

# Izdelava akustičnega merilnika razdalje z uporabo odprto-kodnega merilnega instrumenta Red Pitaya

Marko Meža

LDOS, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana  
E-pošta: marko.meza@fe.uni-lj.si

## Red Pitaya based ultrasonic distance meter

*We have implemented acoustic range sensor using open-source measuring platform Red Pitaya. Acoustic range sensor uses chirp signal around 40 kHz. Chirp signal is created in Matlab environment, played back through ultrasonic transducer connected to the Red Pitaya and captured using another ultrasonic transducer connected to the same Red Pitaya. Acquired signal is then processed in Matlab in order to determine delay between transmitted and received signal, which is then converted to the distance. Using the experimental setup we were able to measure distance up to 3 m in 1.5 cm accuracy.*

## 1 Uvod

Merjenje razdalje je mogoče izvesti na mnogo načinov. V prispevku se ukvarjamo z brez-kontaktnim merjenjem razdalje z uporabo ultrazvoka. Meritev smo izvedli na odprto-kodni platformi Red Pitaya z namenom raziskave in študija možnosti, ki jih platforma ponuja.

### 1.1 Predstavitev problema

Za osnovo našega dela smo uporabili rešitev, ki so jo izvedli in demonstrirali avtorji v viru [1]. Opisana rešitev demonstrira merjenje razdalje v zraku z merjenjem faznega zamika med oddajanjem in sprejetim ultrazvočnim signalom. Ker je bil v eksperimentu uporabljen ultrazvočni vir s konstantno frekvenco sinusnega signala  $f = 40\text{kHz}$ , so lahko ob predpostavki, da je hitrost zvoka v zraku  $v = 343\text{m/s}$  [2] merili razdaljo ene valovne dolžine  $\lambda$  zvoka v zraku, kar glede na enačbo 1 znaša 8,5mm.

$$\lambda = \frac{v}{f} = 8,5\text{mm} \quad (1)$$

Omenjeno razdaljo smo želeli podaljšati in ob enem demonstrirati dostop do funkcionalnosti orodja Red Pitaya iz okolja Matlab. Na voljo smo imeli sprejemnik in oddajnik zvoka, ki sta bila sposobna oddajati v razmeroma ozkem frekvenčnem območju okoli 40 kHz. Izmeriti smo morali čas, ki preteče med oddajo signala in med sprejemom le tega in iz izmerjenega časa izračunati razdaljo. Meritev smo izvedli z uporabo frekvenčno modularnega ultrazvočnega signala, na podlagi katerega smo lahko posredno neprekinjeno merili čas, ki ga je potreboval zvok, da je prepotoval merjeno dolžino v mediju - zraku.

## 2 Materiali in metode

### 2.1 Merjenje razdalje

Razdaljo z ultrazvokom je mogoče meriti na več načinov. Ker je človeško uho neobčutljivo na frekvence nižje od 30 Hz in višje od 20 kHz je za meritev razdalje, brez da bi le ta motila ljudi v bližini, mogoče uporabiti zvok s frekvenco izven območja slišnosti. Ultrazvočno merjenje razdalje je pogosto uporabljen pristop za merjenje razdalje, in detekcijo prisotnosti. Osnovni princip merjenja je osnovan na meritvi časa, ki ga zvok potrebuje, da prepotuje pot od oddajnika do sprejemnika. Za izvedbo sistema lahko uporabimo signal v obliki kratkih pulzov znotraj katerih ima signal fiksno frekvenco, lahko merimo fazni zamik med oddajanjem in sprejemanim signalom fiksne frekvence, lahko pa uporabimo signal, ki mu frekvenco spreminjamo po času. Na podlagi znanega poteka spreminjanja frekvence po času lahko izračunamo čas, ki je bil potreben, da je signal prepotoval merjeno razdaljo.

### 2.2 Red Pitaya

Red Pitaya je odprto-kodni merilni inštrument, razvit okoli rekonfigurabilnega vezja v velikosti kreditne kartice. Na vezju se nahajata dva hitra analogna vhoda (125MS/s, 14bit), dva hitra analogna izhoda (125 MS/s, 14bit), Gigabitni Ethernet vmesnik, USB vmesnik za priključitev naprav ter razširitveni konektorji. Vezje je zgrajeno okoli Xilinx ZYNQ 7010 SoC čipa ki vsebuje 2 ARM Cortex A9 jedri in FPGA vezje, 512 MB DDR3 SDRAM, ter vmesnik za microSD kartico, na kateri se nahaja operacijski sistem Linux [3]. Na sliki 1 je prikazano vezje merilnega instrumenta.



