

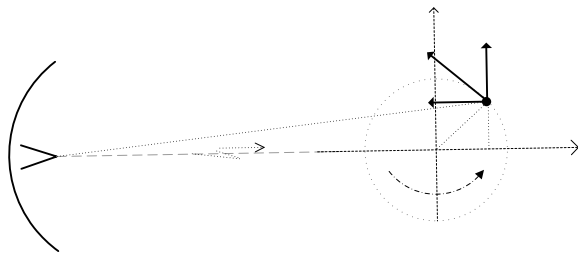
PRIMJENA ADAPTIVNOG S-METODA NA ISAR SIGNALIMA

Ljubiša Stanković, Predrag Raković, Miloš Daković, *Elektrotehnički fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore*
 Thayananthan Tayaparan, *Defence R&D Canada, Ottawa*

Sadržaj – Predstavljena je primjena jedne od vremensko-frekvencijskog metoda nad radarskim signalima dobijenih ISAR metodom. Rezultati primjene adaptivnog S-Metoda nad radarskim signalima dobijenih ISAR metodom su analizirani u ovom radu.

1. UVOD

Radar emituje elektromagnetni signal ka objektu, signal se reflektuje od objekta i radar prima reflektovani signal. Reflektovani signal, u odnosu na emitovani signal, ima vremensko kašnjenje, promijenu u amplitudi, kao i frekvencijski pomjeraj. Ovi parametri primljenog signala sadrže informaciju o karakteristikama objekta, tj. u parametru vremenskog kašnjenja signala sadržana je informacija o udaljenosti objekta od radara, dok se brzina objekta može odrediti iz parametra o frekvencijskom pomjeraju. ISAR (Invers synthetic aperture radar) je metod za dobijanje slike objekta visoke rezolucije u zavisnosti od promjene ugla otvora koji obrazuju objekat i fiksni radar. Rotacija, koja je nastala usled promjene ovog ugla uvodi dodatnu brzinu proporcionalnu ugaonoj brzini i udaljenosti od centra rotacije. Komponenta brzine u pravcu linije radar-objekat je proporcionalna normalnoj udaljenosti tačke od centra rotacije. Na osnovu brzine i udaljenosti određuje se položaj tačke na objektu u range/cross-range domenu. Kako su podaci o range i cross-range sadržani u dvodimenzionoj sinusoidi sa odgovarajućim frekvencijama, često korištena tehnika u analizi ISAR signala jeste dvodimenziona Fourier-ova transformacija. Primjena Fourier-ove transformacije nad ISAR signalima rezultira visoko koncentrisanom funkcijom u jednoj tački čiji položaj odgovara vrijednosti range-a i cross-range-a [1,2,3].



Slika1. ISAR metod

Da bi se dobila visoka koncentracija primjenom Fourier-ove transformacije potrebno je koristiti signale dužeg trajanja. Duži vremenski intervali uslovljavaju da vektor trenutne brzine pojedinih tačaka na objektu mijenja svoj pravac, stoga, i kada imamo konstantnu ugaonu brzinu za rezultat imamo promjenu projekcije vektora brzine. Ove promjene uslovljavaju promjenu odgovarajućih frekvencija, odnosno, raširenje Fourier-ove transformacije, tj. skrivanja informacije oko cross-range-a. Rotacija može imati promjenljivu ugaonu brzinu, što dodatno povećava distorziju radarske slike. Pored ovih distorzija radarske slike, kretanje

objekta može biti trodimenzionalno, pa za rezultat imamo veoma kompleksnu promjenu projekcije vektora brzine duž linije radar-objekat.

Primjenom vremensko-frekvencijske reprezentacije, tj. praćenjem spektralnog sadržaja u vremenu, umjesto primjene Fourier-ove transformacije, ove probleme je moguće prevazići [1,3]. Jedna od najviše korištenih reprezentacija, Wigner-ova distribucija, je predstavnik klase kvadratnih vremensko-frekvencijskih reprezentacija. Za razliku od Fourier-ove transformacije koja dobro koncentriše samo one signale koje imaju konstantnu frekvenciju, Wigner-ova distribucija u potpunosti koncentriše signale sa linearnom promjenom frekvencije. Nedostatak Wigner-ove distribucije je veoma izraženi efekat kros-članova ukoliko postoji više tačaka refleksije na istoj udaljenosti u ISAR analizi. Ovo je razlog zašto su uvedene distribucije klase RID (Reduced Interference Distribution) [4,5,6,7].

