

تخمین خطای ناشی از لرزش سکو در رادار دهانه ترکیبی SAR با استفاده از روش تجزیه‌ی حالت تجربی

نسرین نیکوتدبیر^۱، سید علیرضا سیدین^۲ و علی نیکوتدبیر^۳

^۱ کارشناسی ارشد مخابرات سیستم، دانشگاه فردوسی مشهد ، n_nikootadbir@mail.um.ac.ir

^۲ دانشیار، گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد ، seyedin@um.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس ، alinikoutadbir@gmail.com

یکی از مشکلات تصویربرداری در رادار دهانه ترکیبی (SAR) لرزش‌های سکو است. اگر لرزش سکو را با یک سینوس مدل کنیم، خطای فاز باعث ایجاد یک سیگنال مدولاسیون سینوسی می‌گردد که می‌توان پارامترهای لرزش را در آن تقریب زد؛ از طرفی لرزش سکو را دقیقاً نمی‌توان با یک سینوس تقریب زد زیرا در عمل لرزش سکو به صورت یک هارمونی منظم نیست اما می‌توان آن را با جمع چند سینوس تقریب زد. برای اینکه بتوان تأثیر این سینوس‌ها را در فاز از هم تفکیک کرد، از روش تجزیه‌ی حالت تجربی دوتایی (BEMD) استفاده شده است. تجزیه‌ی حالت تجربی دوتایی سیگنال را به سیگنال‌هایی از چرخش سریع تا آهسته تجزیه می‌کند، به این سیگنال‌های قابل آنالیز، تابع حالت ذاتی (IMF) گفته می‌شود. با تحلیل هر کدام می‌توان فرکانس‌های لرزش سکو را تخمین زد. مزیت این روش نسبت به روش‌هایی که از مدل درجه دوم استفاده می‌شود کاهش محاسبات در نتیجه‌ی کاهش زیربخش‌ها به خصوص در لرزش‌های منظم و متناوب است. و مزیت آن نسبت به مواردی که از مدل سینوسی استفاده شده قابلیت تخمین چند فرکانس سینوس است.

کلیدواژه- جبرانسازی لرزش سکو، رادار دهانه ترکیبی، BEMD، EMD.

روش‌های متداول جبرانسازی حرکت می‌تواند استفاده شود اما لرزش سکو باعث می‌شود دقت اندازه‌گیری‌های رادار کاهش پیدا کند. نیاز به دقیق بودن مسیر حرکت در رادارهای SAR مدرن معمولاً بسیار بالا است [1].

خطای فاز ناشی از لرزش سکو به دو روش پارامتری و غیر پارامتری تعیین می‌شود. روش غیر پارامتری به طور مستقیم خطای فاز را بدون در نظر گرفتن هیچ مدلی برای آن اصلاح می‌کنند. الگوریتم گرادیان فاز^۲ (PGA) که مشتق (گرادیان) اول خطای فاز را تخمین

۱- مقدمه

حرکت سکو باعث افزایش چشمگیر رزولوشن رادارهای دهانه ترکیبی^۱ (SAR) می‌شود. این حرکت ممکن است با لرزش‌هایی همراه شود که این لرزش‌ها باعث بهم‌ریختگی و خراب شدن تصویر می‌شود.

کیفیت تصاویر SAR به دقت اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بستگی دارد. اگر هواپیما مسیر مستقیم را بدون لرزش و دقیق طی کند،

² Phase gradient autofocus

¹ Synthetic aperture radar

متغیره [13] ترکیب بازسازی تنک و معیار کمترین آنتروپی [14] از روش های مطرح شده اخیر هستند.

از دیگر زمینه های جبران سازی لرزش سکو که در سال های اخیر کار شده، رادارهای دهانه مصنوعی SAR در باند تراهرتز است که لرزش سکو حتی به میزان کم در آن قابل چشم پوشی نیست [15,16]. رادارهای با زاویه ی لوچی بالا نیز از دیگر مواردی است که لرزش سکو در آن مورد مطالعه قرار گرفته است [17,18].

روش تجزیه ی حالت تجربی^۶ (EMD) در سال ۱۹۹۶ برای سیگنال های غیرخطی و غیر ایستا بیان شد [19]. در این روش سیگنال های حقیقی غیرخطی و غیر ایستا به چند سیگنال تابع حالت ذاتی^۷ (IMF) تجزیه می شود و ویژگی های زمان-فرکانس در IMF ها با تبدیل هیلبرت به خوبی بیان می شود. روش EMD بر روی مقادیر حقیقی اجرا می شود و برای داده هایی در فضای دوبعدی (مقادیر مختلط)، چند الگوریتم توسعه یافته ی آن پیشنهاد شده است که از جمله ی آن ها روش تجزیه ی حالت تجربی کامل^۸ [20] و تجزیه ی حالت تجربی دوتایی^۹ (BEMD) [21] است.

در ادامه در بخش مدولاسیون لرزش سکو به روابط تصویرسازی رادار SAR با الگوریتم برد-داپلر^{۱۰} (RDA) می پردازیم و تأثیر لرزش سکو بر این روابط بررسی می کنیم. در بخش بعدی روش تجزیه حالت تجربی و روش های متکامل تر بعدی آن در تجزیه ی سیگنال های کامل در رادار دهانه مصنوعی معکوس^{۱۱} بررسی می شود در دو بخش پایانی روش پیشنهادی برای حذف اثرات لرزش سینوسی سکو با استفاده از الگوریتم BEMD بیان می شود و نتایج شبیه سازی آن بررسی می گردد.