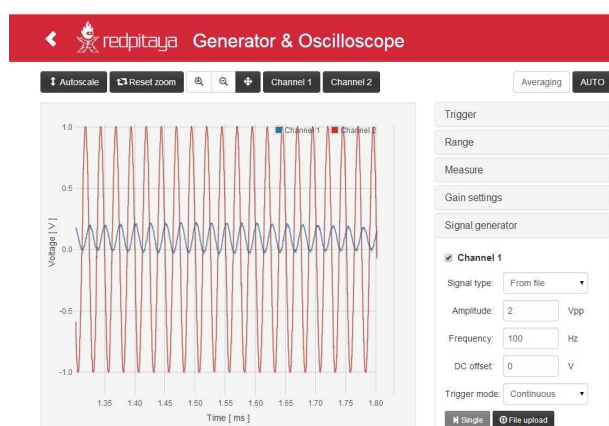
Slika 1: Strojna oprema odprto-kodnega merilnega instrumenta Red Pitaya [3].

Uporabniki do instrumenta dostopajo preko spletnega brskalnika, znotraj katerega nameščajo in pogajajo različne merilne instrumente. V osnovi so na Red

Pitayi nameščeni merilni instrumenti: osciloskop, spektralni analizator ter osciloskop s funkcijskim generatorjem. Slika 2 prikazuje uporabniški vmesnik instrumenta Osciloskop s funkcijskim generatorjem.

### 2.2.1 Orodje scope+gen

V orodju je na voljo signalni generator, ki lahko poleg standardnih oblik signala (sinus, trikotnik, pravokotnik) generira tudi signal, ki ga naložimo v obliki datoteke. Podatki v datoteki so številčne vrednosti relativne napetosti posameznih vzorcev signala, vsak vzorec v novi vrstici. V trenutni verziji orodja je največje možno število vzorcev v datoteki 16383 [4]. Naloženemu signalu za izbrani kanal definiramo frekvenco in amplitudo predvajanja. Uporabniški vmesnik, ki prikazuje izbrane parametre je na sliki 2.



Slika 2: Uporabniški vmesnik virtualnega instrumenta Osciloskop + signalni generator.

### 2.2.2 Dostop do funkcionalnosti acquire Red Pitaye iz Matlab-a

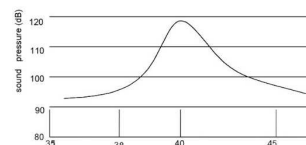
Trenutno je za dostop do funkcionalnosti Red Pitaye na voljo Matlab skripta acquire, ki z uporabo orodij plink in pscp na Red Pitayi izvaja ukaze ter prenaša na Red Pitayi nastale datoteke. Skripta je na voljo v GitHub repozitoriju projekta [5]. S skripto je mogoče z Red Pitayo posneti vzorce na izbranem kanalu Red Pitaye, pri čemer je maksimalno število vzorcev 16k. Red Pitaya vzorči vhodni kanal s stalno frekvenco vzorčenja 125MHz. Pri uporabi funkcije acquire je mogoče izbrati decimacijo, ki ohrani le vsak izbrani vzorec. Možne vrednosti decimacije so 1, 8, 64, 1024, 8192, ali 65536.

### 2.3 Ultrazvočni transducer

Kot vir in sprejemnik zvoka smo uporabili dva ultrazvočna keramična transducerja MCUSD16A40S12RO podjetja Multicomp. Omenjeni transducer ima centralno frekvenco  $f_c = 40kHz$  z uporabnim frekvenčnim pasom okoli centralne frekvence  $\pm 1kHz$ . Uporabljeni transducer je prikazan na sliki 3. Frekvenčna karakteristika transducerja za oddajanje je prikazana na sliki 4, frekvenčna karakteristika transducerja za sprejem pa na sliki 5.



Slika 3: Uporabljeni 40 kHz ultrazvočni transducer MCUSD16A40S12RO [6].



Slika 4: Frekvenčna karakteristika zračnega tlaka v odvisnosti od frekvence uporabljenega transducerja MCUSD16A40S12RO [6].