U ovom radu se predlaže korištenje adaptivnog S-Metoda umjesto Fourier-ove transformacije. S-Metod, kao i Wigner-ova distribucija, daje dobru koncentraciju signala sa linearno promjenljivom frekvencijom, dok su kros-članovi znatno smanjeni ili ih uopšte nema [8,9]. Numerička implementacija S-Metoda je veoma jednostavna jer zahtijeva nekoliko koraka više od standardne Fourier-ove transformacije.

2. MODEL ISAR SIGNALA

Za analitičku analizu poslati radarski signal se posmatra kao niz od M čirpova (parametri čirpa: T_r -trajanje, f_r -frekvencija ponavljanja, B -frekvencijski opseg) na radnoj frekvenciji radara ω_0 . Ako se objekat nalazi na udaljenosti d (range), primljeni signal u odnosu na poslati ima kašnjenje $t_d = 2d/c$, gdje je c brzina svjetlosti, i pomjeraj faze za $\phi = 2\omega_0 d/c$. Primljeni signal se množi sa konjugovano-kompleksnim poslatim signalom, pomjera se u vremenu za minimalno kašnjenje T_0 . Jedna komponenta ovakvog signala za isti indeks čirpa dobija se propuštanjem kroz filter niskih učestanosti, i ima oblik:

$$q(m,t) = \sigma e^{j\omega_0[\frac{2d(t)}{c}-T_0]} e^{-j\pi B f_r (2t-2mT_r)(\frac{2d(t)}{c}-T_0)} \quad (1)$$

Pozicija maksimuma u 2D Fourier-ovoj transformaciji signala $q(m,t)$ sadrži informaciju o frekvencijskom pomjeraju, Doppler efekat, i udaljenost (range) objekta od radara. Rezolucija Doppler-ovog pomjeraja je $R_{Dopp} = 2\pi / MT_r$, a rezolucija range-a je $R_{range} = c/2B$, a rezolucija cross-range-a je data $R_{cross-range} = \pi c / \omega_0 MT_r \omega_R$.

ISAR je metod za dobijanje slike objekta visoke rezolucije u zavisnosti od promjene ugla otvora koji obrazuju objekat i fiksni radar. Prikaz objekta i veličina koje se koriste u ovom radu dat je slici 1. Ako pretpostavimo P tačaka na

objektu onda su koordinate njihovog položaja date sa (x_p, y_p) , za $p = 1, 2, \dots, P$, u koordinatnom sistemu čiji je centar vezan za centar rotacije objekta. Koordinata u pravcu linije radar-objekat je označena sa x_p (range koordinata), a koordinata normalna na nju je y_p (cross-range koordinata). Ukupno kretanje objekta se može posmatrati kao superpozicija translacije i rotacije. U nekom vremenskom intervalu t tačke rotiraju ugaonom brzinom $\theta_R(t) = \omega_R t$. Novi položaji tačaka u zavisnosti od rotacije se daju sa:

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_R(t)) & \sin(\theta_R(t)) \\ -\sin(\theta_R(t)) & \cos(\theta_R(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ukupna udaljenost tačke na objektu u odnosu na radar, za malo $\theta_R(t) \rightarrow 0$, je:

$$\begin{aligned} d(t) &= \sqrt{(R + x'_p)^2 + (y'_p)^2} \cong R + x'_p \\ &= R + x_p(t) \cos(\theta_R(t)) + y_p(t) \sin(\theta_R(t)) \\ &\cong R + x_p \end{aligned} \quad (3)$$