می زند، روشی غیر پارامتری است [2]. در روش غیر پارامتری برای خطای فاز از مدل مشخصی استفاده نمی شود. نقطه ضعف این روش حساس بودن کیفیت تصویر به انتخاب پراکنده ساز غالب، طول پنجره و زمان های تکرار است [3].

در ادامه به بررسی چند روش پارامتری می پردازیم. روش تمرکز خودکار جابجایی صحنه^۳ که روشی پارامتری است، مدل خطای فاز را تابع درجه ی دوم در نظر می گیرد. سپس پارامترهای تابع درجه دوم از جمله شتاب و سرعت را تخمین می زند [4,5].

روش PGA برای حالت نواری و به صورت پارامتری در [6] تعمیم داده شده است. در [7] پارامترهای خطای فاز به وسیله ی مینیمم کردن آنتروپی و با توجه به فاکتور تأثیر بر کیفیت تصویر، استخراج می شود این روش تمرکز خودکار مینیمم آنتروپی^۴ نامیده می شود. این الگوریتم بهینه ترین روش جبران سازی حرکت بر معیار بهبود تفاوت تصویر است. در [8] پارامترهای لرزش سکو با کمک تقریب چبیشف^۵ و بر مبنای معیار مینیمم آنتروپی تخمین زده می شود. در [9] الگوریتمی با توجه به روش تمرکز خودکار مینیمم آنتروپی معرفی شده است که خطای فاز با توجه به سیگنال بازگشتی از تمام دهانه تخمین زده می شود. باید خاطر نشان کرد که این روش در صورتی که لرزش سکو شامل حرکت پیچیده ای بشود، به تکرارهای بیشتری نیاز دارد. در [10] از مدلی غیر از مدل منظم درجه دوم برای مدل سازی خطا استفاده کرده اند. با این وجود محاسبات سنگین این روش، برای صحنه هایی که رزولوشن آن ها بالاست چندان مناسب نباشد.

در [11] یک روش جبران سازی حرکت برای رادار SAR بر پایه ی نمایش تنک پارامتری را توسعه می دهد. استفاده از فیلتر کالمن برای بهبود روش PGA در رادارهای نواری [12]، استفاده از یادگیری چند

⁷ Intrinsic mode function

⁸ Complex Empirical mode decomposition

⁹ Bivariate Empirical mode decomposition

¹⁰ Range Doppler Algorithm

¹¹ Inverse Synthetic aperture radar

³ Mapdrift autofocus

⁴ Minimum-entropy autofocus

⁵ chebyshev approximation

⁶ Empirical mode decomposition

۲- مدولاسیون لرزش سکو

$$s(\tau, t_m, R_0) = A \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \pi f_{dr} t_m^2 - \frac{4\pi H \cdot \Delta R(t_m)}{\lambda R_0} \right] \right\} \quad (3)$$

که اندازه‌ی A به صورت $A = \sigma \text{sinc} \left[\pi B \left(\tau - \frac{2R(t_m)}{c} \right) \right]$ تعریف شده است و $f_{dr} = -(2V^2/\lambda R_0)$ نرخ مدولاسیون فرکانس داپلر را بیان می‌کند [17].

همانطور که در مقدمه بیان شد ما لرزش سکو را با مدل سینوسی تقریب می‌زنیم. بنابراین مقدار تغییر ارتفاع را به صورت زیر داریم

$$\Delta R_v(t) = a_v \sin(2\pi f_v t) \quad (4)$$

هنگامی که a_v اندازه‌ی لرزش و f_v فرکانس لرزش است. با ترکیب دو معادله‌ی (۳) و (۴) و ضرب سیگنال در $\exp \left\{ j \left[\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \pi f_{dr} t_m^2 \right] \right\}$ یک سیگنال مدولاسیون فرکانسی سینوسی (SFM) به صورت زیر بدست می‌آید.

با پردازش معادله‌ی (۵) در مراحل بعد می‌توانیم اطلاعات مربوط به لرزش سکو را استخراج کنیم، همچنین مشاهده می‌شود که خطای فاز به فرکانس کاری رادار λ نیز وابسته شده است بنابراین در رادارهای با فرکانس بالا لرزش‌های کوچک سکو خطاهای بزرگی ایجاد می‌کند [15].

۳- تخمین لرزش سکو با استفاده از الگوریتم BEMD

در این فصل ابتدا توضیح روش تجزیه‌ی حالت تجربی و تجزیه‌ی حالت تجربی دوتایی داده می‌شود، سپس به بیان پژوهشی که با کمک روش تجزیه‌ی حالت تجربی، مشکل اهداف چرخشی را در رادار دهانه مصنوعی معکوس حل می‌کند، پرداخته می‌شود. در فصل بعد با کمک این روش تجزیه، الگوریتمی برای تخمین پارامترهای لرزش سکو پیشنهاد می‌شود.

۳-۱- روش تجزیه‌ی حالت تجربی

تجزیه‌ی حالت تجربی یک سیگنال را به چند سیگنال تابع حالت ذاتی تجزیه می‌کند. توابع حالت ذاتی به گونه‌ای تعریف می‌شوند که دارای فرکانس لحظه‌ای تقریباً ثابت هستند و مشخصات زمان-فرکانس آن‌ها با استفاده از تبدیل هیلبرت به خوبی به دست می‌آید. نام IMF به خاطر تجسم حالت نوسان در داده انتخاب شده است.

