање 100,000 вредности напона у скеунди на сваком каналу независно. Аналогни сигнал се помоћу четири A/D конвертора преводи у дигитални. NI cRIO-9215 картица је убачена у NI USB-9162 читач картица који има излаз на серијски порт. Серијским портом се подаци преведени A/D конвертором шаљу на рачунар.

Време потребно за конверзију када су у употреби сва четири канала износи $10\mu s$. Грешка читања калибрисане cRIO-9215 картице износи 0.02%.

LabVIEW

LabVIEW је графички програмски језик развијен због потребе да се на брз и једноставан начин направи програм за учитавање сигнала и његову обраду. *Front-panel* кориснички интерфејс, омогућава интерактивну контролу извршавања корисничког софтвера, док се на *block diagram*-у врши повезивање објеката као и дефинисање правила њихове интеракције. Да би се специфицирала функционалност система, врши се интуитивно графичко асемблирање дијаграма помоћу готових функционалних блокова, што је природан начин инжењерског представљања система. LabVIEW има све развојне алате и могућности процедуралних програмских језика, као што су петље, структуре гранања, алате за подешавање као и подршку за рад са објектима.

LabVIEW, графичко програмско развојно окружење је базирано на програмском језику G, које је намењено за обраду података, мерење, процесно управљање, анализу и представљање података.

Да би се развио програм у LabVIEW окружењу, врши се асемблирање софтверских објеката који се назвају виртуалним инструментима (VI). Користећи *drag-and-drop* метод, може се брзо створити графички кориснички интерфејс и направити изворни код у облику блок-дијаграма.

7.3. MathWorks - MATLAB

MATLAB је софтверско окружење за нумеричке прорачуне и програмски језик четврте генерације који производи фирма MathWorks. MATLAB омогућава лако манипулисање матрицама, приказивање функција и фитовање, имплементацију алгоритама, стварање графичког корисничког интерфејса као и повезивање са програмима писаним у другим језицима. Као такав често се користи у инжењерству, научним истраживањима и економији.

Матлаб је настао касних 1970-тих година због потребе да се на брз и једноставан начин реши велики број изузетно сложених проблема. MATLAB је језик четврте генерације што чини програмирање интуитивним. Програмирање је додатно олакшано великим бројем имплементираних библиотека и функција. У овом раду није било потребно посебно програмирати функцију кроскорелације као ни функцију за решавање нелинеарног система једначина већ је то одрађено једном командом позивања MATLAB -овог интегрисаног алгорита. На тај начин је корисницима без познавања напредног програмирања и сложених алгоритама омогућено решавање комплексних проблема.

Основа MATLAB -а је правоугаона матрица. Само име “MATLAB” настало је као скраћеница од “Matrix Laboratory”. Наиме, основу рада овог окружења представљају матрице. У њима се складиште променљиве свих типова, од нумеричких вредности, стрингова, до слика, видео и аудио записа.

8. БУМЕРАНГ ПРОЈЕКАТ

Потреба локализације извора звука јавила се у војсци као резултат проблема снајперског напада. На бојном пољу, када се истовремено чују хици стотина ратних машина тешко је установити напад снајпера, као и то да ли је метак управо пролетео поред главе војника. Из тог разлога америчка војска развила је систем за детекцију положаја стрелца како би својим војницима сигнализирала непријатељске јединице и омогућила повлачење или противнапад пре него што би били погођени. Систем је назван Бумеранг, покретни систем за детекцију пуцња (Boomerang Mobile Shooter Detection System). Бумеранг јединица инсталирана је на војна возила, и користи седам микрофона распоређених у облику бодљи морског јежа (слика 11) за детекцију звука пуцња и ударног таласа испаљеног метка. Када је метак детектован Бумеранг екран, која се налази унутар возила, упозорава војнике звучним и визуелним сигналимa да је метак испљен откривајући његову удаљеност и азимут.



Слика 11



Слика 12

Бумеранг сензор инсталиран на војна возила одређује тачку извора непријатељског пуцња било да је статичка или да се креће, у свим временским условима, на отвореном пољу или у урбаној средини. Сензори се налазе на врху копља на задњем делу возила (слика 12) и откривају суперсоничне (надзвучне) ударне таласе као и звучне таласе експлозије пуцња зарад прецизног одређивања локације са које је пуцањ испаљен. Корисници добијају симултане визуелне и аудио информације о месту пуцња помоћу табле на којој су 12 ЛЕД распоређених у облику сата, као и помоћу звучника постављеног унутар возила.

Бумеранг открива метак малокалибарског оружја који се креће у сусрет возилу рачунајући путању која пролази непосредно поред возила. Положај долазећег пуцња и позиција стрелца се утврђују и пријављују за мање од две секунде, затим се систем поново поставља у почетно стање за откривање наредног пуцња.

Лажно откривање пуцња се дешава једном у хиљаду сати рада система, док се један у пет стотина пуцњева не детектује, при брзинама возила до 80 km/h. Систем је подешен за откривање пуцња малокалибарског оружја попут АК-47 који припада породици пушака калибра .30 чији метак када је испаљен путује надзвучно. Ипак овакво подешавање не искључује систем од откривања пуцња пушака већег или мањег калибра. Систем је испитан и доказано је да је успешно откривао метке 5.56 NATO и .50 калибарне машинке.

9. ЗАКЉУЧАК

Систем за одређивање положаја звука је веома моћна машина са великом применом данас када је роботизација и аутоматизација заступљена у свим областима живота. Овакав систем се користи у надзорним системима, роботици, војсци и многим другим делатностима.

Предност система који за одређивање положаја и праћење објеката користи звук је примена у условима када са објектом није могуће успоставити визуелни контакт. Овакав систем делује при неповољним временским условима, у магли као и у мраку.

Испитањем система развијеног у овом раду добијали су се очекивани резултати.

Систем је могуће подесити и унапредити тако да одређује само одговарајуће звуке попут хица из једне врсте оружја али не и из других. Прецизније резултате могуће је добити коришћењем поузданије опреме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петница – зборник радова 2007 – примењена физика и електроника – „конструкција уређаја за пасивну локализацију извора звука у равни“ Иван Разуменић.
2. <http://sr.wikipedia.org/wiki/Звук>
3. <http://www.gizmag.com/go/4497/>
4. <http://www.mathworks.com/>