

Preizkušanje radarja v milimetrskem frekvenčnem področju za uporabo na morju

Mladen Radovanović, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: mlaki@yahoo.com

Millimeter-Wave Radar Testing for Use at Sea

Abstract. Medium/short range system on a chip (SoC radar) TI AWR1843 77-81 GHz has been evaluated onboard cruise vessel M/S Silver Muse for proof of author concepts aiming in increasing safety of life at sea. Among other tests radar has been used to measure vessel water line shape as input to dynamic vessel model monitoring occurrence of parametric roll phenomena, detecting man overboard falls, tank levels monitoring, detection of people presence inside public spaces, measurement of car position in elevator shaft and main engine vibration monitoring.

In this paper, following radar description, measurement of waterline shape as input to vessel parametric roll observer will be presented and man overboard detection test.

1 Uvod

Številne pomorske nesreče z izgubo življenj in/ali materialnimi posledicami, kličejo po načrtovanju in uporabi sodobnih tehnoloških rešitev in sistemov, ki pravočasno opozorijo posadko na nevarnosti. Kot primerna rešitev se v ta namen lahko uporabljajo radarski sistemi. [1] Po uspešni uveljavitvi radarjev v milimetrskem frekvenčnem področju v avtomobilski industriji [2], postopnem prodiranju v telekomunikacije [3] in celo uporabo v satelitskih sistemih [4], je nastopil čas za njihovo uveljavitev tudi na drugih področjih, kot je na primer pomorstvo, ki je predmet tega prispevka.

Cenovno dostopen radarski sistem na čipu v milimetrskem frekvenčnem področju, ponuja možnosti načrtovanja in izdelave različnih sistemov, ki dvignejo varnost ladje in posadke na morju. [5] Z vse večjim razmahom razvoja avtonomnih plovil, postajajo radarski sistemi na čipu, ki se lahko integrirajo v bodoča avtonomna plovila, primerna rešitev tudi na tem področju.

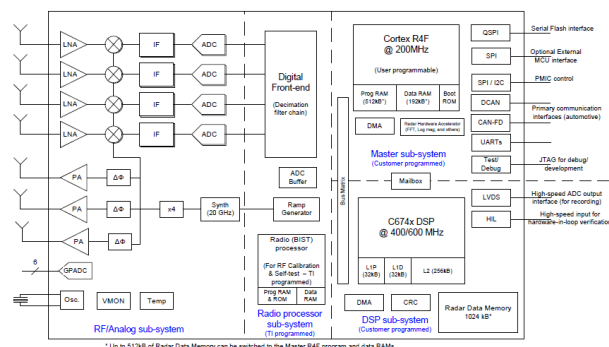
V prispevku je sprva predstavljeno delovanje radarja AWR 1843 in njegove lastnosti. Nato se članek osredotoča na uporabo na morju, pri čemer je opisan primer uporabe pri zaznavanju pojava parametrskega in ekstremnega nihanja ladje ter detekciji padca potnika v morje.

2 Delovanje radarja

AWR 1843 na čipu je integrirani radarski sistem z uporabo frekvenčno moduliranega kontinuiranega valovanja (angl. frequency-modulated continuous wave – FMCW), katerega blokovni načrt je prikazan na sliki 1. Deluje v območju od 77 do 81 GHz in ima 3 vzporedne oddajne (angl. transmitter – Tx) kanale, pri čemer ima vsak neodvisno kontrolo amplitude in faze signala. Na sprejemni strani ima 4 vzporedne sprejemne (angl. receiver – Rx) kanale s kompleksno (I,Q) arhitekturo, ki omogoča kalibracije, oziroma digitalno kompenzacijo nepravilnosti v radarju, katere so posledica nepopolne izdelave anten, umazanije na ohišju radarja, vpliva staranja komponent in podobno.