IMF تابعی است که دو شرط زیر را برآورده می‌کند:

۱. تعداد اکسترمم‌های نسبی و گذر از صفرهای آن باید برابر یا اختلاف آن‌ها یک باشد.

۲. میانگین پوشی که برای ماکزیمم‌های محلی و پوشی که برای

رادارهای SAR خطی، روی سکو به صورت خط مستقیم در حال حرکت هستند. حرکت سکو باعث افزایش چشمگیر رزولوشن رادارهای SAR می‌شود. در این فصل چگونگی تصویرسازی با کمک الگوریتم برد-داپلر (RDA) در رادار SAR بررسی و روابط ریاضی آن بیان می‌شود. سپس با در نظر گرفتن لرزش سکو روابط بازنویسی و خطای فاز حاصل از لرزش سکو نشان داده می‌شود.

هندسه‌ی تصویرسازی رادار SAR در شکل ۱ نشان داده شده

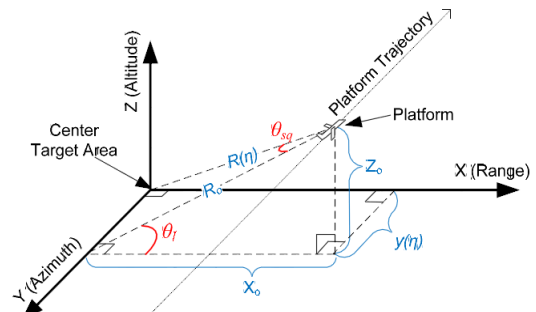
$$s(\tau, t_m, R_0) = A \exp \left\{ j \left[\frac{4\pi H \cdot a_v \sin(2\pi f_v t)}{\lambda R_0} \right] \right\} \quad (5)$$

است. سکوی رادار در مختصات $(0, y(t_m), H)$ یعنی در طول محور Y با سرعت V و ارتفاع H حرکت می‌کند. یک پراکنده ساز را در نقطه‌ی همانند $(x_0, 0, 0)$ نمونه در نظر می‌گیریم. فاصله‌ی بین سکوی رادار و پراکنده ساز در زمان t_m به صورت زیر بیان می‌شود.

$$R(t_m) = \{x_0^2 + y(t_m)^2 + [H - \Delta R(t_m)]^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\approx R_0 + \frac{V^2 t_m^2}{2R_0} - \frac{H \cdot \Delta R(t_m)}{R_0}$$

هنگامی که $R_0 = (x_0^2 + H^2)^{0.5}$ فاصله‌ی بین سکو و مرکز مختصات صحنه است.



شکل ۱: هندسه تصویربرداری رادار SAR سه بعدی [22]

الگوریتم برد-داپلر برای تصویرسازی SAR استفاده می‌شود. می‌دانیم که بعد از فشرده‌سازی برد، سیگنال به صورت زیر درمی‌آید.

$$s(\tau, t_m) = \sigma \text{sinc} \left[\pi B \left(\tau - \frac{2R(t_m)}{c} \right) \right] \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi R(t_m)}{\lambda} \right] \right\} \quad (2)$$

که در آن λ پهنای باند انتقال، c، سرعت نور، B پهنای باند، τ_p پهنای پالس، t زمان سریع و t_m زمان آهسته است.

لرزش سکو تأثیر خود را بر روی فاصله‌ی رادار تا هدف می‌گذارد. با در نظر گرفتن این تأثیر و قرار دادن $R(t_m)$ به صورت (۱)، معادله (۲) را بازنویسی می‌کنیم.

سیگنال می شود و یک سیگنال مدولاسیون فرکانسی تولید می شود. از این جهت جبران سازی حرکت چرخشی هدف در ISAR مشابه لرزش سکو در SAR است. برای حل این مشکل یک الگوریتم بر مبنای روش BEMD در رادار ISAR پیشنهاد شده است که در آن با تجزیه سیگنال به چندین IMF، قسمت های چرخشی هدف از قسمت های با سرعت ثابت آن به وسیله ویژی گذر از صفرشان جدا می شود. قسمت چرخشی با سرعت ω_i در حال چرخش است که با $U \sin(\omega_i t_i)$ مدل می شود. با نوشتن روابط در رادار ISAR و در نظر گرفتن حرکت چرخشی قسمتی از پراکنده ساز، به فرمول زیر می رسیم.

$$s_{ISAR}(\hat{f}, t_i) = A \exp(-j2\pi f t_i - jU_i \sin(\omega_i t_i)) \quad (9)$$

اگر تبدیل فوریه در حوزه زمان آهسته از آن گرفته شود و سپس معادله با کمک تابع بسل بازنویسی شود، به وسیله BEMD و تحلیل نقاط گذر از صفر IMFها، اهداف متحرک با فرکانس داپلر ثابت و اهداف متحرک با حرکت چرخشی از هم جدا شده اند [23].

