

A Novel SIAR Transmitting Waveform to Reduce Coupling Based on Positive and Negative Random Carrier Frequency Coding

Gh. Asadi¹, R.Fatmimofrad²

²Associate Professor, Malek e Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received:2022 /09/17, Revised: 2022/12/20, Accepted: 2023/01/08, Published: 2023/01/21)

DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.4.5>

Abstract

The Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR) considered as a Multi Input and Multi Output (MIMO) radar with different orthogonal carrier frequencies. SIAR is a four-dimensional (4-D) radar and has abilities such as safety against anti-radiation missiles (ARM), stealth targets detection, low probability of interception (LPI), multi targets detection and tracking and etc. In these radars, the phase of the received signals in the receiver is a non-linear function of range and angles, thus there is a coupling between the range and the angles. One of the most important challenges in these radars is coupling between range and angle. Due to this coupling, the range error causes the angle error and vice versa. To reduce coupling, radar designers usually design transmitting waveform based on carrier frequency coding. Previously, some methods such as designing waveforms based on sequential carrier frequency coding, positive and negative sequential carrier frequency coding and random carrier frequency coding were presented. In this article a new method under title of positive and negative random frequency coding is proposed. The geometrical and mathematical equations of coupling for a linear array are presented. Based on simulation results, it's shown that proposed method reduces coupling and side lobe level by at least 3dB more than previous methods. It's shown that the performance of the proposed method after integration in the receiver will be significantly better than previous methods. For example, after 10 pulses integration, the coupling decreases by more than 5 dB compared to the positive and negative sequential method. These improvements in the proposed method are achieved without imposing excessive and complex calculations. In addition, the frequency codes have a random distribution between transmitters, so the benefits of frequency agility are also obtained. Also, these improvements are achieved without imposing new and complex calculations.

Keywords: : MIMO, SIAR, Coupling of Angle and Distance, Transmitting waveform, Carrier frequency coding, DBF

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: fatemi@mut.ac.ir

ارایه یک شکل موج جدید جهت کاهش تزویج در رادارهای پالس و دهانه مصنوعی مبتنی بر کدینگ فرکانسی تصادفی مثبت و منفی

قاسم اسدی^۱، رضا فاطمی مفرد^۲ 

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸، انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.4.5>

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

رادارهای پالس و دهانه‌ی مصنوعی (SIAR) از دسته رادارهای چند ورودی و چند خروجی می‌باشند. در این رادارها از فرکانس‌های حامل متفاوت و متعامد استفاده می‌شود. SIAR یک رادار چهاربعدی (4-D) محسوب می‌شود. آن‌ها دارای ویژگی‌هایی مانند قابلیت کشف و آشکارسازی اهداف RCS کم، احتمال کشف کم، مقاوم در مقابل موشک‌های ضد انتشار و کشف و ردگیری هم‌زمان چندین هدف می‌باشند. در SIAR فاز سیگنال‌های دریافتی رابطه‌ی غیرخطی با برد و زوایای هدف دارد لذا یک تزویج بین برد و زوایای هدف وجود دارد. به‌گونه‌ای که بروز خطا در استخراج برد موجب بروز خطا در استخراج زاویه و برعکس می‌شود. برای مقابله با این چالش از روش طراحی شکل موج مناسب مبتنی بر کدهای فرکانسی در ارسال استفاده می‌شود. تاکنون روش‌هایی مانند طراحی شکل موج‌های مبتنی بر کدهای فرکانسی ترتیبی، ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی ارایه شده است. در این مقاله یک روش جدید به همراه روابط ریاضی برای یک آرایه‌ی خطی تحت عنوان کدهای فرکانسی تصادفی مثبت و منفی پیشنهاد می‌شود. با شبیه‌سازی نشان می‌دهیم که نتایج در مقایسه با روش‌های قبلی در کاهش تزویج حداقل به میزان 3dB بهبود پیدا کرده است. همچنین نشان خواهیم داد عملکرد روش پیشنهادی پس از انجام انتگرال‌گیری و جمع پالس‌ها در گیرنده در مقایسه با روش‌های قبلی به شکل محسوسی بهتر می‌باشد. به‌عنوان مثال میزان تزویج پس از ۱۰ دوره انتگرال‌گیری بیش از 5dB در مقایسه با روش ترتیبی مثبت و منفی کاهش می‌یابد. در ضمن در این روش جدید به دلیل تغییر تصادفی کدهای فرکانسی از مزایای چابکی کدهای فرکانسی نیز بهره می‌بریم. همچنین این بهبودها در روش جدید بدون تحمیل محاسبات جدید و پیچیده حاصل می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: MIMO، رادارهای SIAR، تزویج میان زاویه و برد، شکل موج ارسالی، کدینگ فرکانس حامل، DBF

۱- مقدمه

تشکیل نمی‌شود؛ بنابراین، شکل‌دهی پرتو ارسال و دریافت و تشکیل پالس باریک^۴ همگی در گیرنده و از طریق پردازش سیگنال انجام می‌شود [۵،۶]. رادار SIAR با استفاده از آنتن‌های مختلف، با فرکانس‌های حامل متفاوت به‌مانند آن است که حاوی چندین رادار درون خود می‌باشد و در هنگام استفاده از شکل موج چابکی فرکانسی پالس به پالس، توانایی جابه‌جایی مجازی در بین این زیر رادارها ایجاد می‌گردد. این رادارها دارای ویژگی‌هایی از قبیل احتمال کشف کم^۵ (L₀₀₀)، ضد تداخل^۶،

رادار پالس و دهانه‌ی مصنوعی (SIAR^۲) یک رادار چند ورودی و چند خروجی (MIMO^۳) با فرکانس‌های حامل متفاوت و متعامد می‌باشد [۱،۲]. این رادار برای اولین بار در شرکت ONERA فرانسه ساخته شد و سپس توسط دانشگاه Xidian چین توسعه یافت [۳،۴]. در این نوع رادارها الگوی ارسال در فضا

* رایانامه نویسنده مسئول: fatemi@mut.ac.ir

^۴ Impulse^۵ Low Probability Of Intercept Radar^۶ Electronic Counter Counter Measure (ECCM)^۲ Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR)^۳ Multi Input Multi Output