### 2.4 Radar s frekvenčno moduliranim signalom

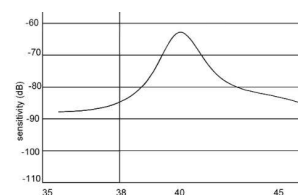
Za meritev razdalje smo namesto signala konstantne frekvence uporabili frekvenčno moduliran signal. Ta pristop je pogosto uporabljan pristop na katerem so osnovani radarji, ki delujejo tudi v radijskem spektru frekvenc [7]. Signalu se frekvenca spreminja linearno zvezno od frekvence 39kHz do 41kHz. Ker poznamo hitrost spreminjanja frekvence, lahko čas, ki ga je signal prepotoval po zraku od trenutka oddaje do trenutka sprejema izračunamo tako, da izračunamo razliko v frekvenci med oddajanim in sprejetim signalom. Iz razlike v frekvenci, hitrosti spreminjanja oddajane frekvence in iz hitrosti zvoka v zraku lahko izračunamo razdaljo, ki jo je prepotoval zvok od oddajnika do sprejemnika. Če imamo zaradi praktičnih razlogov oddajnik in sprejemnik na isti lokaciji in merimo razdaljo od oddajnika/sprejemnika do ovire je potrebno izmerjeno razdaljo deliti z 2.

### 2.5 Chirp

Signal chirp je frekvenčno moduliran signal, ki se mu frekvenca zvezno spreminja od frekvence  $f_0$  do frekvence  $f_1$ . V rešitvi smo uporabili linearno naraščajoči chirp signal, pri katerem je hitrost spreminjanja frekvence v odvisnosti od časa linearna in narašča [8]. Frekvenca linearnega chirp signala je definirana z enačbo 2:

$$f(t) = f_0 + kt \quad (2)$$

pri čemer  $f_0$  začetna frekvenca in  $k$  hitrost naraščanja frekvence v odvisnosti od časa  $t$ . Če je  $f_1$  končna fre-



Slika 5: Frekvenčna karakteristika občutljivosti uporabljenega transducerja MCUSD16A40S12RO v odvisnosti od frekvence [6].

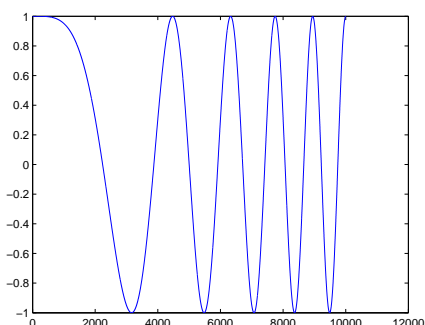
kvenca, hitrost naraščanja frekvence signala  $k$  iz enačbe 2 izrazimo z enačbo 3.

$$k = \frac{f_1 - f_0}{t_1} \quad (3)$$

Linearni chirp signal je definiran z enačbo 4:

$$x(t) = \sin \left[ 2\pi \left( f_0 t + \frac{k}{2} t^2 \right) \right] \quad (4)$$

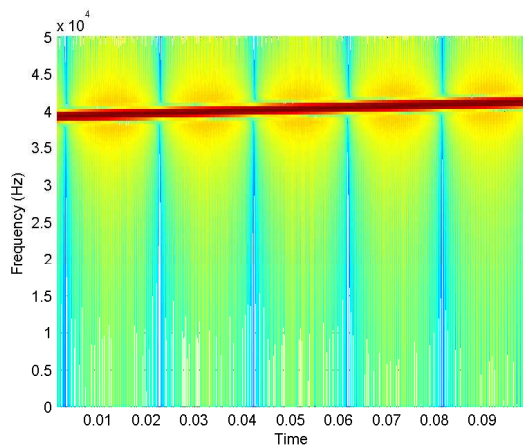
V programskem okolju Matlab je na voljo generator chirp signala, ki lahko poleg ostalih generira tudi linearen chirp signal. Generator poženemo z ukazom chirp in ustreznimi parametri. Na sliki 6 je prikazan oscilogram signala chirp z linearnim naraščanjem frekvence.



Slika 6: Oscilogram signala chirp z linearnim naraščanjem frekvence. Signal je generiran z ukazom chirp v Matlabu.

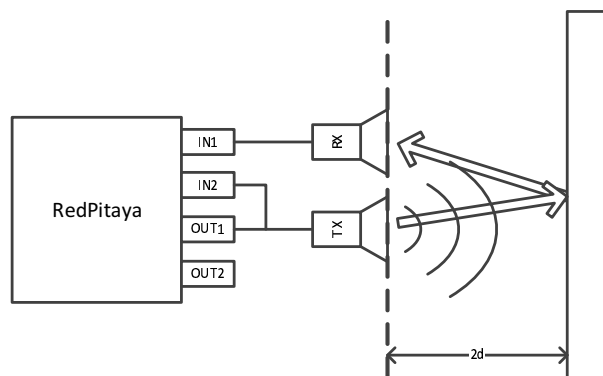
### 3 Rešitev

V programskem jeziku Matlab smo izdelali linearen chirp signal, ki je frekvenčno moduliran signal, kateremu se frekvenca spreminja od  $f_0 = 39kHz$  do  $f_1 = 41kHz$ . Generirali smo 0,01 sekundo trajajoč chirp signal, vzorčen s frekvenco vzorčenja  $F_s = 1MHz$ . Visoka frekvenca vzorčenja je bila izbrana zato, da v nadaljevanju postopka ni bilo potrebno uporabiti dodatnih filtrov. Spektrogram signala je prikazan na sliki 7.