۴- روش پیشنهادی و شبیه سازی

۴-۱- روش پیشنهادی تخمین لرزش سکو با استفاده از الگوریتم BEMD

در فصل قبل تاثیر لرزش سکو بر فاز مشاهده شد و با ضرب آن در سیگنال مرجع به یک سیگنال مدولاسیون فرکانسی سینوسی (معادله ۵) رسیدیم. حال می خواهیم با پردازش آن مقدار خطای سکو را تخمین بزنیم. با قرار دادن $X = \frac{4\pi H a_p}{\lambda R_0}$ در معادله ۵ آن را به صورت زیر بازنویسی می کنیم.

$$s_{p1}(\tau, t_m) = A \exp(-jX \sin(\omega_p t_m)) \quad (10)$$

اگر این سیگنال مدولاسیون فرکانسی سینوسی را با استفاده از توابع بسل بازنویسی کرده و سپس تبدیل فوریه در حوزه زمان آهسته از آن بگیریم، داریم.

$$s_{p2}(\tau, f_m) = AF \{ J_1(X) \exp(-j(l\omega_p) t_m) \} \quad l \in Z \quad (11)$$

$$= A \{ J_0(X) \text{sinc}(T_m(f_m)) + J_1(X) \text{sinc}(T_m(f_m - \omega_p)) - J_1(X) \text{sinc}(T_m(f_m + \omega_p)) + \dots \}$$

با توجه به معادله ۱۱ بعد از گرفتن تبدیل فوریه سینک هایی داریم که هر کدام با شیف به فاصله ω_p از هم قرار گرفته اند. برای سهولت در محاسبه ω_p می توانیم با گرفتن اتوکورلیشن از سیگنال فوق ضربه هایی را در شکل ۲ مشاهده کنیم که فاصله آن ها از هم به اندازه $\frac{1}{\omega_p}$ است.

مینیمم های محلی تعریف می شود در تمام نقاط باید صفر گردد. سیگنال بعد از تجزیه حالت تجربی بر حسب IMF های مختلفش به صورت زیر نوشته می شود.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + rn. \quad (6)$$

IMF های اول فرکانس های بالایی دارند و هر چه پیش می رویم فرکانس IMF ها کاهش پیدا می کند. روش حالت تجربی سیگنال را به سیگنال های با نوسان زیاد تا نوسان کم تجزیه می کند.

۳-۲- روش تجزیه حالت تجربی دوتایی (BEMD)

روش تجزیه EMD برای داده های با مقادیر حقیقی کاربرد دارد اما در زمینه های زیادی از جمله رادار با مقادیر کامل روبرو هستیم بنابراین برای داده های دوعده ای (مقادیر کامل)، EMD توسعه پیدا کرد؛ و چندین مورد برای توسعه یافته ای آن از جمله BEMD پیشنهاد شده است.

همان طور که EMD اجزا نوسان کننده با میانگین صفر را استخراج می کند، روش BEMD طراحی شده است تا اجزا چرخشی با میانگین صفر را استخراج کند. چرخش را توسعه ای دو جهتی از یک نوسان در نظر می گیریم؛ بنابراین ایده ای اصلی در EMD تجزیه سیگنال به سیگنال با نوسان سریع است که بر نوسان آهسته سوار شده است و در مورد BEMD سیگنال را به سیگنال های با چرخش سریع تجزیه می کنیم که بر سیگنال های با چرخش آهسته سوار شده است.

الگوریتم BEMD:

۱- تصویر کردن سیگنال با داده ای کامل بر روی جهت ϕ_K

۲- استخراج محل نقاط اکسترمم $p_{\phi_K}(t)$ به نام $\{t_i^k\}$

۳- درون یابی نقاط $\{(t_i^k, x(t_i^k))\}$ برای به دست آوردن منحنی

پوش در جهت ϕ_K به نام e_{ϕ_K}

۴- محاسبه میانگین تمام پوش ها:

$$m(t) = \frac{1}{N} \sum_k e_{\phi_K} \quad (7)$$

۵- کسر کردن میانگین از سیگنال

$$S^B[x](t) = x(t) - m(t) \quad (8)$$

۳-۳- تصویرسازی از لرزش اهداف با حرکت های چرخشی در رادار ISAR

تصویربرداری در رادار ISAR با در نظر گرفتن هدف متحرک که قسمت کوچکی از آن حرکت چرخش نیز دارد با مشکل مواجه می شود. این حرکت چرخشی باعث ایجاد یک جزء سینوسی در فاز

تعریف شده است.

(۱) فشرده سازی برد و RCMC

(۲) بازسازی سیگنال مرجع به صورت زیر و ضرب آن در سیگنال

هر رنج بین

$$s_{ref} = A \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \pi f_{dr} t_m^2 \right] \right\} \quad (14)$$

(۳) انتخاب یک رنج بین با پراکنده ساز قوی تر و استفاده از روش

BEMD.

(۴) تحلیل IMF های آن و به دست آوردن سیگنال خطای ناشی

از لرزش سکو.

(۵) بازسازی سیگنال با استفاده از تخمین خطای بدست آمده

$$ref_v = A \exp \left\{ -j \frac{4\pi H \Delta R_v(t_m)}{\lambda R_0} \right\} \quad (15)$$

و ضرب سیگنال در هر رنج بین تا لرزش سکو جبران شود.

(۶) فشرده سازی در جهت سمت و به دست آوردن تصویر نهایی.

۴-۲- شبیه سازی

تصویرسازی در رادار SAR با فرکانس تکرار پالس ^{۱۴} 300 Hz،

سرعت سکوی ^{۱۳} 150 m/s، فرکانس حامل ^{۱۴} 4.5 GHz، طول آنتن ^{۱۵}

2 m و پهنای پالس ^{۱۶} 100 MHz انجام شده است.