این روش تا حدودی موجب کاهش تزویج بین زاویه و برد می‌شود ولیکن قله‌های زیادی خواهیم داشت که در تمام محدوده برد و زاویه وجود دارند. یکی دیگر از روش‌های مطرح و رایج شده قبلی استفاده از کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی^۵ می‌باشد. این روش قدیمی قبلاً توسط آقای ژانگ [۱۹] و همکاران ایشان معرفی گردیده است. در این روش کدهای ترتیبی در یک دوره ارسال می‌شود این عمل موجب می‌شود گلبرگ‌های فرعی اصلی در گیرنده و پس از پردازش روی یک خط قرار بگیرند لذا ابهام در مکان هدف داریم. با ارسال کدهای ترتیبی قرینه‌ای آن در دوره بعدی گلبرگ‌های فرعی اصلی بر روی یک خط دیگر با ضریب زاویه قرینه دوره قبل قرار می‌گیرند، خروجی آن‌ها در گیرنده جمع و پس از پردازش، محل تلاقی آن‌ها که محل هدف می‌باشد تقویت گردیده و نسبت دامن‌های محل هدف به سایر گلبرگ‌های فرعی بزرگ‌تر می‌شود اما این اختلاف به اندازه کافی بزرگ نیست. همچنین یک روش دیگر در سال‌های اخیر در دو مقاله بر مبنای استفاده از کدینگ فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی بارویکرد ضرب معرفی شده است [۲۰، ۲۱]. در این روش از ترکیب کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی بهره گرفته شده است و خروجی آن‌ها بجای تجمیع در یکدیگر ضرب می‌شوند در این روش به دلیل به کارگیری عملگر ضرب حجم محاسبات زیاد و پیچیده و منطبق با ساختار رادار نیست. در مقاله حاضر، یک روش جدید پیشنهاد می‌شود به گونه‌ای که ابتدا در یک دوره ارسال کدهای فرکانسی تصادفی بین فرستنده‌های توزیع می‌شوند و در دوره بعدی قرینه‌ای کدهای فرکانسی دوره قبل ارسال می‌شود و خروجی آن‌ها در گیرنده با یکدیگر تجمیع می‌گردد. بدین ترتیب از مزایای کدهای فرکانسی تصادفی و ترتیبی مثبت و منفی به شکل هم‌زمان استفاده می‌کنیم. شبیه‌سازی و مقایسه‌ی نتایج این روش جدید با روش‌های قبلی بیانگر کاهش تزویج بین زاویه و برد حداقل به میزان ۳dB و همچنین کاهش تعداد گلبرگ‌های فرعی می‌باشد. در این مقاله همچنین عملکرد کدهای فرکانسی مختلف پس از انتگرال‌گیری تعدادی پالس بررسی گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد عملکرد کدهای فرکانسی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های قبلی به‌طور محسوسی پس از انتگرال‌گیری بهبود پیدا می‌کند. به گونه‌ای که پس از ۱۰ دوره تجمیع پالس در خروجی گیرنده حدود ۵dB کاهش تزویج نسبت به روش ترتیبی مثبت و منفی حاصل می‌گردد. به دلیل اینکه در SIAR درجه‌ی ارسال و دریافت در یکدیگر ضرب می‌شوند و از کدهای فرکانسی متفاوت

ایمن در مقابل موشک‌های ضد انتشار^۱ (ARM)، چهاربعدی (زاویه ارتفاع، سمت، برد و داپلر) و با دقت بالا می‌باشند. همچنین رادارهای SIAR روش مؤثری برای آشکارسازی و ردگیری اهداف با سطح مقطع راداری کم و اهداف با ارتفاع پروازی کم می‌باشند. این رادارها، چند نقشی (مراقبت و ردگیری) و دارای قابلیت فشرده‌سازی دربرد و زاویه می‌باشند که موجب بهبود قابل‌توجه در حد تفکیک بُرد و زاویه می‌گردد. البته بیشتر کارهای انجام‌شده در باند متریک هستند [۹-۷]. هریک از آنتن‌های ارسال از فرکانس حامل متفاوت، الگوی تشعشعی همه جهته^۲ و از سیگنال با کدینگ فرکانسی متعام بهره می‌برند لذا تمام فضا می‌تواند به‌طور هم‌زمان توسط پرتوهای متعدد پوشش داده شود؛ بنابراین، می‌توان از روش‌های انتگرال‌گیری همدوس بازمان طولانی بهره برد که موجب بهبود نسبت سیگنال به نویز (SNR) و قابلیت آشکارسازی اهداف با سطح مقطع راداری کم می‌گردد [۱۱، ۱۰]. در این رادارها الگوهای ارسال و دریافت در بخش گیرنده و از طریق پردازش سیگنال ایجاد می‌شوند. لذا رادارهای SIAR نسل جدیدی از رادارها با قابلیت‌های جدید و درحال توسعه می‌باشند [۱۵-۱۲]. در SIAR استخراج برد و زاویه به‌طور هم‌زمان در گیرنده و از طریق یک فیلتر منطبق سه‌بعدی (برد، زاویه سمت و ارتفاع) صورت می‌پذیرد و تابع ابهام که خروجی این فیلتر می‌باشد با چهار بعد (برد، زاویه سمت و ارتفاع و داپلر) تجزیه و تحلیل گردیده و مختصات هدف از آن استخراج می‌گردد [۱۶، ۱۱]. رادارهای SIAR در مقایسه با رادارهای سنتی اختلاف زیادی از نظر ویژگی‌های سیستمی و حالت‌های کاری دارند که موجب به وجود آمدن مسائل جدیدی می‌گردند. یکی از مسائل مهم بزرگی سطح گلبرگ‌های فرعی ناشی از تزویج بین برد و زاویه می‌باشد. با توجه به ساختار رادارهای SIAR فاز سیگنال دریافتی متأثر از برد و زوایای سمت و ارتفاع می‌باشد. به دلیل رابطه غیرخطی موجود یک تزویج بین برد و زاویه وجود دارد. به گونه‌ای که بروز خطا در استخراج یک بعد (زاویه یا برد) موجب بروز خطا در استخراج بعد دیگر (برد و زاویه) و برعکس می‌گردد. برای مقابله با این چالش از روش طراحی شکل موج مناسب در ارسال و تخصیص کدهای فرکانسی مناسب به فرستنده‌ها استفاده می‌شود [۱۷]. با این اقدام می‌توان سطح گلبرگ‌های فرعی^۳، گلبرگ‌های مزاحم^۴ و تزویج بین برد و زاویه را کاهش داد [۱۸]. یکی از این روش‌ها توزیع کدهای فرکانسی (فرکانس‌های حامل) تصادفی بین فرستنده‌ها می‌باشد.

