

Štetje in merjenje hitrosti prometa z dostopnim mikrovalovnim senzorjem

Gal Pavlin

Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, SI-1000 Ljubljana
gp4228@student.uni-lj.si, gal@pavlin.si

Affordable speed and traffic flow sensing using microwave sensor module

Abstract. Radar sensor modules have become very affordable. With the right choice of signal processing electronics good enough results can be expected without hurting the system's affordability. Possible use cases range from room activity sensing to measuring traffic speed and flow.

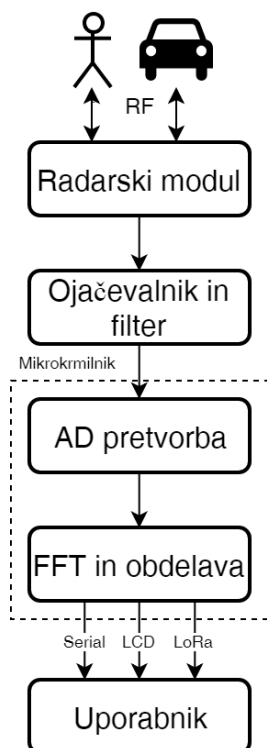
1 Uvod

CDM324 je majhen mikrovalovni radarski modul. Ne večji kot 3x3 cm je z nekaj dodatne elektronike zmožen zaznati premikanje in hitrost večjih objektov v njegovem dosegu.

Uporabnih vrednosti je veliko. Pokazal bom, da je radar uporaben za merjenje aktivnosti v zaprtem prostoru, merjenje hitrosti ter štetje prometa.

2 Strojna oprema

Slika 1 prikazuje potek signalov v celotnem sistemu.



Slika 1. Blokovna shema celotnega sistema

2.1 Radarski modul

Čeprav je izvor CMD324 modula vprašljiv, ga je mogoče kupiti na znanih spletnih avkcijah. Modul je po funkcionalnosti in izgledu precej podoben modulu IMP-165 nemškega podjetja Innosent [1].

Senzorski modul vsebuje mikrovalovni oddajnik in sprejemnik, ki delujeta na 24 GHz [2]. Signal se konstantno oddaja in sprejema preko dveh mikrostrip anten na sprednji strani. Izhod iz modula je analogni signal, ki je frekvenčna razlika oddanega in sprejetega signala. Če se pred modulom dovolj velik objekt premika, nastane med oddanim in sprejetim signalom frekvenčna razlika, ki je posledica frekvenčnega premika zaradi Dopplerjevega pojava [3][4].

Radarski modul potrebuje za delovanje 5V pri porabi 60mA [2]. Napajanje mora biti čim bolj čisto, saj se vsaka motnja na napajanju direktno preslika na izhod. Po navadi so motnje v napajanju periodične, kar povzroči napačne odčitke ali pa močno dvigne zaznavni prag oziroma zniža občutljivost.

Antena na modulu je usmerjena. Sevalni diagram je sploščen stožec s kotom 80° vodoravno in kotom 35° navpično. [2] Zaradi dokaj široke antene je zaznavanje majhnih objektov na daljše razdalje zahtevno. Z mojo implementacijo modula v sistem sem lahko zaznal in izmeril hitrost osebnega avtomobila na približno 15m.

2.2 Ojačevalnik signala

Analogni izhod iz modula je potrebno pred digitalno obdelavo ojačiti. Za dizajn ojačevalnika sem uporabil spletno orodje WEBENCH® Filter Designer podjetja Texas Instruments.

Ojačevalno vezje ima dve stopnji, ki sta realizirani s pomočjo dvojnega operacijskega ojačevalnika. Vezje hkrati služi tudi kot nizkoprepustni filter, ki odreže signale višjih frekvenc, saj nas ti pri obdelavi ne zanimajo. Orodje se je izkazalo za zelo uporabno in ojačevalnik je deloval zadovoljivo dobro že ob prvi implementaciji. [5]

Zaradi fiksne ojačitve pride pri velikih vhodnih signalih ojačevalnik v nasičenje. To se zgodi npr., ko je velik objekt zelo blizu radarja. V frekvenčnem spektru je poleg glavne komponente še več harmonikov, ki zasenčijo ostal uporaben spekter. To težavo bi lahko odpravil z večkanalnim ojačevalnikom z različnimi ojačitvi, pri čemer bi izbral najbolj optimalnega. To bi lahko rešil tudi z avtomatskim uravnavanjem ojačitve, kot to počnejo nekateri mikrofonski ojačevalniki. [7]

2.3 Mikrokrmilnik

Mikrokrmilnik služi kot enota za obdelavo radarskega signala. Izbral sem 32-bitni STM32F4 podjetja ST micro. Ta družina mikrokrmilnikov se ponaša s hitrim AD pretvornikom in FPU enoto, ki zelo pohitri izvajanje matematičnih operacij za obdelavo signala.