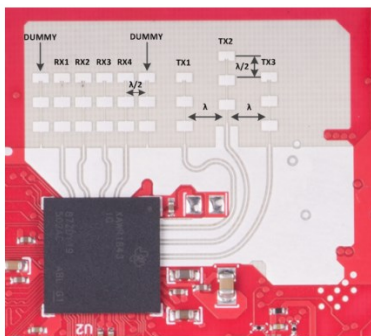
4Rx/3Tx arhitektura omogoča detekcijo objektov v dveh in treh dimenzijah. Radar pošilja položaj in hitrost zaznanih objektov prek serijskega vodila po obdelavi sprejetih signalov v signalnem procesorju (angl. digital signal processor – DSP).

Z direktnim prenosom po vzorčenju prek vodila LVDS (angl. low-voltage differential signaling) v DCA1000EVM zajemno kartico, je možna obdelava radarskih odmevov v računalniku. V programskem okolju Matlab je možno načrtovati in preveriti algoritme za specifično uporabo, ter jih namestiti v DSP-ju radarskega sistema.



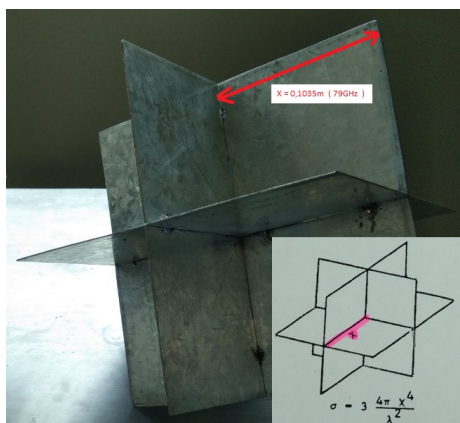
Slika 1. Blokovni načrt radarja AWR 1843

Premišljena arhitektura omogoča uporabo cenovno dostopnega radarja za številne različne aplikacije, kjer pripomore tudi njegova kompaktna zgradba prikazana na fotografiji slike 2.



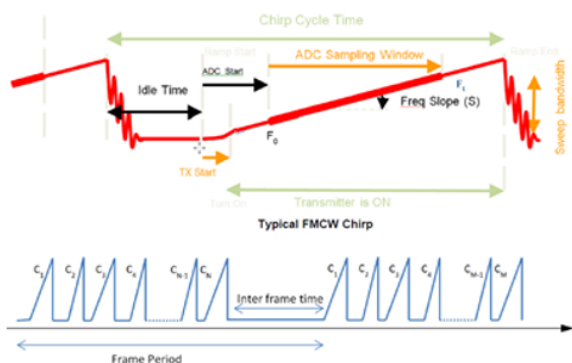
Slika 2. Fotografija radarja AWR 1843

Umerjanje radarja se izvede s postavitvijo radarskega cilja na znano lokacijo, običajno 1 m navpično od radarja. Za umerjanje in različne poskuse je bil izdelan kvadratni radarski reflektor, prikazan na sliki 3, z radarsko odmevno površino 300 m² na frekvenci 79 GHz.



Slika 3. Radarski reflektor

Radar oddaja okvirje, ki so sestavljeni iz niza kratkih frekvenčno linearnih moduliranih signalov (chirpov oziroma preletov) v obliki žage, kot je prikazano na sliki 4. Po mešanju radarskega odmeva z oddajnim signalom, se pridobi signal frekvenčne razlike (angl. beat signal), čigar frekvenca je odvisna od oddaljenosti objekta.



Slika 4. Časovni potek signala, ki ga oddaja radar

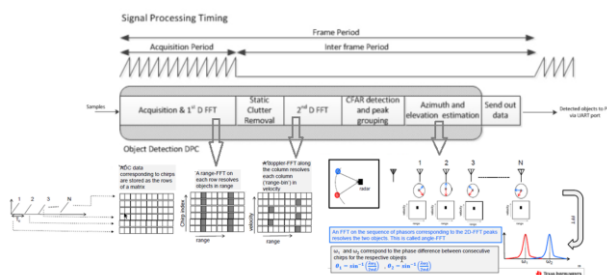
Z nastavitvijo parametrov žage, števila in lastnosti preletov v okvirju radar nastavljamo za specifične načine uporabe, ki zahtevajo različni maksimalni domet radarja, maksimalno hitrost objekta, prilagojen kot

vidnega polja, ter razločljivost vzdolž in prečno na trenutno os radarskega snopa. Postopek nastavljanja parametrov je vedno kompromis in je opisan v [6].