¹ Anti Radiation Missile

² Omni Directional

³ Side Lobe Level

⁴ Grating Lobes

⁵ Positive and Negative Sequential Carrier Frequency Coding

$$\int_{-\infty}^{+\infty} s_k(t - \tau_k) s_i^*(t - \tau_i) dt \quad (3)$$

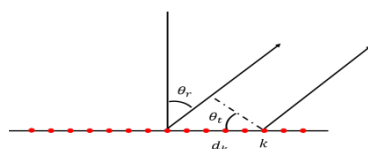
$$= \frac{\sin[\pi(c_k - c_i)\Delta f T_e]}{\pi(c_k - c_i)\Delta f T_e} \exp(j2\pi f_k \tau_k) \exp(-j2\pi f_i \tau_i)$$

با فرض اینکه c_i, c_k اعداد صحیح هستند تا زمانی که $T_e \Delta f$ یک عدد صحیح باشد رابطه‌ی فوق برابر صفر می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال‌های ارسالی از تمام عناصر آرایه نسبت به یکدیگر متعامد می‌باشند. حد تفکیک برد رادار (ΔR) به پهنای باند کل یعنی $B = N\Delta f$ بستگی دارد و از رابطه‌ی $\Delta R = \frac{T_e}{B}$ به دست می‌آید. مطابق شکل (۱) سیگنال‌های دریافتی در گیرنده ناشی از سیگنال‌های ارسالی از تمام عناصر فرستنده و بازگشتی آن‌ها از هدف با رابطه‌ی (۴) بیان می‌شود.

$$S_r(t) = \sum_{k=1}^N S_k(t - \tau_{tk}) = \sum_{k=1}^N g(t - \tau_{tk}) \exp(j2\pi f_k(t - \tau_{tk})) \quad (4)$$

τ_{tk} تأخیر زمانی سیگنال‌های ارسالی از فرستنده k -ام به هدف و از هدف به گیرنده می‌باشند؛ بنابراین، $\tau_{tk} = \tau_t - \Delta\tau_{tk}$ که $\tau_t = \frac{R_t}{c}$ و $R_t = R_1 + R_2$ ، اختلاف تأخیر مسیر موج بین فرستنده‌ی k -ام و فرستنده‌ی مرجع (مرکزی) تا هدف و از هدف تا گیرنده می‌باشد. در میدان دور با توجه به شکل (۲) $\Delta\tau_{tk}$ از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید.

$$\Delta\tau_{tk} = \frac{d_k \sin \theta_t}{c} \quad (5)$$



شکل (۲). امواج در میدان دور

که در آن d_k فاصله‌ی بین فرستنده k -ام تا فرستنده مرجع می‌باشد. فاصله بین دوفرستنده مجاور d_e می‌باشد. با فرض عریض بودن پالس $g(t)$ و چشم‌پوشی از اختلاف تأخیر پوش بین عناصر، سیگنال دریافتی در گیرنده را می‌توان با رابطه (۶) بیان کرد.

$$S_r(t) \cong \sum_{k=1}^N g(t - \tau_t) e^{[j2\pi f_k(t - \tau_{tk})]} \quad (6)$$

$$= g(t - \tau_t) \sum_{k=1}^N e^{[j2\pi f_k(t - \tau_{tk})]}$$

۳- معرفی روش پیشنهادی

سیگنال‌های دریافتی در گیرنده ابتدا جداسازی و سپس هریک در سیگنال مرجع ارسالی $\exp(j2\pi f_k t)$ ضرب می‌شوند. لذا

و متعامد استفاده می‌شود به راحتی می‌توان با یک گیرنده نیز مکان هدف را تشخیص داد. لذا در شبیه‌سازی از یک آرایه‌ی ارسال و یک گیرنده استفاده شده است.

۲- مفاهیم و روابط مسئله

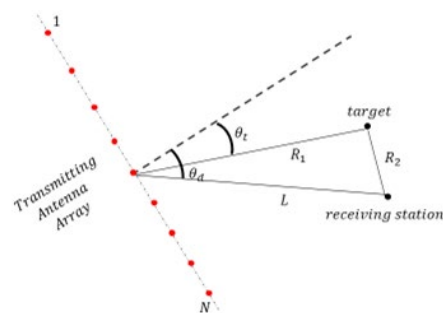
طرح کلی سیستم راداری SIAR در شکل (۱) نمایش داده شده است [۱۹]. در این طرح یک آرایه خطی متشکل از N فرستنده و یک گیرنده وجود دارد. در این طرح θ_t زاویه‌ی بین هدف و بردار نرمال آرایه، R_1 فاصله‌ی بین فرستنده‌ی مرجع و هدف، R_2 فاصله‌ی بین هدف و فرستنده‌ی مرجع همچنین L طول خط واسط بین گیرنده و فرستنده‌ی مرجع و θ_d زاویه‌ی بین این خط واسط و برداری نرمال آرایه می‌باشد. سیگنال‌های ارسالی از فرستنده‌ی k -ام را می‌توان با رابطه‌ی (۱) بیان کرد [۱۹].

$$S_k(t) = g(t) \exp(j2\pi f_k t), \quad k = 1, \dots, N, t \geq 0 \quad (1)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & t \leq T_e \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$f_k = f_0 + c_k \Delta f = f_0 + \Delta f_k$$

Δf عرض پالس ارسال، Δf فرکانس سیگنال ارسالی از فرستنده k -ام، Δf_0 فرکانس حامل مرکزی، Δf بازه فرکانسی، Δf کد فرکانسی سیگنال فرستنده k -ام و $N\Delta f$ پهنای باند کلی می‌باشد.