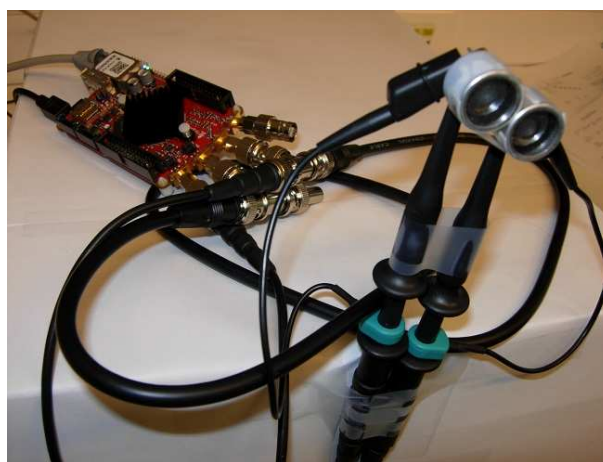


Slika 7: Spektrogram generiranega chirp signala.

Generiran signal smo z uporabo orodja „Generator & Oscilloscope 0.92-233“ na Red Pitayi naložili na RedPitayo in predvajali z ustrežno frekvenco (100 Hz).



Slika 8: Diagram postavitev eksperimenta.



Slika 9: Dejanska postavitev eksperimenta.

Kot je ilustrirano na sliki 8, smo oba ultrazvočna transducercja povezali na Red Pitayo in sicer enega na vhodni kanal 1, drugega pa na izhodni kanal 1. Prav tako smo izhod kanala 1 povezali neposredno na vhodni kanal 2. Na izhodni kanal 1 smo dodali še  $50\Omega$  uporovni terminator. Fotografija eksperimenta je vidna na sliki 9.

V programskem okolju Matlab smo napisali kodo, ki uporablja funkcijo acquire na Red Pitayi. Pri posamezni meritvi smo zajeli 10.000 vzorcev, kot parameter decimacije smo izbrali vrednost 64. Torej je bila dejanska frekvenca vzorčenega signala  $125MHz/64 = 1,953125MHz$ .

#### 3.1 Izračun zakasnitve

Ker smo poznali hitrost naraščanja frekvence signala  $k$ , smo zakasnitev  $t$  med oddajanjem in sprejetim signalom lahko ugotovili iz razlike v frekvenci oddajane in sprejete signala  $\Delta f$ . Zakasnitev  $t$  je mogoče izračunati z uporabo enačbe 5. V enačbi je v imenovalcu ulomka 2, ker je signal merjeno razdaljo prepotoval dvakrat.

$$t = \frac{\Delta f}{k} \quad (5)$$

Iz zakasnitve  $t$  in hitrosti zvoka v zraku  $v$  pa je mogoče izračunati razdaljo z uporabo enačbe 6:

$$d = \frac{tv}{2} = \frac{t \cdot 343m/s}{2} \quad (6)$$

### 3.2 Izračun razlike frekvenc $\Delta f$

Za izračun razlike frekvenc oddajane in sprejetega signala  $\Delta f$  smo uporabili lastnost sinusnih signalov v enačbi 7:

$$\sin(a)\sin(b) = \frac{1}{2}(\cos(a-b) - \cos(a+b)) \quad (7)$$

Iz enačbe 7 lahko razberemo, da ko pomnožimo 2 sinusna signala različnih frekvenc, kot rezultat dobimo signal sestavljen iz razlike in vsote frekvenc.

Pri naši rešitvi smo z Red Pitayo hkrati zajemali oddajani in sprejeti signal. Podatke o poteku signala smo z uporabo funkcije `acquire` pridobili v Matlab v obliki 2 vektorjev, v katerih so bili vzorci napetosti na posameznih kanalih, vzorčeni s frekvenco vzorčenja  $1,953125MHz$ . V nadaljevanju smo predpostavljali, da so vzorci posameznih kanalov izmerjeni istočasno.