ابتدا لرزش را به صورت جمع دو سینوسی مدل می کنیم.

$$\Delta R = 0.1 \sin 2\pi t + 0.08 \sin 1.2\pi t \quad (16)$$

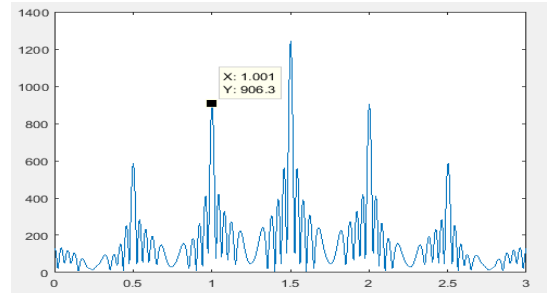
الگوریتم بیان شده با استفاده از روش تجزیه ی BEMD را بر آن

اعمال می کنیم. بعد از تجزیه ی حالت تجربی دوتایی، ده سیگنال IMF

به دست می آید و بعد از اتوکورولیشن این IMF ها با خودشان نتایج

به صورت شکل ۲ به دست می آید. مشاهده می شود که قله های بعضی

از IMF ها در نقاط یکسانی قرار دارند که نشان از تفکیک کردن



شکل ۲: اتوکورولیشن سیگنال

اما در حالت معمول لرزش سکوی ما به صورت جمع دو یا چند

سینوسی با فرکانس های متفاوت به صورت زیر است.

$$\Delta R_v(t) = a_1 \sin(2\pi f_1 t) + b_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad (12)$$

آنگاه معادله ی (۱۰) به صورت زیر درمی آید و این گونه ما با

سیگنال غیر ایستایی مواجهیم که با استفاده از تابع بسل و تبدیل

فوریه دیگر نمی توانیم قله ها را به صورت منظم و بافاصله هایی دقیق

به اندازه ی $\frac{1}{\omega_p}$ ببینیم.

$$s_{p1}(\tau, t_m) = A \exp(-jU_1 \sin(\omega_{p1} t_m) - jU_2 \sin(\omega_{p2} t_m)) \quad (13)$$

برای حل این موضوع ما پیشنهادی را ارائه کردیم و آن استفاده

از BEMD است. ابتدا سیگنال که به صورت معادله ی (12) درآمده

است را به IMF های مختلف تجزیه می کنیم. همان طور که پیش از این

بیان شد روش BEMD اجزاء چرخشی با میانگین صفر را استخراج

می کند؛ در BEMD اجزائی که چرخش آهسته دارند از اجزائی که

چرخش سریع دارند جدا می شوند. بنابراین BEMD مجموعه ای از

IMF های با مقادیر مختلط است که بردار چرخش آن ها از سریع تا

آهسته تغییر می کند

پیشنهاد جدید ما برای الگوریتم تصویرسازی SAR به صورت زیر

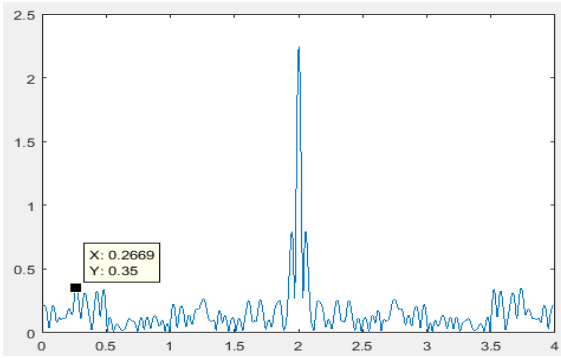
¹⁴ Carrier Frequency

¹⁵ Antenna Actual Length

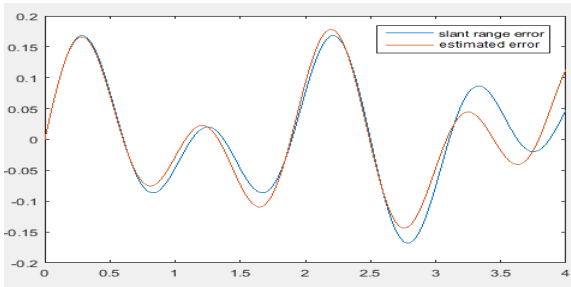
¹⁶ Baseband BW

¹² Pulse Repetition Frequency

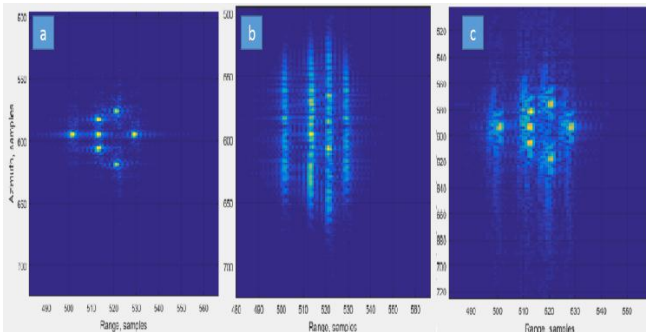
¹³ Platform Velocity



شکل ۴: جمع IMF چهارم، پنجم و ششم



شکل ۵: لرزش سکو (آبی) و مقدار تخمین زده شده آن (نارنجی)