شکل (۱). نمای کلی SIAR با آرایش خطی

سیگنال رسیده از فرستنده k -ام به یک نقطه‌ی دلخواه T در فضا را می‌توان با رابطه (۲) توصیف کرد:

$$s_k(t - \tau_k) = g(t - \tau_k) \exp(j2\pi f_k(t - \tau_k)), \quad (2)$$

$$k = 1 \sim N$$

τ_k تأخیر زمانی از فرستنده k -ام به نقطه‌ی T می‌باشد. حاصل ضرب همبستگی متقابل سیگنال ارسالی از دو فرستنده دلخواه (i, k) در یک نقطه‌ی فضا به صورت زیر بیان می‌شود:

سیگنال دریافتی از فرستنده k -ام پس از گذشتن از فیلتر پایین

گذر با رابطه (۷) نمایش داده می‌شود.

$$S_{rxk}(t) = S_{rk}(t)e^{[-j2\pi f_k t]} = g(t - \tau_t)e^{[-j2\pi f_k \tau_{tk}]} \quad (7)$$

سیگنال‌های دریافتی از تمام کانال‌های فرستنده پس از بازگشت از هدف را در گیرنده می‌توان با رابطه (۸) نمایش داد:

$$S_{rx}(t, R_t, \theta_t) = a(R_t, \theta_t)S(t) \quad (8)$$

$S(t) = g(t - \tau_t)$ پوش سیگنال بازگشتی از هدف و $a(R_t, \theta_t)$ از رابطه (۹) بدست می‌آید.

(۹)

$$a(R_t, \theta_t) = [e^{(-j2\pi f_1(R_t - d_1 \sin \theta_t)/c)}, \dots, e^{(-j2\pi f_N(R_t - d_N \sin \theta_t)/c)}]^T$$

باید توجه داشت که بردار هدایت تابعی از فاصله و زاویه است بنابراین، بردار وزن‌های جست‌وجوی DBF تابعی دوبعدی از فاصله و زاویه بوده و با رابطه (۱۰) نمایش داده می‌شود:

$$\omega(R, \theta) = [e^{(-j2\pi f_1(R - d_1 \sin \theta)/c)}, \dots, e^{(-j2\pi f_N(R - d_N \sin \theta)/c)}]^T \quad (10)$$

لذا پس از جداسازی سیگنال‌ها و اعمال DBF خروجی پردازش سیگنال با رابطه (۱۱) نمایش داده می‌شود.

$$Z(t, R, \theta) = \omega^H(R, \theta) S_{rx}(t, R_t, \theta_t) e^{[j2\pi f_k((R - R_t) - d_k(\sin \theta - \sin \theta_t))/c]} \quad (11)$$

برد و زوایای سمت و ارتفاع هدف جایی است که مقدار رابطه‌ی (۱۲) حداکثر می‌شود:

$$|Z(t, R, \theta)| = |\omega^H(R, \theta) S_{rx}(t, R_t, \theta_t)| \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &= \left| \sum_{k=1}^N e^{[j2\pi f_k((R - R_t) - d_k(\sin \theta - \sin \theta_t))/c]} \right| \\ &= |e^{[j2\pi f_0(R - R_t)/c]}| \left| \sum_{k=1}^N e^{[j2\pi(\Delta f_k(R - R_t) - f_k d_k(\sin \theta - \sin \theta_t))]} \right| \\ &= \left| \sum_{k=1}^N e^{[j2\pi(\Delta f_k(R - R_t) - f_k d_k(\sin \theta - \sin \theta_t))/c]} \right| \end{aligned}$$

در همسایگی هدف داریم: $R = R_t + \Delta R$, $\theta = \theta_t + \Delta \theta$

همچنین در همسایگی هدف ΔR و $\Delta \theta$ مقادیر بسیار کوچکی هستند؛ بنابراین، رابطه‌ی (۱۲) را می‌توان به شکل رابطه‌ی زیر تقریب زد:

$$|Z(R, \theta)| \approx \left| \sum_{k=1}^N e^{[j2\pi(\Delta f_k \Delta R - f_k d_k \Delta \theta \cos \theta_t)/c]} \right| \quad (13)$$

رابطه (۱۳) با توجه فرض‌های فوق و نتایج حاصل از آن یعنی:

$$\varphi_k = (\Delta f_k \Delta R - f_k d_k \Delta \theta \cos \theta_t)/c = M, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

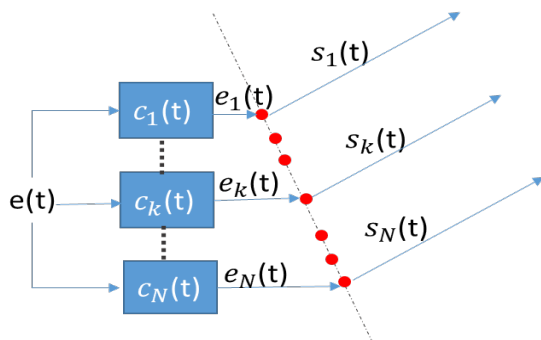
شرط اینکه $|Z(R, \theta)|$ در رابطه (۱۳) به حداکثر برسد M باید یک عدد صحیح باشد. با فرض $M=0$ داریم:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta f_k}{f_k d_k \cos \theta_t} \Delta R \quad (15)$$

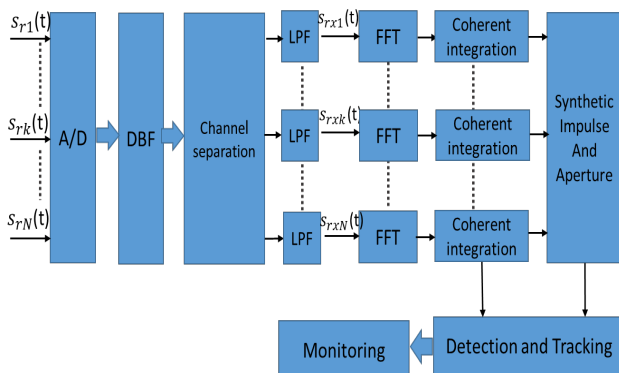
ملاحظه می‌شود هرگونه خطا در استخراج زاویه موجب بروز خطا در استخراج برد و برعکس می‌شود؛ که این همان مفهوم تزویج بین برد و زاویه هدف در SIAR می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) و اینکه $\Delta f_k \ll f_0$ می‌توان نوشت:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta f_k/f_0}{(1 + \Delta f_k/f_0)d_k \cos \theta_t} \Delta R \approx \frac{\Delta f_k}{f_0 d_k \cos \theta_t} \Delta R = \gamma \Delta R \quad (16)$$

به $\gamma = \frac{\Delta f_k}{f_0 d_k \cos \theta_t}$ ضریب تزویج بین برد و زاویه می‌گویند. مطابق رابطه (۱۶) رابطه بین $\Delta \theta$ و ΔR یک رابطه خطی می‌باشد. همچنین با افزایش θ_t ، γ نیز افزایش ولی با افزایش فاصله بین فرستنده‌ها γ کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۱۶) و اینکه $\Delta f_k = c_k \Delta f$ می‌باشد در صورتیکه در دو دوره متوالی i و $i+1$ از کدینگ فرکانسی قرینه استفاده نماییم آنگاه $c_{k,i+1} = -c_{k,i}$ می‌شود. بلوک دیاگرام بخش‌های گیرنده، کدینگ فرکانس، فرستنده و پردازشگر رادار در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است.