Naloga mikrokrmilnika je, da izvaja AD pretvorbo in zajete podatke v časovnem prostoru s pomočjo hitre fourierjeve transformacije pretvori v podatke v frekvenčnem prostoru. V slednjem je obdelava signala bistveno lažja. [3] Računanje poteka v realnem času.

Tabela 1. Parametri zajema in obdelave s FFT

Opis	Parameter	Vrednost
Frekvenca zajema	f_s	20 KHz
Velikost FFT	FFT _{SIZE}	2048 vzorcev
Ločljivost frekvence	Δf	19.5 Hz

Zajem podatkov in računanje FFT potekata istočasno. S t.i. dvojnimi predpomnilnikom se doseže, da se zajame in pretvori celoten signal. Slabost je, da se v sistem doda časovni zamik, ki je enak zajemu ene velikosti FFT. V mojem primeru je ta zamik okrog 100 ms.

Poleg zajema in pretvorbe signala je naloga mikrokrmilnika tudi, da iz dobljenih podatkov izloči bistvene komponente. To je v mojem primeru bodisi hitrost objekta pred radarjem ali pa aktivnost v prostoru, ki sem jo določil kot oceno energije celotnega spektra odbitega signala.

Pri pisanju programske kode sem se trudil čim bolj uporabljati periferno. Uporabil sem interni DMA (Direct Memory Access), ki poskrbi, da se zajeti podatki iz internega AD pretvornika zapišejo v delovni spomin brez posredovanja procesorja. Na ta način zajem podatkov z vzorčenjem 20 kHz ni povročal nobenih težav. Vzorčenje bi lahko še povečal in izboljšal ločljivost, vendar se to ni izkazalo za potrebno.

3 Izdelava sistema

3.1 Vezje

Prvotna ideja je bila, da bi se celoten radar napajal iz ene litijeve celice. Vezje je načrtovano s polnilcem, ki polni baterijo iz USB napajanja. Za zagotovitev potrebnih napetostnih nivojev je na vezju stikalni pretvornik, ki napetost baterije (3-4.2 V) pretvori na 5 V. Za njim je linearni regulator (LDO), ki napetost zniža še na 3.3 V za napajanje mikrokrmilnika.

Za preprosto merjenje frekvence sem na vezje dodal komparator, ki analogni sinusni signal pretvori v kvadratnega z isto periodo. Ta signal je nato speljan na merilec periode (timer) v mikrokrmilniku. S to metodo mi ni uspelo dobiti zadostno dobrih rezultatov, kljub implementaciji histereze. Razlog za to je bil prevelik šum v signalu. Direktno vzorčenje z AD pretvornikom in izračun FFT se je izkazalo za mnogo bolj zanesljivo metodo določanja frekvence z najvišjo amplitudo.



Slika 2: Tiskano vezje z elementi

Na vezju je tudi večsmerna navigacijska tipka, ki služi za premikanje po menijih prikazovalnika. Z njo lahko uporabnik nastavlja merilno območje in parametre prikaza. Uporablja se tudi za vklop in izklop.

Na sliki 2 je prvo izdelano vezje. Radarski modul se nahaja na spodnji strani. Usmerjenost antene modula kaže skozi vezje navzdol. Na sliki 2 je v zgornjem levem kotu videti žične prevezave, ki so posledica nepravilne vezave navigacijske tipke.

Vezje sem cinil ročno s spajkalnikom s fino konico. Elemente brez nogic sem zaspajkal z vročim zrakom.

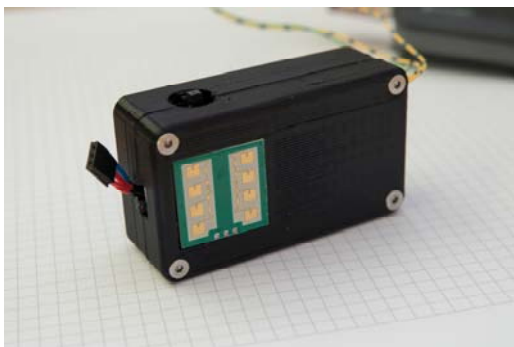
3.2 Problemi

Imel sem težave z motnjami na napajanju. Stikalni boost pretvornik je v kombinaciji z radarskim modulom na 5 V napajanju povzročal periodične špice velikosti do 500 mV, kar je močno dvignilo zaznavni prag za celoten sistem. Težavo mi je uspelo delno omejiti s filtriranjem napajanja, skoraj dokončno odpraviti pa tako, da sem uporabil zunanje USB napajanje. Zaradi tega radar na koncu ni bil več avtonomen in je za delovanje potreboval zunanje napajanje. V naslednji iteraciji načrtovanja vezja bom skušal ta del izboljšati in motnje na napajanju odpraviti, ne da bi spremenil prvotno zamisel avtonomnega delovanja radarja.