Procesiranje radarskega signala poteka v več fazah, kot je prikazano na sliki 5. Po zajemu in vzorčenju se zaporedoma v vrstice shranjujejo signali frekvenčnih razlik (angl. beat signal), oziroma mešalni produkt odbojev od tarč in oddajnega signala. S hitro Fourierjevo transformacijo (angl. fast Fourier transform – FFT) za vsako vrstico dobimo frekvenčni spekter mešalnega signala (angl. beat signal), ki pokaže odmeve objektov na skali, katera predstavlja maksimalni domet radarja. Število vrstic je enako številu preletov v radarskem okvirju. Če so objekti nepremični (statični), se spekter ne spreminja. Statično okolico radarja je mogoče tudi odšteti (angl. static clutter removal) in iskati zgolj spremembe med zaporednimi signali odmevov. S hitro Furijerjevo transformacijo nad vrsticami dobimo hitrost detektiranih objektov na isti skali maksimalnega dosega radarja.

Za tem sledi faza določanja praga detekcije (angl. Constant False Alarm Rate – CFAR), ter grupiranja objektov. Prag CFAR je funkcija tako verjetnosti zaznave kot tudi verjetnosti napačnega alarma.

Po shranjevanju zaporedja okvirja, dobimo radarsko spominsko kocko (angl. radar cube), iz katere se lahko določi smer odboja, ter z bolj zahtevno matematično obdelavo vzorcev v radarski kocki, lahko naredimo specifične aplikacije.



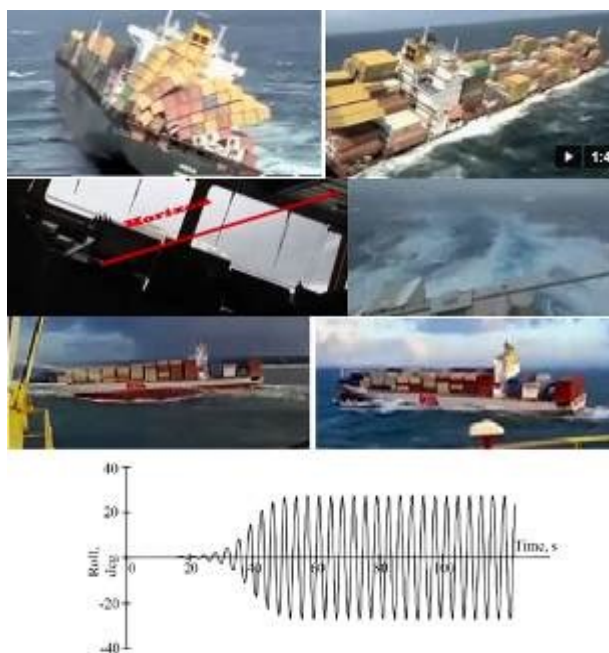
Slika 5. Procesiranje radarskega signala

3 Pojav parametrskega in ekstremnega nihanja ladij

Pojav parametrskega nihanje ladje, ki ga prikazuje slika 6, je več kot pol stoletja znan naravni pojav, ko ladja, ki ima določeno hitrost, zaradi energije valov iz smeri premca (sprednjega dela ladje) ali krme (zadnjega dela ladje), z zadostno višino in valovno dolžino od 0,8 do 1,2 dolžine ladij s periodo primerljivo dvakratni periodi nihanja ladje, začne nihati z zelo velikimi odkloni. Pri ladjah z ravnim trupom, kot so potniške ali kontejnerske ladje, zaradi izgube izpodrivnega volumna morja v zgoraj opisanih pogojih pride do delnega zmanjšanja potiska vode ter se energija vzbujanja naprej/nazaj (angl. pitch) parametrsko prenese oziroma sinhronizira v energijo nihanja levo/desno. Pojav se razvije v manj kot minuti časa, in če se ne spremeni vzbujanje, npr. ladja spremeni hitrost in/ali smer, lahko pride do ekstremnih odklonov, tudi za več kot 45°.