Dakle, parametar $d(t)$ sadrži informaciju o koordinati x_p . Doplerova frekvencija se dobija iz:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_d &= \frac{d}{dt} \phi(t) \cong \frac{2\omega_0}{c} \frac{d}{dt} [d(t)] \\ &= \frac{2\omega_0}{c} \frac{d}{dt} [R + x_p(t) \cos(\theta_R(t)) + y_p(t) \sin(\theta_R(t))] \end{aligned} \quad (4)$$

i zamjenom $\theta_R(t) \rightarrow 0$, tj. $\cos(\theta_R(t)) \rightarrow 1, \sin(\theta_R(t)) \rightarrow \theta_R(t)$ i $d(t) \cong R + x_p + y_p \omega_R t$ u (4) dobija se:

$$\Delta\omega_d = \frac{2\omega_0}{c} y_p \omega_R \sim y_p \quad (5)$$

Kako 2D Fourier-ova transformacija $q(m, t)$ signala nalazi na frekvenciji m , tj. Doppler-ovoj frekvenciji $\Delta\omega_d$, iz (5) slijedi da je u ISAR analizi proporcionalno koordinati y_p . Dakle, 2D Fourier-ova transformacija $q(m, t)$ signala se može predstaviti kao 2D slika reflektujućih tačaka u (x_p, y_p) koordinatnom sistemu (range, cross-range koordinatni sistem).

3. FOURIER-OVA TRANSFORMACIJA I S-METOD U ISAR

Dvodimenziona (2D) Fourier-ova transformacija [10] primljenog signala data je sa:

$$Q(m', n') = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} q(m, n) e^{-j[2\pi m' / N + 2\pi n' / N]} \quad (6)$$

a periodogram $P(y, x) = |Q(y, x)|^2$ predstavlja ISAR sliku. Da bi analizirali samo nestacionarnosti cross-range-a u Fourier-ovoj transformaciji, posmatraćemo komponentu primljenog signala u kojoj se manifestuje Doppler-ov efekat (kako se to često radi u ISAR literaturi), i data je:

$$e_p(t) = \sigma e(j \frac{2\omega_0}{c} d_p(t)) \quad (7)$$

a Fourier-ova transformacija $e_p(t)$ je:

$$E_p(\omega) = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} e_p(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} w(t) e_p(t) e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

gdje je $w(t)$ prozor koji definiše posmatrani vremenski interval. Radarske slike dobijene na ovaj način su često mutne usled povećavanja posmatranog vremenskog intervala i/ili neuniformnog kretanja objekta. Poboljšanje čitljivosti ovako dobijenih slika postiže se ako se umjesto Fourier-ove transformacije (periodograma), koristi S-metod [8] definisan:

$$SM_p(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta) E_p(\omega + \theta) E_p^*(\omega - \theta) d\theta \quad (9)$$

gdje je $P(\theta)$ prozor u frekventnom domenu konačne širine (često se podrazumijeva da je pravougaoni) i $P(\theta) = 0$ za $|\theta| > L_p$. Diskretna verzija (9) je data sa:

$$\begin{aligned} SM_p &= \sum_{-L_p}^{L_p} E_p(k+i) E_p^*(k-i) \\ &= |E_p(k)|^2 + 2\text{real}\left\{ \sum_{i=1}^{L_p} E_p(k+i) E_p^*(k-i) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

Prvi član zbira $|E_p(k)|^2$ je periodogram, dok se drugi član zbira $2\text{real}\{E_p(k+i)E_p^*(k-i)\}$, za $i=1, 2, \dots$, koristi za popravljavanje koncentracije periodograma u slučaju vremenski promjenljivog Doppler efekta, i samo nekoliko članova je dovoljno da bi se postigla visoka rezolucija.

S-metod se može realizovati i u rekurzivnoj formi:

$$SM_{p, L_p}(k) = \sum_{i=-L_p}^{L_p} E_p(k+i) E_p^*(k-i) \quad (11)$$

slijedi,

$$SM_{p, L_p}(k) = SM_{p, L_p-1}(k) + 2\text{real}\{E_p(k+L_p)E_p^*(k-L_p)\} \quad (12)$$

gdje je $SM_{p,0}(k) = |E_p(k)|^2$, standardna Fourier-ova transformacija.