شکل ۶: (a) تصویر اصلی (b) تصویر خراب شده با لرزش سکوی به اندازه ی معادله ی (۱۵) (c) تصویر بازسازی شده به وسیله ی الگوریتم تخمین BEMD

۳-۴- مقایسه ی روش مبتنی بر BEMD با سایر روش ها

مهم ترین مزیتی که برای این روش می دانیم، کاهش محاسبات است. با توجه به اینکه لرزش به صورت بالا پایین شدن آهسته ی سکو رخ می دهد تخمین آن با مجموعه ی سینوس ها نیاز کمتری به تقسیم هر سلول برد به زیر بخش های زیادی دارد. در کارهایی که با مدل درجه دوم کار می شود برای بدست آوردن میزان لرزش سکو با دقت بالا نیاز به تقسیم هر سلول برد به زیر بخش های زیادی داریم. در ادامه چند مدل درجه دوم و تقسیم بندی های آن ها بررسی می شود.

در روش مینیمم کردن آنتروپی با تقریب چیشو برای تخمین تصویری با خطای فاز به شکل ۷ هر سلول برد را به ۸۳ زیربخش تقسیم کرده است و پارامتر لرزش سکو برای هر زیر بخش به صورت جدا تعیین شده است. همانطور که مشاهده می شود لرزش سکو در

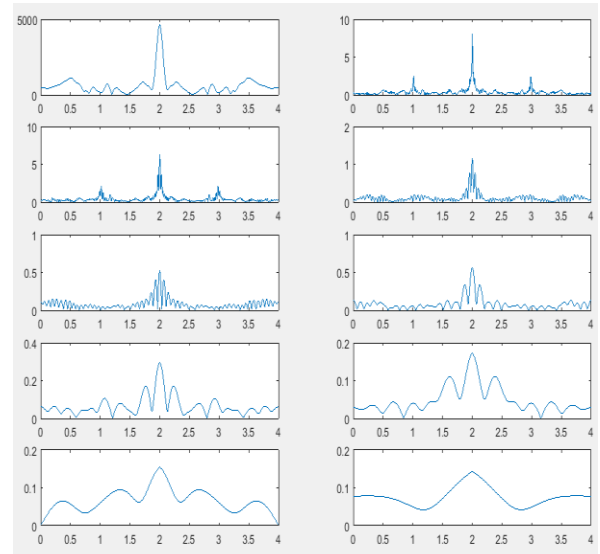
فرکانس ها توسط BEMD است. به عنوان مثال قله ها در اتوکورلیشن IMF های دوم، سوم در نقاط تقریباً یکسانی قرار دارند بنابراین با جمع این سه سیگنال به شکل می رسیم. فاصله ی دو قله را از هم محاسبه کرده و با معکوس کردن آن به یکی از مقادیر f_p می رسیم.

$$2 - 1.018 = 0.982, f_{p1} = \frac{1}{0.982} = 1.018 \quad (17)$$

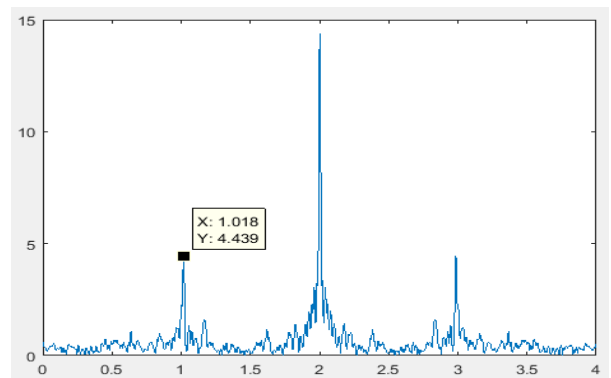
با کمی دقت مشاهده می شود که قله ها در اتوکورلیشن IMF های چهار پنجم و شش نیز در نقاط تقریباً یکسانی قرار دارند بنابراین با جمع این سه سیگنال به شکل ۴ دست می یابیم و فرکانس بعدی لرزش سکو به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$2 - 0.2669 = 1.713, f_{p2} = \frac{1}{1.713} = 0.583 \quad (18)$$

مشاهده می شود که دو فرکانس به وسیله ی تجزیه ی BEMD به خوبی از هم تفکیک شده و با تقریب خیلی خوبی محاسبه شده اند. شکل لرزش سکوی (معادله ی ۱۵) و تخمین آن با استفاده از این الگوریتم در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۲: اتوکورلیشن IMF های به دست آمده



شکل ۳: جمع IMF دوم و سوم

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر لرزش سکو بر فاز در رادارهای SAR و اصلاح آن پرداخته شده است. روش های متفاوت بسیاری برای اصلاح خطای فاز به کار رفته است. روش تمرکز خودکار گرادیان فاز و جابجایی صحنه اصلی ترین روش های مطرح شده هستند که روش های تعمیم یافته ی دیگری از آن ها با کاهش حجم محاسبات و کاستی های دیگر معرفی شده است. اخیراً روش های دیگری نیز بر اساس مینیمم آنتروپی، بازسازی تنک، یادگیری، فیلترکالمن و یا ترکیبی از این روش ها در این زمینه به کار رفته است.