3.3 Ohišje

Radarski modul se skupaj s pripadajočim vezjem nahaja v plastičnem ohišju. Ohišje je sestavljeno iz dveh delov, ki sta med seboj povezana s štirimi vijaki. Na vrhu ohišja je odprtina za navigacijsko tipko. Ob straneh je odprtina za USB napajanje, konektor za programiranje in konektor za serijska vrata. Ohišje je bilo natisnjeno s 3D tiskalnikom v Makerlab Ljubljana.

Na sliki 3 je druga verzija ohišja. Prva je bila približno dvakrat ožja in porezkana iz lesa. Zaradi pomanjkanja prostora in nepraktičnosti sem to verzijo opustil. To verzijo ohišja je videti na sliki 2. Manjka še aluminijast pokrovček z zadnje strani z odprtino za manjši prikazovalnik.



Slika 3: Ohišje s sprednjo odprtino za radarsko anteno

3.4 Prikaz in povezljivost

Za prikaz radarskih podatkov v živo služi grafični OLED prikazovalnik velikosti 2.42 palca na zadnji strani. Na prikazovalniku se izpisuje izmerjena hitrost, če se pred radarjem objekt premika. Če v okolici ni premikajočih objektov, radar z napisom »Low signal« sporoči, da ni odbitega signala. Na spodnji strani prikazovalnika se v živo izrisuje graf komponent signala v kompleksnem spektru. Za grob odčitek iz grafa je na voljo tudi skala. Z visoko frekvenco osveževanja (50Hz) je slika zelo tekoča.



Slika 4: OLED prikazovalnik v delovanju

Z večsmerno navigacijsko tipko lahko uporabnik upravlja z grafom na prikazovalniku. Lahko ga razteguje in krči ter premika po časovni osi, tako da menja merilno območje. Če uporabnik tipko kratko pritisne, se na prikazovalniku pokaže meni, kjer se lahko nastavlja tako parametre za FFT kot parametre algoritma za izračun hitrosti. Uporabnik lahko tudi izbira enote za prikaz izmerjene hitrosti in vključi oziroma izključi prikaz aktivnosti pred radarjem.

Radar se lahko poveže preko serijskega vodila s TTL nivoji na drugo napravo. Sprogramiral sem ga tako, da vsake tri sekunde pošlje najvišjo izmerjeno hitrost in povprečno aktivnost. Na drugi strani serijskih vrat lahko preprosto priključimo osebni ali »System On Chip« računalnik s programsko opremo, ki beleži poslana sporočila in jim doda časovno oznako. Sistem je s tem pripravljen na beleženje hitrosti.

3.5 Možne izboljšave

Namesto direktne žične povezave bi lahko uporabil brezžično LoRa povezljivost. Kot modul se priključi na radar preko serijskih vrat in na spletni strežnik pošilja

radarske podatke. Na spletu se lahko podatki naknadno obdelajo in prikažejo v obliki primerni za širšo publiko. Z dodatkom solarnega napajanja bi lahko sistem postavil kamorkoli v mestu, kjer je dovolj sonca. To bi močno poenostavilo uporabo radarja na mestih, kjer ni dostopne električne in internetne infrastrukture.

4 Rezultati

4.1 Računanje hitrosti in ocena aktivnosti v prostoru

Hitrost objekta, ki se premika pred radarjem, se določi s formulo 1. [4] [6] Ločljivost hitrosti je pri izbranem Δf 0.12 m/s.

$$v = f_{dop} \frac{c_0}{2 f_0 \cos(\alpha)} \quad (1)$$

Tabela 2. Opis veličin v enačbi (1)

Oznaka	Veličina
f_{dop}	Frekvenčni zamik
f_0	Oddajna frekvenca (24.125 Ghz)
c_0	Hitrost svetlobe
α	Kot med hitrostjo objekta in usmerjenostjo mikrovalov

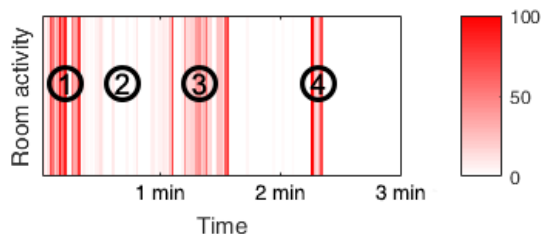
Aktivnost okolice pred radarjem se lahko oceni s povprečno vrednostjo signala v času zajema podatkov za eno velikost FFT. Vse prispevke signala v frekvenčnem prostoru med seboj geometrijsko seštejemo s formulo (2).