Stoga, primjenom S-metoda, i nekoliko jednostavnih matičnih manipulacija u skladu sa (12), na već postojeću radarsku sliku dobijamo poboljšanje iste.

Ukoliko L_p , tj. širina prozora, nije konstantna vrijednost dolazimo do formulacije adaptivnog S-metoda [12], odnosno sumiranje u članu $\sum_{i=1}^{L_p} E_p(k+i)E_p^*(k-i)$ traje sve dok se ne detektuje nulta vrijednost za neki od članova ispod sume. Praktično to znači da kvadratni korjen apsolutne vrijednosti nekog od članova ispod sume je manji od referentnog nivoa R^2 . Referentni nivo se definiše kao $R^2_n = \max_k \{|E_p(k)|^2 / Q^2\}$.

Uvrštavanjem $E_p(\omega)$ iz (8) u (9) dobijamo:

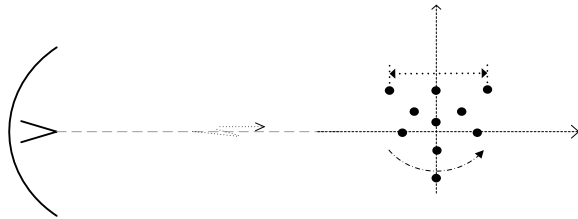
$$SM_p(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(t_1)w^*(t_2)e^{j\frac{2\omega_0}{c}d(t_1)}e^{-j\frac{2\omega_0}{c}d(t_2)} \times e^{-j(\omega+\theta)t_1}e^{j(\omega-\theta)t_2}dt_1dt_2d\theta \quad (13)$$

integraljenjem po θ i po t_1 prethodna jednačina se svodi na:

$$SM_p(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t)w^*(-t)e^{j\frac{2\omega_0}{c}d(t)}e^{-j\frac{2\omega_0}{c}d(-t)}e^{-j2\omega t}dt \quad (14)$$

4. PRIMER

Simulacija opisanog metoda je izvršena na ISAR radarskim signalima sa dvodimenzionim kretanjem [13]. Parametri korišteni za simulaciju ISAR radarskog sistema visoke rezolucije su: radna frekvencija radara $f_0 = 10.1$ GHz, frekventni opseg čirpa $B = 300$ MHz, frekvencija ponavljanja čirpa $f_r = 1/T_r = 2$ kHz sa 2048 čirpova u jednom radarskom snopu. Udaljenost objekta od radara je 2 km i brzina rotiranja je $\omega_R = 4^\circ/\text{sec}$. Ukupna rotacija objekta se dobija superponiranjem nelinearne rotacije frekvencije $\Omega = 0.5$ Hz, i $A = 1.25^\circ/\text{sec}$, na brzinu rotiranja ω_R i iznosi $\omega_R(t) = \omega_R + A\sin(2\pi\Omega t)$. Rezolucija range-a je $R_{\text{range}} = c/2B = 0.5$ m, a $R_{\text{cross-range}} = \pi c/\omega_0 MT_r \omega_R = 0.106$ m je rezolucija cross-range-a. Model signala se sastoji od deset reflektujućih tačaka na objektu koje u $t=0$ imaju koordinate $(x_1, y_1) = (-2.5, 1.44)$, $(x_2, y_2) = (0, 1.44)$, $(x_3, y_3) = (2.5, 1.44)$, $(x_4, y_4) = (1.25, 0.72)$, $(x_5, y_5) = (-1.25, 0.72)$, $(x_6, y_6) = (0, 2.89)$, $(x_7, y_7) = (0, 0.2)$, $(x_8, y_8) = (0, -1)$, $(x_9, y_9) = (-1.5, 0.7)$, $(x_{10}, y_{10}) = (1.5, 0.7)$. Sve koordinate su date u metrima.