Preseganje maksimalnega nagiba opreme, v primeru srednje napetostnih generatorjev proizvajalca ABB je ta omejitev $\pm 25^\circ$ lahko povzroči izpad pogona (angl. blackout), izgubo tovara, ki potem predstavlja navigacijsko nevarnost, poškodbe posadke, poškodbe potnikov na potniških ladjah, in v primeru ekstremnega nihanja tudi obračanje ter potopitev ladje.

Ker je v pomorski skupnosti pojav premalo znan, so na žalost tovrstne nesreče pogoste. Leta 2010 M/S Brilliance of the Seas ob obali Aleksandrije doživi ekstremno nihanje. Pojav se razvije v manj kot minuti po spremembi smeri ladje, traja dve in pol minuti z nihanjem od 35° do 40° . Nihanje levo desno je bilo pospremljeno z zelo močnim nihanjem naprej/nazaj, kar kaže na pojav parametrskega vzbujanja. Pred pojavom ekstremnega nihanja, se je ladja nihala do 5° . Poškodovano je bilo 138 potnikov in 7 članov posadke, materialna škoda je znašala 1,7 milijona dolarjev.



Slika 6. Pojav parametrskega nihanja ladje

Sile, ki delujejo na trup ladje, so sestavljene iz sil propulzorjev, krmila in aktivnih plavuti (angl. stabilizers), sil vetra in valov ter reakcijskih sil zaradi ladijskih premikov.

Matematična razlaga dinamičnega obnašanja ladje v težkih okoliških razmerah je podana v [7]. Za majhne kote nihanja ladje velja linearna obravnava, ob večjih kotih nihanja pride do nelinearnih pojavov, kjer lahko reakcijske sile obrnejo ladjo.

Detekcija nastanka pojava parametrskega nihanja temelji na analizi dinamike gibanja ladje, kjer se uporabljajo vgrajeni dvo ali tri osni merilniki pospeška (angl. accelerometers).

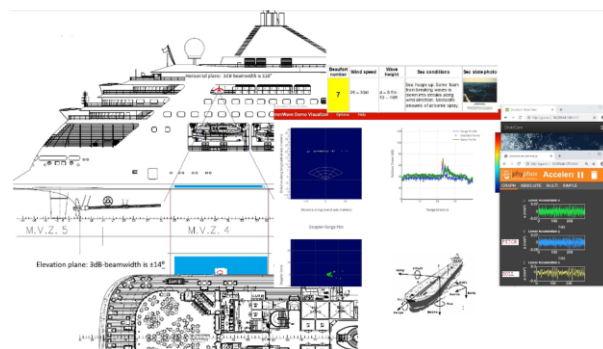
V komercialnem produktu PAROLL [8] se poleg detektorja sinhronizacije frekvence nihanja naprej/nazaj in levo/desno, uporablja detektor sinhronizacije faze obeh nihanj, ker se je izkazalo, da pojav parametrskega nihanja predhodno pospremi niz 5 do 6 močnih nihanj naprej/nazaj.

4 Detekcija parametrskega nihanja z radarjem

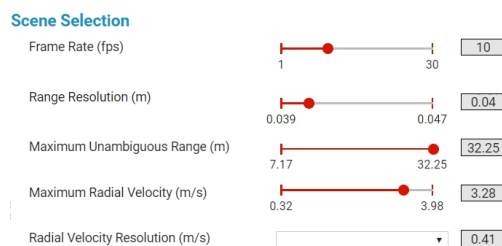
Za oceno stanja morja pred ladjo se lahko uporabljajo odboji od valovanja morja (angl. sea clutter), ki se običajno izvedejo s pomočjo navigacijskega radarja v frekvenčnem področju X. Radar podaja informacije, ki vsebujejo podatek o višini valov, dolžini valov, periodi valovanja in površinskih tokovih.