شکل (۳). بلوک دیاگرام بخش فرستنده و کدینگ فرکانس



شکل (۴). بلوک دیاگرام بخش گیرنده و پردازشگر

۳-۱- روش‌های قبلی

قرینه‌ی کدهای تصادفی دوره قبلی ارسال می‌شود. در روش پیشنهادی ابتدا دامنه‌ها در دو دوره متوالی جمع و سپس عملگر قدر مطلق عمل می‌کند اعمال عملگر قدر مطلق پس از جمع در مقایسه با رابطه (۱۷) موجب کاهش بیشتر گلبه‌های فرعی می‌گردد. در این روش N کد تصادفی صحیح $c_{k,i} \in [-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]$ و $c_{k,i} \in [-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]$ و فرکانس مرتبط تولید و در دوره‌ی Δ ام ارسال می‌گردد. در دوره‌ی $i+1$ ام کد فرکانسی $c_{k,i+1} = -c_{k,i}$ بین فرستنده‌ها توزیع و ارسال می‌گردد. در روش پیشنهادی حداکثر خروجی رابطه‌ی (۱۹) محل هدف را نشان می‌دهد.

$$(R_t, \theta_t) = \text{Argmax}_{R, \theta} \{|z(t_i, R, \theta) + z(t_{i+1}, R, \theta)|\} \quad (19)$$

در این روش در هر دوره ارسال N کد تصادفی ایجاد و سیگنال مرتبط با آن تولید و ارسال می‌گردد بنابراین با توجه به روابط ۱۵ و ۱۶ در خروجی DBF به ازای هر کد فرکانسی تصادفی c_k یک خط با ضریب زاویه تصادفی $\gamma_k = \frac{c_k \Delta f}{f_0 k d_e \cos \theta_t}$ داریم که محل استقرار گلبه‌های فرعی اصلی می‌باشند و محل تلاقی آن‌ها مکان هدف هست این اقدام موجب می‌گردد گلبه‌های فرعی که در کدهای فرکانسی ترتیبی همگی در یک راستا قرار می‌گرفتند و یکدیگر را تقویت می‌کردند درکل محدوده برد و زاویه پراکنده گردند بنابراین دامنه گلبه‌های فرعی در خروجی کاهش و گلبه‌های اصلی تقویت می‌گردد. جهت افزایش نسبت دامنه گلبه‌های اصلی به گلبه‌های فرعی و کاهش تزویج باید در دوره بعدی از کدهای فرکانسی استفاده کرد که علاوه بر اینکه ویژگی کدهای فرکانسی دوره قبلی رادار کمترین همپوشانی با گلبه‌های فرعی دوره قبلی را داشته باشد یعنی مکان هندسی آن‌ها با گلبه‌های فرعی دوره قبلی نیز متفاوت باشند و تنها در محل هدف مشترک باشند. لذا چنانچه این کدها قرینه کدهای دوره قبلی باشد مشابه آنچه در کدهای ترتیبی مثبت و منفی اتفاق می‌افتد مکان هندسی کدهای فرکانسی قرینه دویه متعامد گردیده و پس از ادغام خروجی دو دوره متوالی مطابق رابطه ۱۹ علاوه بر بهبود نسبت گلبه‌های اصلی به فرعی موجب بهبود شکل گلبه‌های اصلی و افزایش عمق قعر^۱ و درنهایت کاهش تزویج می‌گردد. بنابراین در دوره بعدی قرینه کدهای تصادفی دوره قبلی ارسال می‌گردد. از آنجاکه این روش سازگار با ساختار رادارهای SIAR یعنی تجمیع پالس‌ها در گیرنده می‌باشد؛ بنابراین، محاسبات پیچیده و اضافه به سیستم تحمیل نمی‌کند همچنین با تجمیع تعداد بیشتری پالس عملکرد این روش بهبود بیشتری خواهد داشت؛ یعنی اگر تعداد کل پالس‌ها در انتگرال‌گیری زمان طولانی SIAR، برابر با $2i$ باشد آن را به i دوره دوتایی متوالی

در روش کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی در دوره i کدهای فرکانسی ترتیبی ارسال و با توجه به اینکه در کدهای فرکانسی ترتیبی $d_k = c_k d_e$ می‌باشد به ازای هر کد فرکانسی c_k یک خط با ضریب زاویه یکسان $\gamma = \frac{\Delta f}{f_0 d_e \cos \theta_t}$ داریم لذا مکان هندسی استقرار هدف و گلبه‌های فرعی تمام کدهای فرکانسی روی یک خط با ضریب زاویه γ قرار می‌گیرد و ابهام در مکان هدف به وجود می‌آید. هنگامی که در دوره $i+1$ از کد فرکانسی ترتیبی قرینه استفاده می‌کنیم مکان هندسی استقرار هدف روی یک خط با ضریب زاویه قرینه‌ی دوره قبلی $(-\gamma)$ می‌باشد که محل تلاقی آن‌ها مکان هدف می‌باشد لذا محل تلاقی طبق رابطه‌ی زیر تقویت و مکان هدف به دست می‌آید. این روش قبلاً توسط آقای ژانگ [۱۹] و همکاران ایشان معرفی شده است. در این روش مختصات هدف از رابطه (۱۷) حاصل می‌گردد.

$$(R_t, \theta_t) = \text{Argmax}_{R, \theta} \{|z(t_i, R, \theta)| + |z(t_{i+1}, R, \theta)|\} \quad (17)$$

مزیت روش مذکور استقرار گلبه‌های فرعی اصلی روی دو خط متقاطع و اشکال آن بزرگ بودن این گلبه‌ها و ضریب تزویج می‌باشد.