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^{FFT_{size}} U_i^2} \quad (2)$$

4.2 Merjenje aktivnosti v zaprtem prostoru

Radar sem postavil v prostor na mizo in ga povezal na računalnik preko serijskih vrat. Računalnik je beležil 3 sekundno povprečje signala. Meritev je potekala 3 minute. V tem času sta se dve osebi premikali po prostoru ali sedeli pri miru.

Zajete podatke sem obdelal v Matlab-u in iz njih sestavil toplotno karto na sliki 2. Enote so relativne glede na najvišjo izmerjeno vrednost.



Slika 5: Toplotna karta aktivnosti v prostoru

Tabela 3. Opis dogajanja v prostoru za sliko 2

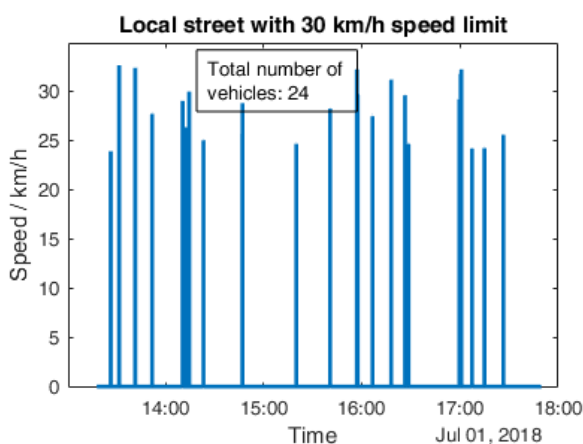
Št.	Dogajanje v prostoru
1	Dve osebi prideta v prostor.
2	Osebi sedita.
3	Ena oseba hodi po prostoru in ga nato zapusti
4	Prostor zapusti še druga oseba

4.3 Merjenje hitrosti in štetje prometa

Algoritem po vsakem končanem izračunu FFT najprej v frekvenčnem prostoru poišče komponento z najvišjo amplitudo. Nato preveri, če je ta komponenta višja od nastavljenih spodnjih vrednosti, da se izloči šum. Če je, se izračuna hitrost po enačbi (1), s tem da se za kot α vzame 0. Kot med hitrostjo objekta in umerjenostjo mikrovalov je potrebno upoštevati kasneje. Pri algoritmu je še veliko prostora za izboljšave.

Za prikaz izmerjenih vrednosti sem uporabil tekoče povprečje zadnjih štirih izmerjenih vrednosti. Na ta način sem odpravil skakanje prikaza. Rezultat je zaokrožen na dve decimalni mesti.

Radar sem postavil ob cesto. Zaradi širokega snopa oddajne in sprejemne antene je efektivni domet omejen na približno 15 m za meritev hitrosti osebnega avtomobila. Zaradi kratkega dometa, sem radar obrnil približno 40° glede na smer vozil. Meritev se je izvajala 3 ure na nedeljsko popoldne, zato je bilo naštetih avtomobilov le 24.



Slika 6: Graf hitrosti prometa za 1.7.2018

5 Zaključek

Uspelo mi je pokazati, da je z malo iznajdljivosti za preproste meritve uporaben tudi kitajski radarski modul vprašljivega porekla. To sem dosegel z uporabo ustreznega algoritma in skrbno načrtovanim vezjem. Z IoT integracijo in solarnim napajanjem bi lahko sistem postal uporaben za merjenje hitrosti in gostote prometa v mestih ali kot npr. učni pripomoček za poučevanje v srednjih tehniških šolah.

Literatura

- [1] Limpkin's blog, 11.7.2018
<https://www.limpkin.fr/index.php?post/2017/02/22/Making-the-Electronics-for-a-24GHz-Doppler-Motion-Sensor>
- [2] Data Sheet IPM-165, 11.7.2018
https://www.innosent.de/fileadmin/media/dokumente/DATASHEETS_2016/Datenblatt_IPM-165_V8.5.pdf
- [3] Li S., Wang Y. (2012) The Design of Radar Signal Processor Based on FPGA. In: Zhang Y. (eds) Future Wireless Networks and Information Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 143. Springer, Berlin, Heidelberg
- [4] Innosent Application note I, 11.7.2018
https://www.innosent.de/fileadmin/media/dokumente/Downloads/Application_Note_I_-_web.pdf
- [5] WEBENCH® Filter Designer, 11.7.2018
<http://www.ti.com/design-tools/signal-chain-design/webench-filters.html>
- [6] K. Ma, K. Zhang and Y. Zhang, "A signal processing practice method based on LFMCW radar," 2017 6th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), Dalian, 2017, pp. 449-452.
- [7] L. González-Delgado, D. Valencia-Redrován, V. Robles-Bykbaev, N. González-Delgado and T. Panzner, "Fuzzy controller for automatic microphone gain control in an autonomous support system for elderly," 2014 IEEE 16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), Natal, 2014, pp. 77-81.