Izboljšavo detekcije parametrskega nihanja dobimo z opazovanjem, oziroma meritvijo oblike valov vzdolž trupa ladje.

Za namen testiranja uporabe radarja AWR 1843, ki deluje v milimetrskem frekvenčnem področju, je bila opravljena meritev valov na potniški ladji M/S Silveira Muse. Os radarja je bila usmerjena navpično v morsko površino z osmega nadstropja ladje, kot prikazuje slika 7. Za potrebe verifikacije se je dinamiko gibanja ladje spremljalo z uporabo triosnega merilnika pospeška na mobilnem telefonu in programa Phyphox [9] in še snemalo video valovanja. Na sliki 8 so prikazane 2D (2Tx/4Rx) nastavitve radarja za opazovanje valov z osmega nadstropja ladje. Na sliki 9 so prikazani rezultati meritev pet metrskih visokih in dolgih valov iz smeri premca (ang. sea swell). Iz grafa x,y,z pospeška se vidi nihanje naprej/nazaj, graf x (angl. pitch) predaja energijo v nihanje levo/desno, graf z (angl. roll).

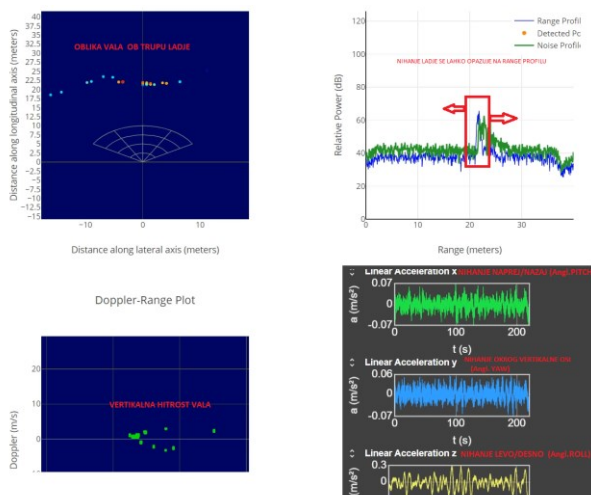


Slika 7. Prikaz namestitve radarja na ladjo



Slika 8. 2D (2Tx/4Rx) nastavitve radarja

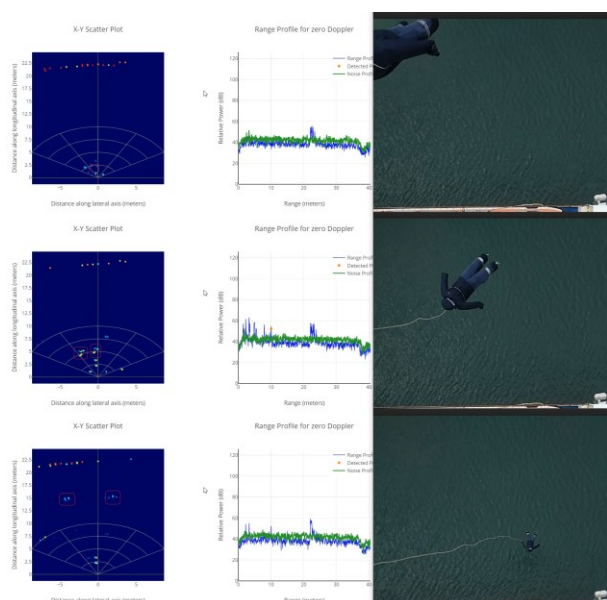
Iz radarskega odmeva od površine morja dobimo obliko, višino in periodo valov (slika 9). Z izvedbo enodimenzijskega (1D) FFT se pridobi graf profila področja (angl. range profile graph), kar omogoča meritev velikosti in oblike valov vzdolž trupa ladje in nihanja ladje levo desno. Z izvedbo dvo-dimenzijskega (2D) FFT se pridobi informacija o hitrosti objekta (angl. doppler range profile graph), kar omogoča spremljanje dinamike morskega valovanja.