یک روش دیگر اخیراً با استفاده از ترکیب کدینگ فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی بارویکرد ضرب معرفی گردیده است [۲۰، ۲۱]. در این روش ابتدا در دو دوره متوالی i و $i+1$ کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی و در دوره $i+2$ کد فرکانسی تصادفی بین فرستنده‌ها توزیع و ارسال می‌گردد سپس خروجی آن‌ها در گیرنده بجای جمع در یکدیگر ضرب می‌گردد. در این روش مختصات هدف از رابطه ۱۸ بدست می‌آید.

$$(R_t, \theta_t) = \text{Argmax}_{R, \theta} \{|z(t_i, R, \theta)| * |z(t_{i+1}, R, \theta)| * |z(t_{i+2}, R, \theta)|\} \quad (18)$$

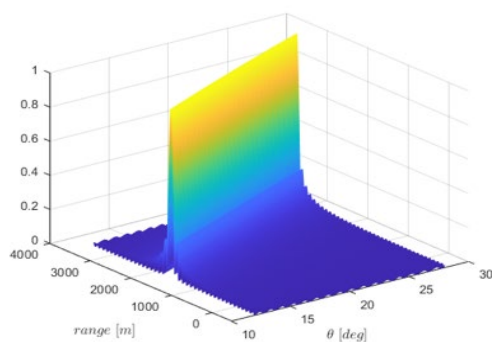
بدیهی است استفاده از عملگر ضرب بجای جمع موجب کاهش بخش‌های غیر منطبق می‌گردد اما این روش مطلوبی نیست زیرا با عملگر ضرب حجم پردازش کامپیوتری بشدت افزایش یافته همچنین ماهیت سیگنال با عملیات ضرب تغییر و ناسازگار با ساختار رادارها به‌ویژه رادارهای SIAR با قابلیت تجمیع تعداد زیاد پالس می‌باشد.

۳-۲- روش پیشنهادی

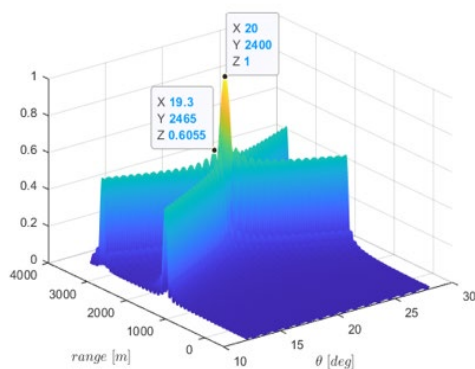
در روش پیشنهادی جدید از مزایای کدهای تصادفی و کدهای ترتیبی مثبت و منفی به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است. در این روش در دوره i ام یک دسته از کدهای تصادفی و در دوره $i+1$ ام

¹ Null Depth

همان گونه که از شکل ۷ و جدول (۱) مشاهده می شود عملکرد کد تصادفی در کاهش دامنه ی گلبرگ فرعی به اصلی ($\eta=0.37$) هست؛ که بیانگر $\square\square$ ۴,۳۲ بهبود است اما اشکال آن نسبت به کدهای ترتیبی و ترتیبی مثبت و منفی در تعداد زیاد گلبرگ های فرعی بزرگ می باشد که در تمام محدوده برد و زوایای تابع ابهام پراکنده شده است. با اعمال کد فرکانسی پیشنهادی تصادفی مثبت و منفی η به ۰,۲۹ کاهش یافته و G نیز به ۵,۳۸ افزایش می یابد این میزان بهبود به همراه کاهش تعداد گلبرگ های فرعی می باشد که در شکل ۸ و جدول (۱) مشهود است؛ بنابراین، بهترین عملکرد مربوط به کد فرکانسی پیشنهادی تصادفی مثبت و منفی می باشد. در این شبیه سازی عملکرد کدهای فرکانسی پس از انجام انتگرال گیری تعداد ۱۰ دوره تکرار بررسی و نتایج در شکل های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. با توجه به ماهیت کدهای ترتیبی و ترتیبی مثبت و منفی انجام فرایند تجمیع پالس های بازگشتی از هدف هیچ گونه تأثیری در کاهش تزویج ندارد و $\eta=0.6$ یعنی بدون تغییر و مانند قبل از انتگرال گیری حفظ شده است (شکل ۱۰)؛ اما مطابق شکل ۹ برای کد تصادفی مثبت و منفی بهترین عملکرد مشاهده می گردد که نسبت گلبرگ فرعی به اصلی از ۰,۲۹ قبل از انتگرال گیری به ۰,۲۱ پس از انتگرال گیری کاهش یافته است که در نهایت برای این تعداد تجمیع پالس شاهد کاهش تزویج تا 6.87dB می باشیم.



شکل (۵). کد فرکانسی ترتیبی مثبت



شکل (۶). کد فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی

تقسیم می کنیم که در هر دوره دوتایی از روش فوق در تولید سیگنالینگ و کدینگ فرکانسی در ارسال بهره می گیریم. مقایسه نتایج شبیه سازی این روش جدید در مقایسه با روش های قبلی بیانگر کاهش تزویج بین زاویه و برد یعنی افزایش نسبت دامنه گلبرگ اصلی به فرعی و نیز کاهش تعداد گلبرگ های فرعی می باشد. در نهایت روش جدید موجب کاهش تزویج به میزان 3dB نسبت به روش کدهای ترتیبی مثبت و منفی گردیده و مشکلات ساختاری روش مبتنی بر ترکیب کدهای ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی بارویکرد ضرب را ندارد.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش شبیه سازی برای یک رادار SIAR دوبعدی با آرایش خطی با مقادیر زیر ارائه و نتایج گزارش شده است:

$$N = 61, f_0 = 200\text{MHz}, d_e = 45\lambda, \Delta f = 50\text{KHz}, R_t = 2400\text{m}, \theta_t = 20^\circ$$

در شبیه سازی های انجام شده عملکرد کدهای فرکانسی متفاوت ترتیبی، ترتیبی مثبت و منفی، تصادفی، کدهای ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی بارویکرد ضرب، روش پیشنهادی تصادفی مثبت و منفی^۱ و روش پیشنهادی بارویکرد ضرب در ایجاد تزویج بین برد و زاویه (R, θ) بررسی و خروجی روابط ۱۹-۱۷مبتنی بر $|z(t, R, \theta)|$ نمایش داده شده است (شکل های ۱۲-۵). در این شبیه سازی برای کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی مقادیر ذیل انتخاب گردیده اند.