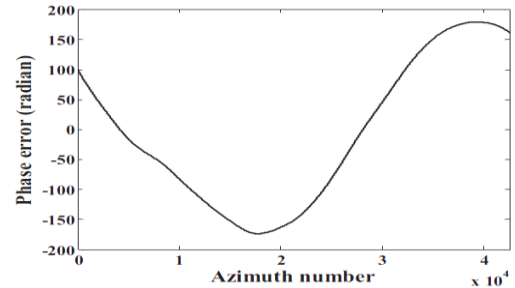
مسئله ای که در اینجا مطرح می شود حجم محاسبات سنگین در مقالاتی که با مدل درجه دوم کار می کنند زیرا سکو باید به زیر بخش های کوچک تقسیم شده و فرآیند تخمین و محاسبات برای هر کدام از زیر بخش ها به صورت جدا انجام می گیرد. در نتیجه حجم محاسبات در حرکات ریتیمیک و پیچیده بسیار بالا خواهد رفت.

محاسبات یکی از مسائل مهم مطرح شده در روش های اصلاح خطای فاز است. بسیاری از روش های تعمیم یافته ی PGA و جابجایی صحنه در جهت کاهش محاسبات این روش ها مطرح شده اند. به عنوان نمونه روش KFPGA که روش اصلاح شده ی PGA است که در سال اخیر بیان شده است و مزیت خود را کاهش تکرارها و سایز پنجره ها در جهت کاهش محاسبات مطرح می کند. اما همچنان به دلیل استفاده از مدل درجه دوم سلول برد را به زیربخش های زیادی تقسیم می کند.

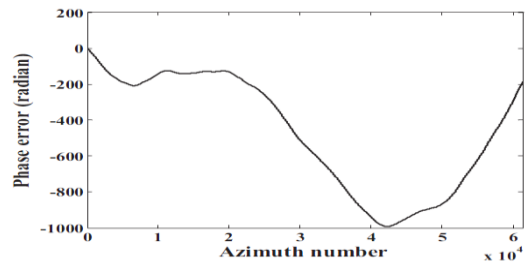
در رادارهای تراهرترز به دلیل تأثیر مستقیم فرکانس کاری رادار در میزان خطای فاز ایجاد شده، لرزش های کوچک و ریتیمیک نیز بسیار مهم می شود. در روش تجزیه ی چیرپ هوشمند این لرزش ها با تابع سینوسی مدل شده است. اما روش پیشنهادی در اینجا دو مزیت مهم نسبت به روش تجزیه ی چیرپ هوشمند دارد. در روش تجزیه ی چیرپ هوشمند مدل لرزش سکو را فقط با یک سینوس تقریب می زند در صورتی که روش BEMD در شرایطی که لرزش سکو ناشی از جمع سه سینوس است توانسته هر سه فرکانس را با تقریب خوبی تخمین بزند. در روش تجزیه ی چیرپ هوشمند سلول بردی برای پردازش انتخاب می شود که فقط شامل یک پراکنده ساز باشد، اما در روش پیشنهادی، اطلاعات دریافتی به تعداد پراکنده سازها در سلول برد بستگی ندارد در نتیجه محدودیتی در انتخاب سلول برد نداریم [15].

در مجموع در این پژوهش سعی شده است با معرفی روش جدیدی که تاکنون برای جبران سازی لرزش سکو استفاده نشده است باب جدیدی در این زمینه فراهم شود. چراکه این روش با استفاده از مدل سینوسی سعی داشته با کاهش زیر بخش ها باعث کاهش بار محاسبات شود. از طرفی مشکلاتی که برای روش های با مدل سینوسی

شکل ۵ که با روش BEMD تخمین زده شده است، شکل پیچیده تری از شکل ۵ دارد ولی تخمین فقط در یک بخش انجام شده است. یا برای تخمین خطای فاز دیگری به شکل ۸ در روش مینیمم آنتروپی هر سلول برد به 120 زیربخش تقسیم می شود که این بار محاسباتی زیادی دارد.

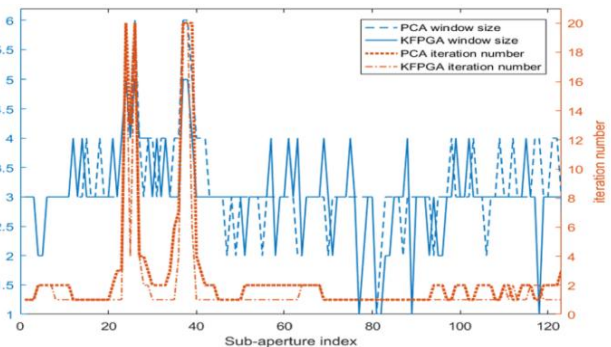


شکل ۷: لرزش سکوی بدست آمده بعد از اصلاح خطای فاز [14]



شکل ۸: لرزش سکوی بدست آمده بعد از اصلاح خطای فاز [14]

استفاده از فیلترکالمن برای ارتقای روش اتوفوکوس انحنای فاز (PCA)، یکی از جدیدترین روش ها در زمینه ی اصلاح خطای فاز است. مزیتی که این روش برای خود ذکر کرده است افزایش سرعتی است که در نتیجه ی کاهش محاسبات رخ می دهد. این مقایسه با روش PCA انجام می شود. مقایسه ای که در جهت مزیت روش KFPGA نسبت به PCA مطرح شده است، کم شدن سایز پنجره ها و تعداد تکرارها در هر زیر دهانه برای رسیدن به نتیجه مطلوب است. در اینجا هر سلول برد به 123 زیربخش تقسیم شده است. در شکل ۹ محور افقی اندیس هر زیربخش و محور عمودی سمت راست تعداد تکرارها در هر زیردهانه برای رسیدن به تصویر مطلوب است.