Slika 9. Meritev 5 m visokih dolgih valov iz smeri premca

Poleg omenjene meritve oblike valov ob ladji lahko radar zazna tudi padec v morje, ki je pogost pojav na potniških ladjah. Na sliki 10 je pokazan padec lutke v morje in detekcija padca z radarjem. Po nekaj metrih postane opazen pojav dvojne tarče, ki nastane zaradi neumerjenega radarja.

Z uporabo drugega radarja postavljenega nižje v horizontalni smeri in s tri-dimenzionalnim snemanjem, lahko verjetnost detekcije padca v morje občutno povečamo. Dodatni drugi radar lahko uporabljamo tudi kot pomoč pri privezu ladje, kot alternativa ali dopolnitev laserskemu sistemu. [10] S pravilnim načrtovanjem obdelave podatkov v radarski kocki, lahko še dodatno izboljšamo verjetnost detekcije in zmanjšamo verjetnost napačnih detekcij (angl. false true), kar bo predmet nadaljnjega dela.



Slika 10. Meritev padca v morje (angl. man over board)

5 Zaključek

V članku je opisano testiranje radarja na frekvenčnem področju milimetrskih valovih v pomorstvu. Prikazan je primer uporabe detekcije parametrskega in ekstremnega nihanja ladij vključno s detekcijo padca potnika v morje. Uporaba cenovno dostopnega radarja se je izkazala kot zelo primerna in fleksibilna rešitev, ki ponuja možnosti prilagajanja in reševanja nekaterih problemov v pomorstvu.

Literatura

- [1] Yury Yu. Yurovsky, Vladimir N. Kudryavtsev, Semyon A. Grodsky, Bertrand Chapron, »Sea Surface Ka-Band Doppler Measurements: Analysis and Model Development«, Remote Sensing 11(7):839, april 2019.
- [2] S. Clark and H. Durrant-Whyte, "Autonomous land vehicle navigation using millimeter wave radar," Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146), Leuven, Belgium, 1998, pp. 3697-3702 vol.4, doi: 10.1109/ROBOT.1998.681411.
- [3] Shao-Qiu Xiao, Ming-Tuo Zhou, Yan Zhang, »Millimeter wave technology in wireless Pan, Lan, and Man«, CRC Press, 2008.
- [4] T. Wen, Z. G. Yao, Z. L. Zhao, L. F. Lin, Z. G. Han and L. D. Guo, "Retrieval of Sea Surface Wind Speed Using Spaceborne Millimeter-Wave Radar Measurements," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 15, no. 12, pp. 1807-1811, Dec. 2018, doi: 10.1109/LGRS.2018.2865196.
- [5] Mladen Radovanović, Boštjan Batagelj, »Single-chip mmW Radar for Marine and Industrial Applications«, seminar radijskih komunikacije 2020 (SRK 2020), Ljubljana, februar 2020.
- [6] Programming Chirp Parameters in TI Radar Devices, Texas Instruments Application Report, maj 2017, dostopno na: <https://www.ti.com/lit/an/swra553a/swra553a.pdf>
- [7] R. A. Ibrahim, I. M. Grace, »Modeling of Ship Roll Dynamics and Its Coupling with Heave and Pitch«, Mathematical Problems in Engineering, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 934714, 2010.
- [8] Roberto Galeazzi, »Real-time Detection of Parametric Roll: Full-scale Validation«, CeSOS Highlights and AMOSVisions Conference, Trondheim, 27-29 May 2013.
- [9] phyphox.org
- [10] M. Perkovič, L. Gucma, M. Bilewski, B. Muczynski, F. Dimc, B. Luin, P. Vidmar, V. Lorenčič, M. Batista, »Laser-Based Aid Systems for Berthing and Docking«. J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 346.