$$c_{k,i} = \{-30, -29, \dots, 0, \dots, 30, 29\}$$

$$c_{k,i+1} = \{30, 29, \dots, 0, \dots, -29, -30\}$$

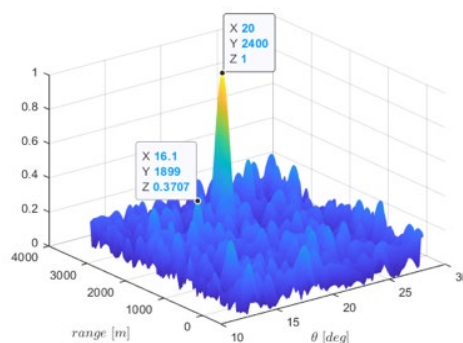
در اینجا η و G به ترتیب به عنوان نسبت بزرگ ترین دامنه گلبرگ فرعی به دامنه گلبرگ اصلی (مقدار تزویج) و میزان بهبود تزویج برحسب $\square\square$ یعنی $G = -10 \log \eta$ معرفی و به عنوان معیاری جهت مقایسه میزان تزویج بین شکل ها استفاده می شوند. تزویج بین θ و R برای کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت، ترتیبی مثبت و منفی، تصادفی مثبت، تصادفی مثبت و منفی در شکل های (۸-۵) نمایش و نتایج مقایسه بر اساس η و G در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱). تزویج بین R و θ

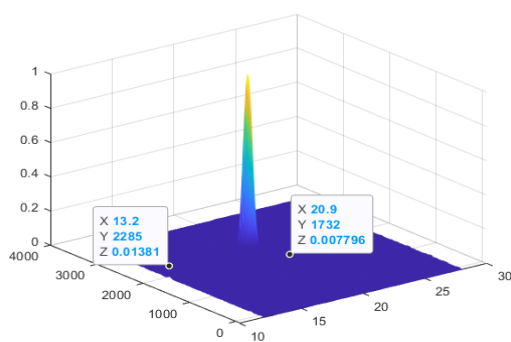
G	η	
۰	۱	کدهای فرکانسی ترتیبی مثبت
۲,۲۱	۰,۶	کد فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی
۴,۳۲	۰,۳۷	کدهای فرکانسی تصادفی مثبت
۵,۳۸	۰,۲۹	کد فرکانسی تصادفی مثبت و منفی

¹ Positive and Negative Random Carrier Frequency Coding

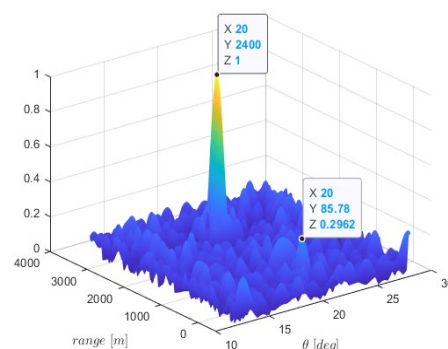
لازم به ذکر می‌باشد چنانچه در روش پیشنهادی نیز از عملگر ضرب بجای جمع مشابه رابطه ۱۹ استفاده گردد گلبه‌های فرعی بشدت کاهش می‌یابد و نتایج بهتر از روش ارایه شده قبلی یعنی ترکیب کدهای ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی با رویکرد ضرب آمده در مراجع ۲۰ و ۲۱ حاصل می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی جهت مقایسه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آمده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود گلبه‌های فرعی بشدت سرکوب و از گلبه اصلی نیز فاصله دارند و نتایج نسبت به روش قبلی (شکل ۱۲) بهتر می‌باشد اما همان‌طور که بیان گردید استفاده از عملگر ضرب منطقی نیست و استفاده از آن پیشنهاد نمی‌گردد.



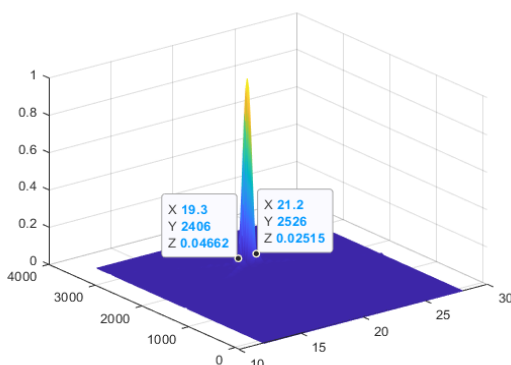
شکل (۷). کد فرکانسی تصادفی مثبت



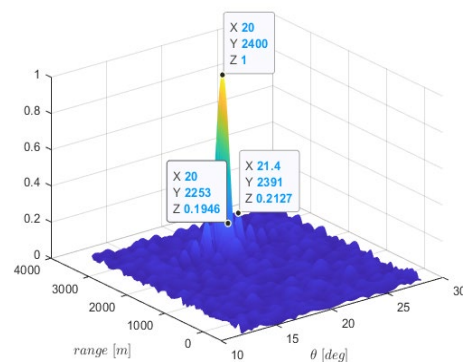
شکل (۱۱). کد فرکانسی روش پیشنهادی با رویکرد ضرب



شکل (۸). کد فرکانسی تصادفی مثبت و منفی



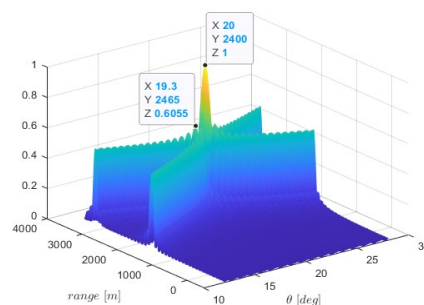
شکل (۱۲). کد فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی و تصادفی با رویکرد ضرب



شکل (۹). کد فرکانسی تصادفی مثبت و منفی پس از ۱۰ دوره انتگرال گیری

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا سیگنالینگ و روابط ریاضی اثبات تزویج در رادار SIAR با آرایش خطی ارایه گردید. همچنین جهت کاهش تزویج بین برد و زاویه یک روش جدید تحت عنوان کد فرکانسی تصادفی مثبت و منفی پیشنهاد گردید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بهره‌گیری از کد فرکانسی پیشنهادی در مقایسه با سایر کدهای فرکانسی از نتایج بهتری در کاهش تزویج برخوردار هست و تزویج نسبت به روش‌های قدیمی یعنی کدهای فرکانسی