شکل ۹: مقایسه ی تعداد تکرارها و سایز پنجره استفاده شده در هر زیردهانه در دو روش PCA و KFPGA

- SAR Imaging Based on Adaptive Chirplet Decomposition," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., VOL. 13, NO. 6, JUNE 2016.
- [16] Zhang, Yuan, et al. "High-frequency vibration compensation of helicopter-borne THz-SAR [Correspondence]." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 52.3 (2016): 1460-1466.
- [17] Zeng, Letian, et al. "A novel motion compensation approach for airborne spotlight SAR of high-resolution and high-squint mode." IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 13.3 (2016): 429-433.
- [18] Vandewal, Marijke, Rainer Speck, and Helmut Suss. "Efficient SAR raw data generation including low squint angles and platform instabilities." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5.1 (2008): 26-30.
- [19] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long et al., "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proc. R. Soc. Lond. A, Math. Phys. Sci., vol. 454, no. 1971, pp. 903-995, Mar. 1998.
- [20] T. Tanaka and D. P. Mandic, "Complex empirical mode decomposition," IEEE Signal Process. Lett., vol. 14, no. 2, pp. 101-104, Feb. 2007.
- [21] G. Rilling, P. Flandrin, P. Goncalves et al., "Bivariate empirical mode decomposition," IEEE Signal Process. Lett., vol. 14, no. 12, pp. 936-939, Dec. 2007.
- [22] Matthew Schlutz, "Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB" A Thesis presented to the Faculty of the California Polytechnic State University, San Luis Obispo, June 2009.
- [23] Bai, Xueru, et al. "Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition." IEEE transactions on geoscience and remote sensing 46.11 (2008): 3514-3523.

مطرح شده است را نداشته باشد.

برای ادامه‌ی مسیر و بهبود کیفی تصاویر پیشنهادهایی مطرح می‌شود.

۱- اعمال الگوریتم بر تعداد بیشتری از سیگنال‌های سمت برای بررسی دقیق‌تر فرکانس لرزش و کاهش خطا.

۲- تبدیل هر سیگنال سمت به زیر بخش‌های مختلف، با این کار دقت بالا می‌رود، چراکه زیر بخش‌های کوچک را شاید بتوان با یک یا دو هارمونیک نمایش داد.

۳- برای ارزیابی فرکانس‌های تعیین شده در این روش از مینیمم آنتروپی تصویر استفاده کنیم.

مراجع

- [1] Soumekh, Mehrdad. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms. New York, NY: Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [2] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, Jr., "Phase gradient autofocus – A robust tool for high resolution phase correction", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 30, no. 3, pp. 827-835, 1994.
- [3] J. Qing, H. Xu, X. Liang, and Y. Li, "An improved phase gradient autofocus algorithm used in real-time processing," J. Radars, vol. 4, no. 5, pp. 600-607, 2015.
- [4] P. Samczynski and K. Kulpa, "Concept of the coherent autofocus map drift technique," in Proc. Int. Radar Symp. (IRS), May 2006, pp. 1-4.
- [5] Bezvesilniy, Oleksandr O., Ievgen M. Gorovyi, and Dmytro M. Vavriv. "Estimation of phase errors in SAR data by local-quadratic map-drift autofocus." *2012 13th International Radar Symposium. IEEE*, 2012.
- [6] D. E. Wahl, C. V. Jakowatz, Jr., P. A. Thompson, and D. C. Ghiglia, "New approach to strip-map SAR autofocus," in Proc. 6th IEEE Digit. Signal Process. Workshop, Yosemite National Park, CA, USA, Oct. 1994, pp. 53-56.
- [7] T. Zeng, R. Wang, and F. Li, "SAR image autofocus utilizing minimum entropy criterion," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 10, no. 6, pp. 1552-1556, Nov. 2013.
- [8] T. Xiong, M. Xing, Y. Wang, S. Wang, J. Sheng, and L. Guo, "Minimum entropy-based autofocus algorithm for SAR data using Chebyshev approximation and method of series reversion, and its implementation in a data processor," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 52, no. 3, pp. 1719-1728, Mar. 2014.
- [9] T. J. Kragh, "Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus," in Proc. Adapt. Sensor Process. (ASAP) Workshop, Jun. 2006, pp. 1-38.
- [10] Chen, Yi-Chang, et al. "Motion compensation for airborne SAR via parametric sparse representation." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55.1 (2016): 551-562.
- [11] N. Ö. Onhon and M. C. etin, "A sparsity-driven approach for joint SAR imaging and phase error correction," IEEE Trans. Image Process., vol. 21, no. 4, pp. 2075-2088, Apr. 2012.
- [12] Li, Yake, and Siu O'Young. "Kalman Filter Disciplined Phase Gradient Autofocus for Stripmap SAR." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (2020).
- [13] Yang, Lei, et al. "Cooperative Multitask Learning for Sparsity-Driven SAR Imagery and Nonsystematic Error Autocalibration." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (2020).
- [14] Zhang, Chi, et al. "Joint Structured Sparsity and Least Entropy Constrained Sparse Aperture Radar Imaging and Autofocusing." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (2020).
- [15] Yong Wang, Zhaofa Wang, Bin Zhao, and Liang Xu, "Compensation for High-Frequency Vibration of Platform in