Slika 2. Ilustracija postavka simulacije

Model signala koji odgovara jednom od deset rotirajućih dijelova se dobija:

$$d_p(t) = R + x_p \cos(\theta_R(t)) + y_p \sin(\theta_R(t)) \quad (15)$$

gdje je $d_p(t)$ položaj rotirajućeg dijela u odnosu na radar, a poslije kompenzacije distance:

$$d_p(t) = x_p \cos(\theta_R(t)) + y_p \sin(\theta_R(t)) \quad (16)$$

a Doppler-ova frekvencija je:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_d &\cong \frac{2\omega_0}{c} [d_p(t)] \\ &= \frac{2\omega_0}{c} (-x_p \theta'_R(t) \sin(\theta_R(t)) + y_p \theta'_R(t) \cos(\theta_R(t))) \end{aligned} \quad (17)$$

gdje su x_p i y_p horizontalna i vertikalna udaljenost od centra rotacije, kao što je dato na slici 1., $\Delta\omega_d$ je Doppler-ova frekvencija, a $\theta'_R(t)$ i $\theta_R(t)$ su dati kao:

$$\begin{aligned} \theta'_R &= \omega_R(t) = \omega_R + A\sin(2\pi\Omega t) \\ \theta_R &= \omega_R t - A/2\pi\Omega \cos(2\pi\Omega t) + \phi_0 \end{aligned} \quad (18)$$

zamijenom $d_p(t)$ iz (17) u (1), uzimajući da je $T_0 = 0$ i ako se zanemari konstantni dio faze, dobijamo signal u formi:

$$q_p(m, n) = \sigma_p e^{j\omega_0 \frac{2d_p(nT_s + mT_r)}{c}} e^{-j\pi B f_r n T_s \frac{2d_p(nT_s + mT_r)}{c}} \quad (19)$$

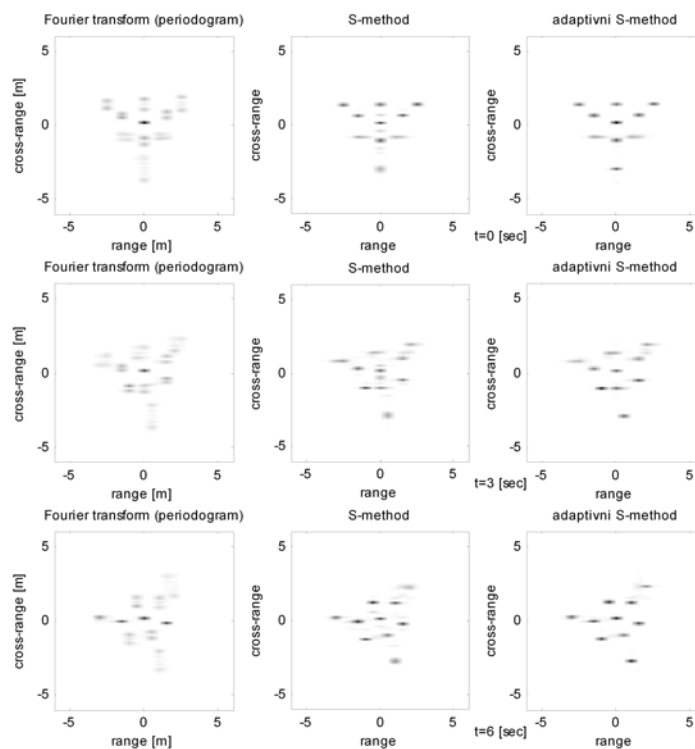
gdje je T_s perioda odabiranja signala. Najbolja rezolucija slike primjenom S-metoda dobija se za širinu prozora $L_p = 4$, a primjenom adaptivnog S-metoda $Q = 8$ daje najbolje rezultate (eksperimentalni rezultati). Rezultati poređenja Periodograma (lijevo), S-metoda-a (sredina) i adaptivnog S-metoda (desno) u vremenskim trenucima $t = 0, t = 3, t = 6$ su prikazani na slici 3. Koordinate (x_p, y_p) su proporcionalne rastojanju objekta od radara (range), i Doppler-ovoj frekvenciji (cross-range), respektivno. Sa slike 3. se uočava da periodogram (lijeva kolona na slici) ne fokusira reflektujuće tačke, pa se ne može tačno odrediti ni položaj objekta, a ni Doppler-ovu frekvenciju, a za S-metod (srednja kolona na slici) daje bolje fokusiranje tačaka ali se uočavaju jaki kros članovi koji mogu dovesti da prilikom određivanja Doppler-ove frekvencije i udaljenosti objekta dobijemo pogrešne vrijednosti. Povećavanjem vrijednosti za L_p dobija se poboljšanje fokusiranja tačaka ali i do pojave jakih kros-članova. Adaptivni S-metod (desna strana slike 3) daje slike na kojima nema kros članova ili su u velikoj mjeri smanjeni u odnosu na slike dobijene S-metodom kao i bolje fokusiranje tačaka. Samim tim određivanje tačnih vrijednosti za Doppler-ovu frekvenciju i položaj objekta je sa mnogo većom preciznošću.