شکل (۱۰). کد فرکانسی ترتیبی مثبت و منفی پس از ۱۰ دوره انتگرال گیری

- International Conference on Radar Proceedings (Cat No. 01TH8559). IEEE, 2001. p. 1062-1066
- [11] CHEN, Baixiao. Researches on 4-Dimensional Tracking and Long-time Coherent Integration for Synthetic Impulse and Aperture Radar. Doctoral Dissertation (in Chinese), 1997
- [12] BAO, Zheng; ZHANG, Qingwen. A new style metric wave radar-synthetic impulse and aperture radar. *Modern Radar*, 1995, 17.1: 1-13
- [13] CHEN, Baixiao; ZHANG, Shouhong. Performance analysis of pulse compression using phase-coded signals for sparse-array synthetic impulse and aperture radar. *Journal of Electronics (China)*, 1998, 15: 332-338
- [14] CHEN, Baixiao, et al. The applications and future of synthetic impulse and aperture radar. In: 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). IEEE, 2016. p. 1-5
- [15] WU, Jian-q; XU, Jin. Some issues in the development of metric surveillance radar. In: 2013 International Conference on Radar. IEEE, 2013. p. 6-10
- [16] CHEN, B.; ZHANG, S. 4-Dimensional ambiguity function and resolution of sparse-array synthetic impulse and aperture radar. *Signal Processing*, 1998, 44: 33-37
- [17] CHEN, Baixiao; ZHANG, Shouhong. Study of frequency coding of transmitting signals for sparse-array synthetic impulse and aperture radar. *ACTA Electronica Sinica*, 1997, 25: 64-68
- [18] ZHAO, Yongbo; LIU, Maocang; ZHANG, Shouhong. The grating lobe induced by the coupling of range and direction in siar and its elimination. *Electronics and Information Technology Magazine*, 2001, 23.4: 360-364
- [19] ZHANG, Xue, et al. A SIAR transmitting waveform design approach based on positive and negative sequential carrier frequency coding. In: IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2018. p. 2795-2801
- [20] ALIABAD, Pourya Yaghoubi; SOLEIMANI, Hossein. A New Method for SIAR Transmitting Waveforms to Reduce the Range-Angle Coupling. *IEEE Sensors Letters*, 2021, 5.11: 1-4.
- /r1/ YAGHOUBI ALIABAD, Pourya; SOLEIMANI, Hossein; SOLEIMANI, Mohammad. A new method for Synthetic Impulse and Aperture Radar transmitting waveform design based on non-sequential positive, negative and random carrier frequency coding with dot product approach. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2022, 16.1: 170-181

ترتیبی و ترتیبی مثبت و منفی به ترتیب به میزان 5.38 dB و 3.17dB کاهش یافته است این بهبود نسبت به کد فرکانسی تصادفی نیز مشاهده و حدود ۲۳ درصد به همراه کاهش تعداد گلبرگ‌های فرعی می‌باشد. همچنین از آنجاکه در تمام رادارها به‌ویژه راداری‌های SIAR جهت بهبود SNR از عملیات انتگرال‌گیری و تجمیع پالس‌های بازگشتی از هدف در گیرنده استفاده می‌شود و این موضوع در رادارهای SIAR که در آن‌ها قابلیت بهره‌گیری از انتگرال‌گیری زمان طولانی وجود دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا بررسی عملکرد و تأثیر کدینگ فرکانسی در تابع ابهام و کاهش تزویج پس از انجام انتگرال‌گیری زمان طولانی نیز مهم می‌باشد. بررسی این تأثیر نشان می‌دهد هنگامی که از کدینگ فرکانسی تصادفی مثبت و منفی استفاده می‌شود انجام انتگرال‌گیری تنها برای ۱۰ دوره موجب بهبود قابل توجه در تابع ابهام و کاهش تزویج تا 1.5 dB بیشتر نسبت به قبل از انتگرال‌گیری می‌شود. در حالیکه زمانی که از کدینگ ترتیبی یا ترتیبی مثبت و منفی استفاده می‌شود انتگرال‌گیری موجب کاهش تزویج نمی‌شود.

۶- مراجع

- [1] M. Ahmadi, K. Mohamed-pour, M. Alaei and M. A. Sebt, "Moving Target Detection in Airborne Widely Separated Phased MIMO Radar Using Generalized Subspace Detector," *Journal of Radar*, 6 Vol. 2, No. 1, 2014. (In Persian)
- [2] DUOFANG, Chen; BAIXIAO, Chen; SHOUHONG, Zhang. Multiple-input multiple-output radar and sparse array synthetic impulse and aperture radar. In: 2006 CIE international conference on radar. IEEE, 2006. p. 1-4.
- [3] A.S luse, H. Monina, D. muller et al., Experimental results on RIAS digital beam forming radar, international radar conference on radar, Landan, Uk, (1996), pp. 505-510
- [4] BAIXIAO, Chen, et al. Analysis and experimental results on sparse-array synthetic impulse and aperture radar. In: 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings (Cat No. 01TH8559). IEEE, 2001. p. 76-80
- [5] CHEN, Baixiao; WU, Jianqi. Synthetic impulse and aperture radar (SIAR): a novel multi-frequency MIMO radar. John Wiley & Sons, 2014.
- [6] ZHANG, Q. W.; BAO, Z.; ZHANG, Y. H. A novel method to from transmitting beam based on receiving array. *Mod. Rad.*, 1992, 14.3: 41-51
- [7] JIANQI, Wu, et al. Researches of a new kind of advanced meter wave radar. In: 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings (Cat No. 01TH8559). IEEE, 2001. p. 71-75
- [8] JIANQI, Wu; RUILONG, He; KAI, Jiang. Researches of a new kind of advanced metric wave radar. In: Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium (Cat. No. 99CH36249). IEEE, 1999. p. 194-197
- [9] BAIXIAO, Chen, et al. Experimental system and experimental results for coast-ship Bi/multistatic ground-wave over-the-horizon radar. In: 2006 CIE International Conference on Radar. IEEE, 2006. p. 1-5
- [10] BAIXIAO, Chen; HONGLIANG, Liu; SHOUHONG, Zhang. Long-time coherent integration based on sparse-array synthetic impulse and aperture radar. In: 2001 CIE