V nadaljevanju postopka smo posamezne soležne vzorce iz vektorjev zmnožili med sabo in dobili signal, ki je glede na enačbo 7 vseboval vsoto in razliko frekvenc obeh kanalov. Ker je bila razdalja med merjenjem konstantna in ker je frekvenca chirp signala naraščala linearno, je bila razlika frekvenc med kanaloma konstantna, zato sta bili v produktu kanalov v konstantni frekvenčni komponenti.

V nadaljevanju je bilo potrebno iz signala ti dve frekvenčni komponenti določiti. V ta namen smo na signalu izvedli Fourierovo transformacijo z uporabo Matlabove funkcije `fft`. V transformaciji smo poiskali vrhove amplitudne komponente transformacije. Frekvenco prvega vrha smo proglasili za iskano frekvenco razlike frekvenc  $\Delta f$ .

### 3.3 Izračun razdalje

Ker smo poznali hitrost naraščanja frekvence, smo iz razlike frekvenc določili čas, ki ga je signal potreboval, da je prepotoval pot od oddajnika do sprejemnika po enačbi 5. V nadaljevanju smo uporabili enačbo 6, s katero smo izračunali dejansko razdaljo, ki jo je signal prepotoval. Enačbi 5 in 6 sta združeni v enačbi 8:

$$d = \frac{\Delta f \cdot 343m/s}{2 \cdot k} \quad (8)$$

## 4 Rezultati

Z omenjeno metodo uspemo izmeriti razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom do okoli 3 metrov. Meritev razdalje je namreč omejena s trajanjem chirp signala, ki v trenutni izvedbi eksperimenta znaša 0,01s. V trenutni verziji algoritma je izračun razdalje iz izmerjenih vrednosti opravljen z uporabo kalibracijske konstante, ki smo jo določili eksperimentalno.

Z omenjeno metodo izmerimo razdaljo ob neupoštevanju ostalih napak, kot so npr. nenatančno definirane hitrosti širjenja zvoka po zraku, na 1,1cm natančno. Vzrok za omenjeno sistemsko omejitev natančnosti meritve leži v ločljivosti določanja frekvence razlike, ki je pogojena s frekvenco vzorčenja.

## 5 Zaključek

V pričujočem članku smo opisali izdelavo ultrazvočnega merilnika razdalje. Motiv za izdelavo merilnika je bil preizkus funkcionalnosti odprto-kodnega merilnega orodja Red Pitaya, predvsem preizkus dostopnosti funkcionalnosti iz okolja Matlab. V trenutni verziji opisanega eksperimenta je dostop do funkcionalnosti sicer izveden, vendar je še nekoliko okoren, saj komunikacija med Red Pitayo in računalnikom ne poteka v realnem času, marveč poteka na osnovi generiranja in prenosa datotek. Za komunikacijo v realnem času je mogoče za Red Pitayo izdelati programske module, ki bi to omogočali.

## 6 Zahvala

Delo je nastal delno s financiranjem v okviru programske skupine Algoritmi in optimizacijski algoritmi v telekomunikacijah. Za koristne nasvete pri nastajanju pričujočega dela se želim zahvaliti dr. Urbanu Burniku, mag. Štefanu Dobravcu ter dr. Francu Policardiju. Prav tako se želim zahvaliti podjetju I-Tech, ki je omogočilo dostop do Red Pitaye.

## Literatura

- [1] Anonimni avtor. Precision to the Last Micron. <http://blog.RedPitaya.com/?p=218>, dostop 23. 6. 2014
- [2] Wikipedija. Speed of sound. [http://en.wikipedia.org/wiki/Speed\\_of\\_sound](http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound), dostop 23. 6. 2014
- [3] Spletna stran podjetja Red Pitaya. <http://RedPitaya.com/>, dostop 24. 6. 2014
- [4] Red Pitaya Wiki. Programska specifikacija Red Pitaye. [http://wiki.RedPitaya.com/index.php?title=Software\\_Specifications](http://wiki.RedPitaya.com/index.php?title=Software_Specifications), dostop 24. 6. 2014
- [5] GitHub repozitorij projekta Red Pitaya. <https://github.com/RedPitaya/RedPitaya>, dostop 24. 6. 2014
- [6] Proizvajalčev list z lastnostmi ultrazvočnega transducerja MCUSD16A40S12RO. <http://www.farnell.com/datasheets/1759988.pdf>, dostop 23. 6. 2014
- [7] Matjaž Vidmar. A Landing Radio Altimeter for Small Aircraft. <http://lea.hamradio.si/~s53mv/radalt/radalt.html>, dostop 23. 6. 2014
- [8] Wikipedia. Chirp. <http://en.wikipedia.org/wiki/Chirp>, dostop 24. 6. 2014