5. ZAKLJUČAK

Primjenom vremensko-frekvencijskih metoda mogu se prevazići problemi koji se primjenom 2D Fourier-ove transformacije u ISAR analizi radarskih signala ne mogu otkloniti. Primjenom adaptivnog S-metoda, kao jedne vremensko-frekvencijske metode iz klase RID, dobijamo povećavanje koncentracije radarske slike, a samim tim i bolje određivanje parametara sa slike (Doppler-ove frekvencije i udaljenost objekta od radara)

LITERATURA

- [1] Y. Wang, H. Ling, V.C. Chen, "ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency techniques", *IEEE Trans. Aerospace and electronics Systems*, Vol. 43, No.2, April 1988.



Slika 5. Radarska slika u range/cross-range domenu: Periodigram (lijevo), S-metod (sredina), adaptivni S-metod (desno) u posmatranim trenucima vremena $t=0$, $t=3$, $t=6$.

- [2] S. Wong, E. Riseborough, G. Duff, "Experimental investigation on the distortion of ISAR images using different radar waveform", *Defence R&D Canada, Ottawa, Technical memorandum DRDC Ottawa*, TM 2003-196, Sept. 2003.
- [3] T. Thayaparan, G. Lampropoulos, S.K. Wong, E. Riseborough, "Application of adaptive joint time-frequency algorithm for focusing distorted ISAR images from simulated and measured radar data", *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, Vol50, No.4, Aug. 2003.
- [4] L. Cohen, "Time-Frequency analysis", Prantice-Hall Inc., NewYork, USA, 1995
- [5] T. Thayaparan and S. Kennedy, "Detection of a manouvering air targetr in a sea-clutter using joint time-frequency analysis techiques", *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, Vol51, No.1, Feb. 2004, pp.19-30.
- [6] V.C. Chen and H. Ling, "Time-Frequency transforms for radar imaging and sygnal analysis", Artech House, Boston, MA, USA, 2002.
- [7] S. Qian, D. Chen, "Joint time-frequency analysis : methods and aplicatin", Prantice-Hall Inc., NewYork, USA, 1996.
- [8] LJ. Stanković, "A method for time-frequency analysis", *IEEE Trans.SP*, vol.42, Jan. 1994, pp.225-229.
- [9] LJ.Stanković, "The auto-term representation by the reduced interference distribution: The procedure for a kernel design ", *IEEE Trans.on Signal Processing*, vol.44, no.6, June 1996, pp.1557-1564.
- [10] A. Papoulis, "Probability, random variables, and stochastic processes ", McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [11] LJ.Stanković, "The auto-term representation by the reduced interference distribution: The procedure for a kernel design ", *IEEE Trans.on Signal Processing*, vol.44, no.6, June 1996, pp.1557-1564.
- [12] LJ. Stanković, " Time-Frequency Signal Analysis ", Research Monograph 1993-2003, 2004.
- [13] V.C. Chen, W.J. Miceli, " Simulation of ISAR imaging of moving terget ", *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol 148, No. 3, June 2001, pp.160-166.

Abstract – Radar signals obtained by ISAR method can be analized by use of time-frequency methods. Results of implementing S-method on ISAR radar signals are presented in the document.

IMPLEMENTATION OF SIGNAL DEPENDENT S-METHOD ON ISAR SIGNALS

Ljubiša Stanković, Predrag Raković, Miloš Daković,
Thayananthan Tayaparan